И.А.КУЗНИК,
Е.И.ЛУКОНИН,
В.Я.ПИЛИПЕНКО

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОМЕТРИЯ

И. А. КУЗНИК
Е. И. ЛУКОНИН
В. Я. ПИЛИПЕНКО

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОМЕТРИЯ

Издание второе, переработанное и дополненное

Под редакцией д-ра геогр. наук проф. И. А. Кузника

Допущено управлением кадров Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР в качестве учебника для сельскохозяйственных техникумов по специальности „гидромелиорация"

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД · 1974

УДК 556.08(075.3)

Учебник содержит краткие сведения по метеорологии, теории формирования гидрологического режима рек, гидрологическим расчетам и методам гидрометрических измерений.

Для лучшего усвоения материала отдельные темы сопровождаются значительным числом примеров, наиболее употребительных в практике гидрологических расчетов и гидрометрии. Контрольные вопросы дают возможность учащимся сосредоточить свое внимание на главном, основном содержании курса.

The textbook presents some information on meteorology, the theory of hydrological river regime forming, hydrological estimations, methods of hydrometeorological measurements.

In order to help the students to master the material, some themes contain a considerable number of exercises most frequently used in the practice of hydrological estimations and hydrometry. Control questions make it possible to concentrate attention on the main subject-matter of the course.

К $\frac{20806\text{-}236}{069(02)\text{-}74}$ 6-74

© Гидрометеоиздат, 1974 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является вторым изданием учебника «Гидрология и гидрометрия», выпущенного издательством «Колос» в 1968 г. Первое издание подверглось значительной переработке; дополнено сведениями о методах измерения испарения в условиях орошаемого земледелия; дана простейшая формула его расчета. Полностью переработана тема «Дождевые осадки» в соответствии с проработками Г. А. Алексеева. Определение расчетных гидрологических характеристик изложено в соответствии с СН 435-72. В разделе «Гидрометрия» исключены устаревшие конструкции водомерных устройств и дано описание современных, более совершенных приборов.

Упражнения, выполняемые во время лабораторно-практических занятий, изменены в соответствии с изменениями в изложении теоретических вопросов.

Авторы приносят глубокую благодарность д-ру техн. наук А. И. Чеботареву за ценные указания, сделанные им при рецензировании учебника.

Раздел IV «Гидрометрия» написан доц. Е. И. Лукониным, все лабораторно-практические занятия составлены инж. В. Я. Пилипенко. Остальные разделы написаны проф. И. А. Кузником.

ВВЕДЕНИЕ

Роль воды в жизни человека огромна. Но разумное использование ее возможно только при знании режима водоемов и водотоков и других водных ресурсов земного шара.

Наука, изучающая физические явления, происходящие в водной оболочке земного шара — в гидросфере, называется общей гидрологией. Общая гидрология делится на гидрологию вод суши и гидрологию морей и океанов.

Предметом этого учебника является гидрология суши. Гидрология суши занимается изучением вод на поверхности суши (рек, оврагов, балок, озер и других водоемов и потоков).

Гидрология суши в свою очередь делится на гидрологию рек, озер, болот и ледников. Гидрология — комплексная наука, тесно связанная с метеорологией, климатологией, почвоведением, ботаникой, геологией, гидрогеологией и другими науками.

Для того чтобы получить гидрологическую характеристику тех или иных водных объектов, необходимо систематически измерять глубины, скорости, направления течений, определять химический состав воды и т. д. Прикладная часть гидрологии, изучающая способы и технику измерения элементов водных потоков и водоемов, называется гидрометрией. Гидрометрия развивается на базе геодезии, математики, гидравлики и других наук.

Формирование гидрологического режима водных объектов происходит в первую очередь под воздействием климата. Так, для засушливой зоны Юго-Востока СССР характерны небольшие реки, многоводные весной и пересыхающие летом. Реки северных районов, где больше осадков, многоводны в течение всего года. Вообще каждой климатической зоне соответствует свой, специфический гидрологический режим.

Наука, занимающаяся изучением физических явлений и процессов (ветра, снега, дождей, гроз, града, ураганов и т. д.), происходящих в атмосфере, называется метеорологией.

Метеорология, гидрология и гидрометрия тесно связаны с такими специальными науками, как сельскохозяйственная мелиорация и гидротехнические сооружения. Проектирование и строительство гидротехнических сооружений (плотин, водозаборов при орошении, водоприемников при осушении и т. д.) невозможно без знаний гидрологического режима используемых водных объектов.

Для руководства всеми метеорологическими, гидрометеорологическими и гидрологическими работами и исследованиями в 1929 г. образован Гидрометеорологический комитет при СНК СССР, преобразованный в 1936 г. в Главное управление гидрометеорологической службы (ГУГМС). Это управление организует и проводит наблюдения и исследования, контролирует работы ведомственных организаций и одновременно собирает в своих фондах материалы наблюдений со всей территории нашей страны.

По богатству водными ресурсами Советский Союз занимает первое место в мире. Протяженность внутренних водных путей страны составляет около 420 тыс. км.

В 1715 г. в Петербурге на р. Неве был установлен первый водомерный пост. В 1874 г. началось систематическое описание судоходных водных путей России и планомерные гидрометрические работы на них. К 1909 г. были получены обширные гидрометрические материалы в Средней Азии, Амуро-Зейском районе, Заволжье, на Кавказе, в Барабинской и Ишимской степях. Однако в дореволюционной России вследствие общей технической отсталости водное хозяйство развивалось весьма слабо. Естественно, что и гидрологические исследования в то время не нашли широкого развития.

После Великой Октябрьской социалистической революции гидрология и гидрометрия начали развиваться очень быстрыми темпами. Под непосредственным руководством В. И. Ленина в 1920 г. был разработан план электрификации России (план ГОЭЛРО). Осуществление этого грандиозного плана потребовало выполнения комплекса сложных исследований, в том числе и изучения естественных водных ресурсов страны.

Крупным событием в изучении водных ресурсов было создание в 1919 г. Российского гидрологического института, ныне Государственный ордена Трудового Красного Знамени гидрологический институт (ГГИ). Гидрологический институт является центральным научно-исследовательским гидрологическим учреждением Советского Союза. Он ведет крупные стационарные, экспедиционные

исследования и методические разработки. Метеорологические и гидрологические прогнозы сосредоточены в Гидрометцентре СССР.

Все материалы гидрологических наблюдений публикуются в серии справочников «Ресурсы поверхностных вод СССР», а метеорологические данные — в серии «Справочников по климату СССР».

В соответствии с решениями XXIV съезда и майского (1966 г.) Пленума ЦК КПСС до 1975 г. будет осуществлено строительство новых оросительных систем на площади 3 млн. га и осушительных систем на площади 5 млн. га. В ближайшие годы площадь орошаемых земель будет доведена до 20 млн. га. Развернуто строительство крупных мелиоративных систем в старых и новых районах орошения. В связи с этим расширяется объем гидрологических и гидрометрических исследований и изысканий, необходимых при проектировании, строительстве и освоении гидростанций и мелиоративных систем.

ТЕМА 1. АТМОСФЕРА И ЕЕ СТРОЕНИЕ

Атмосфера — это воздушная оболочка земного шара, высота которой превышает 1000 км.

Нижний слой атмосферы называется тропосферой. Высота его 16—18 км на экваторе и 8—10 км в полярных широтах. В тропосфере сосредоточено около $^4/_5$ всей массы атмосферы, поэтому плотность воздуха здесь наибольшая. В сухом воздухе содержится 78% азота, 21% кислорода, 0,9% аргона и 0,03% углекислого газа. Помимо перечисленных элементов, в воздухе находится ничтожное количество гелия, водорода, неона и других газов. Этот слой атмосферы отличается от вышележащих высоким содержанием водяного пара. В тропосфере температура воздуха падает в среднем на 6° с подъемом на каждый километр.

Слой атмосферы, расположенный выше тропосферы, называется тропопаузой. Это переходный слой с температурой 190—220 К[1]. Выше этого слоя до высоты 50 км простирается стратосфера. В стратосфере воздух более сухой; облака в ней отсутствуют. В нижнем слое стратосферы (до высоты 25 км) температура остается приблизительно постоянной и составляет 190—220 К. В верхней части стратосферы температура возрастает до 270 К.

Над стратосферой до высоты 80 км расположена мезосфера, где температура понижается и на верхней границе ее достигает 180 К.

Над мезосферой находится переходный слой — мезопауза, выше него — термосфера. В этом слое температура возрастает с высотой и достигает очень больших значений (свыше 1000 К).

Еще выше, на высоте приблизительно 1000 км и более, находится экзосфера, где происходит постепенный переход от атмосферы к межпланетному пространству. Здесь атмосферные газы рассеиваются в мировое пространство.

---

[1] «К» означает, что температура выражена по Кельвина шкале. За нуль по этой шкале принят абсолютный нуль, т. е. температура, лежащая на 273,16° ниже точки таяния льда. По К. ш. все температуры положительны.

Наиболее важной составной частью атмосферы является водяной пар. Концентрация водяного пара колеблется в широких пределах: от 3% у земной поверхности в тропиках до $2 \cdot 10^{-5}$% в Антарктиде. Основная масса водяного пара сосредоточена в тропосфере. Средняя влажность этого слоя атмосферы колеблется в пределах 2—4 мг/кг. Наличие значительных количеств влаги в тропосфере способствует образованию здесь облаков, закрывающих около 50% всей земной поверхности. В стратосфере и мезосфере облака наблюдаются сравнительно редко.

ТЕМА 2. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА И ИЗМЕРЕНИЕ

1. Солнечная радиация

Лучистая энергия, посылаемая солнцем на землю, называется солнечной радиацией. Интенсивность солнечной радиации характеризуется мощностью потока лучистой энергии и определяется количеством тепла, поступающего за 1 мин на 1 см² поверхности, расположенной перпендикулярно солнечным лучам.

Часть солнечной радиации (около 40%) отражается от земной поверхности и облаков и возвращается в мировое пространство, часть поглощается атмосферой, а часть рассеивается. Некоторая доля солнечной радиации достигает поверхности земли в виде рассеянного дневного света. Количество энергии солнечных лучей, которое поступает в 1 мин на 1 см² площади, перпендикулярной солнечным лучам на верхней границе атмосферы, называется солнечной постоянной. Она больше солнечной радиации, измеряемой у поверхности земли, и близка к 2,0 кал/(см²·мин), или 8,36 Дж/(см²·мин).

Количество поступающей солнечной энергии неодинаково в различных местах земного шара и в разное время года. Это объясняется тем, что высота солнца и прозрачность атмосферы непостоянны.

Земная поверхность, нагреваемая солнечными лучами, сама излучает тепло в атмосферу и в мировое пространство. Днем нижние слои воздуха, соприкасающиеся с поверхностью земли, нагреваются и как более легкие поднимаются вверх. На их место сверху опускаются холодные, более плотные слои воздуха. Происходит вертикальный обмен воздуха, называемый тепловой конвекцией.

Ночью же поверхность земли, а следовательно, и нижние слои воздуха охлаждаются; по мере поднятия вверх температура воздуха повышается. Это явление известно под названием температурной инверсии.

2. Температура почвы

Тепловой режим почвы. Тепло, поглощаемое поверхностью почвы, расходуется на нагревание, испарение и химические процессы. Поэтому в верхних слоях почвы температура в течение суток значительно колеблется. Изменение суточной температуры почвы совпадает с изменением температуры воздуха. Минимальная температура наблюдается обычно перед восходом солнца, а максимальная около полудня (13 ч). С глубиной амплитуда суточных колебаний уменьшается. Приблизительно на глубине 0,7—1,0 м температура остается постоянной в течение суток.

Более значительно температура меняется в течение года. В средних широтах самая низкая температура бывает в январе, а самая высокая в июле или августе. На глубине около 20 м от поверхности уже не наблюдается ни суточных, ни годовых колебаний.

Для стационарных измерений температуры почвы на глубинах от 0,1 до 3,2 м служат вытяжные, или глубинные термометры (рис. 1). Эбонитовые или пластмассовые трубки с медным дном опускают на определенную глубину. В трубку вставляют деревянный стержень, на конце которого закреплен термометр в оправе. Резервуар термометра засыпан медными опилками. Соприкасаясь шариком с металлическим дном трубки, вытяжной термометр показывает температуру почвы на этой глубине. Термометры обычно устанавливают на глубинах 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 и 3,2 м. В срок наблюдения термометр вынимают, записывают его показание и снова опускают в трубку.

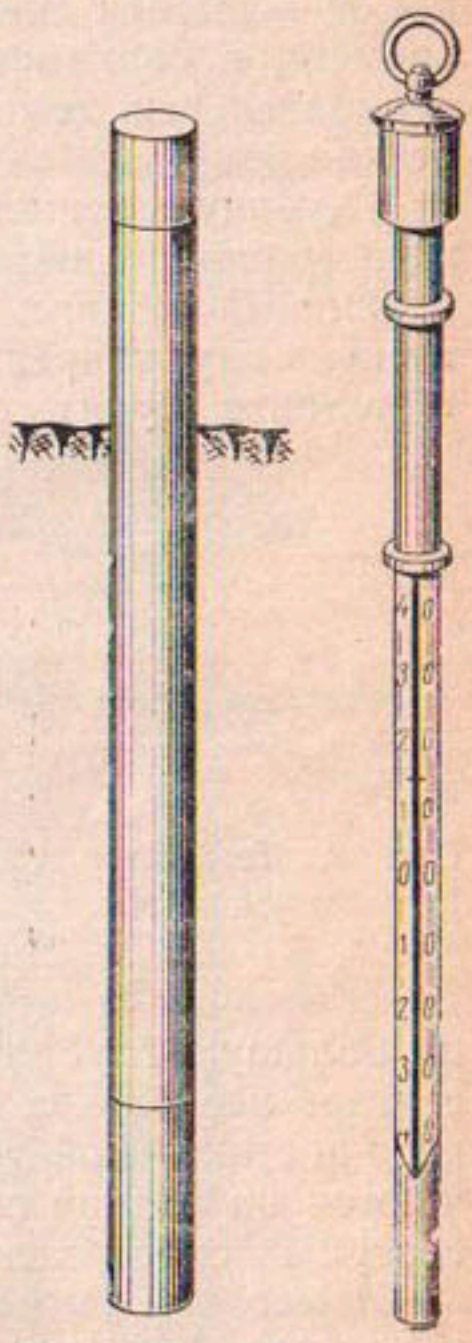


Рис. 1. Вытяжной термометр.

Для измерения температуры почвы можно пользоваться электрическими термометрами-термопарами и термометрами сопротивления.

Промерзание почвы. Промерзание грунта происходит из-за того, что замерзает вода в почвенных капиллярах. Глубина промерзания почвы зависит в первую очередь от глубины увлажнения грунта, концентрации почвенного раствора и утепления поверхности почвы. Так, слой снега мощностью 45—50 см надежно защищает почву от холода. Лесная подстилка тоже является хорошим утепляющим средством. Поэтому в лесу под подстилкой и мощным снежным покровом почва не промерзает иногда всю зиму.

В инженерных расчетах необходимо знать, на какую глубину в почве распространяются отрицательные температуры, при которых может замерзнуть вода в подземных трубопроводах. Глубина про-

мерзания в южной полосе Европейской территории СССР (Ростов, Ставрополь, Краснодар и т. д.) достигает примерно 0,75 м, в средней полосе 1,0 м, в восточных районах 1,5 м, в Нижнем Заволжье 2,0 м, в Сибири более 2,0 м.

Глубина промерзания h (в сантиметрах) может быть удовлетворительно рассчитана по эмпирической формуле И. А. Кузника

$$h = \Sigma \left[(0{,}84 - 0{,}016H) \left(\Sigma t_n^{0{,}74} - \Sigma t_{n-1}^{0{,}74} \right) \right], \qquad (1)$$

где H — высота снежного покрова в отдельные расчетные отрезки времени в сантиметрах; Σt_n и Σt_{n-1} — суммы средних суточных отрицательных температур воздуха конца и начала расчетного отрезка времени.

Глубину проникновения отрицательной температуры в почвогрунты определяют мерзлотомером Данилина. Мерзлотомер — это резиновый шланг длиной 2 м, наполненный водой. Шланг опускают в скважину, закрепленную трубой. По глубине промерзания воды в шланге судят о глубине промерзания грунта.

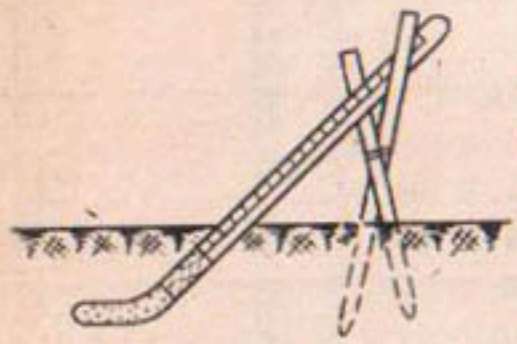


Рис. 2. Термометр Савинова.

На огромной территории (площадью свыше 10 млн. км²) к северу и северо-востоку от линии, соединяющей нижнее течение Печоры и Амура, расположена область многолетнемерзлых пород. На этой территории (Сибирь, Дальний Восток, Заполярье) летом оттаивает только верхний слой почвы. Глубина оттаивания зависит от условий погоды и характера почвы. Глинистые и торфянистые почвы с плохой теплопроводностью оттаивают меньше и позже, чем песчаные и щебенистые почвы, которые оттаивают быстрее и на большую глубину. Максимальная мощность мерзлого слоя достигает нескольких метров на юге и сотен метров на севере и северо-востоке этой территории. Многолетнемерзлые породы встречаются на разной глубине от поверхности земли: от 20—25 см на северных склонах до 4 м и более на южных сухих склонах.

Измерение температуры почвы. Температуру поверхности почвы измеряют ртутными термометрами: срочным, минимальным и максимальным.

Срочный термометр служит для измерения температуры в определенные сроки наблюдений, а минимальный и максимальный термометры — для определения самой низкой и самой высокой температуры поверхности почвы между сроками наблюдений. Все три термометра устанавливают горизонтально в затененном месте южной части метеорологической площадки на поверхности земли так, чтобы их резервуары и стеклянные оболочки были наполовину погружены в почву. Описание срочного, максимального и минимального термометров дано на стр. 12.

Температуру почвы на глубине до 20 см измеряют коленчатыми ртутными термометрами С. И. Савинова (рис. 2). Они отличаются от обычных термометров тем, что резервуары их

значительно удалены от шкалы и поставлены под тупым углом к ней. Комплект из четырех термометров устанавливают в направлении с востока на запад на расстоянии 10 см друг от друга на глубины 5, 10, 15 и 20 см. Термометрами Савинова пользуются только в теплое время года.

3. Температура воздуха

Для измерения температуры воздуха служат ртутные термометры. Ртуть, однако, замерзает при температуре —38° С. Поэтому при более низкой температуре пользуются спиртовыми термометрами. Приборы устанавливают в психрометрической будке, показанной на рис. 3. Будка с жалюзийными стенками хорошо проветривается и защищает приборы от дождя, снега и прямых солнечных лучей.

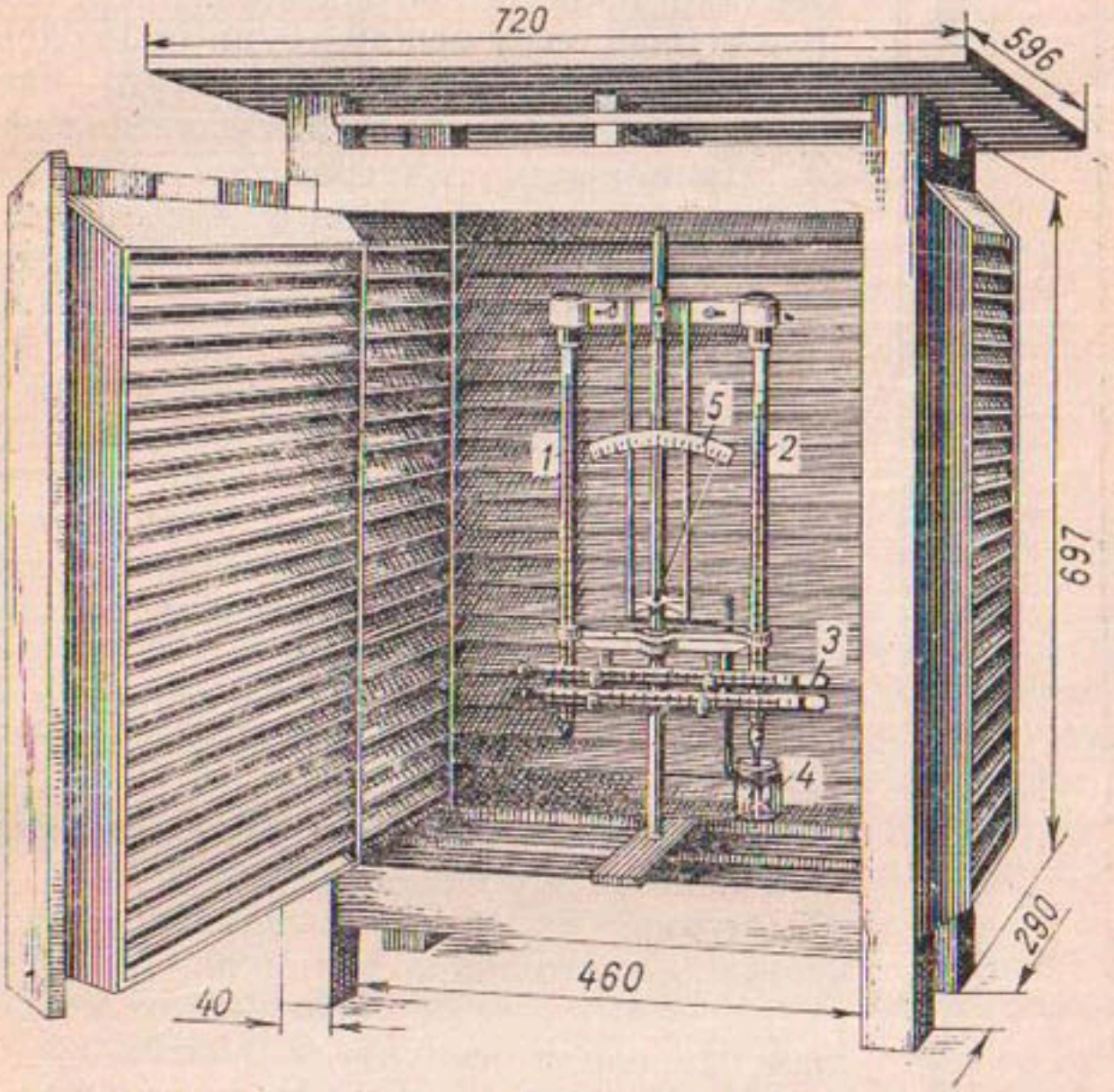


Рис. 3. Психрометрическая будка с установленными в ней приборами.

Термометры: *1* — сухой; *2* — смоченный; *3* — минимальный и максимальный; *4* — стаканчик; *5* — волосной гигрометр.

Термометр, которым измеряют температуру воздуха в установленные часы наблюдений, называется срочным. Для определения температуры между сроками наблюдений служат минимальные и максимальные термометры.

Максимальный (ртутный) термометр (рис. 4 *а*) устроен так же, как и медицинский. Внутри капиллярной трубки вблизи ртутного резервуара есть стеклянный волосок, сужающий отверстие. При потеплении ртуть расширяется и поднимается из резервуара в капилляр. При похолодании ртуть не может спуститься вниз по суженному капилляру. Ртутный столбик в этом месте разрывается и остается в капилляре.

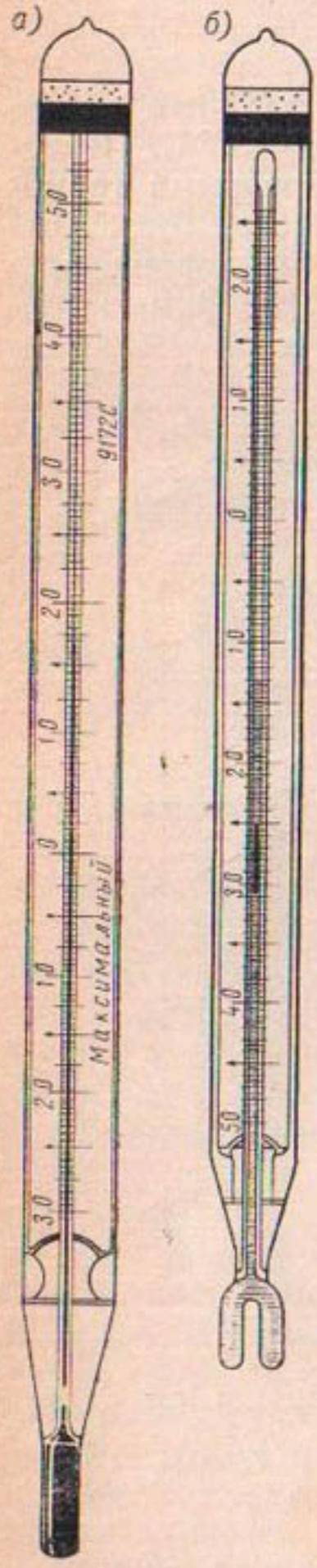


Рис. 4. Термометры.
а — максимальный; *б* — минимальный.

Минимальный термометр (рис. 4 *б*) — спиртовой. В спирт погружен стеклянный штифтик. При понижении температуры спирт опускается, а пленка поверхностного натяжения в конце спиртового столбика перемещает стеклянный штифтик. При повышении температуры спирт обтекает штифтик, оставляя его в неподвижном состоянии. Верхний край штифтика показывает минимальную температуру между двумя наблюдениями.

Колебания температуры могут непрерывно регистрироваться самописцем-термографом (рис. 5). Приемником температуры служит биметаллическая пластинка. При изменении температуры у этой пластинки меняется кривизна. Один конец пластинки закреплен, к другому концу прикреплен на шарнирах рычаг со стрелкой; стрелка скользит по ленте, надетой на барабан. Барабан вращается от часового механизма (суточного или недельного) вокруг вертикальной оси. На конце стрелки есть перо с чернилами, которое при повышении температуры поднимается по ленте вверх, при понижении опускается вниз, записывая температуру.

Амплитуда колебаний суточных температур зависит от времени года, рельефа местности, высоты над поверхностью земли и т. д. Днем над водой она ниже, чем над землей; у поверхности почвы выше, чем в воздухе, и т. д.

Годовое изменение температуры в разных частях земного шара различно. Годовая температура повышается с удалением от морей и океанов. Большая амплитуда колебания температур (суточных — днем и ночью, годовых — летом и зимой) при незначительной сумме годовых осадков создает резко континентальный климат (на Юго-Востоке, в полупустынной и пустынной зонах СССР). В Заволжье летом максимальные температуры достигают 43° С, а зимой минимальные температуры опускаются до —42° С. Максимальная годовая амплитуда достигает 43—(—42) = 85° С.

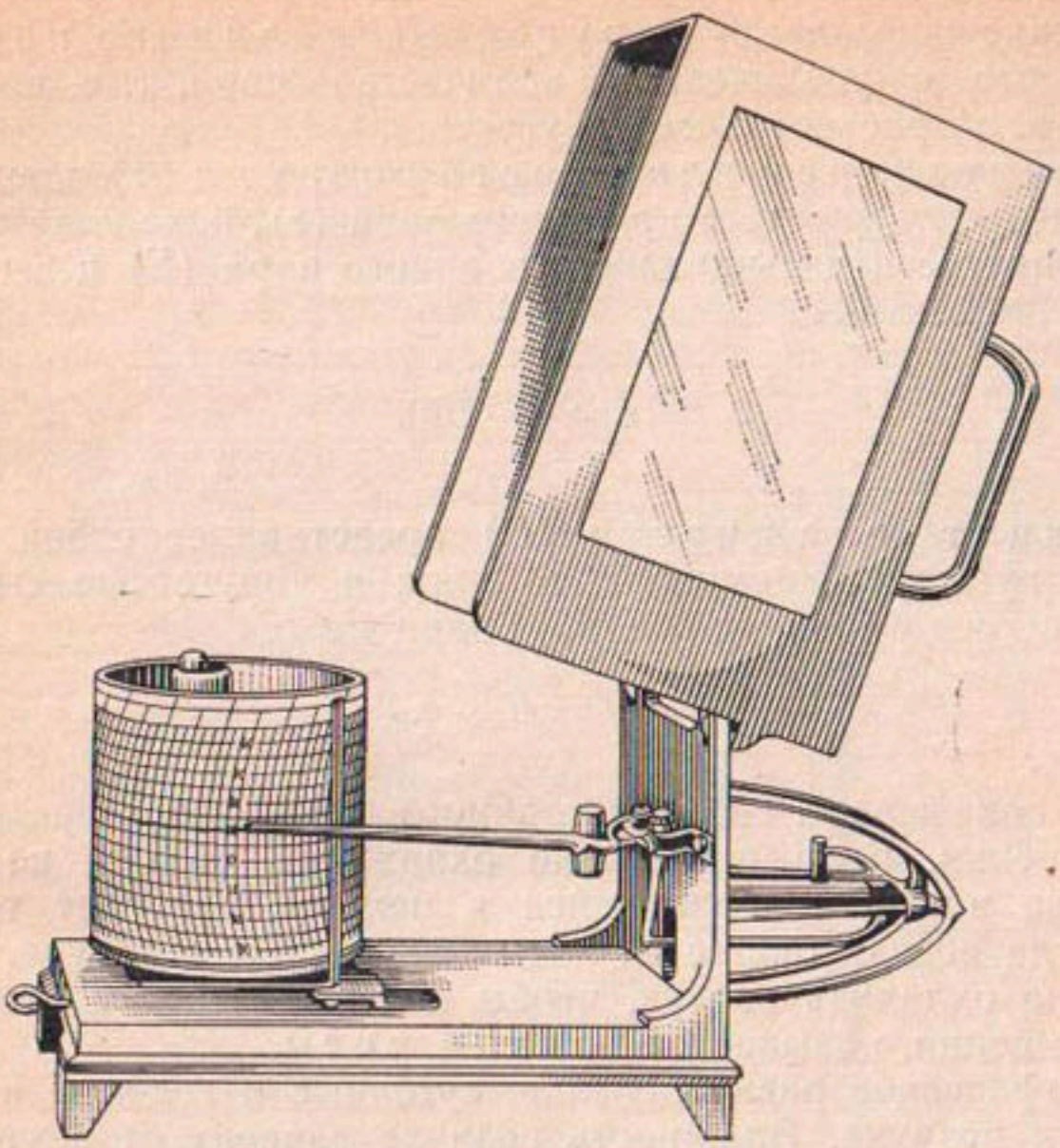


Рис. 5. Термограф.

4. Влажность воздуха

Влажность воздуха обусловливается наличием в нем водяного пара. Наибольшее количество водяного пара, которое может содержаться в определенном объеме, зависит от температуры воздуха. С повышением температуры увеличивается и максимальное содержание водяного пара. Так, например, в 1 м³ воздуха при температуре —30° С может содержаться не больше 0,45⁷ г водяного пара, а при +30° С в 66,5 раза больше, т. е. 30,4 г.

Для характеристики количества водяного пара, содержащегося в атмосфере, служат: абсолютная и относительная влажность, упругость водяного пара и дефицит влажности.

Абсолютная влажность показывает, какое количество влаги содержится в единице объема воздуха. Абсолютная влажность измеряется граммами на кубический метр (г/м³).

Абсолютная влажность воздуха может быть измерена по величине его парциального давления в миллиметрах ртутного столба или в миллибарах (мб) [1].

---

[1] Миллибар — единица давления, равная 1000 дин на 1 см², или 100 Па, соответствует 0,75 мм ртутного столба на уровне моря под широтой 45°.

Давление называется упругостью водяного пара. Естественно, что с увеличением количества пара, т. е. абсолютной влажности, возрастает и его упругость.

Относительная влажность воздуха (r) представляет собой отношение упругости водяного пара (e), находящегося в воздухе, к упругости насыщающего водяного пара (E) и выражается обычно в процентах

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100. \qquad (2)$$

Дефицит влажности (D) представляет собой разность между упругостью насыщающего пара и упругостью фактически содержащегося в воздухе водяного пара

$$D = E - e. \qquad (3)$$

Дефицит показывает, сколько водяного пара не достает в воздухе до насыщения. Если постепенно охлаждать воздух, не изменяя количество влаги, содержащейся в нем, то наступит такой момент, когда воздух окажется насыщенным. Температура, до которой нужно охладить воздух, чтобы содержащийся в нем пар достиг насыщения, называется точкой росы.

Географическое распределение, суточные и годовые колебания влажности воздуха. Влажность воздуха зависит от высоты местности и географического ее положения. Она изменяется в течение суток и по временам года. С высотой абсолютная влажность воздуха быстро убывает вследствие понижения температуры, что способствует конденсации водяных паров и выпадению их на землю в виде осадков.

К северу и югу от экватора вглубь материков абсолютная влажность убывает. На морских же побережьях жарких стран она повышается до 25—30 г/м³.

В летние месяцы с поверхности почвы днем происходит усиленное испарение. Нагретые массы воздуха вместе с водяным паром поднимаются вверх, а холодные опускаются вниз. Абсолютная влажность достигает минимума обычно в 15—16 ч и перед восходом солнца, а максимум наступает в 8—9 и в 20—21 ч.

Годовое изменение абсолютной влажности, так же как и суточное, следует за изменением температуры. Поэтому влажность летом выше, чем зимой.

По-иному меняется относительная влажность воздуха. Максимум бывает ночью, минимум — днем, а в годовом ходе максимум наблюдается зимой, а минимум — летом.

Приборы для измерения влажности воздуха. Влажность воздуха на метеорологических станциях измеряют волосным гигрометром и психрометром Августа (станционный психрометр). В экспедиционных условиях пользуются психрометром Ассмана (аспирационный психрометр).

Волосной гигрометр (рис. 6) состоит из металлической рамы, в середине которой в вертикальном направлении натянут обезжиренный человеческий волос. Верхний конец его закреплен неподвижно, а нижний перекинут через блок и снабжен гирькой. К блоку прикреплена стрелка, движущаяся по дуге с делениями.

Длина волоса изменяется с изменением относительной влажности воздуха. При увеличении влажности (и длины волоса) гирька опускается, а стрелка уходит вправо. При уменьшении влажности стрелка уходит влево. Отсчеты на дуге даны в процентах.

Психрометр Августа состоит из двух ртутных термометров, установленных вертикально на подставке гигрометра. Один из них, сухой (см. рис. 3), служит для измерения температуры воздуха и располагается по левую сторону от волосного гигрометра. Второй термометр, смоченный (см. рис. 3), расположен справа от гигрометра. Шарик его обернут батистом, конец которого опущен в стаканчик с дистиллированной водой. Потеря влаги вследствие испарения сопровождается и потерей тепла. Поэтому смоченный термометр всегда показывает меньшую температуру, чем сухой. Разница в температурах зависит от влажности воздуха: чем воздух суше, тем больше испаряется воды, тем больше разность отсчетов по термометрам. Зная разность температур, с помощью специальных психрометрических таблиц определяют абсолютную и относительную влажность воздуха.

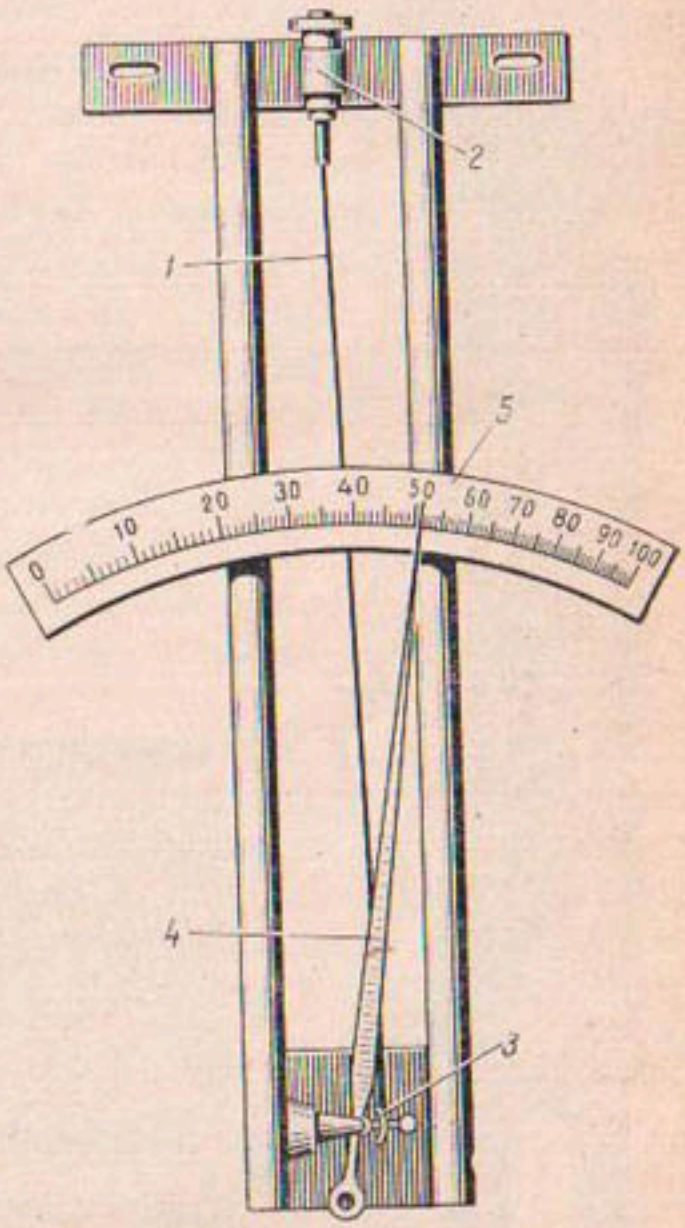


Рис. 6. Волосной гигрометр.
1 — волос; *2* — верхний зажим; *3* — блок; *4* — стрелка; *5* — дуга.

Психрометр Ассмана (рис. 7) работает по тому же принципу, что и психрометр Августа. Резервуары термометров защищены от прямого действия солнечных лучей и атмосферных осадков металлическими оправами, которые соединены трубкой с вентилятором, расположенным в верхней части прибора. Вентилятор приводится в движение пружиной. При работе вентилятора воздух всасывается в оправу и выбрасывается через щелевые отверстия. Таким образом, резервуары термометров находятся в условиях постоянной вентиляции. Поэтому психрометр Ассмана называют аспирационным. Прибор нужно располагать горизонтально, так как при вертикальном положении вентилятор засасывает воздух из большого объема воздуха. Поэтому нельзя указать точно, к какому именно слою воздуха относятся

показания психрометра. Отсчеты температуры проводят через 3—4 мин после включения в работу вентилятора.

Гигрограф (рис. 8) служит для непрерывной записи изменений относительной влажности воздуха. Приемной частью гигрографа является пучок обезжиренных человеческих волос, который в натянутом состоянии закреплен в двух точках. С помощью крюч-

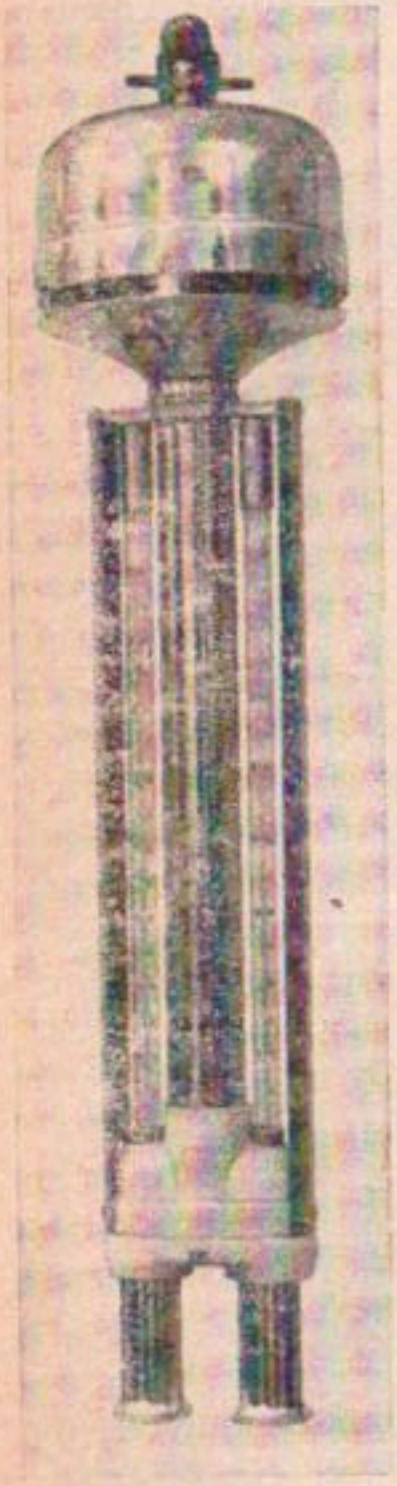


Рис. 7. Психрометр Ассмана.

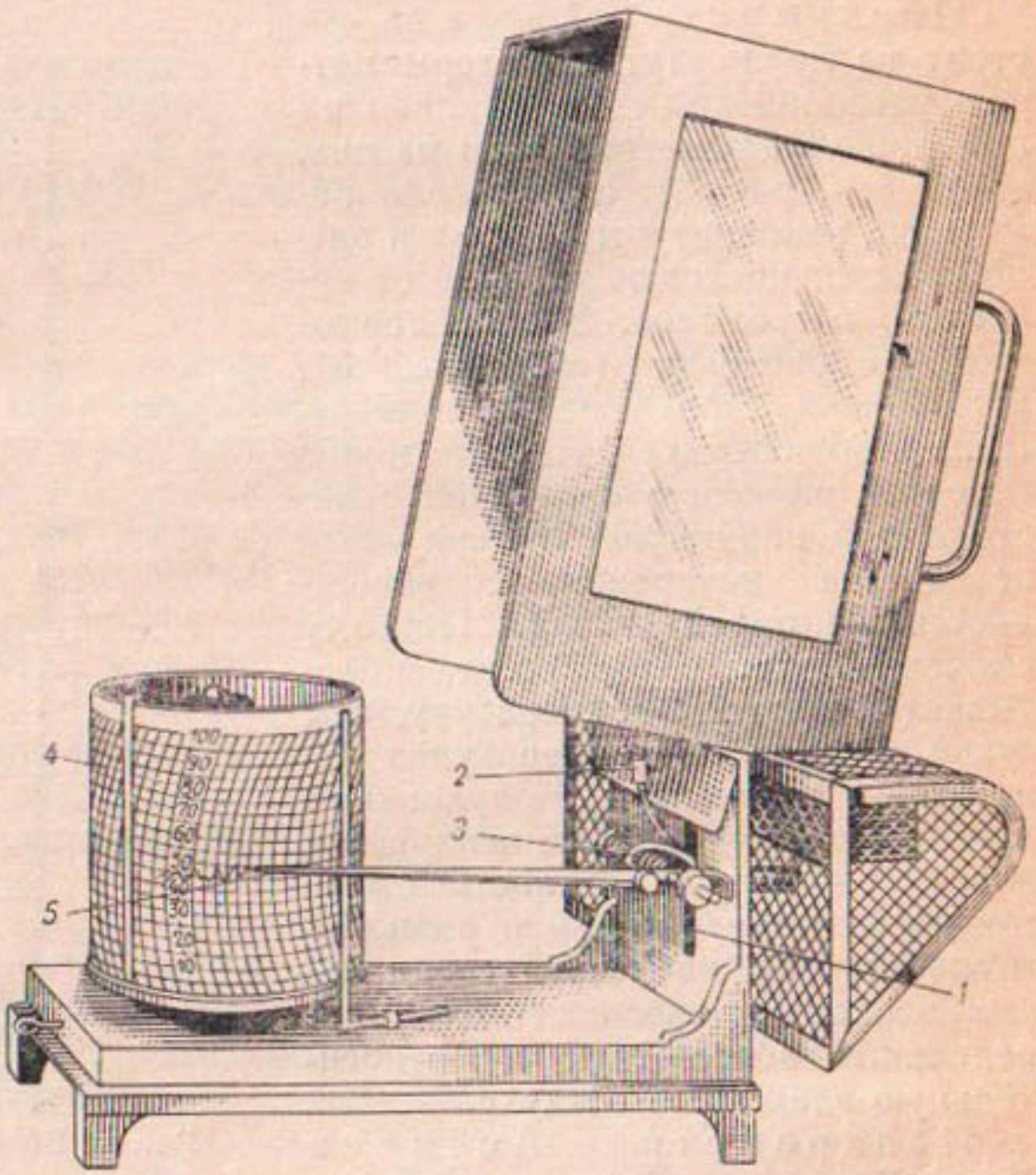


Рис. 8. Гигрограф.
1 — крючок; *2, 3* — рычаги; *4* — барабан; *5* — перо.

ка *1* пучок волос присоединяется к передающей части гигрографа. Передающая часть состоит из двух криволинейных рычагов *2* и *3*, катящихся один по другому. Барабан *4* приводится в движение часовым механизмом, который находится внутри. На барабан надета лента. При вращении барабана перо *5* касается ленты и наносит кривую линию, которая соответствует значениям относительной влажности воздуха.

5. Испарение с поверхности воды и почвы

Испарением называется процесс перехода воды из жидкого состояния в газообразное. Влага испаряется с поверхности воды и почвы. Небольшое количество воды испаряется с поверхности льда и снега.

Физическая сущность испарения заключается в следующем. Молекулы воды непрерывно движутся. Отдельные молекулы, скорость которых оказывается достаточной для преодоления сил молекулярного притяжения, отрываются и удаляются с поверхности жидкости или твердого тела. Естественно, что чем выше температура, тем больше скорость движения молекул, тем больше и величина испарения. В дальнейшем часть оторвавшихся молекул поглощается испаряющей поверхностью, а часть отражается от нее. Получаются два потока молекул. Величина же испарения представляет собой разность между объемами молекул, отрывающихся от поверхности и попадающих на нее обратно. Когда обе величины равны между собой, наступает состояние подвижного равновесия.

Известно, что при данной температуре в воздухе может содержаться определенное количество водяного пара. Естественно, что при падении температуры ниже точки росы в воздухе появляется избыток водяного пара. Такое состояние называется перенасыщением.

Состояние перенасыщения очень неустойчиво, так как пар сгущается и, падая на испаряющую поверхность, конденсируется. При конденсации количество молекул, поглощаемых испаряющей поверхностью, больше количества молекул, отрывающихся от нее.

Испарение зависит от дефицита влажности воздуха и скорости ветра. Ветер усиливает перенос пара; на место увлажненного воздуха поступает более сухой. Чем суше воздух и больше скорость ветра, тем больше испарение.

Испарение сопровождается затратой тепла. Так, для перехода 1 кг воды при температуре 0° С в водяной пар требуется 539 килокалорий, или 2260 тыс. Дж/кг. Это количество тепла называется удельной теплотой парообразования. Конденсация же, наоборот, сопровождается выделением тепла.

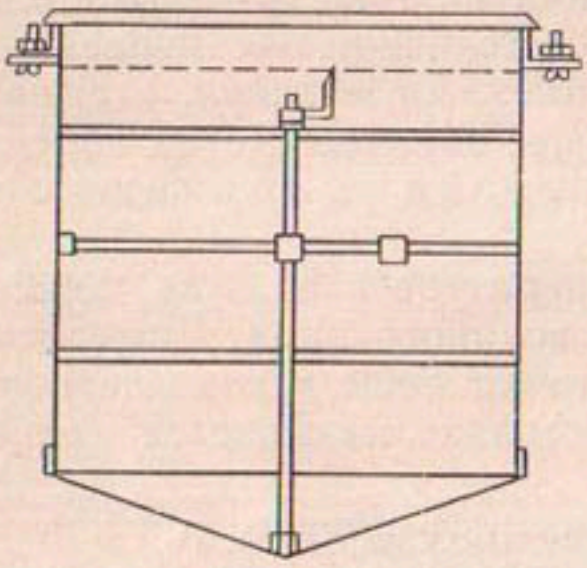
Испарение с поверхности почвы имеет свои специфические особенности. Даже при высокой температуре в жарких районах испарение невелико, если почва сильно иссушена.

Взрыхленная почва испаряет влаги меньше, чем уплотненная. Это объясняется тем, что в рыхлой почве капилляры нарушены, поэтому вода слабо поступает из нижних слоев к поверхности почвы. Почвы тяжелого механического состава (глинистые и тяжелосуглинистые) лучше увлажняются капиллярными токами и интенсивнее испаряют воду, чем почвы легкого механического состава (супесчаные и песчаные).

Поверхность земли, затененная растениями, меньше нагревается, а скорость ветра в приземном слое незначительна. Поэтому

здесь испаряется влаги меньше, чем с открытой поверхности. Чем гуще растительный покров, тем меньше испарение с поверхности почвы.

Процесс испарения воды растениями называется транспирацией. Сумма же испарения с поверхности почвы и транспирации называется суммарным водопотреблением, или суммарным испарением. Эта величина выражается в кубических метрах на гектар ($м^3$/га) или в миллиметрах (мм) слоя воды, испаряющейся за определенный промежуток времени: за сутки, месяц и год.



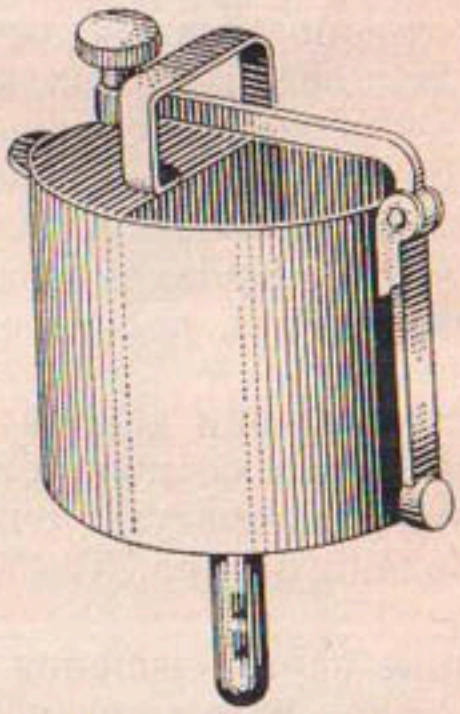


Рис. 9. Испаритель ГГИ-3000. Рис. 10. Бюретка ГГИ.

Для изучения испарения с водной поверхности на испарительных станциях и в гидрологических обсерваториях системы ГУГМС установлены бассейны площадью 5—20 $м^2$.

На станциях III разряда устанавливают испарители ГГИ (рис. 9). Испаритель ГГИ-3000 представляет собой цилиндрический сосуд площадью 3000 $см^2$. Испаритель устанавливают в грунт на испарительной площадке или на плавучей раме на поверхности воды. Здесь же устанавливают и наземный дождемер. В центре испарителя есть латунная трубка, верхний срез которой на 100 мм ниже борта испарителя. На трубку насаживается объемная бюретка для измерения уровня воды в испарителе (рис. 10).

Объемная бюретка диаметром 50 мм имеет боковое отверстие, через которое поступает вода. В течение 30—40 с в бюретке вода устанавливается на одном уровне с испарителем. Затем отверстие закрывают клапаном при помощи прямоугольного рычага и винта, упирающегося в крышку бюретки. Сняв бюретку, переливают из нее воду в измерительную стеклянную мензурку с делениями, соответствующими 1 $см^3$, и с мелкими делениями — 0,1 $см^3$ (или 0,05 мм). После отсчета воду из мензурки выливают обратно в испаритель. У верхнего конца центральной трубки прикреплена

Таблица 1

Внутригодовое распределение испарения с водной поверхности малых водоемов по месяцам
(в долях от суммы испарения за весь период)

№ района	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I					—	0,28	0,34	0,25	0,13	—	—	—
II					0,16	0,26	0,27	0,19	0,12	—	—	—
III					0,12	0,22	0,28	0,20	0,12	0,06	—	—
IV					0,18	0,24	0,23	0,17	0,11	0,07	—	—
V					0,21	0,22	0,20	0,16	0,12	0,09	—	—
VI				0,10	0,18	0,20	0,20	0,16	0,10	0,06	—	—
VII				0,13	0,18	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	—	—
VIII				0,08	0,17	0,19	0,20	0,17	0,12	0,07	—	—
IX				0,11	0,19	0,21	0,18	0,14	0,10	0,07	—	—
X				0,10	0,18	0,19	0,18	0,15	0,10	0,07	0,03	—
XI				0,07	0,15	0,18	0,20	0,18	0,12	0,07	0,03	—
XII			0,05	0,09	0,17	0,17	0,16	0,15	0,11	0,07	0,03	—
XIII			0,04	0,09	0,15	0,15	0,18	0,17	0,12	0,07	0,03	—
XIV			0,05	0,09	0,13	0,14	0,17	0,16	0,12	0,08	0,04	0,02
XV	0,02	0,03	0,05	0,08	0,12	0,15	0,16	0,15	0,11	0,07	0,03	0,03

игла, острие которой на 75 мм ниже борта испарителя. По мере снижения уровня воды в испарителе в него доливают воду вровень с острием иглы.

Дождемер служит для учета атмосферных осадков, выпадающих на поверхность воды в испарителе.

По изменению уровня воды (между двумя сроками наблюдений) с учетом выпадающих осадков определяется величина испарения

$$z = x + h_1 - h_2, \tag{4}$$

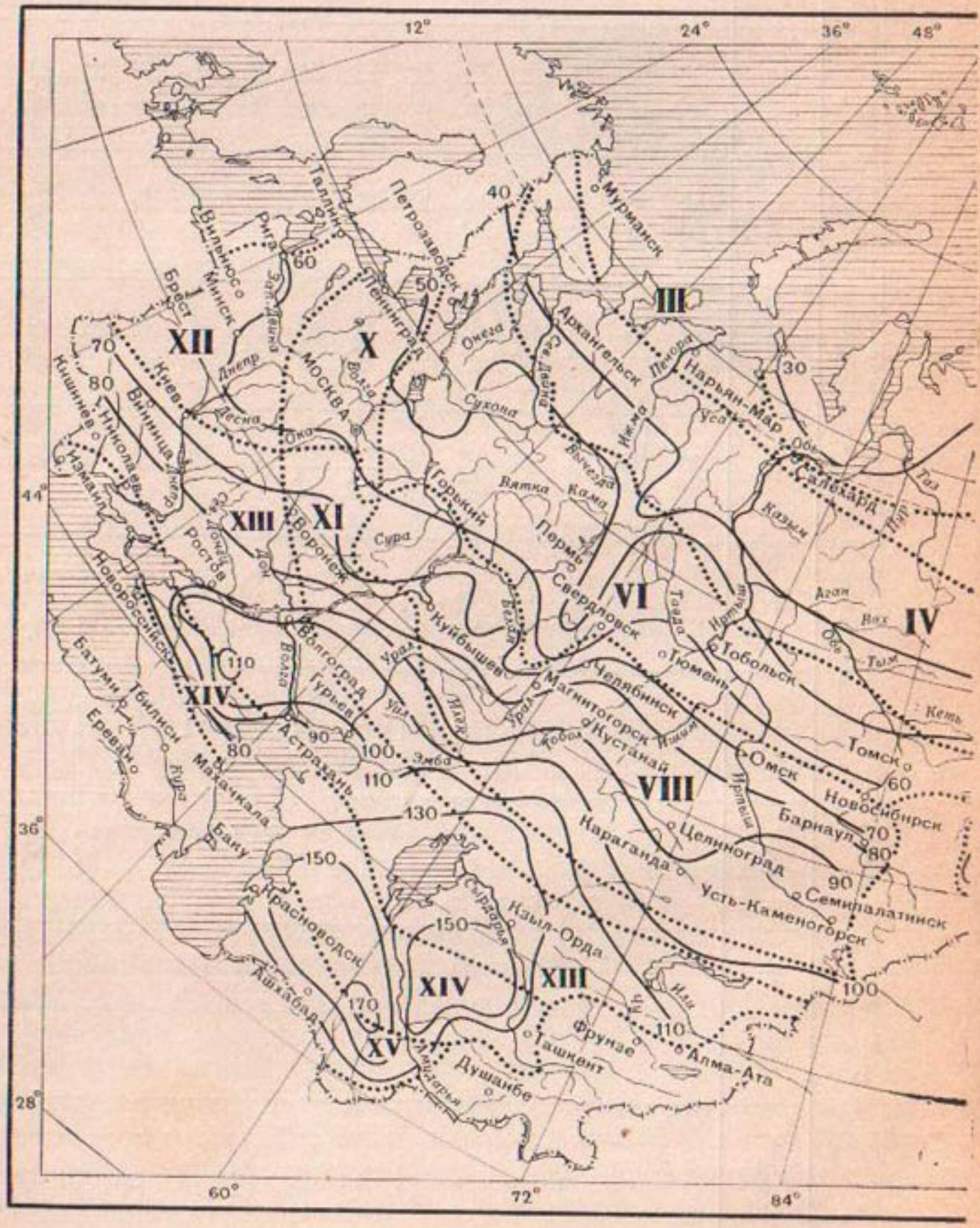
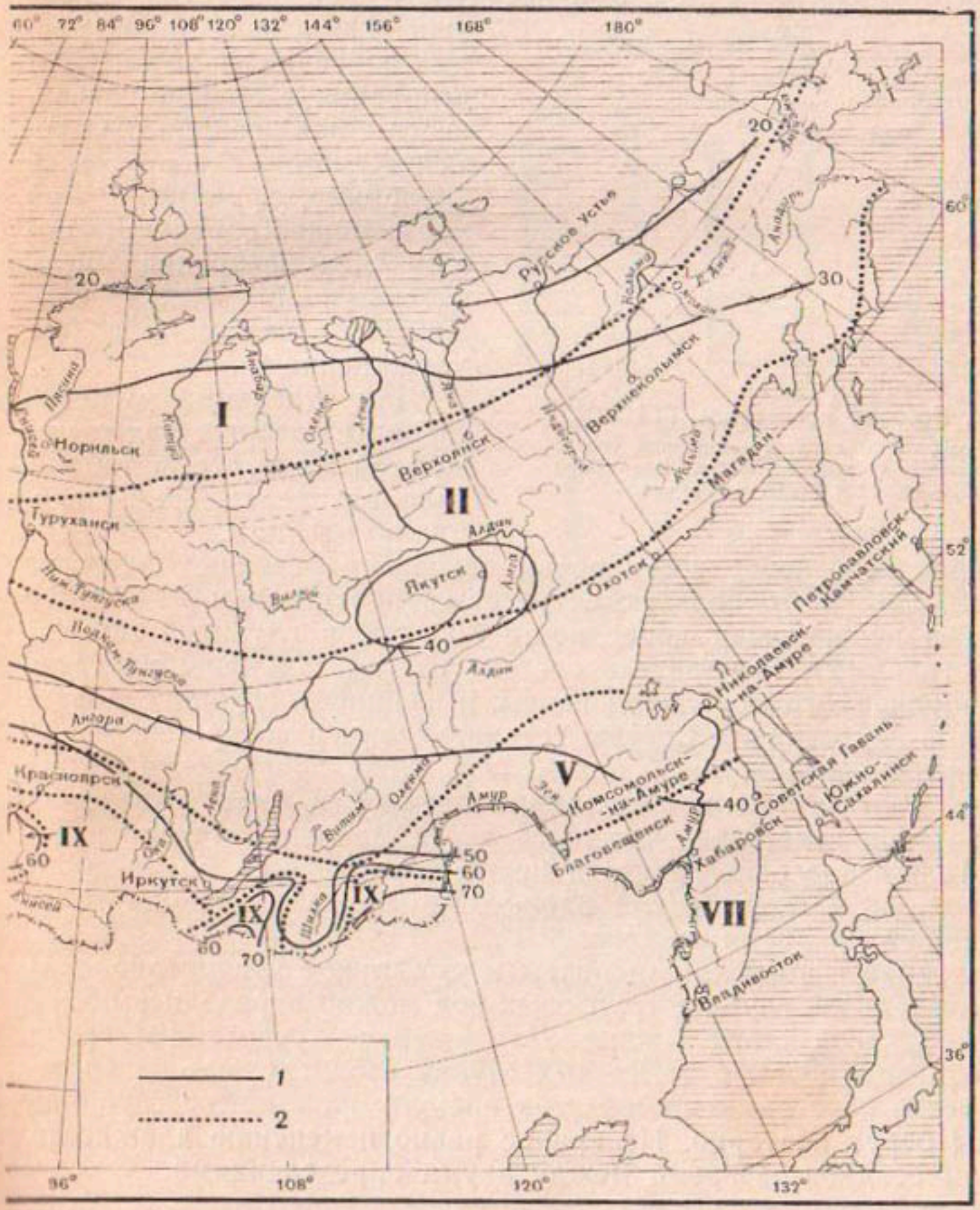


Рис. 11. Испарение с водной поверхности малых водоемов

1 — изолинии испарения в сантиметрах;

где z — слой испарения в миллиметрах; x — слой осадков в миллиметрах; h_1 и h_2 — уровни воды в первый и второй сроки наблюдений.

Наблюдения за испарением ведутся два раза в сутки. Величина испарения по показаниям испарителей ГГИ завышена по сравнению с большими испарителями. Поэтому для получения действительной величины испарения с поверхности водоемов надо ввести поправочный, или редукционный, коэффициент. Этот коэффициент (меньший единицы) для разных типов испарителей



и районы по внутригодовому распределению испарения.

2 — границы районов по табл. 1.

определяется в различных гидрометеорологических условиях на основании наблюдений, выполняемых одновременно на большом испарительном бассейне и на испарителе ГГИ-3000.

Можно определить величину испарения с водной поверхности и при отсутствии наблюдений. Б. Д. Зайков, а впоследствии А. П. Браславский и З. А. Викулина установили, что испарение зависит от разности между максимальной упругостью пара, вычисленной по температуре поверхности воды в водоеме, и средней упругостью на высоте 200 см и от скорости ветра на той же высоте. На основании этого определены средние многолетние величины испарения с малых водоемов. Эти величины показаны на карте (рис. 11) в виде линий равных значений (изолиний) испарения с водной поверхности. Зная координаты проектируемого сооружения (например, пруда), по этой карте можно определить высоту слоя испарения путем интерполяции между ближайшими изолиниями (см. упражнение 4).

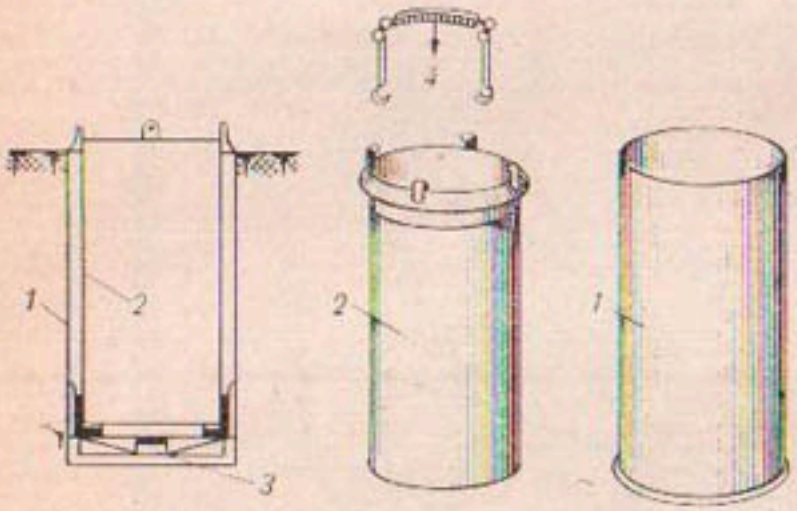


Рис. 12. Весовой испаритель ГГИ-500.
Слева в собранном виде: *1* — внешний сосуд; *2* — внутренний сосуд; *3* — сосуд для сбора просочившейся воды; *4* — ручка.

Для отдельных районов, границы которых показаны на этой же карте, в табл. 1 дано распределение испарения по месяцам.

Испарение с поверхности почвы обычно определяют весовым методом. Для этого пользуются весовым испарителем ГГИ-500 с площадью испаряющей поверхности 500 см² и глубиной 50 или 100 см (рис. 12). Испаритель состоит из двух сосудов: внутреннего, заполняемого монолитом почвы, и внешнего, служащего футляром для внутреннего. Сосуды устанавливают в почву так, чтобы края внутреннего сосуда *4* находились выше поверхности почвы на 5 см. Дно внутреннего цилиндра съемное и имеет отверстие, через которое вода, просочившаяся через монолит, стекает в сосуд *3*. Испарение с поверхности почвы определяется по разности весов монолита между двумя наблюдениями с учетом количества выпавших за это время осадков.

Испарение с поверхности почвы и суммарное водопотребление при значительной глубине грунтовых вод можно определить по изменению запасов влаги в почве. Для этого в определенные сроки берут образцы почвы с различных глубин и определяют их влажность; через некоторый промежуток времени на этих же глубинах образцы берут повторно. Испарение равно изменению влажности с учетом осадков за время между двумя определениями.

Испарение с поверхности суши, помимо метеорологических факторов, зависит от запасов влаги в почве и затененности ее растительностью.

Растения потребляют влагу не только из почвенного покрова, но и из водоносного горизонта, если он залегает неглубоко от поверхности. Так, пшеница использует пресную грунтовую воду при глубине ее залегания до 2,5 м, а люцерна — до 4—4,5 м.

Толща грунта от поверхности до грунтовых вод называется зоной аэрации. Суммарное испарение и испарение грунтовых вод в мелиоративной практике определяются специальными приборами — лизиметрами разной конструкции. УГМС выпускает взвешиваемые лизиметры ГР-80 (рис. 13) с площадью испаряющей поверхности 2000 см² и глубиной грунтовых вод 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 м. Лизиметр состоит из внутреннего цилиндра со съемным перфорированным дном. В верхней части цилиндра имеется кольцевой козырек. Цилиндр заполняется монолитом с ненарушенной структурой. Подъем цилиндра с монолитом для взвешивания и опускания его в наружный цилиндр производится подъемным краном, для чего служат две скобы. Водоносный горизонт моделируется в виде обратного фильтра. Для этого в футляр насыпается хорошо просеянный мелкий песок. Над ним помещается слой крупного песка и гальки. Футляр крепится болтами к нижнему основанию цилиндра. Поддон состоит из двух отсеков. В большой отсек помещается цилиндр в сборе с обратным фильтром, а в малый — водорегулирующее устройство. Из поддона проведена металлическая трубка, в которой находится поплавочный водомерный стержень для контроля положения грунтовых вод. Водорегулирующее устройство позволяет поддерживать постоянный уровень грунтовых вод и измерять количество долитой или отлитой воды.

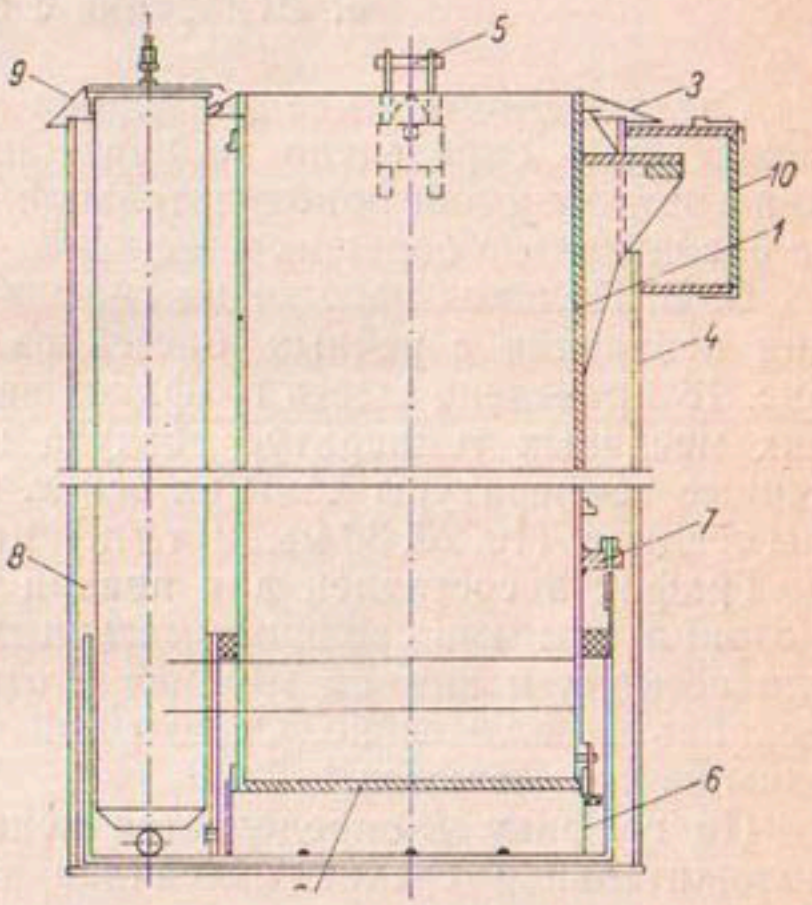


Рис. 13. Лизиметр ГР-80.

1 — внутренний цилиндр с монолитом; *2* — дно; *3* — козырек большой; *4* — наружный цилиндр; *5* — скоба; *6* — футляр обратного фильтра; *7* — бабышка; *8* — водорегулирующее устройство; *9* — козырек малый.

Величина испарения (в миллиметрах) по лизиметру вычисляется по формуле

$$E = \frac{1}{200}(P_1 - P_2) + x + M + k - b, \qquad (5)$$

где P_1 и P_2 — вес лизиметра при предыдущем и текущем взвешивании в граммах, x — сумма осадков над поверхностью почвы за

время между двумя очередными взвешиваниями в миллиметрах; M — количество поданной воды при поливах за это время в миллиметрах; k — количество воды, поданной в лизиметр водорегулирующим устройством, в миллиметрах; b — отлитое из лизиметра количество воды, поступившей в грунтовые воды при поливах или за счет инфильтрации атмосферных осадков.

В лизиметре выращивается исследуемая сельскохозяйственная культура.

6. Испарение с поверхности речных бассейнов

Среднее многолетнее суммарное испарение с речных бассейнов может быть определено по карте изолиний (рис. 14). Эта величина пригодна для приблизительной оценки суммарного испарения со сравнительно больших площадей.

Б. В. Поляков предложил графики для расчета месячных величин испарения с речных бассейнов в разных зонах СССР. На рис. 15 приведено шесть графиков зависимости испарения от средних месячных температур воздуха и сумм осадков. Средние месячные температуры даны на оси x, испарение — на оси y, а суммы осадков (10, 20, 30 мм и т. д.) надписаны над каждой кривой.

График *2* составлен для января и всех последующих месяцев с отрицательными средними месячными температурами, график *6* — для осенних и зимних месяцев с отрицательной температурой по декабрь включительно. Осадки при подсчете испарения за эти месяцы не учитываются.

По графику *1* определяется испарение для первого месяца с положительной средней месячной температурой. Испарение для второго и третьего месяцев с положительными средними месячными температурами воздуха определяются соответственно по графикам *3* и *4*. По графику *5* определяется испарение для четвертого и всех последующих месяцев с положительными средними месячными температурами воздуха.

Б. В. Поляков рекомендует ввести следующие поправки к графикам: для Крайнего Севера (севернее Полярного круга) 0,90, для севера (между Полярным кругом и 58° с. ш.) 0,85—0,90, для центра (территория между 58 и 52° с. ш.) 1,0—1,10, для районов южнее 52° с. ш. 0,80—0,85, в бассейнах рек Десны и Днестра 1,00—1,10.

Суточный и годовой ход испарения с водной поверхности аналогичен ходу температуры воздуха. Самое большое испарение бывает летом в июне или июле. С понижением температуры и дефицита влажности уменьшается испарение. Почти на всей Европейской территории СССР испарение за май — август составляет 60—80% годового.

Испарение в различных районах СССР. Испарение с водной поверхности увеличивается с севера на юг, так как в этом направлении повышается температура и дефицит влажности воздуха и увеличивается продолжительность безморозного периода. Например,

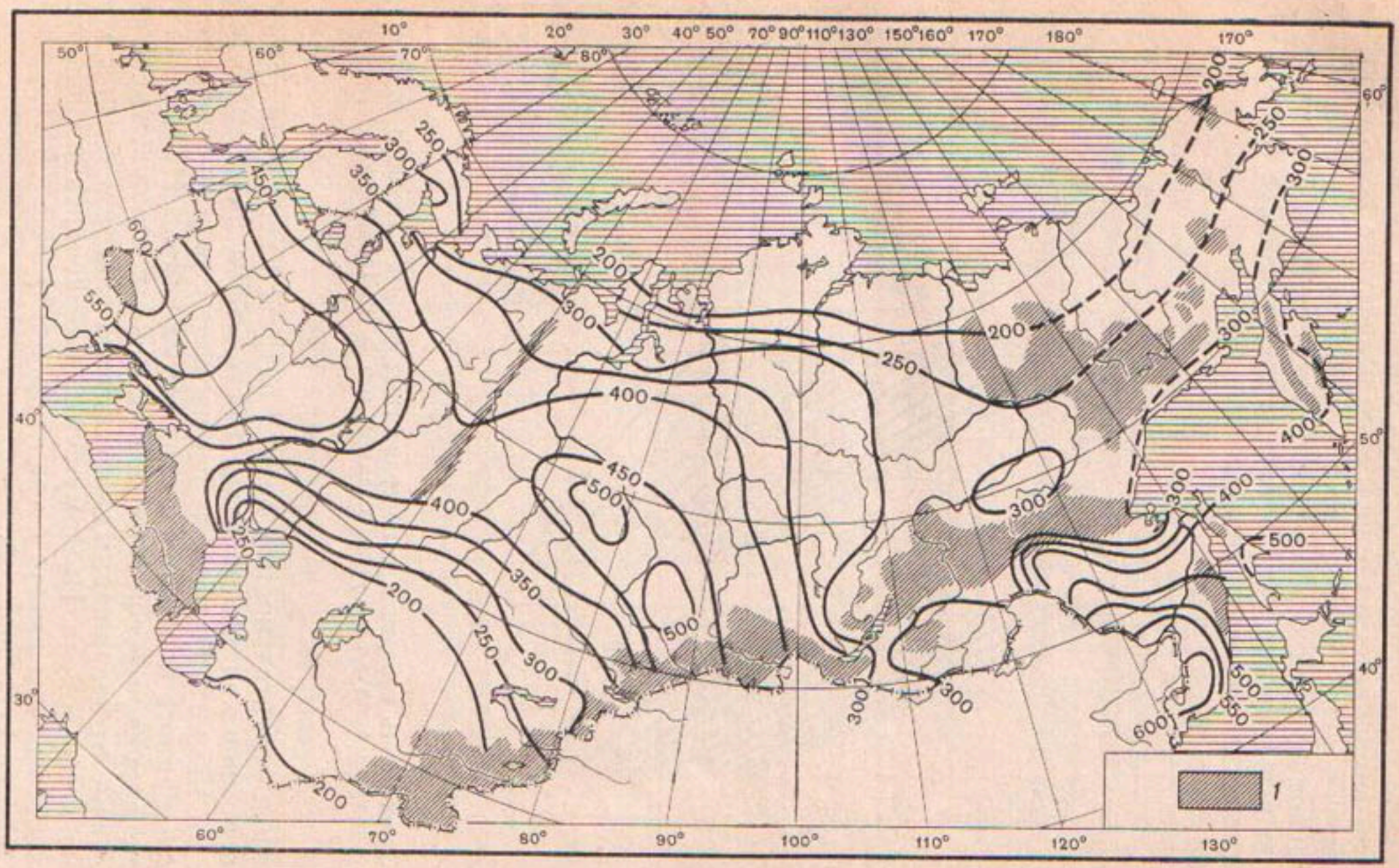


Рис. 14. Среднее многолетнее испарение с речных бассейнов (мм).

1 — горные районы.

на севере СССР высота слоя испарения за год составляет 200 мм, а в пустынной зоне 1700 мм.

Испарение с поверхности речных бассейнов также возрастает с севера на юг. Однако в степной зоне вследствие недостатка влаги в почве испарение уменьшается в направлении к югу. Поэтому максимальное испарение наблюдается в юго-западной части СССР, на Кубани и в Колхиде. На восточном же побережье Каспийского моря испарение уменьшается до 100—150 мм в год. Здесь оно почти такое же, как в тундре.

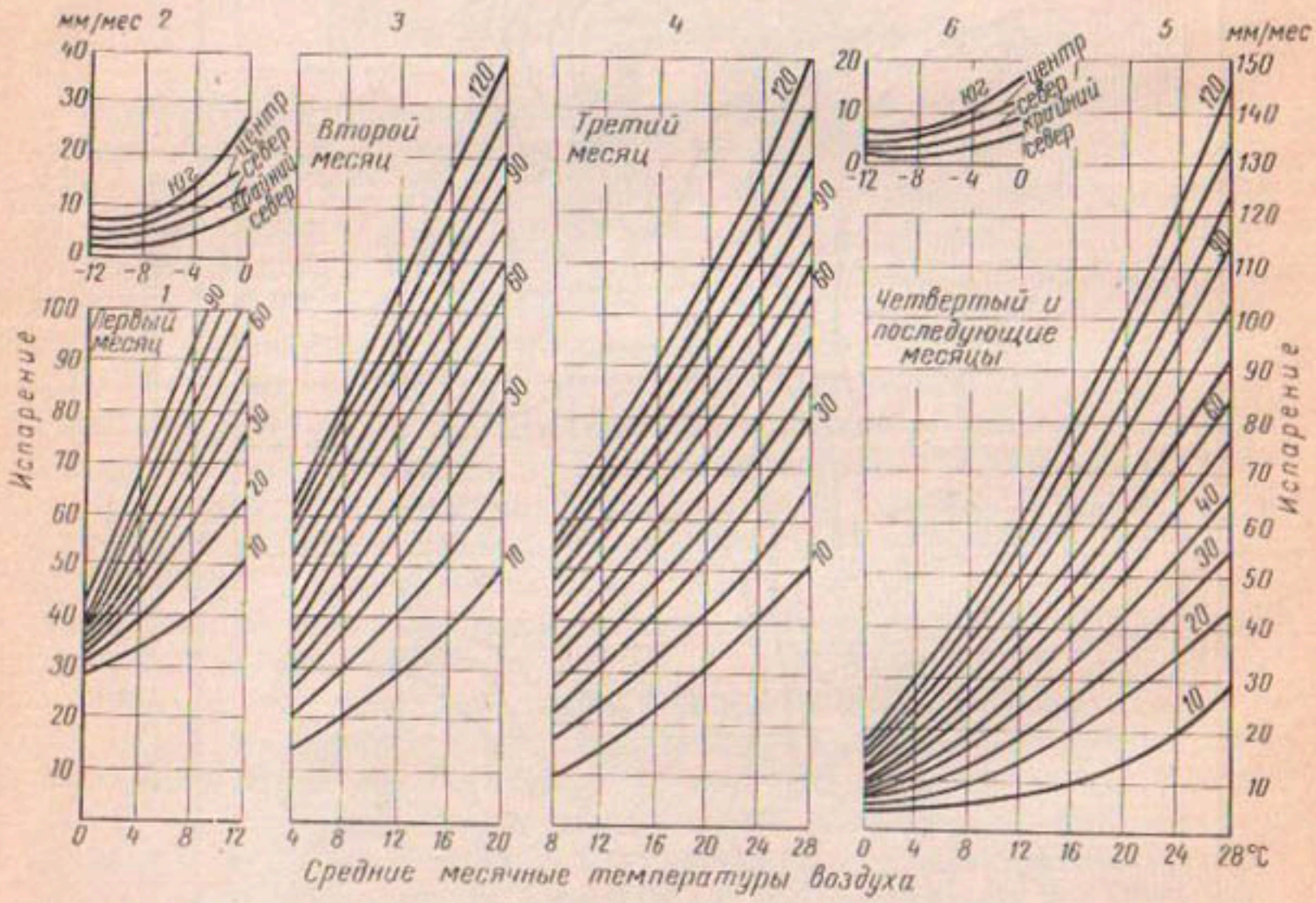


Рис. 15. Зависимость испарения с поверхностных речных бассейнов от температуры воздуха и суммы осадков (по Б. В. Полякову).

Болотная растительность в период активной вегетации транспирирует огромное количество воды. Расход воды на суммарное испарение на 15—20% больше, чем испарение с водной поверхности. **Расчет суммарного испарения с орошаемых земель.** На орошаемых землях испарение имеет некоторые особенности. Орошаемые массивы, в отличие от неорошаемых, обеспечены влагой в течение всего вегетационного периода. Поэтому суммарное испарение (испарение с поверхности почвы вместе с транспирацией) на этой территории больше, чем на неорошаемой.

После полива верхние горизонты почвы сначала увлажнены до полной влагоемкости, т. е. почти все поры заполнены влагой. С поверхности переувлажненной почвы интенсивность испарения боль-

ше, чем с водной поверхности. Затем влага под действием силы тяжести опускается в нижележащие слои. Испарение в связи с этим уменьшается. Оно велико, если почва уплотнена или покрыта коркой. После рыхления испарение резко уменьшается.

В практике проектирования оросительных систем суммарное испарение с орошаемых площадей, занятых разными культурами, рассчитывается по эмпирической формуле С. М. Алпатьева

$$E = k \sum d, \tag{6}$$

где E — суммарное испарение за расчетный период времени (за декаду, за фазу развития растений) в миллиметрах; k — биоклиматический коэффициент, зависящий от биологических особенностей культуры в отдельные фазы ее развития; Σd — сумма среднесуточных дефицитов влажности воздуха за расчетный период времени в миллибарах.

Ориентировочные значения биоклиматических коэффициентов некоторых культур в степной зоне СССР даны в табл. 2.

Таблица 2

Выборочные среднедекадные значения биоклиматических коэффициентов в мм/мб

Культура	№ декады									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Яровая пшеница	—	0,27	0,32	0,37	0,43	0,47	0,43	0,37	0,27	0,27
Кукуруза	—	—	—	—	0,23	0,28	0,31	0,37	0,41	0,46
Картофель летней посадки	—	—	—	—	0,23	0,35	0,41	0,46	0,46	0,41

7. Сгущение водяного пара

Сгущение водяного пара и переход его в жидкое или твердое состояние называется конденсацией. Если пар переходит в твердое состояние, минуя жидкую фазу, то это называется сублимацией.

Рассмотрим причину сгущения водяных паров.

Земная поверхность систематически излучает тепло. Ночью эти потери не компенсируются притоком тепла. Поэтому происходит значительное охлаждение поверхности почвы и растений. Относительная влажность воздуха повышается. В случае перенасыщения водяным паром капельки его выпадают в виде росы. Образованию росы способствуют ясные, безоблачные ночи и небольшие ветры, потому что тогда к охлажденным предметам притекают новые массы влажного воздуха.

Если охлаждение происходит при отрицательных температурах, поверхность почвы и растений покрывается и н е е м. На наветренной части проводов, деревьев, кустов, зданий и т. п. осаждается изморозь, которая по внешнему виду похожа на иней.

Слой льда, осаждающийся на стенах домов, мостовых, деревьях, телеграфных столбах, называют г о л о л е д о м.

Конденсация водяных паров в совершенно чистом воздухе наступает только при очень высоких перенасыщениях. Для образования капелек облаков или тумана в условиях насыщенного пара, а иногда даже при относительной влажности ниже 100% нужно, чтобы в воздухе находились твердые или жидкие частицы: пыль, дым и т. п. Такие частицы называются я д р а м и к о н д е н с а ц и и. Наиболее активные ядра конденсации — частицы солей и кислот. На них водяные пары конденсируются и при относительной влажности 80%.

8. Осадки

Виды осадков: дождь, снег, град, иней, роса. Основная масса воды поступает на поверхность земли из облаков в виде дождя и снега. Количество остальных видов осадков составляет всего около 1% общего объема атмосферных осадков.

Капли дождя или кристаллы снега выпадают из облаков лишь тогда, когда скорость их падения больше скорости восходящих движений воздуха. Кроме того, нижние слои воздуха должны быть насыщены водяным паром, иначе осадки могут испаряться. Поэтому капли дождя и снежинки должны преодолеть не только восходящее движение воздуха, но и пройти, не испарившись, путь от облака до земли. Для этого они должны иметь достаточный вес и относительно большие размеры. Рост капель или снежинок происходит или в силу конденсации водяного пара на их поверхности, или в результате слияния, а также при смерзании капель, попадающих на кристаллы льда.

Осадки выражаются слоем воды (в миллиметрах) равномерно распределенной на площади, покрытой дождем. Если на 1 га выпадает x мм дождя, то объем воды, поступающей на 1 га, составит

$$W = \frac{x}{1000} \cdot 100 \cdot 100 = 10\,x, \qquad (7)$$

где W — объем воды в $м^3$/га.

Ливни. Дожди характеризуются суммой осадков и продолжительностью их выпадения. Отношение суммы осадков к продолжительности их выпадения называется средней и н т е н с и в н о с т ь ю дождя. Средняя интенсивность дождя выражается формулой

$$a = \frac{x}{t}, \qquad (8)$$

где a — интенсивность дождя в мм/мин; x — сумма осадков в миллиметрах, t — продолжительность осадков в минутах.

Интенсивность дождя разнообразна. Обычно осенние дожди охватывают большую территорию и весьма продолжительны. Интенсивность их невелика. Дождь интенсивностью больше 0,3 мм/мин называется ливнем. Ливни, как правило, выпадают летом; в жаркие дни, но иногда они бывают ранней весной и поздней осенью.

В засушливых районах ливни охватывают одновременно, как правило, небольшую территорию (десятки, редко сотни квадратных километров). Из самых сильных известны ливни, выпавшие в 1932 г. в Христиановке (140 мм осадков за 2 ч 30 мин) и в 1963 г. в Вязовке Саратовской области (134 мм осадков за 2 ч).

Ливни играют большую роль в формировании годовых сумм осадков на Дальнем Востоке и в субтропической зоне. Так, в 1885 г. в г. Батуми выпало за одни сутки 261 мм осадков.

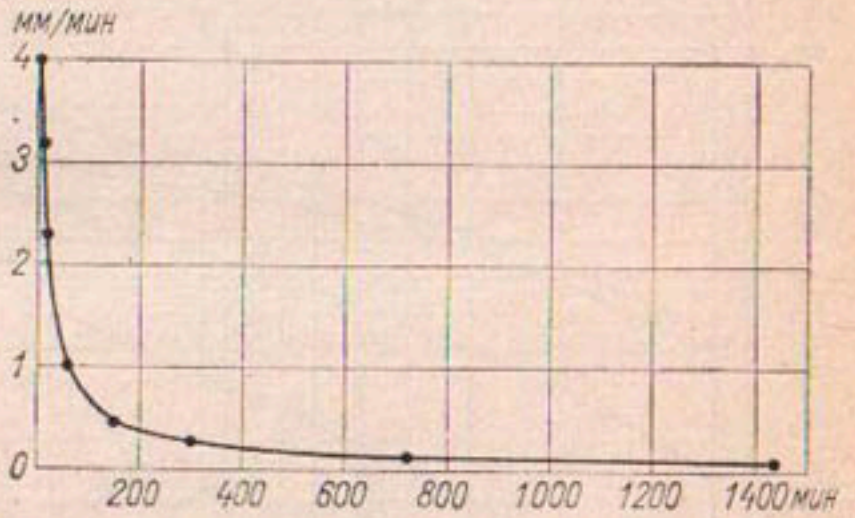


Рис. 17. Кривая зависимости средней интенсивности дождя (повторяемостью 1 раз в 100 лет) от его продолжительности для района г. Свердловска.

Расчетная сумма осадков, выпадающих за время ливня, велика, если рассматривать очень длинный ряд наблюдений, скажем, за 100 лет. Один раз в 100 лет возможен ливень с очень большой суммой осадков. В течение же более короткого срока наблюдений (50, 10 лет и т. д.) такие исключительно большие ливни менее вероятны. Поэтому расчетная сумма осадков будет меньше. На основании имеющихся материалов наблюдений в ГГИ составлена карта изолиний распределения максимального суточного слоя осадков (повторяемостью 1 раз в 100 лет) (рис. 16 на вклейке стр. 32).

Из рис. 16 видно, что максимум суточных сумм осадков, достигающий 260 мм, находится на крайнем Юго-Востоке СССР и в Закавказье (до 300 мм). В центральных районах Европейской территории СССР максимум суточных сумм осадков находится в пределах 90—120 мм.

Минимальная величина (50 мм) приходится на полупустынные и пустынные районы и на Крайний Север СССР (40 мм). С увеличением продолжительности наблюдений соответственно возрастает сумма осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет.

Изменение сумм осадков в зависимости от интенсивности и продолжительности дождя различно в разных природных зонах СССР. На рис. 17 показана кривая средней интенсивности дождя (повторяемостью 1 раз в 100 лет) от его продолжительности для района г. Свердловска.

Из рис. 17 видно, что с увеличением продолжительности дождя уменьшается его интенсивность. Так в разбираемом примере с увеличением продолжительности от 5 до 60 мин интенсивность дождя уменьшается от 4 до 1,0 мм/мин. С дальнейшим увеличением продолжительности интенсивность уменьшается в гораздо меньшей степени.

Суточная сумма осадков не пропорциональна продолжительности их выпадения. Так, если у г. Свердловска слой осадков (повторяемостью 1 раз в 100 лет) при продолжительности 450 мин составляет $0{,}22 \cdot 450 = 100$ мм, то за 26 мин (при уменьшении продолжительности в 17 раз) сумма осадков уменьшается только в 2 раза и составляет $1{,}92 \cdot 26 = 50$ мм. В этом случае коэффициент

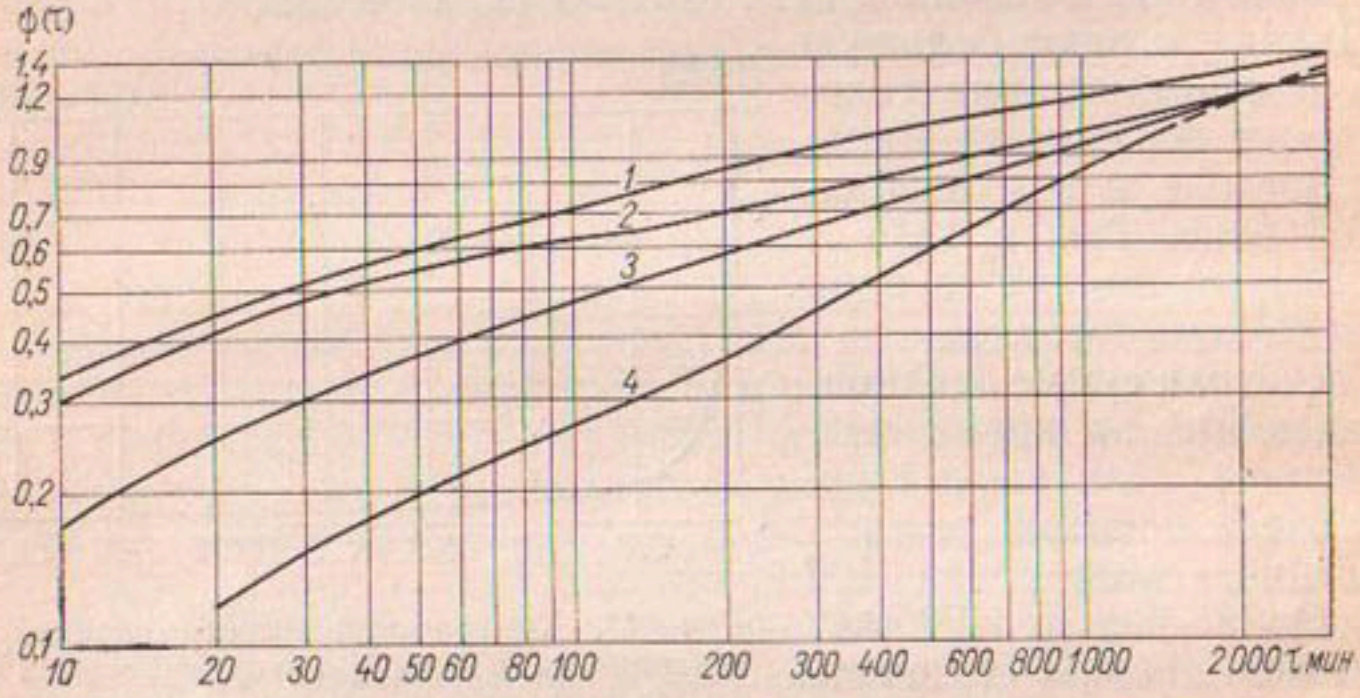


Рис. 18. Типовые кривые редукции слоя осадков в зависимости от интервала времени.

1 — район *2* по карте на рис. 19, *2* — район *3* (Свердловск); *3* — район *8*; *4* — район 12.

уменьшения осадков, или коэффициент редукции, составляет 1 : : 2 = 0,5. Зависимость коэффициента редукции от интервала времени показана на рис. 18 в логарифмическом масштабе. На оси ординат приведен коэффициент редукции $\psi(\tau)$, а на оси абсцисс — интервалы времени τ. Математически это выражается формулой

$$\frac{H_\tau}{H_p} = \psi(\tau), \qquad (9)$$

где H_p — сумма осадков по карте (см. рис. 16); H_τ — сумма осадков при продолжительности τ (мин).

Так, например, у г. Свердловска (рис. 18 *2*) при продолжительности 100 мин $\psi(\tau) = 0{,}62$, а сумма осадков составляет $100 \cdot 0{,}62 = 62$ мм. Коэффициент редукции $\psi(\tau) = 1$ при продолжительности $\tau = 500$ мин. Значит, при этом интервале времени сумма осадков составит $62 \cdot 1 = 62$ мм.

Интенсивность осадков и коэффициенты редукции при разной продолжительности не одинаковы на территории СССР. Они

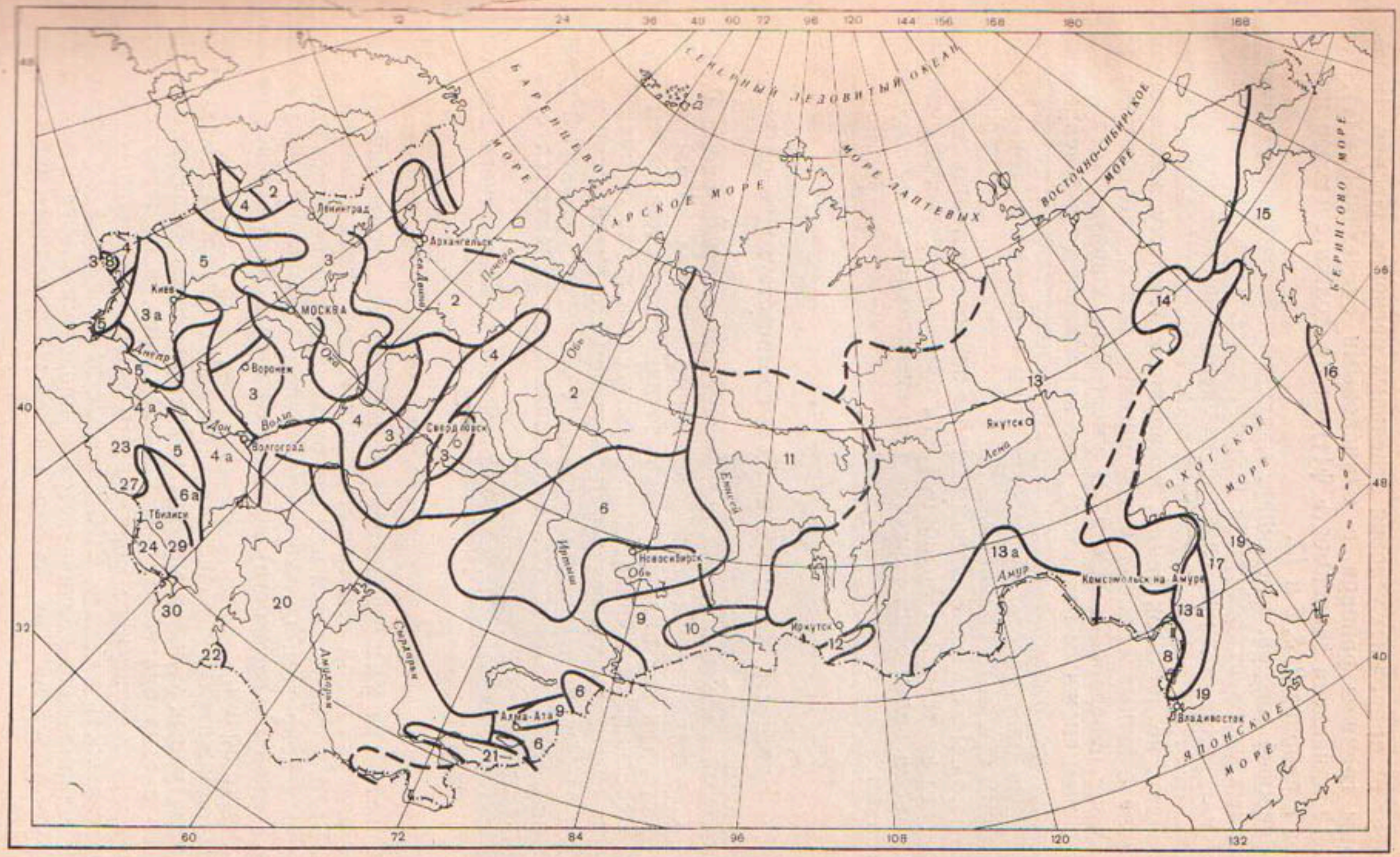


Рис. 19. Районы распространения типовых кривых редукции осадков.

зависят от природных условий отдельных регионов. На рис. 19 показаны границы районов с одинаковыми значениями $\psi(\tau)$. На рис. 18 приведена зависимость $\psi(\tau)$ от продолжительности интервалов в районах 2, *3*, *8* и *12*.

Снежный покров. Снежинки, падая из облаков, переходят из холодных слоев атмосферы в более теплые. При положительных температурах в нижних слоях атмосферы снег может перейти в дождь. Если же размер снежинок мал, а высота падения велика, то осадки, не достигая земли, испаряются. Поэтому, несмотря на наличие снежных облаков в тропическом поясе, снег никогда не достигает поверхности земли. В умеренных широтах (в поясе с временным снежным покровом) снег накапливается в течение зимнего периода и тает с наступлением положительных температур. Полярные пространства и высокие горы относятся к поясу с постоянным снежным покровом.

Запасы воды в снежном покрове зависят от толщины и плотности его залегания. Плотность снега представляет собой отношение объема воды, образующейся при снеготаянии, к объему снега до таяния

$$\delta = \frac{W_в}{W_с}, \qquad (10)$$

где δ — плотность снега; $W_в$ и $W_с$ — соответствующие объемы воды и снега.

Рыхлый свежевыпавший снег имеет плотность порядка 0,10—0,15. С увеличением толщины снежного покрова возрастает его плотность, так как нижние слои уплотняются под давлением верхних. Особенно увеличивается плотность снега после оттепелей и в период снеготаяния в связи с насыщением его водой. Если в течение зимы бывает несколько оттепелей, образуется слоистый снежный покров, в котором более плотные слои чередуются с менее плотными.

Высота слоя воды $h_в$, образующейся от таяния снега высотой $h_с$, составляет

$$h_в = \delta h_с. \qquad (11)$$

Снеготаяние происходит в результате вторжения теплых масс воздуха и под непосредственным воздействием солнечных лучей. Вода, образующаяся при снеготаянии, постепенно поглощается снежным покровом. Только после полного насыщения снега водой (до полной влагоемкости) вода опускается вниз и стекает по поверхности почвы.

Продолжительность залегания снежного покрова зависит от температурных условий местности. На побережье Северного Ледовитого океана она составляет 240—260 дней, а на юго-восточном побережье Каспийского моря — всего лишь 3—4 дня в году. Континентальность климата СССР возрастает с запада на восток. В этом направлении увеличивается и продолжительность залегания снежного покрова. Так, на одной и той же параллели 60° снег ле-

жит на побережье Балтийского моря в среднем около 80 дней, а в Западной Сибири — 200 дней.

Приборы для измерения осадков. Основной прибор для измерения осадков — осадкомер Третьякова (рис. 20). Осадкомер состоит из ведра с площадью приемной поверхности, равной 200 см². Ведро устанавливают на столбе в тагане так, чтобы верхний край его был на высоте 2 м от поверхности почвы. От выдувания осадков ветром прибор защищен изогнутыми металлическими планками.

Для измерения осадков накопившуюся воду переливают в измерительный стакан, каждое деление которого соответствует слою 0,1 мм.

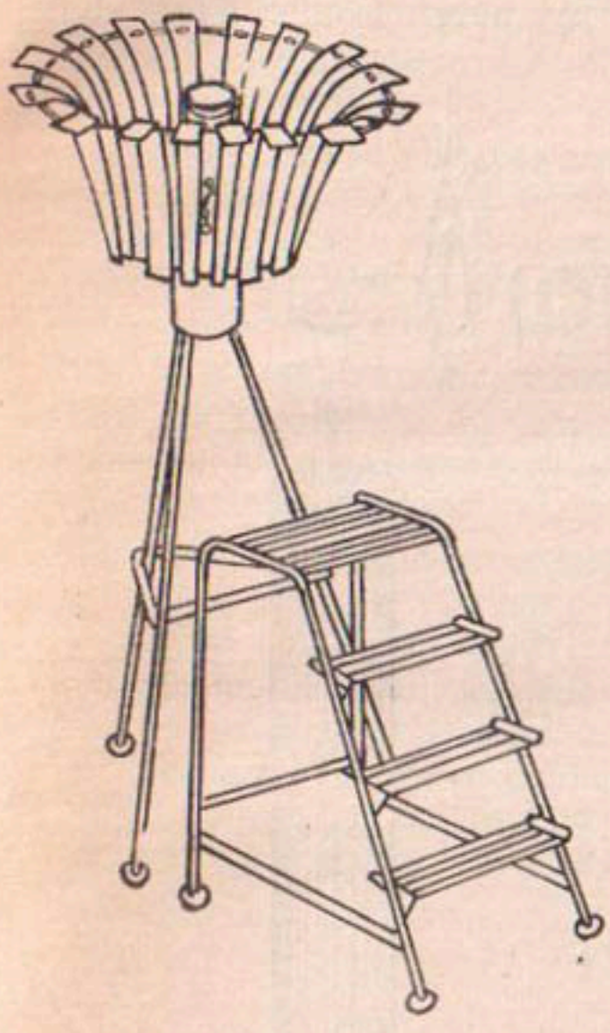


Рис. 20. Осадкомер Третьякова.

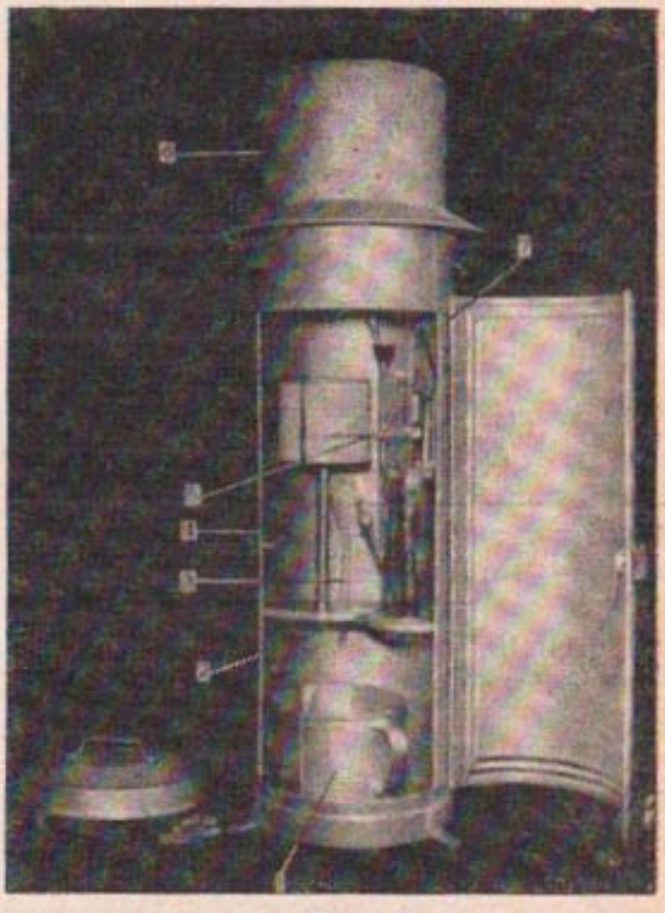


Рис. 21. Плювиограф.

1 — приемный сосуд; *2* — сосуд; *3* — сифон; *4* — кожух; *5* — перо самописца; *6* — дождемерное ведро; *7* — стержень с поплавком.

Для автоматической записи количества дождя и его продолжительности служит плювиограф (рис. 21). Осадки в плювиографе улавливаются дождемерным ведром площадью 500 см². Из дождемера вода стекает по трубке в специальный сосуд с поплавком. Когда уровень воды поднимается, поплавок всплывает вверх. На стержне, прикрепленном к поплавку, привинчено перо самописца. Бумажная лента надета на барабан, вращаемый часовым механизмом. После наполнения сосуда вода через сифон выливается, поплавок опускается на дно сосуда; в это время перо вычерчивает на ленте нисходящую вертикальную линию. По записи на ленте опре-

деляют начало и конец дождя, количество выпавшей воды, а следовательно, и интенсивность осадков.

Высоту снежного покрова на метеорологических станциях определяют при помощи снегомерных реек.

Плотность и высоту снега, а следовательно, и запасы воды в снежном покрове определяют весовым снегомером, или плотномером (рис. 22). Это цилиндр с заостренным кольцом с одной стороны. Площадь его приемной поверхности равна 50 см². На стенке цилиндра нанесена сантиметровая шкала. Крышка цилиндра съемная. При взятии пробы цилиндр погружается в снег. Под кольцо

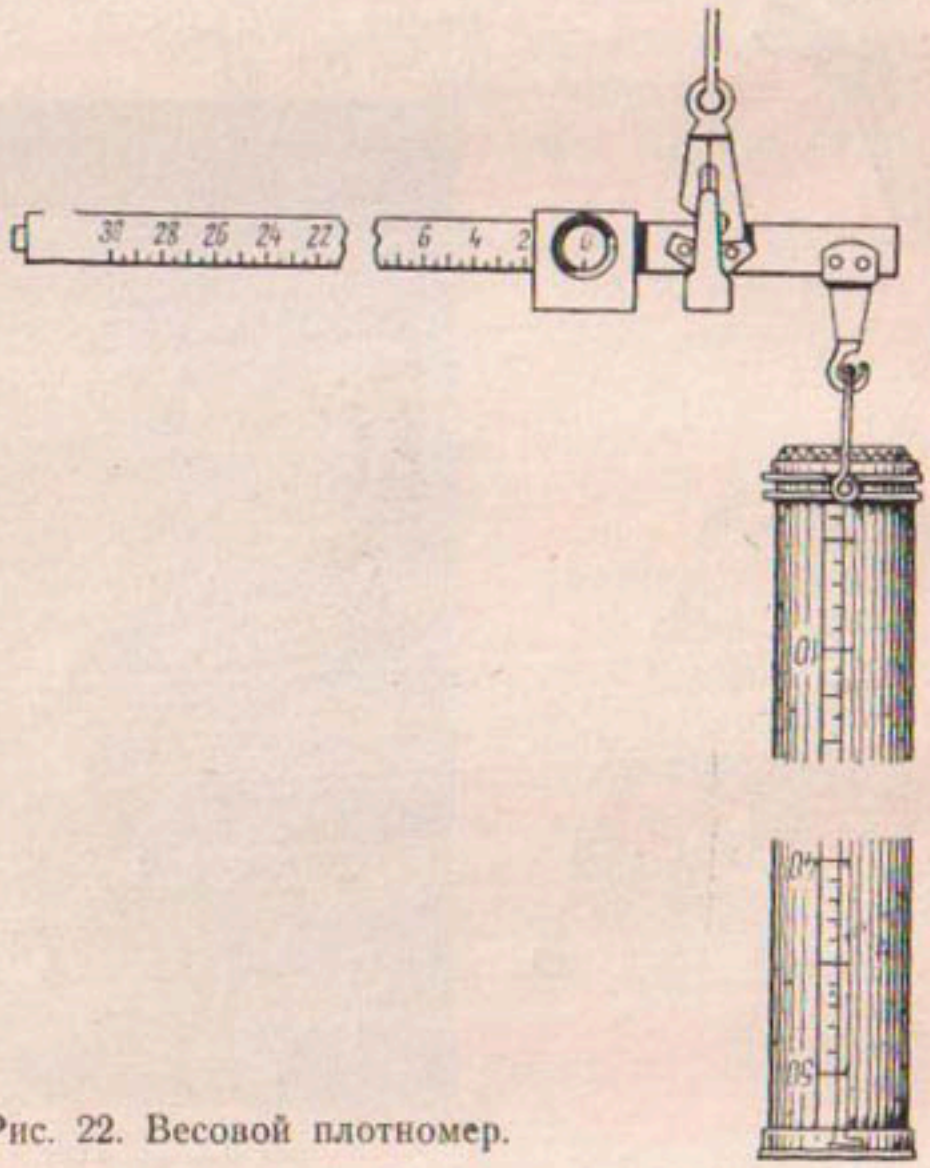


Рис. 22. Весовой плотномер.

подводится лопатка. После этого цилиндр поднимается и опрокидывается. Снег взвешивают при помощи безмена с точностью 5 г.

Если высота снежного покрова составляет h_c см, а плотность его δ, то объем его в см³ составляет $W_c = 50h_c$, а вес снега в граммах

$$W_0 = 50\, h_c \delta. \tag{12}$$

Так как одно деление на коромысле соответствует весу снега 5 г, то при n делениях вес снега в граммах $W_0 = 5n$. Из равенства $5n = 50\, h_c\delta$ находим плотность снега

$$\delta = \frac{5\,n}{50\,h_c} = \frac{n}{10\,h_c}. \tag{13}$$

Запас воды в снеге

$$h_в = \delta h_с = \frac{nh_с}{10\,h_с} = \frac{n}{10}\ [см] = n\ [мм]. \qquad (14)$$

Распределение средних многолетних годовых осадков на территории СССР показано на рис. 23 в виде изогиет (линий равных сумм осадков). Из рисунка видно, что больше всего осадков (2500—2700 мм в год) выпадает на Черноморском побережье Кавказа. Сумма осадков понижается с 700 мм на северо-западе ЕТС до 200 мм в Прикаспийской низменности и менее 100 мм в пустынях Средней Азии.

Большую роль в распределении осадков играет рельеф, удаленность от моря и другие факторы. Количество осадков возрастает с высотой местности. На наветренных склонах высоких гор сумма осадков больше, чем на подветренных склонах.

На территории СССР преобладают в основном летние осадки.

Способы вычисления количества осадков. Метеорологические станции распределены по территории страны весьма неравномерно. Иногда они находятся за пределами участка, для которого необходимо определить сумму осадков.

Для расчета среднего количества осадков на заданной территории применяются следующие способы.

1. Способ средней арифметической — наиболее простой, но и наименее точный. Его применяют только для территорий с равнинным рельефом при наличии достаточно густой сети метеорологических станций. В этом случае среднее количество осадков для всей территории $x_{ср}$ вычисляют делением суммы осадков Σx, зарегистрированных всеми станциями, на число станций n

$$x_{ср} = \frac{\Sigma x}{n}. \qquad (15)$$

2. Метод квадратов применим для больших площадей. Вся площадь территории делится на сеть равновеликих квадратов. Среднеарифметическую из сумм осадков на всех станциях, расположенных в квадрате, принимают за сумму осадков этого квадрата. Если в данном квадрате нет метеорологических станций, принимают среднюю величину по данным двух ближайших станций. Средняя величина осадков всей территории получается как среднеарифметическая из величин осадков всех квадратов.

3. Метод изогиет применяется при более точных подсчетах. Для построения изогиет необходимо в точках расположения метеорологических станций выписать наблюденные суммы осадков. После этого проводят изогиеты (линии равных сумм осадков) точно так же, как вычерчивают горизонтали рельефа местности. Средняя сумма осадков (рис. 24) вычисляется как средневзвешенная величина для всей территории. Для этого площадь между соседними изогиетами $f_1, f_2, \ldots, f_n$ умножают на среднюю сумму осадков

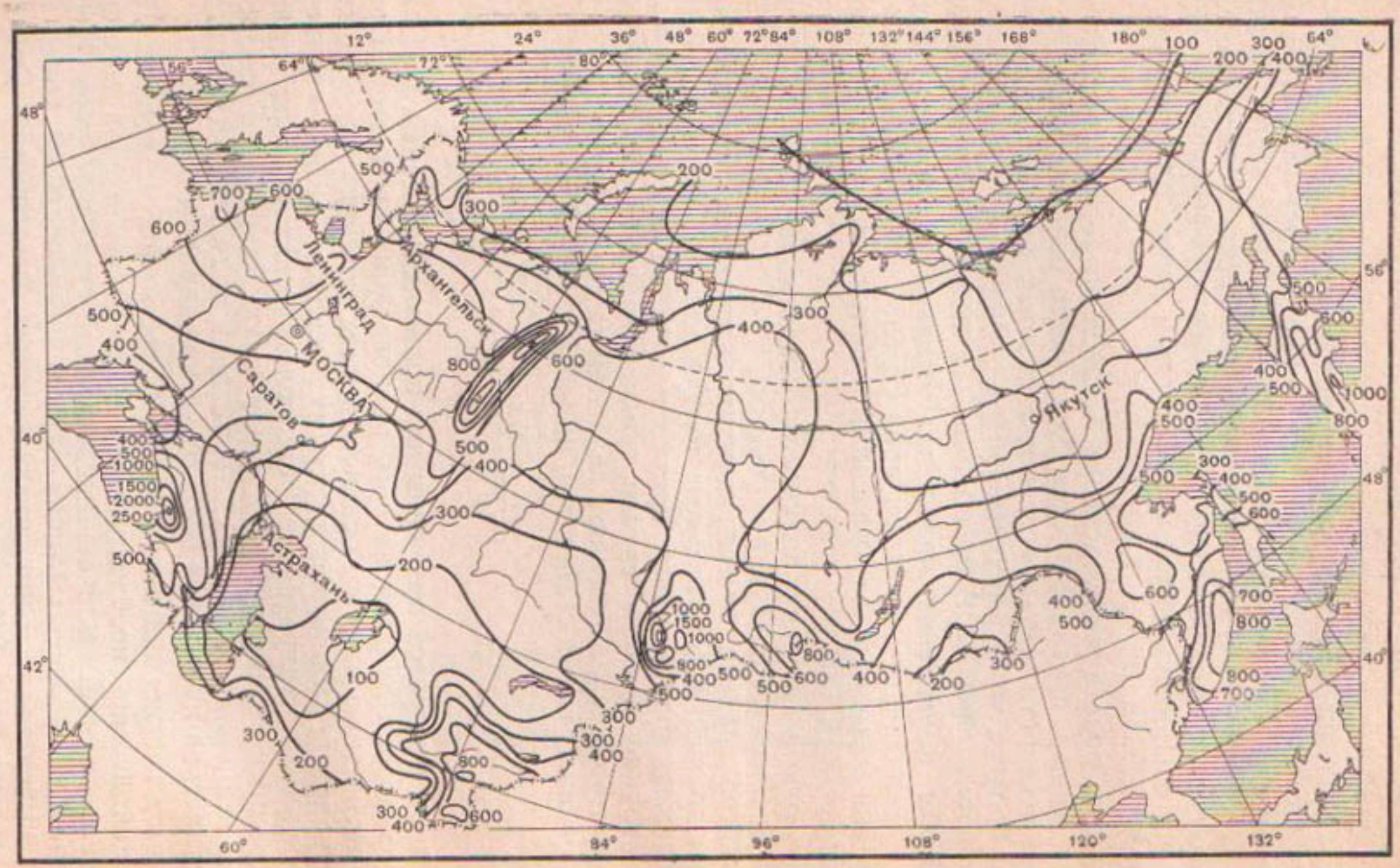


Рис. 23. Средние многолетние годовые суммы осадков на территории СССР.

между ними, т. е. f_1 умножают на $\frac{x_1 + x_2}{2}$ и т. д. Полученные результаты суммируют, а сумму делят на всю площадь территории Σf

$$x_{ср} = \frac{\frac{x_1 + x_2}{2} f_1 + \frac{x_2 + x_3}{2} f_2 + \ldots + \frac{x_{n-1} + x_n}{2} f_n}{\Sigma f}. \qquad (16)$$

4. При применении метода взвешивания всю территорию разбивают на участки следующим образом (рис. 25). Точки *1—6* расположения метеорологических станций соединяют прямыми линия-

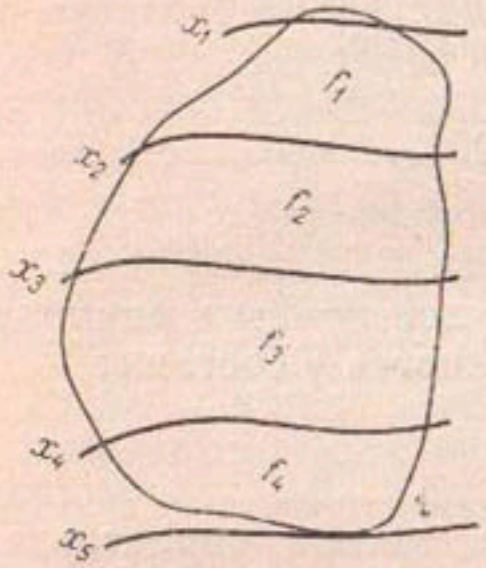


Рис. 24. Вычисление средней суммы осадков методом изогиет.

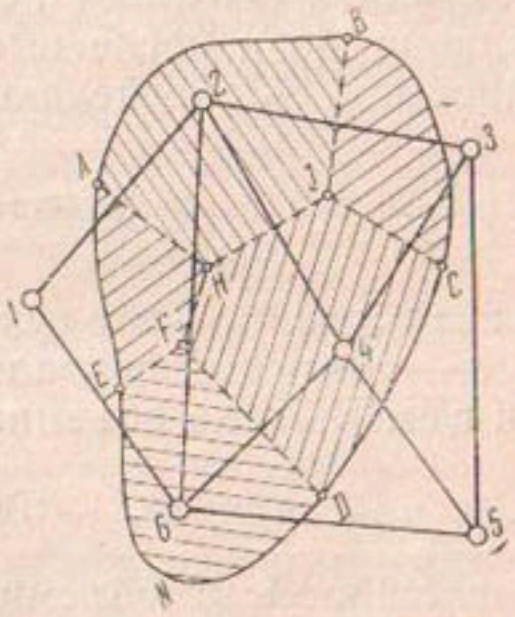


Рис. 25. Вычисление среднего количества осадков для территории методом взвешивания.

ми. Получают треугольники *126*, *246*, *234*, *435*, *645*. Из середины каждой стороны восстанавливают перпендикуляры внутрь треугольника до их пересечения. Таким образом, исследуемая территория *ABCДE* разделена перпендикулярами на контуры *ABJH*, *BCJ* и другие. К контуру *AHFE* относится ближайшая станция *1*, к контуру *ABJH* станция *2* и т. д. Умножив площадь каждого контура на сумму осадков соответствующей станции, получают объем осадков для каждого контура. Частное от деления объема осадков всех контуров на их суммарную площадь составляет средневзвешенную сумму осадков всей территории.

9. Вода в почве

Часть атмосферных осадков, выпадающих на поверхность земли, поглощается почвой, а часть испаряется и стекает в понижения и водоемы. Почва увлажняется и грунтовыми водами, если они залегают близко от поверхности. В этом случае грунтовая вода поднимается вверх по капиллярам. Высота поднятия грунтовой

воды, или зона капиллярной каймы, зависит от механического состава грунта: она обратно пропорциональна диаметру капилляров и составляет 2—3 м у глин, 1,5—2 м у суглинков и 30—50 см у песков.

Количество воды, находящейся в почве, обусловливает ее влажность, которая выражается в весовых или объемных процентах, т. е. в процентах от веса или объема почвы. Для определения влажности буром берется образец почвы. Образец помещают в алюминиевый стакан и взвешивают на технических весах. Затем почву высушивают в течение 6 ч при температуре 105—110° С, после чего вновь взвешивают. Из полученной величины вычитают вес стаканчика и получают вес высушенного образца почвы. Разность величин до и после высушивания составляет вес воды.

Влажность $\gamma_в$ % определяют по формуле:

$$\gamma_в = \frac{h_в}{h_п} \cdot 100\%, \qquad (17)$$

где $h_в$ — вес воды; $h_п$ — вес сухой почвы.

Пусть r — объемный вес, или вес сухой почвы в единице объема (т/м^3 или г/см^3). Тогда объемная влажность γ составит

$$\gamma_0 = r\gamma_в. \qquad (18)$$

Зная влажность и объемный вес, можно определить запасы влаги в почве. Рассуждаем следующим образом. В одном гектаре почвы толщиной слоя h (метры) имеется объем почвы $100 \times 100 \times h$ (м^3). При объемном весе r вес почвы составит $100 \times 100 \times h \times r$. Так как в почве имеется $\gamma_в$ % влаги, то вес воды (т/га) или объем (м^3/га) составит

$$W = \frac{100 \cdot 100\, hr\gamma_в}{100} = 100\, hr\gamma_в = 100\, h\gamma_0. \qquad (19)$$

Высушенный до абсолютно сухого состояния (в течение 6 ч при температуре 105—110° С) образец почвы поглощает водяной пар из воздуха. Максимальное количество влаги, поглощаемой абсолютно сухой почвой из воздуха при относительной влажности 94%, называется максимальной гигроскопичностью (МГ). Эта влага удерживается частицами почвы с силой около 50 ат.

В зависимости от механического состава почвы максимальная гигроскопичность глины и тяжелых суглинков равна 11—12%, среднесуглинистых почв и грунтов 7—8%, песков 2—3%.

Запас воды при влажности почвы, соответствующей 1,3—1,5 максимальной гигроскопичности, называется мертвым запасом. Так, например, в метровом слое глинистой почвы при $r = 1{,}45$ г/см^3 и при влажности, равной максимальной гигроскопичности, $\gamma_в = 11\%$ мертвый запас составляет $100 \times 1 \times 1{,}45 \times 11 \times 1{,}5 = 2392$ м^3/га. Эта вода прочно связана с почвенными частицами и не может быть использована растениями.

Вода, поступающая в почву во время снеготаяния, дождя или поливов, размещается в капиллярах. Глубина увлажнения почвы при этом зависит от количества поступившей воды. Максимальное количество воды, которое может удержаться в капиллярах, не опускаясь вниз, соответствует предельной полевой влагоемкости (ППВ).

Величина ППВ составляет: для глинистых почв около 24—32%, для тяжелосуглинистых 20—26% и для среднесуглинистых 18—24%.

Влажность почвы определенного механического состава зависит от количества осадков, стока, испарения и транспирации, которые сильно меняются в течение года и на разных сельскохозяйственных угодьях. Так, в лесу часть дождевых осадков задерживается кронами деревьев и не попадает в почву. Снег в лесу сохраняется полностью, в поле же часть снега сносится ветром в овраги и русла рек, вообще в понижения рельефа. Снеговые воды в лесу мало стекают; большая часть их впитывается в почву. Поэтому весной почва в лесу увлажнена лучше, чем в поле.

Летом суммарное водопотребление больше на полях, занятых влаголюбивыми культурами. Причем решающую роль играет продолжительность вегетационного периода. Поэтому в степной и лесостепной зонах к концу вегетации больше иссушены почвы, занятые многолетними травами, залежью, целиной, под лесополосами. В меньшей степени иссушается почва из-под ранних яровых и озимых посевов.

10. Давление воздуха

Так как воздух имеет вес, то он давит на земную поверхность. Давление воздуха, или атмосферное давление, равняется весу столба атмосферы, приходящейся на единицу площади. За нормальное атмосферное давление (или одну атмосферу) на широте 45° на уровне моря при температуре 0° С принято давление 760 мм ртутного столба. В метеорологии атмосферное давление обычно выражается в миллибарах. Тысяча миллибар (один бар) равна 750,1 мм ртутного столба. Один миллиметр ртутного столба соответствует 1,33 миллибара. Нормальное атмосферное давление равно 1013 мб (в системе СИ $1{,}013 \cdot 10^5$ Па).

Приборы для измерения давления воздуха. Атмосферное давление измеряется барометрами. Применяются два типа барометров: ртутные и анероиды. Ртутный барометр более точный прибор, чем анероид. Он представляет собой трубку длиной около 1 м, запаянную с одного конца. Трубка открытым концом опущена в чашку со ртутью. Ртуть в трубке удерживается атмосферным давлением, действующим на поверхность ртути, находящейся в чашке. Чем больше давление, тем выше поднимается ртуть в трубке (рис. 26). Отсчет по ртутному барометру производится при помощи нониуса.

Барометр анероид (рис. 27) представляет собой гофрированную круглую металлическую коробку. Внутри коробки воздух сильно разрежен. При увеличении давления коробка сжимается, а при уменьшении давления коробка растягивается. Эти деформации коробки передаются при помощи систем рычагов на стрелку, движущуюся по циферблату.



Рис. 26. Ртутный барометр.

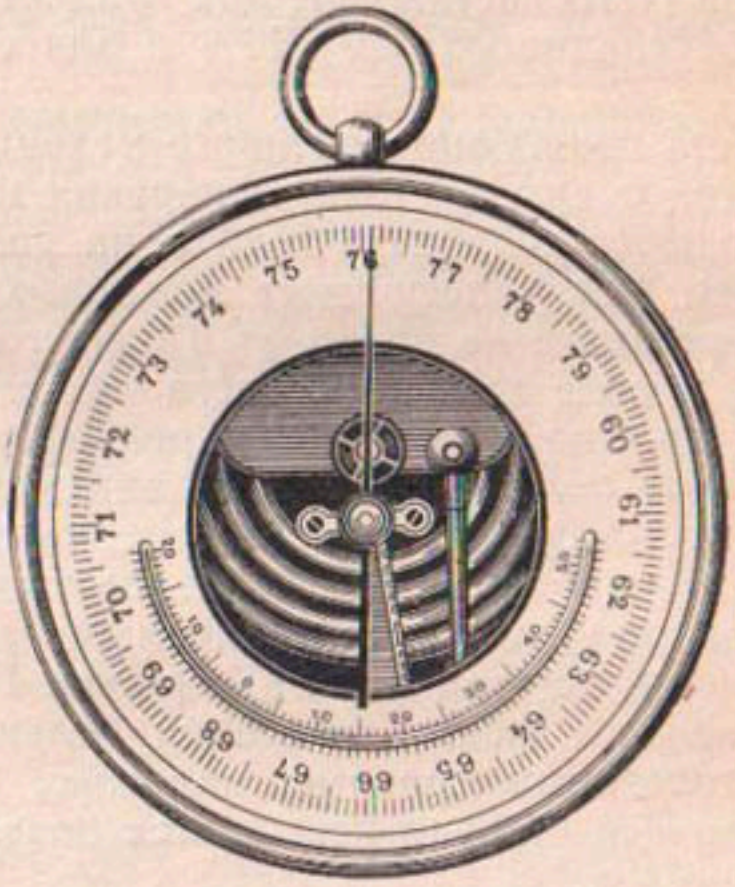


Рис. 27. Барометр анероид.

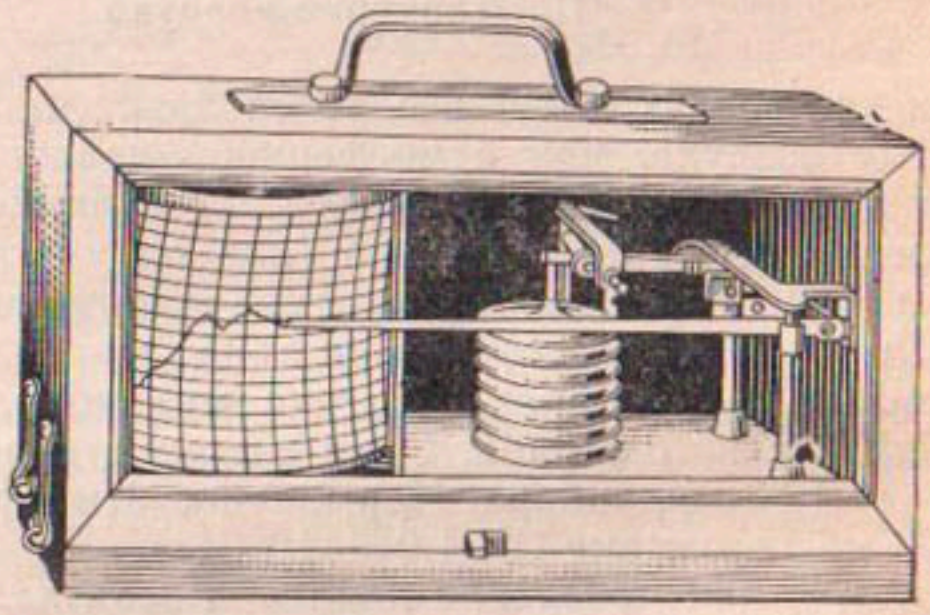


Рис. 28. Барограф.

Самопишущий барометр называется барографом (рис. 28). Здесь давление воспринимается серией анероидных воздухонепроницаемых коробок, из которых выкачан воздух. При увеличении атмосферного давления коробки сжимаются, вследствие чего перо поднимается кверху. При уменьшении давления происходит обрат-

ное действие. При этом перо вычерчивает линию колебания давления на ленте, надетой на барабан часового механизма.

В наблюденную величину давления по барометру вводится ряд поправок. Они исключают влияние температуры и силы тяжести, а также неточности самого инструмента, допущенные при его изготовлении. Инструментальная поправка дана в приложении к инструменту, а температурная поправка и поправка для приведения к нормальной тяжести даны в психрометрических таблицах.

Суточные колебания давления составляют от 0,2 до нескольких миллиметров ртутного столба, а в отдельных случаях — до 10 мм и более. Годовые колебания больше суточных и достигают нескольких десятков миллиметров.

С увеличением высоты атмосфера постепенно разрежается, а давление уменьшается. На каждые 100 м высоты давление воздуха уменьшается на 10,5 мм.

Если на карте провести линии через точки с одинаковыми величинами давления воздуха, то получается карта изобар, которая широко используется для прогнозов погоды.

11. Ветер

Ветер представляет собой движение воздушных масс над земной поверхностью. Воздушные массы передвигаются в направлении от мест с большим к местам с меньшим давлением. Они отклоняются от этого направления под влиянием вращения земли и силы трения. Чем больше разность давления, тем быстрее движется воздух, тем сильнее ветер.

В зависимости от направления движения воздуха, обусловленного разностью температур в продолжение суток или периодов года, различают несколько типов ветров.

Береговые ветры, или бризы, днем дуют с более холодного моря по направлению нагретой суши, а ночью, наоборот, с суши на море.

Горные и долинные ветры дуют днем из долин в горы, а ночью с гор в долины.

Муссоны — ветры приморских стран. Они дуют летом с Индийского и Тихого океанов на Азиатский материк (летний муссон). Зимою же, наоборот, ветры дуют с материка на океан (зимний муссон).

Кроме направления, ветер характеризуется еще и скоростью. Скорость ветра выражается в м/с и в баллах. Для перехода от баллов к м/с пользуются табл. 3.

Приборы для определения направления и скорости ветра. Основным прибором для определения направления и скорости ветра на метеорологических станциях служит флюгер Вильда (рис. 29). Его устанавливают на столбе высотой 10—12 м. Состоит из наглухо установленных указателей направления, флюгарки с противовесом и железной рамы с дугой и штифтом. К верхней части рамы

Таблица 3

Связь между скоростью ветра в баллах и м/с

Баллы	Скорость, м/с	Баллы	Скорость, м/с
0	0—0,5	6	9,9—12,4
1	0,6—1,7	7	12,5—15,2
2	1,8—3,3	8	15,3—18,2
3	3,4—5,2	9	18,3—21,5
4	5,3—7,4	10	21,6—25,1
5	7,5—9,8	11	25,2—29,0

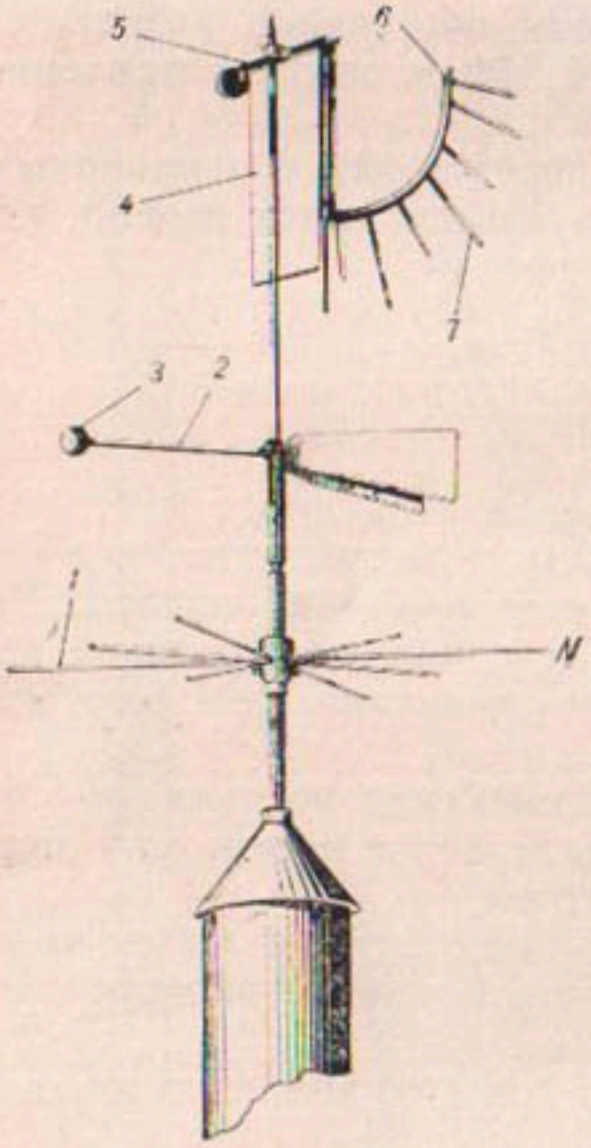


Рис. 29. Флюгер Вильда.

1 — указатели направления; *2* — флюгарка; *3* — противовес; *4* — доска; *5* — железная рама; *6* — дуга; *7* — штифт.

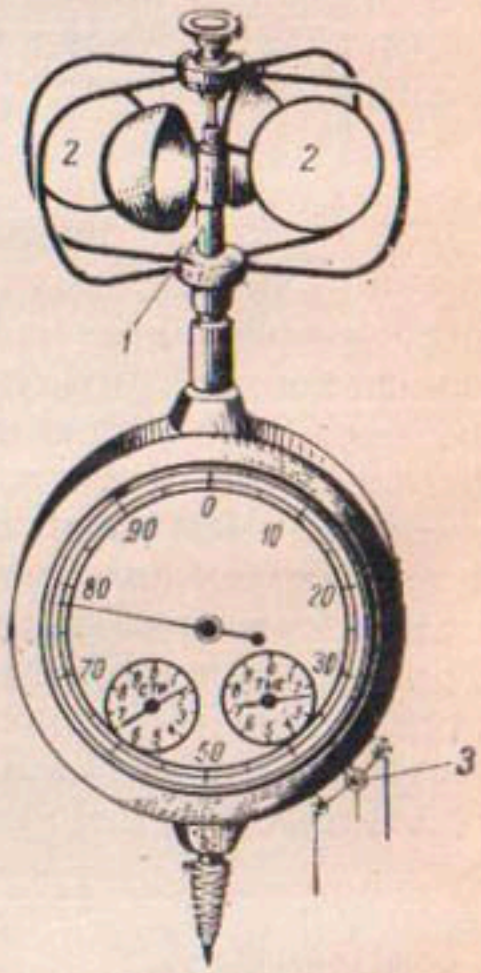


Рис. 30. Анемометр.

1 — вертикальная ось; *2* — полушария; *3* — пусковой механизм.

шарнирно прикреплена доска. Железные стержни (указатели направления) расположены по направлению восьми румбов. Стержень с буквой N ориентирован строго на север; противоположный конец — на юг. Остальные стержни направлены на северо-восток, восток, юго-восток, юго-запад, запад и северо-запад. Международные обозначения румбов N, S, NE, E, SE, SW, W, NW.

На стержень надета свободно вращающаяся железная трубка. К нижней части трубки прикреплена флюгарка, которая вра-

щается под действием ветра. Стержень с противовесом и плоскость железной доски направлены навстречу ветру. Чем сильнее ветер, тем сильнее отклоняется доска от вертикального положения. Скорость ветра определяется в зависимости от положения доски по отношению к штифтам по табл. 4.

Таблица 4

Связь между скоростью ветра и положением доски флюгера

№ штифта	Скорость, м/с	№ штифта	Скорость, м/с	№ штифта	Скорость, м/с	№ штифта	Скорость, м/с
1	0	3	4	5	8	7	11
1—2	1	3—4	5	5—6	9	7—8	17
2	2	4	6	6	10	8	20
2—3	3	4—5	7	6—7	12	>8	>20

В табл. 4 приведены скорости ветра для легкой доски весом 200 г. Для измерения скорости ветра, превышающей 20 м/с, применяют тяжелую доску весом 800 г. Для нее есть своя таблица скоростей.

В походных условиях скорость ветра измеряют ручным анемометром (рис. 30). Он имеет четыре полушария, вращающиеся на вертикальной оси. Число оборотов передается через зубчатки к счетчику оборотов. Зная число оборотов N, продолжительность работы анемометра t (секунд), устанавливают число оборотов n в секунду: $n=\frac{N}{t}$. К каждому анемометру приложен сертификат, в котором указаны скорости ветра в зависимости от n.

Для наглядного изображения ветрового режима строят график, называемый розой ветров (см. рис. 33). В упражнении 7 даны указания, как построить розу ветров.

ТЕМА 3. КЛИМАТ, ПОГОДА И ЕЕ ПРОГНОЗЫ

12. Понятие о погоде и климате

Сочетание наблюденных метеорологических элементов (температуры, силы и направления ветра, влажности воздуха, осадков и т. д.) в данном месте за короткий промежуток времени (за одни сутки, месяц, год) определяет состояние погоды за этот отрезок времени. Так, когда нет дождей и температура воздуха высокая, стоит сухая жаркая погода. Бывает погода дождливая, солнечная, ветреная, морозная и т. д.

Климат — это совокупность возможных в данном месте погод, их распределения по временам года, сезонам, периодам, повторяемости и последовательности их появления.

Климат территории является основным, ведущим показателем физико-географических условий. С климатом связан характер почвенного покрова, растительного и животного мира.

13. Типы воздушных масс

Температура слоев атмосферы зависит от характера поверхности земли, с которой эти слои соприкасаются. На одной и той же широте температура воздуха над океаном ниже, а влажность воздуха выше, чем над сушей. Поэтому над сушей формируется континентальная, т. е. сухая, теплая или жаркая с большим содержанием пыли, воздушная масса. Над океаном формируется морская воздушная масса с более низкой температурой, большей влажностью и меньшим содержанием пыли. Так как земная поверхность очень разнообразна (почвы, растительный покров, площади суши и воды), то разнообразны и воздушные массы над ней. Воздушные массы простираются по горизонтали на тысячи километров, а по вертикали иногда достигают верхней границы тропосферы.

Над Арктикой формируется арктическая воздушная масса, которая вторгается чаще всего с Карского моря, через Западную Сибирь и Забайкалье.

На континентах и океанах, расположенных между 40 и 70-й параллелями, формируются воздушные массы умеренных широт.

На широте 30—40° (в Казахстане, Нижнем Поволжье и на Кавказе) формируются тропические воздушные массы, а в экваториальных областях до 10° северной широты — экваториальные воздушные массы.

Если континентальная воздушная масса проходит над водной поверхностью, она охлаждается и обогащается водяным паром и постепенно трансформируется в морскую. Морская же воздушная масса, выходя на материк, летом постепенно подогревается и как более легкая поднимается вверх, что может сопровождаться образованием облаков и выпадением осадков. Зимой же морская воздушная масса над материком охлаждается. Постепенно она приобретает свойства континентальной воздушной массы. Расположенные рядом воздушные массы могут иметь разные температуры. Поэтому относительно более теплая воздушная масса (независимо от величины самой температуры) называется теплой. Более холодная масса называется холодной. Поверхность раздела между двумя воздушными массами называется фронтальной, а пересечение фронтальной поверхности с земной поверхностью называется линией фронта, или фронтом.

Возможны два варианта движения воздушных масс: теплая масса наступает на холодную. В этом случае фронт называют

теплым. Когда холодная воздушная масса наступает на теплую, фронт называют холодным.

При длительном преобладании тех или иных движений воздушных масс на обширных территориях в разных географических зонах формируется полярный, арктический, тропический и другие типы климата.

Циклоны, антициклоны. Воздушные массы движутся от мест с большим давлением к местам с меньшим давлением. Значения давления воздуха в миллибарах выписывают на карте. Точки с одинаковым давлением на карте соединяют линиями, называемыми изобарами. Некоторые из них представляют собой кривые, близкие к окружностям или эллипсам. В центре замкнутых изобар давление либо наименьшее, увеличивающееся к периферии, либо, наоборот, наибольшее, уменьшающееся к периферии. Так как ветры направлены от мест с большим давлением к местам с меньшим давлением, то в первых системах изобар ветер направлен к центру и против часовой стрелки. Такие системы называются циклонами (рис. 31 *б*). Во вторых системах ветер дует от центра к периферии по направлению часовой стрелки. Их называют антициклонами (рис. 31 *а*).

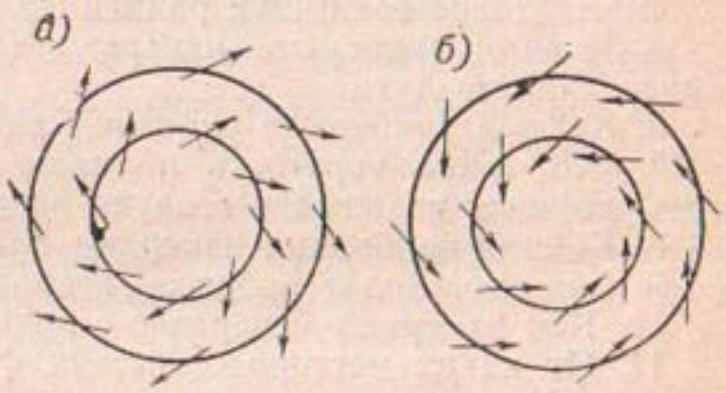


Рис. 31. Схема движения воздушных масс.
а — при антициклоне; *б* — при циклоне.

Циклоны и антициклоны являются носителями погоды. В умеренных широтах циклон сопровождается обложными дождями. В тылу циклона проходит холодный фронт, образуются кучево-дождевые облака, идут ливни. В холодное время года часто образуются туманы, низкие облака, осадки.

Для антициклона характерно повышение температуры воздуха в тропосфере, исчезновение облаков, ясная погода.

14. Общие сведения о прогнозах погоды

Предсказание погоды называется прогнозом. Погода формируется в зависимости от перемещения воздушных масс, характера барических систем — циклонов или антициклонов. Поэтому изучение движения циклонов и антициклонов является основой для предсказания погоды.

Для прогноза погоды составляют синоптическую карту, на которую наносят наблюденные метеорологические элементы на большой территории. Изучение этой карты позволяет с той или иной степенью точности предсказать погоду на будущее. Возможно предсказание погоды и по местным признакам.

Для предсказания погоды широко используются данные наблюдений искусственных спутников земли, дрейфующих станций и обсерваторий, расположенных в Арктике и Антарктике.

Вопросами предсказания погоды занимается Гидрометцентр (ГМЦ) СССР. Краткосрочный прогноз дается на 1—3 сутки, долгосрочный — на месяц и даже на сезон.

Управления гидрометеорологической службы собирают сведения от метеорологических станций и составляют прогноз погоды для обслуживаемой ими территории.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое гидрология, гидрометрия и метеорология?
2. Каково значение гидрологии и гидрометрии в решении народнохозяйственных задач СССР?
3. Что такое атмосфера?
4. Что такое солнечная радиация?
5. Какими приборами измеряют температуру почвы на разных глубинах и температуру воздуха?
6. Какими приборами измеряют влажность воздуха?
7. Что такое упругость водяного пара, абсолютная, относительная влажность, дефицит влажности воздуха и точка росы?
8. Какими приборами измеряют влажность воздуха?
9. Как происходят процессы испарения и конденсации?
10. Как измеряют испарение с водной поверхности?
11. От каких метеорологических факторов зависит испарение с водной поверхности?
12. Как определяют испарение с водной поверхности при отсутствии наблюдений?
13. В чем сущность метода Б. В. Полякова для расчета испарения с речных бассейнов?
14. Какими факторами определяется испарение с поверхности суши?
15. Какими приборами измеряют испарение с поверхности суши?
16. В чем заключается особенность испарения с орошаемых земель и болот?
17. Как рассчитывается суммарное испарение с орошаемых площадей, занятых разными культурами?
18. Что такое интенсивность дождя?
19. Как зависит интенсивность ливней от их продолжительности и площади распространения?
20. Как вычисляют сумму осадков для ливней разной продолжительности?
21. Какими приборами измеряют дождевые осадки и запасы воды в снежном покрове?
22. Как вычисляют запас воды в снежном покрове по данным измерений высоты и плотности снега?
23. Как определяют осадки для территории методом изогиет?
24. Как вычисляют количество осадков для территории методом взвешивания?
25. Как определяют запас влаги в почве?
26. Что такое максимальная гигроскопичность и предельная полевая влагоемкость?
27. Какова размерность величин давления воздуха?
28. Какими приборами измеряют давление воздуха, каков принцип их работы?
29. Как возникает ветер?
30. Какими приборами определяют скорость и направление ветра?
31. Чем отличается циклон от антициклона?
32. В чем разница между погодой и климатом?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 1. Вычислить слой и объем осадков на 1 га повторяемостью 1 раз в 100 лет и среднюю интенсивность дождя.

Дано: Географические координаты пункта $\varphi = 52°00'$ с. ш. и $\lambda = 42°00'$ в. д., продолжительность интервала времени $\tau = 800$ мин.

Решение. Суточный слой осадков повторяемостью 1 раз в 100 лет определяем по карте изолиний (см. рис. 16). В заданной точке проходит изолиния 80 мм. Эта точка находится в районе *3* распространения типовых кривых редукции (см. рис. 19).

Определим коэффициент редукции осадков $\psi(\tau)$ при продолжительности $\tau = 800$ мин (рис. 18). Для этого от оси τ из точки 800 мин восстановим перпендикуляр до пересечения с кривой *2*. Из точки пересечения с кривой опустим перпендикуляр на ось $\psi(\tau)$. Коэффициент редукции составит 0,92. Следовательно, при этой продолжительности сумма осадков $H_\tau = 0{,}92 \cdot 80 = 74$ мм. Объем осадков на 1 га по формуле (7) составит $W = 10 \cdot 74 = 740$ м³/га. Среднюю интенсивность определяем по формуле (8)

$$a = \frac{74}{800} = 0{,}092 \text{ мм/мин}.$$

Упражнение 2. Вычислить запас воды в снеге на экспериментальном участке Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории.

Дано: результаты снегомерной съемки на участке (табл. 5).

Высоту снежного покрова измеряли снегомерной рейкой через 10 м, а плотность снега — весовым снегомером в точках через 50 м путем взятия двойных проб.

Решение. Для определения запаса воды необходимо вычислить: 1) среднюю высоту снежного покрова $h_{ср}$ и 2) среднюю плотность снега δ. Все расчеты выполнены в табл. 5. Среднюю высоту снежного покрова $h_{ср}$ вычисляем путем деления суммы высот Σh_c на количество точек измерений

$$h_{ср} = \frac{560}{17} = 33 \text{ см}.$$

Плотность снега δ вычисляется по формуле (13). Например, для первой пробы точки № 1 $n = 67$, $h_c = 24$. Отсюда $\delta_1 = \frac{67}{10 \cdot 24} = 0{,}28$. Плотность снега второй пробы в той же точке $\delta_2 = \frac{55}{10 \cdot 24} = 0{,}23$.

Средняя плотность в точке № 1

$$\delta_{1\,ср} = \frac{0{,}28 + 0{,}23}{2} = 0{,}26.$$

Таблица 5

Данные снегомерной съемки на участке Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории от 18/III 1954 г.

№ точек	Высота снежного покрова h_c см	№ точек	Высота снежного покрова h_c см	№ точек	Высота снежного покрова h_c см	№ точек	Высота снежного покрова h_c см	Плотность снега						
								1-я проба			2-я проба			
								отсчет по шкале ц-линдра h_c см	отсчет по безмену n	плотность δ	отсчет по шкале ц-линдра h_c см	отсчет по безмену n	плотность δ	Средняя плотность в точке $\delta_{ср}$
1	39	6	25	11	38	16	23	24	67	0,28	24	55	0,23	0,26
2	42	7	27	12	37	17	27	25	49	0,20	25	51	0,20	0,20
3	27	8	34	13	30			27	54	0,20	25	55	0,22	0,21
4	35	9	48	14	31			20	48	0,24	26	63	0,24	0,24
5	34	10	32	15	31									
Сумма			$\Sigma h_c=560$											$\Sigma\delta_{ср}=0,91$

Среднюю плотность снега δ для всего участка вычисляем делением суммы средних плотностей $\Sigma\delta_{ср}$ всех измерений на число точек измерений. В данном упражнении $\Sigma\delta_{ср} = 0{,}91$, $n = 4$. Отсюда

$$\delta = \frac{0{,}91}{4} = 0{,}23.$$

Средний запас воды в снеге $h_в$ в миллиметрах вычисляем по формуле (14)

$$h_в = 0{,}23 \cdot 33 = 7{,}6 \text{ см} = 76 \text{ мм}.$$

Упражнение 3. Требуется: 1) построить карту изогиет в бассейне р. Сулы и 2) вычислить среднюю годовую сумму осадков.

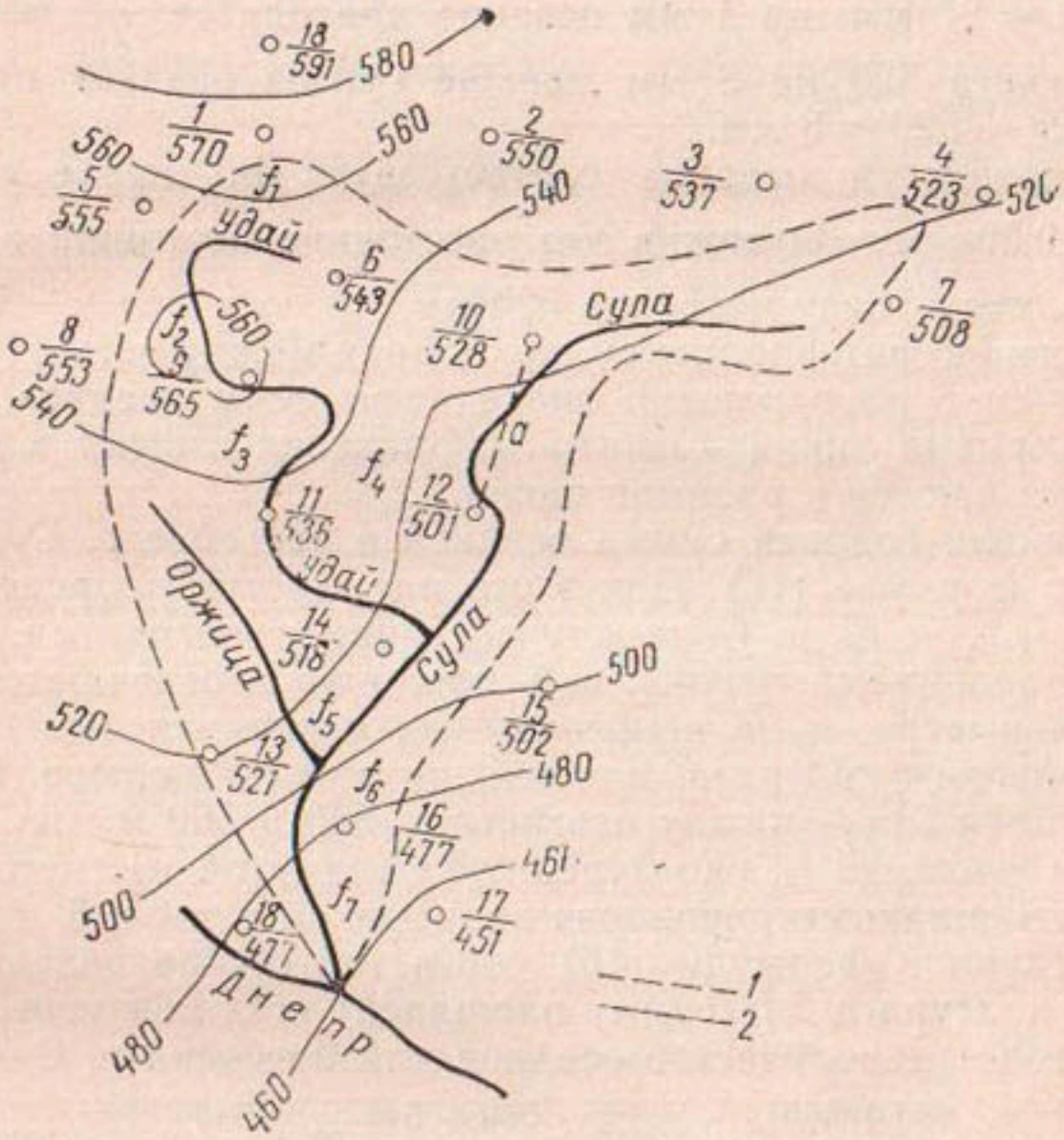


Рис. 32. Определение среднего количества осадков для бассейна р. Сулы методом изогиет:
1 — граница бассейна; *2* — изогиета.

Дано: выкопировка из карты (рис. 32), на которую нанесены метеорологические станции и дождемерные посты как в самом бассейне, так и вблизи его границ. Возле каждого из этих пунктов указаны средние многолетние годовые суммы осадков.

Решение. 1. Сечение изогиет принимаем через 20 мм. Наибольшая сумма осадков составляет 591 мм, наименьшая 451 мм. Амплитуда (разность) выражается величиной 591 — 451 = 140 мм.

Таким образом, на карте размещается $\frac{140}{20}=7$ изогиет: 580, 560, 540, 520, 500, 480, 460 мм. Изогиеты вычерчиваем так же, как и горизонтали на топографических картах. Положение точек, через которые проходят изогиеты, определяем путем аналитического или графического интерполирования [1]. Суть аналитического способа интерполирования рассмотрим на примере метеорологических станций № 10 и 12. Годовая сумма осадков первой станции 528 мм, а второй 501 мм. Линия, соединяющая эти пункты, пересекается изогиетой 520 мм. При определении места положения этой точки исходим из предположения, что изменение сумм осадков происходит равномерно. Для этого циркулем измеряем по карте расстояние a между обеими станциями. Разность осадков составляет $528-501=27$ мм; на 1 мм осадков приходится $\frac{a}{27}$ мм расстояния. Изогиета 520 на 8 мм меньше суммы осадков на станции № 10: $528-520=8$ мм.

Этой разности осадков соответствует по карте расстояние $\frac{a}{27}\cdot 8=0{,}30a$ мм. Отложив это расстояние по линии от станции № 10, получим точку изогиеты 520 мм.

Аналогично интерполируем расстояния между всеми станциями. Через точки с одинаковыми значениями сумм осадков проводим плавные кривые линии — изогиеты. Значения изогиет в миллиметрах выписываются в разрыве линий.

2. Средняя годовая сумма осадков в бассейне р. Сулы вычисляется по формуле (16). Для этого планиметром определяем площади f_1, f_2, ..., f_6 и f_7 между соседними изогиетами. В целях уменьшения объема вычислений площади определяются в делениях планиметра, а не в абсолютных величинах (км^2). Каждый контур обводим три раза, изменяя положение полюса. При определении площади f_3 между изогиетами 540 и 560 мм из последней вычитаем площадь f_2, оконтуренную замкнутой изогиетой 560 мм. Результаты планиметрирования записываем в табл. 6.

Подставив в формулу (16) соответствующие значения x и f каждого контура и Σf (сумму площадей) всех контуров, получаем среднее годовое количество осадков для бассейна р. Сулы:

$$x_{ср}=\frac{\frac{580+560}{2}\cdot 3+500\cdot 9+\frac{560+540}{2}\cdot 59+\frac{540+520}{2}\cdot 121}{303}+$$

$$+\frac{\frac{520+500}{2}\cdot 83+\frac{500+480}{2}\cdot 14+\frac{480+460}{2}\cdot 14}{303}=525 \text{ мм}.$$

Тот же расчет можно выполнить в табличной форме, что и рекомендуется учащимся сделать самостоятельно.

---

[1] Примеры графического способа интерполяции подробно изложены в курсе геодезии.

Таблица 6

Определение площадей между изогиетами

№ контура	Изогиеты в мм (от—до) и площадь f	Отсчет	Отсчеты по планиметру 1	2	3	Площадь в делениях планиметра
1	580—560 f_1	Начальный Конечный Разность	0837 0839 2	9754 9757 3	0750 0753 3	3
2	560 f_2	Начальный Конечный Разность	0399 0408 9	9543 9551 8	8471 8481 10	9
3	560—540 f_3	Начальный Конечный Разность	0361 0428 67	9587 9655 68	7438 7506 68	68—9=59
4	540—520 f_4	Начальный Конечный Разность	0279 0399 120	9673 9794 121	6432 6554 122	121
5	520—500 f_5	Начальный Конечный Разность	0709 0793 84	0042 0125 83	9437 9520 83	83
6	500—480 f_6	Начальный Конечный Разность	0749 0764 15	0106 0120 14	0137 0151 14	14
7	480—460 f_7	Начальный Конечный Разность	0750 0763 13	0736 0751 15	9270 9284 14	14
	Сумма (Σf)					303

Упражнение 4. Определить среднее многолетнее испарение с водной поверхности малого пруда, расположенного в бассейне р. Хопра (притока р. Дона).

Дано: координаты пруда $\varphi = 51°33'$ с. ш. и $\lambda = 43°09'$ в. д.

Рассчитать внутригодовое распределение испарения по месяцам.

Решение. На карту изолиний испарения (см. рис. 11) наносим координаты пруда. Точка расположена между изолиниями 70 и 80 см. Искомая величина, определенная путем интерполяции, $z = 766$ мм.

По этой же карте устанавливаем, что пруд расположен в XI районе по типу внутригодового распределения испарения. Испарение по месяцам в долях от годового для данного района

находим по табл. 1. Умножив суммарное испарение на каждую из этих величин, получим испарение по месяцам. Например, для июля $z_{VII} = 766 \times 0{,}2 = 153$ мм. Расчеты сведены в табл. 7.

Таблица 7

Испарение с водной поверхности пруда по месяцам

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Период
В долях от суммарного периода	0,07	0,15	0,18	0,20	0,18	0,12	0,07	0,03	1,0
Месячные величины, мм	54	115	138	153	138	92	53	23	766

Упражнение 5. Определить испарение по месяцам и за год с поверхности бассейна р. Золотоношки до г. Золотоноши.

Дано: средние месячные температуры воздуха и осадки за период 1893—1935 гг. (табл. 8).

Решение. Расчеты выполняем по графикам Б. В. Полякова (рис. 15). Испарение за январь, февраль и март определяем по графику *2*, пользуясь одной из четырех ветвей в зависимости от географической широты бассейна. В данном примере бассейн лежит южнее 52° с. ш. Поэтому испарение с графика *1* снимаем по кривой «юг».

Например, для января средняя температура воздуха $t = -6{,}1°$ С. Откладываем температуру по горизонтальной оси графика, после чего восстанавливаем перпендикуляр вверх до пересечения с кривой «юг». С точки пересечения опускаем перпендикуляр на вертикальную ось графика (ось испарения). Искомая величина испарения $z_1 = 10{,}0$ мм.

Испарение за апрель (первый месяц с положительной средней месячной температурой воздуха) определяем по графику *1* (см. рис. 15) с учетом осадков. При температуре апреля $t_{IV} = 7{,}5$ °С и сумме осадков 41 мм $z_{IV} = 61$ мм.

Испарение за май (второй месяц с положительной средней месячной температурой воздуха) определяем аналогично изложенному по графику *3*.

Испарение за июнь (третий месяц с положительной средней месячной температурой воздуха) определяем по графику *4*, а для июля, августа, сентября и октября с положительными средними месячными температурами воздуха — по графику *5*.

Для декабря испарение находим по графику *6*, которым пользуются так же, как графиком *2*. Найденные значения испарения по месяцам приведены в последней строке табл. 8. Сумма месячных величин составляет 423 мм. По карте изолиний (см. рис. 14) суммарное испарение определяется в 420 мм.

Упражнение 6. Определить суммарное испарение E (в миллиметрах) за девятую декаду от начала вегетационного периода кар-

тофеля весенней посадки на Краснознаменской оросительной системе (Херсонская область).

Дано: сумма средних суточных значений дефицита влажности за эту декаду составляет $\Sigma d = 135$ мб.

Решение. Задача решается методом С. М. Алпатьева согласно формуле (6). По табл. 2 находим значение биоклиматического коэффициента $k = 0{,}46$. Отсюда суммарное испарение

$$E = 0{,}46 \cdot 135 = 62 \text{ мм}.$$

Упражнение 7. Построить розы ветров для метеостанции Озерная: 1) без учета штилей и 2) с учетом штилей.

Дано: среднее многолетнее число случаев с ветром различных направлений (румбов) и штилей по метеорологической станции Озерная (табл. 9).

Решение. Годовое число случаев с ветром различных направлений получены путем суммирования месячных величин одинакового направления ветра. При четырехразовых наблюдениях на станции общее число случаев с ветром различных направлений за месяц, в том числе и штилей, составляет $4 \times 30 = 120$ или $4 \times 31 = 124$. В году число наблюденных величин составляет $4 \times 365 = 1460$ (см. табл. 9), а без учета штилей $1460 - 281 = 1179$.

В табл. 9 приведена повторяемость разных направлений ветра в процентах от общего их количества. Так, ветры северного направления с учетом штилей имеют повторяемость

$$\frac{206}{1460} \cdot 100 = 14{,}1\%,$$

а без учета штилей

$$\frac{206}{1179} \cdot 100 = 17{,}5\%$$

и т. д.

Построение розы ветров без учета и с учетом штилей выполнено на рис. 33 в масштабе 1 деление = 5%.

Таблица 8

Наблюденные средние месячные температуры, суммы осадков и вычисленные величины испарения в бассейне р. Золотоношки

Показатели	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средние годовые
Температура воздуха, град	—6,1	—5,5	—0,5	7,5	15,2	17,9	20,2	19,0	14,0	7,9	1,2	—3,7	7,3
Сумма осадков, мм	24	24	27	41	51	58	70	63	42	35	38	34	507
Испарение, мм	10	11	24	61	73	69	63	54	28	14	5	11	423

Таблица 9

Среднее многолетнее число дней с ветром различных направлений (румбов) и их повторяемость

	Румбы									Всего случаев	
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	штиль	без учета штилей	с учетом штилей
Среднее годовое число случаев	206	181	100	97	182	131	122	160	281	1179	1460
Повторяемость в % без учета штилей	17,5	15,4	8,5	8,2	15,4	11,1	10,3	13,6	—	100	—
Повторяемость в % с учетом штилей	14,1	12,4	6,8	6,6	12,5	9,0	8,4	11,0	19,2	—	100

В первом случае (рис. 33 *а*) выбираем произвольную точку и от нее проводим линии по направлениям румбов. На каждой из этих линий откладываем от выбранной точки повторяемость ветров (в процентах). Так, по линии «север» откладываем $\frac{17,5}{5} = 3,5$ деления. Полученные точки соединяем прямыми линиями.

Во втором случае (рис. 33 *б*) из произвольно выбранной точки строим окружность. Радиус окружности представляет собой общий процент штилей (19,2%), деленный на 8 (восемь румбов). При принятом масштабе построения (в 1 делении — 5%) длина радиуса составляет 19,2 : 8 : : 5 = 0,48 деления. Как и в первом случае, от выбранной точки проводим линии по направлениям румбов; на каждой из этих линий (от точки пересечения с окружностью) откладываем повторяемость ветров. Полученные точки соединяем прямыми линиями. На каждой линии выписываем соответствующий румб и процент повторяемости ветров. В центре круга выписываем процент повторяемости штилей. Из построенных графиков видно, что ветры северного, северо-восточного и южного направлений являются преобладающими (имеют наибольшую повторяемость).

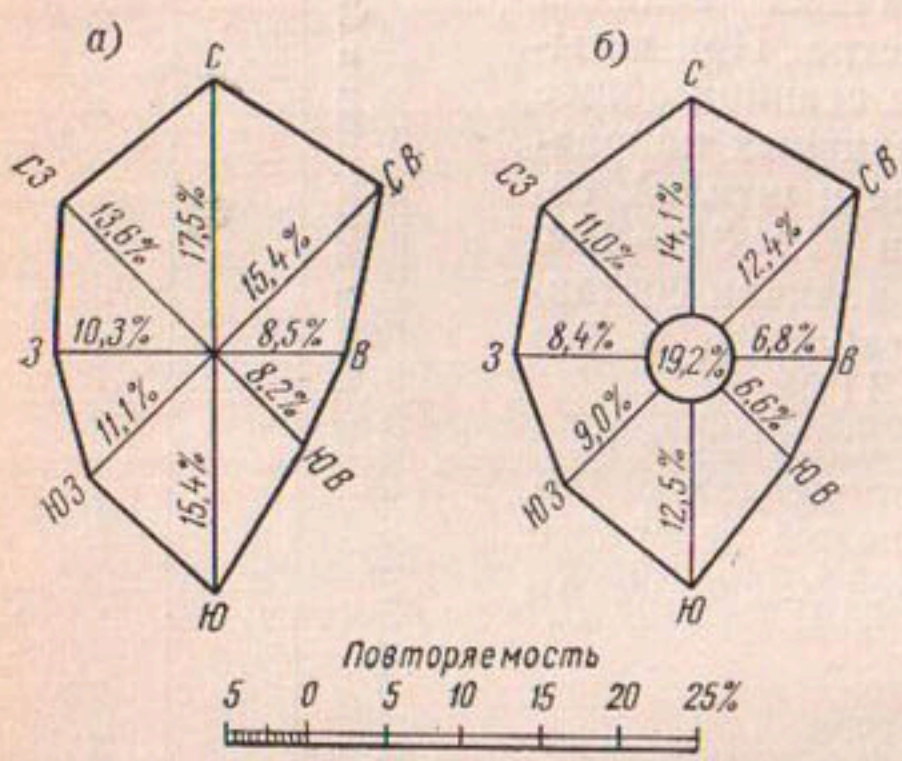


Рис. 33. Розы ветров для метеорологической станции Озерная.

а — без учета штилей; *б* — с учетом штилей.

ТЕМА 4. КРУГОВОРОТ ВОДЫ В ПРИРОДЕ И ВОДНЫЙ БАЛАНС НА ЗЕМНОМ ШАРЕ

Вода, испаряющаяся с поверхности морей и океанов, поднимается в атмосферу. Частично этот пар конденсируется и в виде атмосферных осадков возвращается снова в океан, совершив так называемый малый круговорот воды в природе (рис. 34). Остальная часть водяного пара переносится воздушными течениями на сушу. При благоприятных условиях пар конденсируется и выпадает в виде осадков. Часть осадков просачивается в почву, а остальные стекают по земной поверхности в русла оврагов, балок

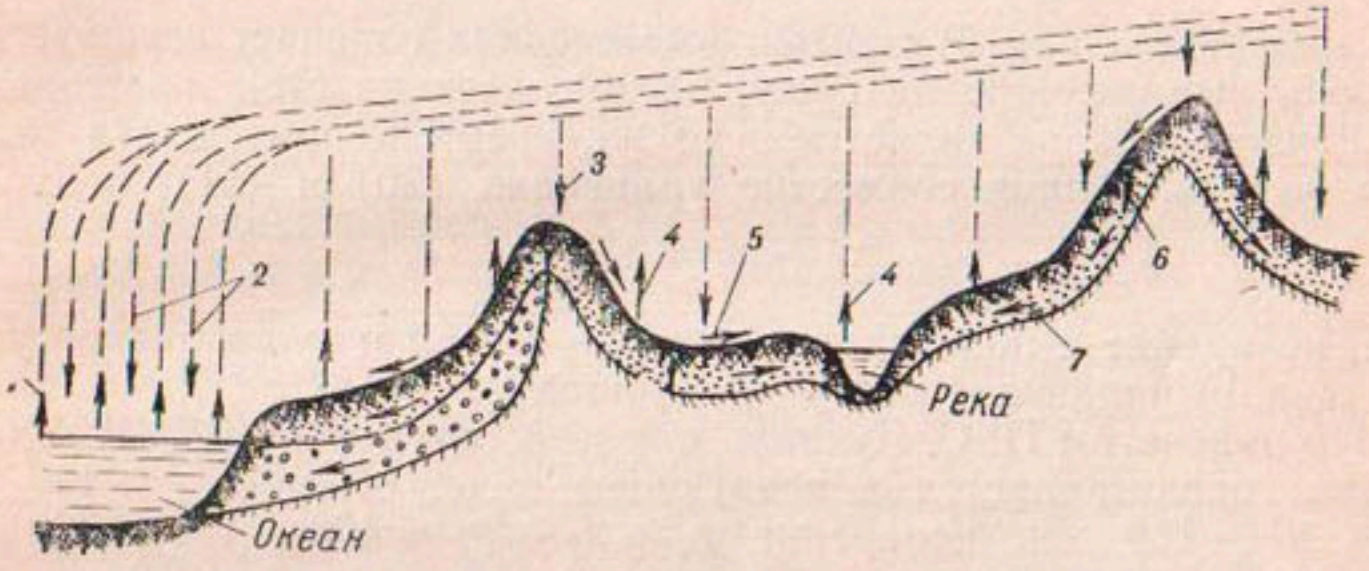


Рис. 34. Схема круговорота воды в природе.

1 — испарение с поверхности океана; *2* — осадки над водной поверхностью; *3* — осадки над поверхностью суши; *4* — испарение с поверхности суши и воды; *5* — поверхностный сток; *6* — просачивание воды в почву; *7* — подземный сток.

и рек, создавая поверхностный сток. Вода, просочившаяся в почву, расходуется на испарение и транспирацию, а часть проникает глубже в грунт, за пределы почвенного покрова и поступает в подземные, грунтовые воды. Эта вода тоже попадает в русла рек, прорезающих подземный поток. Таким образом, сток рек складывается из поверхностного стока и подземного. Реки выносят свои воды в океаны и моря. Этим завершается большой круговорот воды в природе.

Поступающая в атмосферу влага, двигаясь над материками, выпадает частично на поверхность суши, частично относится в глубь материка и переносится дальше по направлению господствующих ветров. К ней присоединяется влага, поступающая в атмосферу путем испарения с поверхности суши, снега и воды. Вся эта вода может вторично увлажнить материк.

Чем большее число оборотов делает вода над материком, т. е. чем больше внутренний влагооборот материка, тем большую пользу приносит он человеку.

Влагоносные ветры, дующие с Атлантического океана и Балтийского моря, оставляют часть осадков на Северо-Западе Европей-

ской территории СССР. Оставшаяся часть влаги продвигается над центральными областями, направляясь в Среднюю Азию и на восток — в Западную Сибирь. Чем дальше от океана проникают ветры на материк, тем меньше влаги в них остается.

Водный баланс земного шара. Исходя из круговорота воды в природе, можно написать

$$x_0 + y_0 = z_0, \tag{20}$$

где x_0 — осадки, выпадающие на поверхность океана; y_0 — приток в океан речных вод; z_0 — испарение с поверхности океана.

Для поверхности суши

$$x_c = y_c + z_c, \tag{21}$$

где индекс «с» при буквенных выражениях означает «суша», т. е. осадки, выпадающие на сушу, расходуются на сток и испарение.

Речной сток y_c является в то же время и притоком в океан, т. е. $y_c = y_0$. Решая совместно уравнения (20) и (21), получаем

$$x_0 + x_c = z_0 + z_c, \tag{22}$$

т. е. испарение с поверхности океанов, морей и суши равно сумме осадков, выпадающих на ту же площадь.

По подсчетам П. С. Кузина, для всей территории СССР водный баланс представляется в следующем виде: осадки $x_c = 400$ мм, сток $y_c = 180$ мм, испарение $z_c = x_c - y_c = 400 - 180 = 220$ мм.

ТЕМА 5. РЕКИ, ИХ ПИТАНИЕ И РЕЖИМ

15. Образование рек

Реки, речные системы. Дождевая и талая вода (а также ключи и родники) движутся по земной поверхности сначала в виде мелких ручейков, которые собираются в более крупные ручьи. Последние, сливаясь, образуют малые, а затем средние и большие реки, которые направляются в моря и океаны или бессточные озера. Так, Обь и Енисей впадают в Ледовитый океан, а Волга, Амударья и Сырдарья — в бессточные Каспийское и Аральское моря.

Речная система состоит из главной реки и ряда притоков. Притоки бывают 1, 2, 3-го и т. д. порядков. Реки, впадающие в главную реку, являются притоками первого порядка. В притоки первого порядка впадают притоки второго порядка и т. д.

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

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

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

Речные долины. Неширокие, вытянутые в длину, извилистые, наклоненные в одном направлении углубления земной поверхности называются *долинами*. Часть дна долины, занятая водным потоком называется *руслом*. Линия, соединяющая самые пониженные части долины, называется *тальвегом*, обычно совпадающим с динамической осью потока, т. е. с линией наибольших глубин. Долина состоит из дна и склонов.

Узкая долина с отвесными стенками называется ущельем (рис. 35 *а*). Такой профиль долго сохраняется в твердых породах (Дарьяльское ущелье). Если долина расположена в мягких размываемых породах, то она быстро расширяется. Сначала берега становятся наклонными, а дно остается узким (рис. 35 *б*). Постепен-

но долина приобретает трапецеидальную форму (рис. 35 *в*) с широким дном и пологими склонами. При дальнейшем размыве долина принимает корытообразную форму (рис. 35 *г*). Глубина долин в равнинных районах бывает от 10 до 200—300 м, а в гористых местностях — до 2000 м.

В начальной стадии реки использовали существующие понижения, образовавшиеся в результате тектонической деятельности. В последующем эрозионные процессы постепенно содействовали углублению долин и расширению их. Вниз по течению увеличивается масса стекающей воды, поэтому постепенно углубляется нижний участок реки; на верхнем же участке дно круто поднимается к водоразделу.

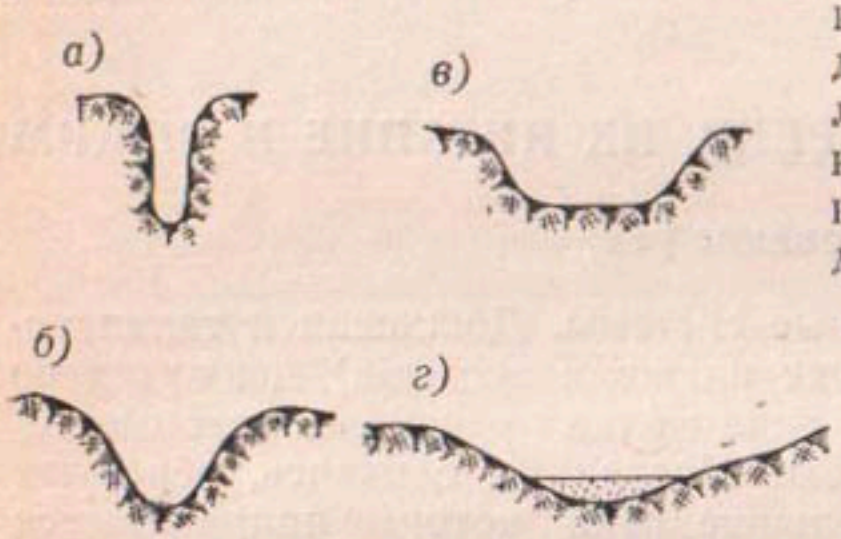


Рис. 35. Форма долин.

а — ущелье; *б* — долина с узким дном и наклонными берегами; *в* — то же трапецеидальная; *г* — корытообразная.

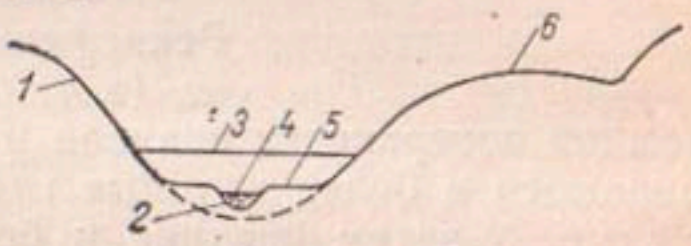


Рис. 36. Поперечное сечение долины.

1 — склон; *2* — меженное русло; *3* — уровень высоких вод; *4* — меженный уровень; *5* — пойма; *6* — надпойменная терраса.

Форма долин зачастую усложнена террасами или горизонтальными площадками на склонах (рис. 36).

Затопляемая во время половодья нижняя терраса называется поймой. Вышележащие незатопляемые террасы называются первой, второй и т. д. надпойменными террасами.

Образование излучин. Речное русло в плане обычно имеет извилистую форму и состоит из ряда излучин, или меандр. Излучины образуются, если основное течение реки по какой-либо причине отклонится в сторону. Даже незначительное препятствие, отклоняющее течение к одному из легко размываемых берегов, может вызвать образование целой серии излучин. На рис. 37 *а* показано искривление русла, когда отклонение течения от прямолинейного направления вызывает подмыв одного берега. Постепенно увеличивается вогнутость этого берега. Продукты размыва уносятся водой и откладываются на другом берегу. Этот процесс образования меандр может прекратиться в трех случаях:

1) образование излучин увеличивает протяженность русла, т. е. уменьшает его уклон. С уменьшением уклона снижается скорость течения воды. При очень малых скоростях прекращается подмыв берега;

2) развитие излучин прекращается вследствие обнажения в русле твердых неразмываемых пород;

3) концы излучин сближаются, и река прорывает перешеек *АБ*

(рис. 37 *б*). Скорость в новом русле возрастает. Вход в излучину перекрывается наносами, старое русло отмирает и превращается в с т а р о р е ч ь е.

Глубина воды по длине реки не одинакова. Глубокие участки, называемые плесами, чередуются с перекатами (мелкие участки). Плесы характерны для изогнутых участков русла, а перекаты находятся (рис. 38) на переходах от одного закругления к другому. Подробно этот вопрос изложен в теме 9.

Уклоны рек и их продольный профиль. Уклон участка реки выражается формулой

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L}, \qquad (23)$$

где H_1 и H_2 — отметки уровней воды в начале и конце участка; L — длина реки по геометрической оси, проходящей посредине реки.



Рис. 37. Процесс образования излучин (*а*) и стариц (*б*) при прорыве излучин.

Обозначив $H_1 - H_2 = h$ (где h — падение уровня на участке), получим

$$I = \frac{h}{L}. \qquad (24)$$

Уклон обычно выражается десятичными дробями, иногда в промилле (т. е. в тысячных долях) и в процентах. Переход от дроби к промилле получают умножением на 1000, а к процентам — умножением ее на 100. Промилле обозначается $^0/_{00}$. Так, $I = 0{,}003 = 0{,}3\% = 3^0/_{00}$.

Река в верхней части долины обычно имеет более значительный уклон, чем в средней, а в средней части — бóльший, чем в нижней. Например, Волга в бытовых условиях (до гидротехнического строительства) имела в верховьях уклон 0,00017, в среднем течении 0,00006, в нижнем 0,00002. Поэтому средневзвешенный уклон определяют по средневыравненному уклону продольного профиля реки. На рис. 39 *АВСД* — это продольный профиль русла. Линия *АЕ* проведена так, что положительные и отрицательные площади, отсекаемые ею, равны между собой и минимальны по величине. Средневзвешенный урожай реки $I = h/l$.

Река имеет не только продольный, но и поперечный уклон. Поперечный уклон обусловливается тем, что центробежная сила на закруглениях русла прижимает воду к вогнутому берегу, а это

приводит к повышению уровня по сравнению с выпуклым берегом. Кроме того, под действием силы Кориолиса движущаяся масса воды отклоняется в северном полушарии вправо, а в южном — влево, что также дает перекос поверхности воды в одну сторону.

Уровень может повышаться у одного берега и понижаться у другого, если ветер дует поперек русла или под некоторым углом к направлению потока. У наветренного берега уровень повышается, а у противоположного понижается.

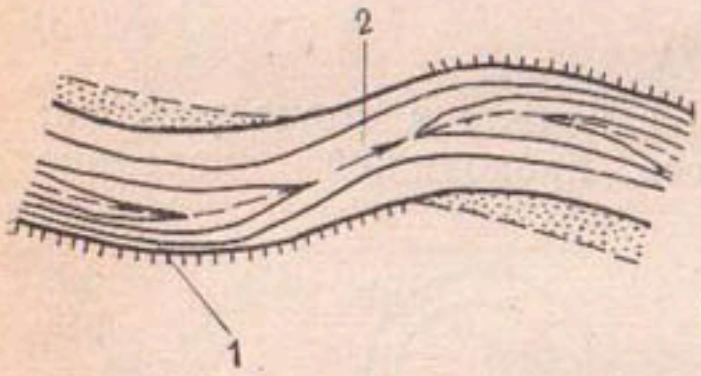


Рис. 38. Чередование плесов и перекатов в плане.
1 — плес; *2* — перекат.

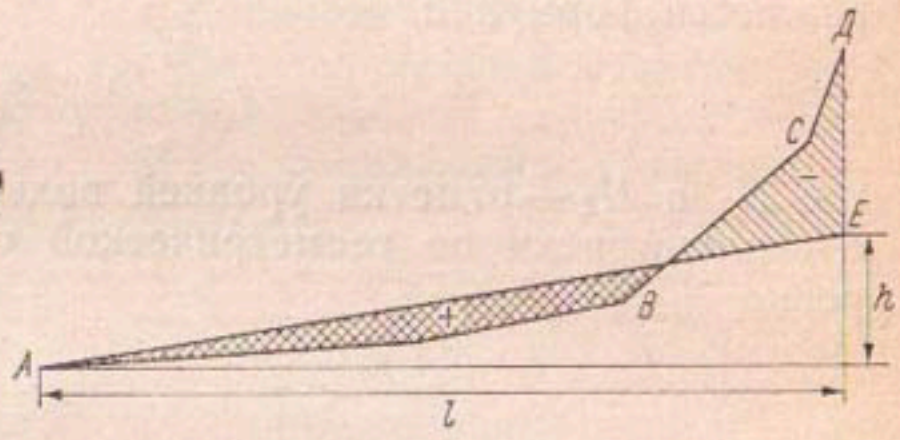


Рис. 39. Определение уклона выравненного продольного профиля реки.

16. Движение воды в реках

Вода в русле движется под воздействием: 1) силы тяжести, заставляющей частицы воды перемещаться вниз по уклону местности, и 2) силы внутреннего трения. При движении потока происходит трение между отдельными частицами воды, а также между водой и стенками русла. Силы трения оказывают сопротивление потоку и уменьшают скорость движения воды.

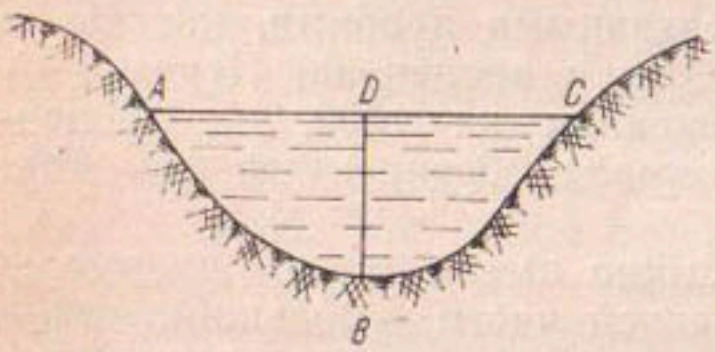


Рис. 40. Поперечное сечение русла.

Гидравлические элементы потока. Скорость движения воды зависит от основных гидравлических элементов русла и от уклона поверхности воды. Поперечное сечение потока, проведенное нормально к направлению движения, называется живым сечением потока. Площадь живого сечения (*ABC* на рис. 40) обозначается буквой ω и выражается в м². Длина линии *ABC*, по которой вода соприкасается с твердыми стенками водного сечения русла, называется смоченным периметром, который обозначается буквой χ и выражается в метрах. Отношение площади живого сечения к смоченному периметру называется гидравлическим радиусом.

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \qquad (25)$$

Скорость движения воды характеризуется длиной пути, проходимого водой в единицу времени. Единица измерения скорости — м/с.

Скорости отдельных струек в русле неодинаковы; они меняются в зависимости от местоположения в живом сечении и по длине русла. Следует различать скорость в точке, среднюю скорость по глубине, например по глубине $ДВ$ (см. рис. 40), и среднюю скорость по всему живому сечению русла.

Расходом воды называется количество воды, протекающей через данное живое сечение в единицу времени. Расход воды обозначается буквой Q и выражается в кубических метрах или литрах в секунду ($м^3/с$ или л/с). Расход является произведением площади живого сечения и средней скорости

$$Q = \omega v. \tag{26}$$

Отсюда средняя скорость

$$v = \frac{Q}{\omega}. \tag{27}$$

Формула равномерного движения воды в открытых руслах. Равномерным называется такое установившееся движение воды, при котором живое сечение в потоке и средние скорости постоянны. Причем скорости одних и тех же элементарных струек воды в разных сечениях тоже остаются одинаковыми.

Скорость движения воды при равномерном движении определяется формулой Шези

$$v = C\sqrt{RI}, \tag{28}$$

где R — гидравлический радиус; I — уклон поверхности воды; C — коэффициент Шези, или скоростной коэффициент.

Коэффициент C зависит от шероховатости дна и стенок русла, размеров и геометрической формы поперечного сечения. Из многих эмпирических формул для определения коэффициента C наибольшее распространение получили формулы Н. Н. Павловского и И. И. Агроскина.

Формула Н. Н. Павловского имеет вид

$$C = \frac{1}{n} R^y, \tag{29}$$

где R — гидравлический радиус; n — коэффициент шероховатости, определяемый для естественных водотоков по табл. 10, предложенной М. Ф. Срибным; y — показатель степени, зависящий от R и n; C — в $м^{1/2}/с$.

Для приближенных расчетов можно принять:

$$y = 1{,}5\sqrt{n} \quad \text{при } 0{,}1 < R < 1{,}0 \text{ м}, \tag{30}$$

$$y = 1{,}3\sqrt{n} \quad \text{при } 1{,}0 < R < 3{,}0 \text{ м}. \tag{31}$$

Таблица 10

Значения коэффициента шероховатости *n* в формуле Павловского

№ пп.	Характер русла	*n*
1	Естественные русла в весьма благоприятных условиях (чистое, прямое, незасоренное земляное русло со свободным течением)	0,025
2	Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, местами камни)	
	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в относительно благоприятных условиях	0,040
3	Русла периодических водотоков, сильно засоренные и извилистые	
	Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кустарники, деревья, заводи) . . .	
	Галечно-валунные русла горного типа с неправильной поверхностью водного зеркала; порожистые участки равнинных рек	0,067
4	Реки и поймы, значительно заросшие (со слабым течением, с большими глубокими промоинами)	
	Валунные русла горного типа, с бурным пенистым течением, с изрытой поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды)	0,080
5	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода); поймы с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями, озерами и пр.	0,133

17. Бассейн реки

Площадь, с которой вода стекает в реку, называется бассейном, или водосбором. Естественно, что водосборная площадь постепенно нарастает по длине реки. Различают общий бассейн всей реки и частные бассейны отдельных ее притоков.

Граница между двумя смежными бассейнами, проходящая по наивысшим точкам местности, называется водораздельной линией, или водоразделом. Внутри бассейна бывают отдельные замкнутые понижения, в которые поступает часть стока общего водосбора. Такое явление характерно для многих равнинных рек Нижнего Поволжья, Целинного Края и других районов.

Водоразделы проходят по хребтам и вершинам холмов и в зависимости от размеров водосборов выявляются на гипсометрических картах или планах в горизонталях. В равнинных и болотистых районах рельеф не всегда ярко выражен. Так, в Пинских болотах берут начало реки бассейна Днепра и притоки Вислы. Здесь выявить положение водораздела очень трудно. Границы бассейнов искусственно перемещаются в результате соединения

двух речных систем посредством каналов (Волго-Донской канал).

Реки питаются не только поверхностным стоком, но и грунтовыми водами, создающими подземный сток. Бассейн подземного питания может не совпадать с поверхностным. На рис. 41 поверхностный водораздел проходит через точку *а*. Водораздел подземного питания проходит через точку *в*. Подземный водосбор реки *1*, видимо, значительно больше поверхностного водосбора этой же реки. Однако выявить подземный водосбор очень трудно.

Геометрические характеристики бассейна. К геометрическим характеристикам бассейна относятся: площадь, густота речной сети, протяженность, средняя ширина, уклон и конфигурация бассейна.

Морфометрические характеристики — это размеры долин, русел рек, чаш озер, болот и их водосборов.

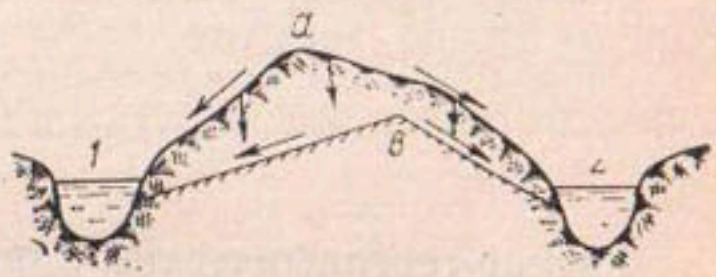


Рис. 41. Несовпадение вершин поверхностного (*а*) и подземного (*б*) водоразделов.
1, 2 — реки.

В гидрологии применяется понятие «гидроморфометрические характеристики», представляющие собой комплекс значений морфометрических элементов и шероховатости, влияющих на скорость и продолжительность добегания воды по склонам бассейна и руслу (см. п. 37).

Для определения площади водосбора на карте с горизонталями проводят водораздельную линию. Оконтуренную площадь фигуры определяют с помощью планиметра или палетки. Если в состав бассейна входят целые трапеции, то их площади определяют по геодезическим таблицам.

Среднюю ширину бассейна вычисляют по формуле

$$b_{ср} = \frac{F}{L}, \qquad (32)$$

где F — водосборная площадь в км²; L — длина бассейна в километрах.

Длину бассейна обычно принимают по спрямленной длине главной реки.

Средний уклон бассейна определяют с помощью крупномасштабной карты по формуле

$$I_б = \frac{\Delta H}{F} \Sigma l, \qquad (33)$$

где ΔH — сечение рельефа; Σl — сумма длин горизонталей; F — площадь водосбора в км².

Густота речной сети зависит от почвенно-геологических и климатических условий, уклонов поверхности и т. д. Она пред-

ставляет собой длину русел, приходящуюся на 1 км² поверхности бассейна. Таким образом,

$$\gamma = \frac{L}{F}, \tag{34}$$

где γ — густота сети в км/км²; L — длина всех русел, включая овражно-балочную сеть, в километрах; F — площадь водосбора в км².

Значение γ достигает на Северном Кавказе 0,97, на Северо-Западе Европейской территории СССР 0,1—0,2, на Северо-Востоке Европейской территории СССР 0,03—0,04 км/км².

Среднюю длину склонов бассейна $\bar{l}$ (в километрах) можно определить по формуле

$$\bar{l} \approx \frac{F}{2L} \approx \frac{1}{2\gamma}. \tag{35а}$$

Физико-географические характеристики бассейна. Географическое положение определяется географическими координатами (широтой и долготой), между которыми располагается бассейн.

Основным фактором формирования гидрологического режима района является климат. По выражению А. И. Воейкова: «Реки — продукт климата». К климатическим показателям гидрологического режима рек относятся: осадки, температура, влажность воздуха и т. д.

Гидрологический режим рек во многом зависит от почвенного покрова бассейна. Механический состав и агрегатное строение почвы оказывают влияние на динамику и интенсивность просачивания воды, а следовательно, на величину стока и эрозионные процессы.

От гидрогеологических условий зависит характер и размер подземного питания рек, химический состав воды в маловодные периоды года.

Характер растительного покрова в бассейне и его густота воздействуют на структурный состав почвы и ее скважность, а также на шероховатость поверхности. В связи с этим создаются различные условия стока и эрозии. Поэтому изысканиями должны быть установлены площади лесов, их положение на плане, наличие залежных земель, севообороты на пахотных площадях и т. д.

Озера и болота аккумулируют часть стока, поэтому необходимо выявлять озерность и заболоченность водосборов. Озерность и заболоченность выражаются соответствующим коэффициентом, представляющим отношение площадей озер и болот к общей площади бассейна (в долях или процентах). Так, лесистость $\delta_л = \frac{f_л}{F}$, или $\delta_л = \frac{f_л}{F} \cdot 100\%$; (35б) болотистость $\delta_б = \frac{f_б}{F}$, или $\frac{f_б}{F} \cdot 100\%$; (35в) озерность $\delta_{оз} = \frac{f_{оз}}{F}$, или $\frac{f_{оз}}{F} \cdot 100\%$. (35г)

18. Классификация и виды питания рек

Источниками питания рек являются: 1) поверхностные воды, стекающие по земной поверхности во время дождей, таяния снега или ледников в горах, и 2) подземные воды. Реки умеренных широт СССР в основном получают снеговое питание, иногда на 100% (реки Южного Заволжья). К югу роль снегового питания снижается и повышается роль дождевого стока, а в высокогорных районах — ледникового. Сток талых вод р. Кубани у г. Краснодара составляет 12%, дождевой 24%, ледниковый 32% и подземный 32%.

Впервые классификацию рек земного шара по условиям их питания дал А. И. Воейков. Впоследствии М. И. Львович ввел количественную характеристику основных видов питания (табл. 11). Он же составил карту распространения типов рек по источникам их питания.

19. Уровенный режим рек

Высота стояния уровня воды в реке зависит от характера и интенсивности питания. Уровень воды повышается во время снеготаяния или после обильных ливней и понижается, когда река переходит на грунтовое питание. Высота стояния уровня зависит не только от количества воды, поступающей в реку. Уровень можно искусственно регулировать с помощью плотин и других сооружений на реках. Изменение уровня может быть вызвано и деформацией русла. Так, при размыве русла уровень воды в реке понижается, а при отложении наносов повышается.

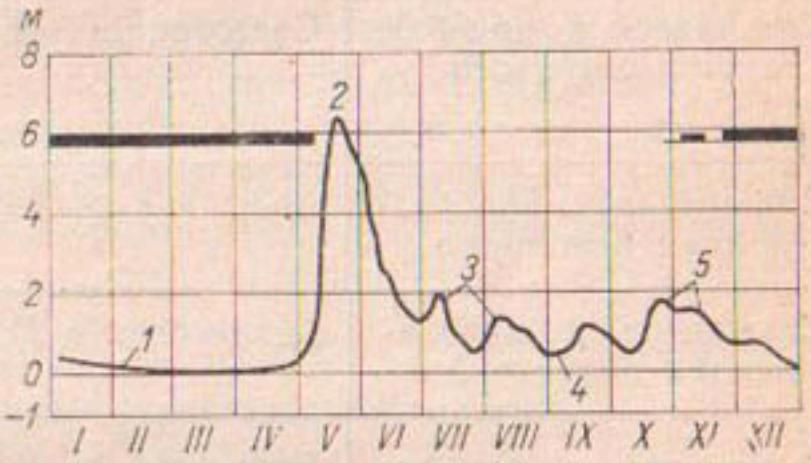


Рис. 42. График колебания уровней р. Днестра у г. Тирасполя.

1 — наинизший зимний уровень; *2* — наивысший годовой, он же весенний уровень; *3* — наивысшие уровни летних и осенних паводков; *4* — наинизший летний уровень; *5* — наивысший уровень осеннего ледохода.

Режим изменения уровней рек легко проследить по графику колебания ежедневных уровней (рис. 42). Высота уровней на графике наносится над условным горизонтом, называемым нулем графика. Нуль графика выбирают так, чтобы уровни воды всегда были выше него, т. е. чтобы отсчеты от него были положительными. По графику может быть установлена высота уровня воды за любой день года, наивысшее и наинизшее значение, а следовательно, и амплитуда колебания.

Например, максимальный уровень р. Волги у с. Тетюши в 1928 г. составил 18,00 м, а минимальный 1,85 м. Амплитуда вы-

Таблица 11

Основные типы рек по источникам питания по М. И. Львовичу

Характеристика типа питания	Количественный показатель преимущественного вида питания	Районы преимущественного распространения
Почти полностью снеговое	Снеговое $>80\%$	Северный Казахстан, Заволжье
Преимущественно снеговое	Снеговое $>50\%$	Европейская часть СССР, Западная Сибирь, северо-восток азиатской части СССР
Почти полностью дождевое	Дождевое $>80\%$	Черноморское побережье Кавказа (южная часть)
Преимущественно дождевое	Дождевое $>50\%$	Дальний Восток, некоторые районы Закавказья, бассейны рек Лены и Индигирки
Преимущественно ледниковое	Ледниковое $>50\%$	Высокогорные районы Кавказа и Средней Азии
Смешанное с преобладанием снегового	Снеговое $>50\%$	Прибалтика, предгорные районы Северного Кавказа, Алтая, бассейн р. Лены
Смешанное с преобладанием дождевого	Дождевое $>50\%$	Закавказье, Черноморское побережье Кавказа (северная часть)
Смешанное с преобладанием ледникового	Ледниковое $>25\%$	Горные районы Алтая
Смешанное с преобладанием подземного	Подземное $>25\%$	Предгорные районы Средней Азии, большая часть рек Армении

ражается величиной $18{,}00 - 1{,}85 = 16{,}15$ м. Зная абсолютную или условную отметку нуля графика, можно вычислить и соответствующие отметки уровней воды.

Повторяемость и продолжительность стояния уровней. Режим уровней характеризуется повторяемостью (частотой) и продолжительностью (обеспеченностью) стояния. Повторяемость уровней представляет собой количество дней стояния того или иного уровня за какой-либо определенный период времени (за год, половодье и т. д.). Продолжительность, или обеспеченность, представляет собой количество дней (или соответственно процентное выражение), в течение которых уровень воды был не ниже заданного. Обе

характеристики уровней изображаются графически в виде кривых. Для построения кривой частоты всю амплитуду колебания уровней делят на равные интервалы (например, 10, 20 или 50 см). Размер интервала устанавливают в зависимости от амплитуды и заданной подробности разработки. Чем больше амплитуда, тем больше принимают интервал. Для каждого интервала подсчитывают число дней стояния уровней за исследуемый период. Это и есть повторяемость, которая исчисляется в днях или процентах от общего числа дней.

Продолжительность стояния уровня получается путем последовательного суммирования повторяемостей интервалов, начиная с наивысшего. Расчет повторяемости и продолжительности выполнен в табл. 12, на основании его вычерчены кривые повторяемости и продолжительности уровней р. Урала у г. Оренбурга (рис. 43). Точки по оси ординат откладывают в середине интервала для кривой повторяемости и в конце интервала для кривой продолжительности.

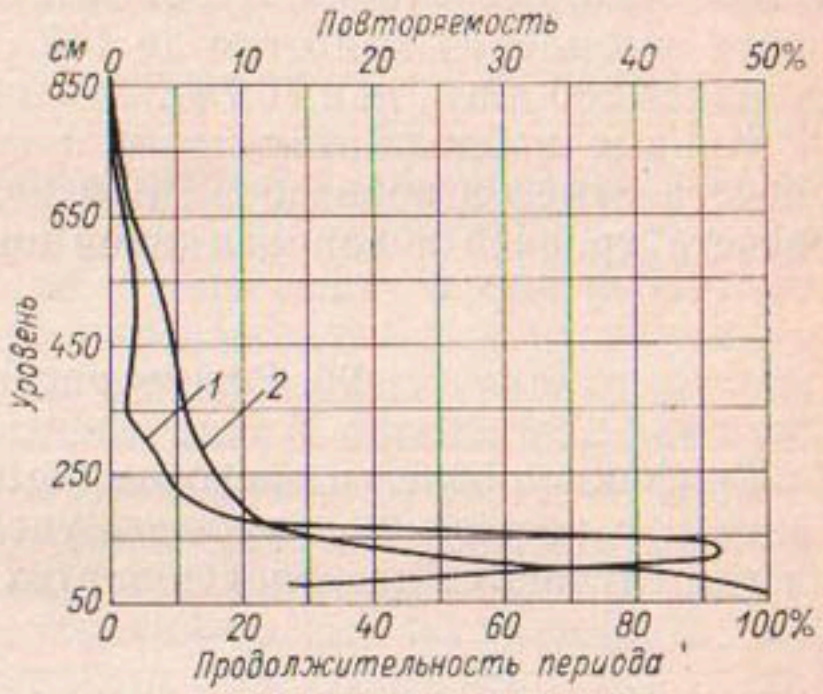


Рис. 43. Кривые повторяемости (*1*) и продолжительности (*2*) стояния уровней воды.

Судя по этим данным, уровень 750 см над нулем графика имеет продолжительность 6 дней, или 1,65%. Иначе говоря, в течение этого времени уровень воды в реке стоял не ниже 750 см над

Таблица 12

Расчет повторяемости и продолжительности уровней р. Урала у г. Оренбурга

Интервал, см	Повторяемость уровней		Продолжительность уровней	
	дни	%	дни	%
899—850	2	0,55	2	0,55
849—800	2	0,55	4	1,10
799—750	2	0,55	6	1,65
749—700	2	0,55	8	2,20
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
199—150	38	10,42	110	30,15
149—100	170	46,55	280	76,70
99—50	85	23,30	365	100,00
Итого	365	100,00		

нулем графика. Отсюда и термин «обеспеченность», т. е. в течение этого времени на реке были обеспечены уровни не ниже 750 см.

Кривая продолжительности применяется, например, при определении продолжительности затопления. Если данная точка берега затопляется при отметке 100 см, то при более высоких отметках уровня она, безусловно, будет затоплена. Таким образом, длительность затопления при отметке 100 см (см. рис. 43 и табл. 12) составляет 280 дней, или 76,7%.

Кривые продолжительности и повторяемости необходимы для расчета отметок водозабора при водоснабжении и орошении, для расчета уровней водоприемников при осушении болот и т. д.

20. Режим расходов воды в реке

Графики уровней и расходов обычно аналогичны по своим очертаниям; с повышением уровня увеличивается и расход. Однако иногда случаются несовпадения этих режимов.

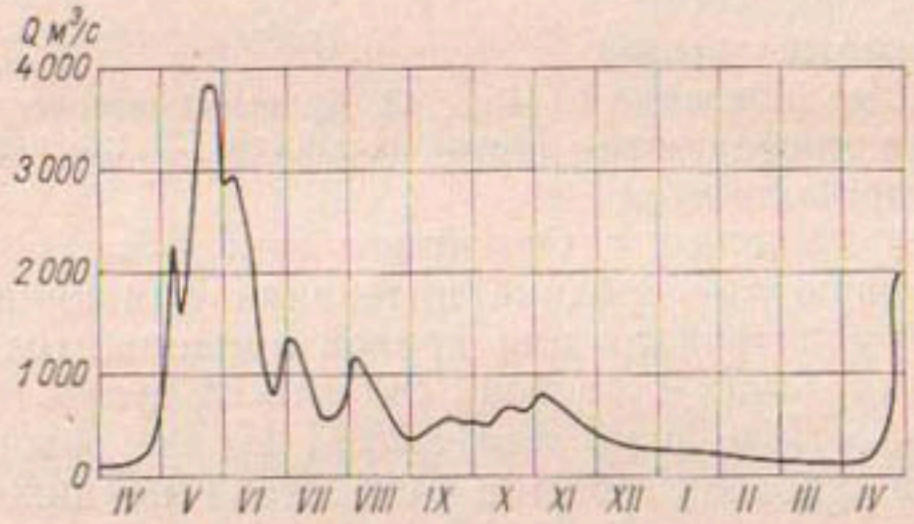


Рис. 44. График колебания расходов воды (гидрограф) р. Вычегды у г. Сыктывкара.

Гидрографом называют график колебания расходов по времени.

На рис. 44 показан график колебания расходов воды р. Вычегды у г. Сыктывкара. Расходы здесь колеблются от 10 до 3800 м³/с. Они резко повышаются в мае, в период весеннего половодья, а затем несколько раз в течение лета во время летних дождевых паводков.

Так как расход представляет собой количество воды, протекающей в одну секунду, то, помножив средний расход $Q_{ср}$ (м³/с) на время t (секунды), получим объем воды, протекающей за это время. Тот же результат можно получить путем определения площади, заключенной внутри гидрографа, выразив масштаб абсцисс в секундах, а ординат — в кубических метрах. Очертания гидрографа зависят от условий питания реки и размера водосборной площади. Для малого водосбора характерен многовершинный гидрограф весеннего половодья (см. рис. 61 *а*), так как сток возрастает

в часы наиболее интенсивного снеготаяния днем и снижается или полностью прекращается с понижением температуры воздуха ночью. Многовершинные гидрографы характерны и для больших рек ливневых районов Дальнего Востока и Черноморского побережья Кавказа.

21. Фазы режима рек

Режим рек по отдельным периодам года изменяется в зависимости от хода метеорологических элементов в бассейне реки. Зимой осадки накапливаются в виде снега и льда. В этот период поверхностное питание прекращается, расходы воды в реках уменьшаются. Весной во время снеготаяния в бассейнах равнинных рек, а летом во время таяния снегов и ледников в бассейнах горных рек происходит резкое увеличение расходов воды. Такие отдельные периоды в жизни рек со свойственными им своеобразными, типичными из года в год режимами расходов и уровней воды называют фазами. Сроки наступления и окончания фаз не постоянны, как не постоянны сроки смены времен года. Различны ежегодные значения расходов и высоты уровней в каждой фазе. Для каждой из них устанавливаются средние даты наступления и окончания фаз, их продолжительность, характерные уровни и расходы воды.

Хозяйственная деятельность человека может изменять характерные для каждой фазы значения расходов и уровней. Регулирование мелких рек иногда приводит к полной ликвидации фаз в их режиме. Регулирование крупных рек, не уничтожая отдельных фаз, резко изменяет характеристики, свойственные режиму рек. Например, постройка плотин на Волге привела к увеличению расходов и уровней летом за счет накопления в водохранилищах вод весеннего половодья. Поэтому расходы весеннего периода многих лет снижены.

Немалую роль в формировании режима реки в отдельные ее фазы играют и другие хозяйственные мероприятия, проводимые в бассейне: осушение болот, вырубка или насаждение лесов, распашка земель и т. д.

В режиме рек различают следующие фазы: половодье, паводок, летнюю и зимнюю межень.

Половодье является ежегодно повторяющейся в один и тот же сезон фазой, в течение которой происходит увеличение водности и подъем уровня. Увеличение водности обусловлено: а) весенним таянием снега на равнинах, б) летним таянием снегов и ледников в высокогорных районах (например, на Тереке, Сулаке, Амударье и других горных реках половодье проходит в июне, июле, первой половине августа), в) длительным выпадением обильных дождей в определенный сезон года, например во время летних муссонов.

На равнинных реках при отсутствии грунтового и дождевого питания режим реки фактически ограничен одной фазой весеннего половодья. Годовой сток формируется только за счет весен-

него стока на большинстве рек Нижнего Заволжья и на всей территории между нижним течением Днепра и Азовским морем.

Для всех равнинных рек СССР (Днепра, Дона, Волги и др.) характерны весенние половодья.

В отличие от половодья, паводок не повторяется периодически в определенный сезон года. Это быстрое, кратковременное поднятие уровня воды в реке. Паводок возникает в любое время года в результате быстрого таяния снега (иногда во время зимней оттепели), таяния ледников, сильных кратковременных дождей, от сброса воды из водохранилища.

Ливневые паводки характерны для рек Крыма, Черноморского побережья и карпатских притоков Днестра.

Меженью называется фаза режима, в продолжение которой река питается в основном грунтовыми водами. В зависимости от времени года межень бывает летняя или зимняя. Наиболее четко границы зимней межени (по продолжительности ледостава) выражены на равнинных реках. Для межени характерно небольшое колебание расходов, тогда как расходы и уровни половодья и паводков меняются в широких пределах. Меженный сток большинства рек СССР невелик. На малых реках его иногда совсем не бывает. Многие крупные реки засушливых областей Юго-Востока СССР с площадями водосборов 10 000 км² после прохождения весеннего половодья пересыхают.

В зимнем режиме рек различают следующие периоды: замерзание, ледостав и вскрытие. Процесс замерзания реки протекает следующим образом. При отрицательной температуре воздуха верхние слои воды охлаждаются. У берегов, где скорости течения малы, появляются забереги, а на поверхности тонкая ледяная пленка, или сало. Вода в реке все время перемешивается: верхние струи опускаются вниз, а нижние поднимаются вверх. Поэтому начавшееся охлаждение постепенно проникает через всю толщу воды. Температура воды по глубине выравнивается, опускается до нуля или ниже. Взвешенные в воде наносы являются «затравками», ядрами кристаллизации. Соприкасаясь с этими пылинками, переохлажденная вода превращается в кристаллы внутриводного льда. Он образуется у дна реки, на плавающих в воде предметах и т. д. Особенно сильно внутриводный лед нарастает на незамерзающих быстротоках и порожистых участках рек, где он иногда загромождает русло, образуя зажоры, которые вызывают сильное повышение уровня воды в реке и даже наводнения. Впоследствии масса внутриводного льда (шуга) всплывает на поверхность реки. Здесь, соприкасаясь с холодным воздухом, шуга смерзается сильнее, превращаясь в льдины. На реке образуется осенний ледоход.

Льдины постепенно увеличиваются и смерзаются в суженных и мелких участках русла, где раньше всего наступает сплошной ледостав. При этом прекращается образование внутриводного льда, так как ледяной покров является теплоизолятором, не допускающим понижения температуры воды.

Некоторые участки реки — полыньи — не замерзают почти всю зиму. На этих участках продолжает образовываться внутриводный лед.

Ледяной покров нарастает главным образом снизу. При снежном покрове толщиной 40 см нарастание льда прекращается.

Толщина льда может быть определена по эмпирической формуле С. В. Быдина — П. П. Белокони

$$h_л = 11\sqrt{\Sigma t} + 2{,}3, \qquad (36)$$

где $h_л$ — толщина льда в сантиметрах; Σt — сумма средних месячных отрицательных температур.

Продолжительность отдельных фаз осенне-зимнего режима (продолжительность ледохода, образования сплошного ледяного покрова, зимнего ледостава) зависит от метеорологических условий года в бассейне реки. Немалую роль играет водность (расход) реки. Равнинные малые реки замерзают раньше, чем большие. На крайнем Севере реки покрыты льдом в течение семи-восьми месяцев; на юге (Закавказье, Северный Кавказ) часть рек вообще не замерзает.

Весной во время снеготаяния уровень воды в реке поднимается, лед взламывается, после чего начинается ледоход. Зачастую в местах поворота русла лед скапливается, нагромождается и образует заторы. Во время заторов возможны значительные повышения уровня в реке, являющиеся иногда причиной наводнений. Заторы особенно характерны для рек, которые текут с юга на север, потому что вскрываются они раньше в верховьях и плывущий лед нагромождается ниже на невскрывшихся еще участках реки.

Действие поверхностного и внутриводного льда на гидротехнические сооружения заключается в следующем. Внутриводный лед нарастает на сороудерживающих решетках водоприемных устройств. Вследствие этого уменьшается доступ воды к турбинам. Резко снижается выработка электроэнергии. Зачастую внутриводный лед вызывает аварии водоприемников водоснабжения. Для борьбы с внутриводным льдом на гидростанциях применяют обогревание решеток, подводных частей сооружений, где он чаще всего скапливается.

Значительные аварии гидротехнических сооружений возможны во время ледохода. Весной ударами льда разрушаются незащищенные участки плотин. Лед часто забивает входные отверстия, снижая пропускную способность водоспусков и водосбросных каналов. Иногда переполняются водохранилища, вода переливается через гребни плотин, что приводит к разрушению сооружений.

На водохранилищах строят специальные ледоудерживающие сооружения; применяют также измельчение льда при помощи взрывов. Лед особенно опасен в неотепленных трубопроводах, например на ирригационных насосных станциях. Поэтому воду из них удаляют до наступления низких температур.

Характерные уровни и расходы. Каждой фазе режима рек свойственны типичные или характерные расходы и соответствующие уровни воды в реке. Знание характерных уровней и расходов воды необходимо для проектирования, а также при эксплуатации гидротехнических сооружений.

Наивысшие уровни и расходы воды необходимо знать для проведения мероприятий по борьбе с затоплением населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий и т. д. Без этих данных невозможно проектировать сооружения для сброса максимальных расходов (водоспусков, водосливных плотин, водосбросных каналов). Минимальные расходы учитывают при проектировании гидростанций, орошения и водоснабжения. Наинизшие уровни необходимы для определения возможностей судоходства.

Зная средние даты наступления и окончания отдельных фаз режима реки, средние многолетние значения характерных уровней, перечисленных выше, можно построить типовой график уровней и расходов воды. Типовой график расходов отражает общие характерные черты гидрографов в среднем за ряд лет и свободен от случайных метеорологических особенностей каждого года.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы гидравлические элементы потока? Что такое живое сечение, смоченный периметр, гидравлический радиус, уклон, скорость течения воды и расход потока?
2. Каково соотношение между расходом, площадью живого сечения и средней скоростью?
3. Какова зависимость между средней скоростью и гидравлическими элементами потока при равномерном движении? Напишите формулу Шези.
4. Что называется истоком и устьем реки?
5. Что такое дельта?
6. Что такое речная долина и русло реки? Есть ли между ними разница?
7. Назовите составные части долины.
8. Из каких частей состоит русло реки?
9. Как образуются излучины?
10. Как вычислить уклон участка реки? Как вычислить средний уклон бассейна?
11. Как перейти от дробных величин уклона к процентам и промилле?
12. Почему реки имеют поперечный уклон?
13. Что такое водосбор, водораздел?
14. Всегда ли совпадают поверхностные и подземные водоразделы?
15. Перечислите основные геометрические характеристики водосбора и объясните, как они определяются?
16. Назовите основные физико-географические характеристики бассейна.
17. По каким признакам классифицируются реки земного шара?
18. Как классифицируются реки по источникам питания?
19. От чего зависит высота стояния уровней воды в реке?
20. Что такое «нуль графика»?
21. Как составляется график колебания уровней?
22. Что такое повторяемость и продолжительность стояния уровней?
23. Как вычислить повторяемость и продолжительность уровней и как составить график повторяемости и обеспеченности?
24. Какие основные фазы режима реки?
25. Как образуется донный лед?
26. Как образуется ледяной покров?

27. Что такое сало, зажоры, забереги, полыньи?
28. По какой формуле можно вычислить толщину льда?
29. Как образуются заторы льда? Какая разница между заторами и зажорами?
30. Какие уровни и расходы называют характерными и как составляется типовой график уровней и расходов?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 8. 1. Определить площади бассейнов р. Раздольной и ее притоков первого порядка. 2. Построить график нарастания площади бассейна. 3. Определить для бассейна р. Раздольной: а) длину, б) среднюю ширину, в) наибольшую ширину, г) средний уклон, д) лесистость, озерность, заболоченность и е) густоту речной сети. 4. Определить для р. Раздольной: а) длину, б) падение и в) средний уклон.

Дано: выкопировка из карты бассейна р. Раздольной до впадения в нее р. Лесной (рис. 45).

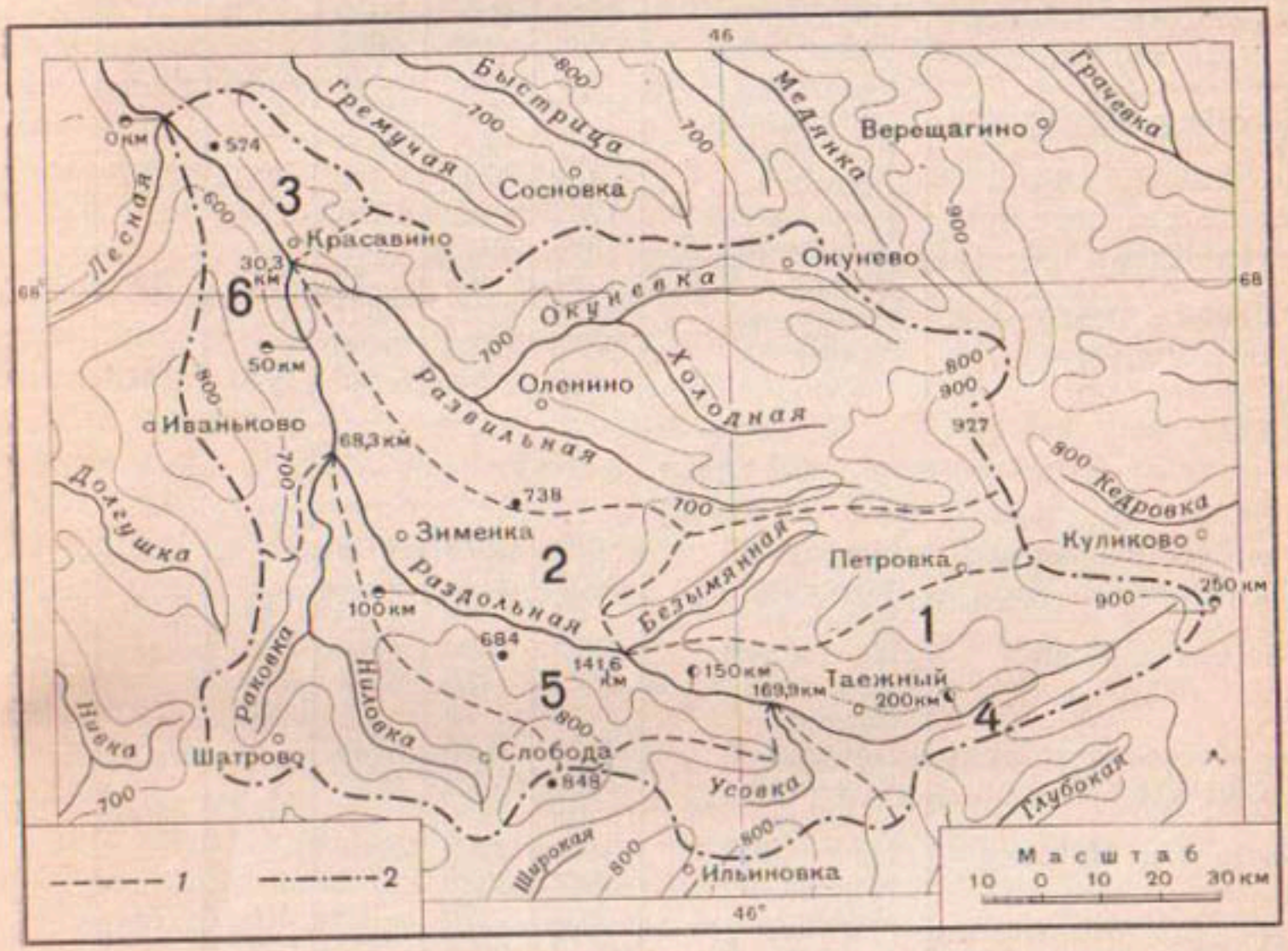


Рис. 45. Выкопировка из карты бассейна р. Раздольной.
1 — водоразделы частных бассейнов; *2* — водоразделы общего бассейна.

Решение. 1. Сначала наносим линию водораздела общего бассейна р. Раздольной, затем водоразделы частных бассейнов притоков первого порядка. В данном упражнении линия водораздела общего бассейна проходит по отметкам 900, 800 м у истока, снижаясь до отметок 700, 600, 580 м у расчетного створа.

Таблица 13

Вычисление площади бассейна р. Раздольной
Планиметр «Геофизика» № 6228, цена деления $f_0 = 10{,}31$ км²

Площадь	Отсчет	Отсчеты по планиметру			Средняя разность отсчетов $n_2 - n_1 = \Delta n$	Площадь $F = f_0 \Delta n$, км²	Площадь нарастающим итогом, км²
		I прием	II прием	III прием			
Правый берег							
Межбассейновое пространство № 1	Начальный (n_1)	0183	3856	4476			
	Конечный (n_2)	0322	3997	4616			
	Разность (Δn)	139	141	140	140	1443	1443
Бассейн р. Безымянной	Начальный	5194	4979	4532			
	Конечный	5297	5080	4634			
	Разность	103	101	102	102	1052	2495
Межбассейновое пространство № 2	Начальный	3844	4068	3935			
	Конечный	3963	4188	4055			
	Разность	119	120	120	120	1237	3732
Бассейн р. Развильной	Начальный	4754	9406	7399			
	Конечный	5197	9847	7844			
	Разность	443	441	445	443	4567	8299
Межбассейновое пространство № 3	Начальный	1762	9429	9353			
	Конечный	1806	9475	9398			
	Разность	44	46	45	45	464	8763
Бассейн р. Раздольной правого берега $F_{пр}$	Начальный	8718	2844	2621			
	Конечный	9568	3695	3469			
	Разность	850	851	848	850	8763	
Левый берег							
Межбассейновое пространство № 4	Начальный	3980	4073	4670			
	Конечный	4027	4119	4715			
	Разность	47	46	45	46	474	474
Бассейн р. Усовки	Начальный	4073	4380	4780			
	Конечный	4143	4450	4851			
	Разность	70	70	71	70	722	1196
Межбассейновое пространство № 5	Начальный	4703	4970	6844			
	Конечный	4808	5076	6951			
	Разность	105	106	107	106	1093	2289
Бассейн р. Ниловки	Начальный	4169	3219	3560			
	Конечный	4337	3389	3728			
	Разность	168	170	168	169	1742	4031
Межбассейновое пространство № 6	Начальный	4513	6874	7984			
	Конечный	4590	6950	8059			
	Разность	77	76	75	76	784	4815
Бассейн р. Раздольной левого берега $F_л$	Начальный	7860	4297	3845			
	Конечный	8327	4766	4311			
	Разность	467	469	466	467	4815	
Весь бассейн р. Раздольной F	Начальный	8900	4721	2893			
	Конечный	9219	6036	4200			
	Разность	1319	1315	1317	1317	13 578	

Река Раздольная имеет два левых притока первого порядка (Усовка и Ниловка) и два правых (Безымянная и Развильная). Общий бассейн р. Раздольной делится водораздельными линиями на четыре частных бассейна притоков первого порядка и шесть межбассейновых пространств. Нумерацию межбассейновых пространств производим сначала по правому (*1*, *2*, *3*), а затем по левому берегу (*4*, *5*, *6*).

Площади определяем планиметром трехкратной обводкой каждого контура. Расхождение в количестве делений между отдельными обводками не должно превышать: двух — при площади до 200 делений; трех — при площади 200—2000 и четырех — при площади свыше 2000 делений.

Результаты планиметрирования и вычисления площадей по правому и левому берегам р. Раздольной приведены в табл. 13.

Из табл. 13 видно, что площадь бассейна правого берега р. Раздольной составляет: $F_{пр}=8763$, левого берега $F_{л}= 4815$ км². Общая площадь бассейна $F = 13\,578$ км².

Следует помнить, что полного совпадения площади общего бассейна реки с суммой площадей частных бассейнов и межбассейновых пространств при планиметрировании добиться очень трудно. Невязка (расхождение) в $^1/_{200}$ от общей площади бассейна считается допустимой и распределяется между площадями частных бассейнов пропорционально их величине.

2. Площадь бассейна р. Раздольной разбиваем на пять участков. Каждый участок заканчивается у впадения притока первого порядка: 1-й участок — от расчетного створа до р. Развильной, 2-й — от р. Развильной до р. Ниловки, 3-й — от р. Ниловки до р. Безымянной, 4-й — от р. Безымянной до р. Усовки, 5-й участок — от р. Усовки до истока. Затем при помощи измерителя с постоянным раствором ножек (обычно 2—3 мм) измеряем дважды длину каждого участка главной реки (туда и обратно). Умножаем цену деления измерителя l_0 на измеренное количество n, т. е.

$$L = l_0 n.$$

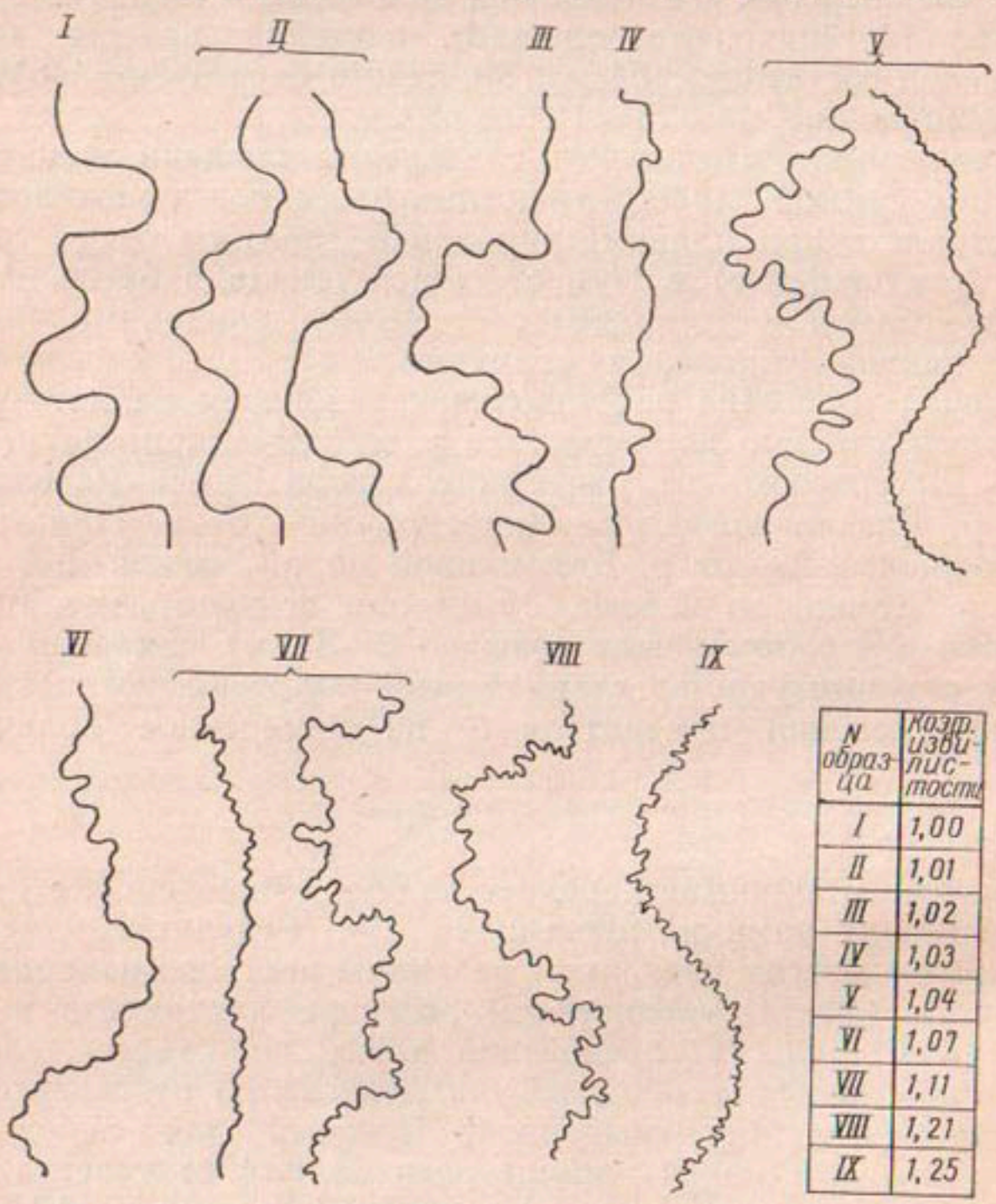
За расчетное принимаем среднее из обоих измерений, если расхождение между ними не превышает 2%. Результат измерения длины реки во многом зависит от величины раствора измерителя и извилистости реки. С увеличением раствора измерителя и извилистости реки точность определения длины понижается, так как малые изгибы иногда вообще не учитываются. В результате длина реки получится преуменьшенной. Поэтому для определения действительной (истинной) длины реки $L_р$ или ее участка измеренную длину L следует умножить на поправочный коэффициент k, значение которого зависит от степени (класса) извилистости. Тогда длина реки $L_р = Lk$.

Образцы извилистости рек и соответствующие им значения поправочных коэффициентов показаны на рис. 46. Результаты измерений и вычислений длины р. Раздольной приведены в табл. 14.

Таблица 14

Результаты измерений длины р. Раздольной

Название участка	Длина участка L, км			Коэффициент k	Вычисленная длина $L_р$, км	Расстояние от расчетного створа, км
	1-измерение	2-измерение	средняя из двух измерений			
Расчетный створ	—	—	—	—	—	0,0
Расчетный створ — р. Развильная . . .	30	30	30,0	1,01	30,3	30,3
Р. Развильная — р. Ниловка	37	37	37,0	1,03	38,1	68,4
Р. Ниловка — р. Безымянная	71	72	71,5	1,03	73,6	142,0
Р. Безымянная — р. Усовка	28	27	27,5	1,01	27,8	169,8
Р. Усовка — исток р. Раздольной . . .	82	83	82,5	1,02	84,2	254,0



№ образца	Коэф. извилистости
I	1,00
II	1,01
III	1,02
IV	1,03
V	1,04
VI	1,07
VII	1,11
VIII	1,21
IX	1,25

Рис. 46. Образцы извилистости рек и поправочные коэффициенты по шкале Ю. М. Шокальского.

На графике (рис. 47) по вертикальной оси откладываем длину реки, а по горизонтальной — площади бассейнов. Графики нарас-

тания площади бассейна строим отдельно для правого и левого берегов, согласно табл. 13. Для правого берега на вертикальной оси откладываем расстояния от расчетного створа до мест впадения р. Развильной (30,3 км) и р. Безымянной (142,0 км).

Первой точкой *a* графика является исток реки, где площадь бассейна равна нулю. От истока до места впадения р. Безымянной площадь бассейна р. Раздольной возрастает за счет первого межбассейнового пространства, равного 1443 км². Эту величину откладываем влево на расстоянии 142 км от расчетного створа. Полученную точку *b* графика соединяем с точкой *a*. В этом же месте

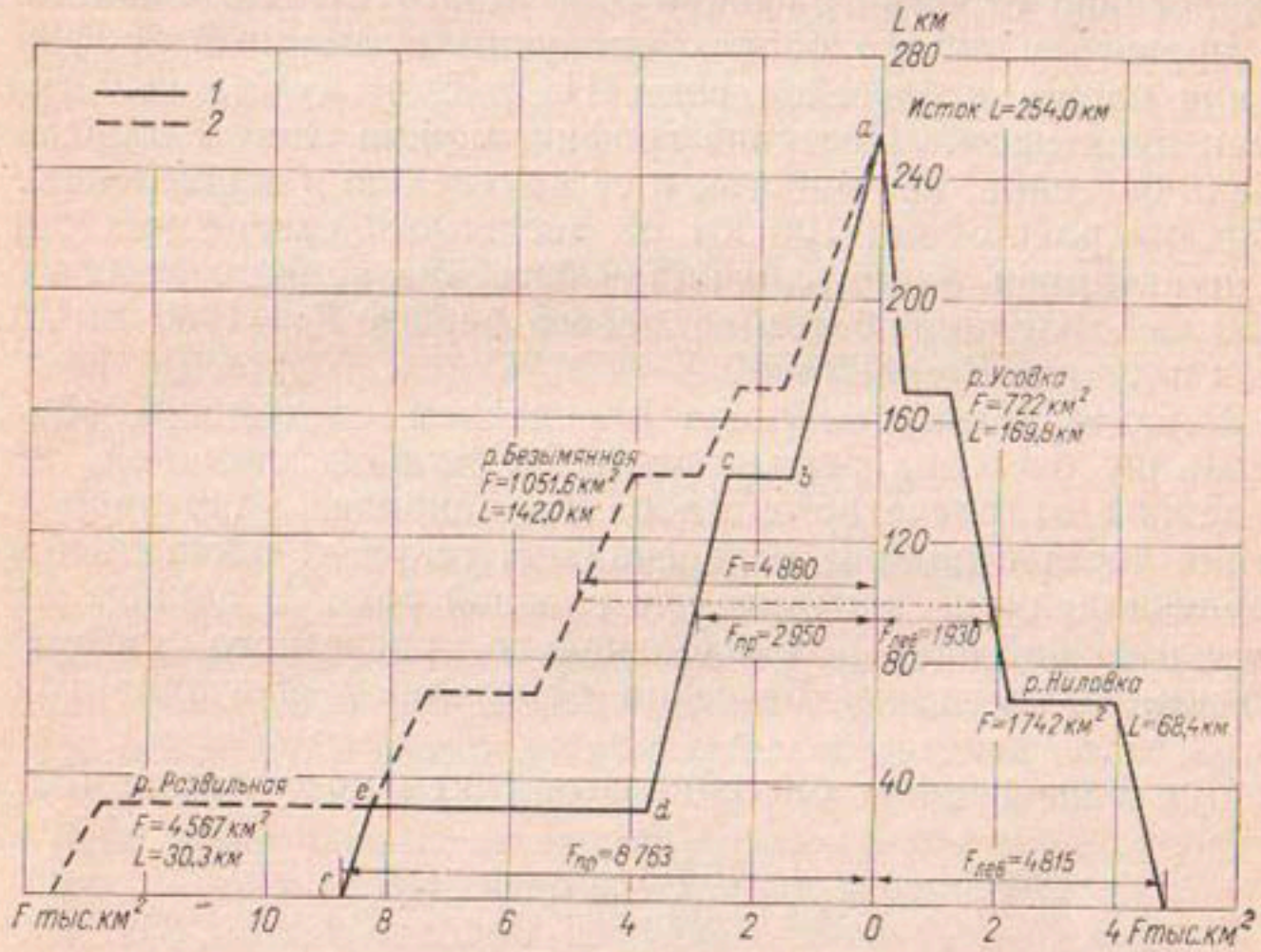


Рис. 47. График нарастания площади бассейна р. Раздольной.
1 — частная площадь бассейна по правому или левому берегу; *2* — суммарная площадь бассейна.

в реку впадает р. Безымянная с площадью бассейна 1052 км². Следовательно, на расстоянии 142 км от расчетного створа площадь бассейна р. Раздольной составляет $1443 + 1052 = 2495$ км².

Площадь бассейна р. Безымянной на графике изображается отрезком *bc*. На участке от р. Безымянной до р. Развильной площадь бассейна увеличивается за счет 2-го межбассейнового пространства в 1237 км². Площадь бассейна р. Раздольной до впадения в нее р. Развильной составляет $2495 + 1237 = 3732$ км². На расстоянии 30,3 км от расчетного створа откладываем 3732 км². Полученную точку *d* соединяем наклонной линией с точкой *c*. В этом же месте в р. Раздольную впадает р. Развильная с площадью бассейна 4567 км². Следовательно, суммарная площадь бассейна р. Раздольной составит: $3732 + 4567 = 8299$ км². Эта величина отло-

жена от расчетного створа (30,3 км) до точки *e* графика. Отрезок *de* графика изображает площадь бассейна р. Развильной. В дальнейшем увеличение площади бассейна р. Раздольной происходит за счет третьего межбассейнового пространства в 464 км². Суммарная площадь бассейна р. Раздольной от истока до расчетного створа по правому берегу составляет 8299 + 464 = 8763 км². Отложив на горизонтальной оси эту площадь, получим конечную точку *f* графика, которую соединяем с точкой *e*. Линия *abcdef* графически изображает ход нарастания площади бассейна р. Раздольной от истока до расчетного створа по правому берегу.

Аналогично строим график и для левого берега. Сложив графики правого и левого берегов, получим суммарный график нарастания площади бассейна реки. На рис. 47 суммарный график показан пунктиром. Построив график, можно легко определить площадь бассейна, не прибегая к ее измерению и вычислению. Например, на расстоянии 100 км от расчетного створа (на рис. 47 штрихпунктирная линия) площадь бассейна правого берега $F_{пр}$ = = 2950 км², площадь бассейна левого берега $F_{л}$ = 1930 км². Суммарная площадь F = 4880 км².

3. Характеристики бассейна определяем следующим образом.

а. Длину бассейна реки определяем длиной ломаной линии, проведенной от расчетного створа до наиболее удаленной точки бассейна через середины поперечников, секущих площадь бассейна перпендикулярно направлению главной реки. В данном упражнении длина бассейна р. Раздольной до расчетного створа L = = 215 км. Часто длину бассейна определяют по длине главной реки.

б. Среднюю ширину бассейна вычисляем по формуле (32)

$$b_{ср} = \frac{13\,578}{215} = 63{,}2 \text{ км}.$$

в. Средний уклон бассейна вычисляем по формуле (33). Сечение рельефа ΔH = 100 м; площадь водосбора F = 13 578 км²; сумма длин горизонталей Σl = 414 км. Средний уклон бассейна

$$I_б = \frac{100}{13\,578} \cdot 414 = 3{,}05‰ = 0{,}305\% = 0{,}003.$$

г. Густоту речной сети вычисляем по формуле (34). В результате выполненных измерений длина р. Раздольной и ее притоков оказалась равной 687 км. Отсюда

$$\gamma = \frac{687}{13\,578} = 0{,}05 \text{ км/км}^2.$$

д. Лесистость, озерность и заболоченность бассейна определяются по формулам (35 б), (35 в), (35 г). На данном бассейне озера и болота отсутствуют, т. е. $f_{оз}$=0 и $f_б$=0. Для определения

лесистости бассейна наносим на карту контуры леса. Суммарная площадь лесов, определенная планиметрированием,

$$f_л = 1420 \text{ км}^2, \text{ а } \delta_л = \frac{1420}{13\,578} \cdot 100 = 10{,}5\%.$$

4. Характеристики р. Раздольной вычисляем следующим образом.

а. Длина р. Раздольной $L_р = 254$ км (см. табл. 14).

б. Средний уклон р. Раздольной вычисляем по формуле (23). При отсутствии данных об отметках уровней средний уклон ориентировочно определяют как частное от деления разности отметок поверхности земли в тех же точках на расстояние между ними по геометрической оси реки. В данном упражнении отметка поверхности земли у истока реки $H_1 = 897$ м, в расчетном створе $H_2 = 574$ м. Отсюда

$$I = \frac{897 - 574}{254{,}0 \times 1000} = 0{,}00127 = 1{,}27‰ \approx 0{,}13\%.$$

Уклон выравненного продольного профиля 0,98‰.

ТЕМА 6. РЕЧНОЙ СТОК

22. Единицы измерения стока

Водность реки в тот или иной момент времени характеризуется расходом воды. В связи с непрерывным изменением поверхностного или подземного притока происходит изменение расходов воды в реке. Сток особенно сильно изменяется в отдельные фазы режима реки и еще больше по годам. Поэтому для определения объема стока за какой-либо отрезок времени (сутки, месяц, фазу, год и т. д.) пользуются средним расходом воды за этот отрезок времени. Суммарный сток W вычисляют умножением среднего секундного расхода Q_0 на число секунд

$$W = Q_0 t \cdot 86\,400, \tag{37}$$

где t — число суток; 86 400 — число секунд в одних сутках ($24 \times 60 \times 60 = 86\,400$).

Суммарные величины стока разных рек несравнимы между собой, так как площади водосборов их неодинаковы. Поэтому для характеристики годового стока удобно пользоваться модулем стока.

Модуль стока — расход реки, приходящийся на 1 км² бассейна. Он выражается формулой

$$q = \frac{Q_0 \cdot 1000}{F}; \tag{38}$$

отсюда

$$Q_0 = \frac{qF}{1000}, \tag{38а}$$

где q — модуль стока в л/(с·км²); Q_0 — средний годовой расход реки в м³/с.

Согласно формуле (37),

$$Q_0 = \frac{W}{t \cdot 86\,400}.$$

При $t = 365$ суткам

$$q = \frac{W \cdot 10^3}{365 \cdot 86\,400\, F} = \frac{W}{31{,}5 \cdot 10^3 F}. \qquad (39)$$

Сток принято выражать, как и осадки, в миллиметрах слоя: предполагается, что весь сток распределен ровным слоем по площади бассейна. Слой стока y получается делением объема стока на площадь водосбора

$$y = \frac{W}{F \cdot 1000 \cdot 1000} \cdot 1000 = \frac{W}{F \cdot 10^3}. \qquad (40)$$

Из формул (39) и (40) можно найти зависимость между слоем стока и модулем стока

$$q = \frac{yF \cdot 10^3}{31{,}5 \cdot 10^3 F} = \frac{y}{31{,}5} = 0{,}0317\, y, \qquad (41)$$

где y — в миллиметрах; q — в литрах в секунду с 1 км² (л/(с·км²)).

Среднее многолетнее значение стока (модуля или слоя стока или среднего многолетнего расхода) называется нормой стока. Обозначив годовые величины стока через $q_1, q_2, q_3, \ldots, q_{n-1}, q_n$, а число лет наблюдений n, получим среднюю многолетнюю величину, или норму годового стока:

$$\overline{q} = \frac{q_1 + q_2 + q_3 + \ldots + q_{n-1} + q_n}{n} = \frac{\Sigma q}{n}, \qquad (42)$$

где $\overline{q}$ — в л/(с·км²).

Точно так же

$$\overline{y} = \frac{y_1 + y_2 + \ldots + y_{n-1} + y_n}{n} = \frac{\Sigma y}{n} \qquad (43)$$

(где y — в миллиметрах) или средний многолетний[1] расход (в м³/с)

$$\overline{Q} = \frac{\Sigma Q}{n}. \qquad (44)$$

Очень часто сток выражают в долях от суммы осадков. Эта величина называется коэффициентом стока. Коэффициент стока η выражается формулой

$$\eta = \frac{y}{x}, \qquad (45)$$

[1] Все величины с черточкой наверху являются средними многолетними.

где x — сумма осадков в миллиметрах; y — сток в миллиметрах.

В практике гидрологических расчетов, кроме перечисленных величин, применяется еще модульный коэффициент, который представляет собой отношение стока за какой-либо период года или весь год к среднему многолетнему значению его за тот же период или за год

$$k = \frac{Q_i}{\overline{Q}} = \frac{W_i}{\overline{W}} = \frac{y_i}{\overline{y}} = \frac{q_i}{\overline{q}}, \qquad (46)$$

где k — модульный коэффициент.

Индекс i при величинах Q, W, y и q означает, что сток принят для конкретного расчетного периода, например для января, февраля или другого определенного месяца или для какого-то конкретного года и т. д.

23. Водный баланс речных бассейнов

Водный баланс рассматривается как разность сумм приходных и расходных элементов за какой-либо период времени. Если обозначить сумму приходных элементов через П, а расходных через Р, то уравнение водного баланса можно выразить так:

$$\text{П} - \text{Р} = \pm \Delta U. \qquad (47)$$

Приходные элементы складываются из осадков x, выпадающих на поверхность водосбора за рассматриваемый период, конденсации влаги c в почве и на ее поверхности: $\text{П} = x + c$.

К расходным элементам относятся: суммарное испарение с поверхности воды и почвы z, поверхностный сток y_1 и подземный сток y_2, т. е. $\text{Р} = z + y_1 + y_2$.

Таким образом $(x + c) - (z + y_1 + y_2) = \pm \Delta U$.

Конденсация обычно невелика и из расчетов может быть исключена. Заменив $y_1 + y_2$ на y, представляющий суммарный сток речного бассейна, получим

$$x - (z + y) = \pm \Delta U.$$

В отдельные годы возможны два случая: 1) в многоводные годы не все осадки расходуются на испарение и сток (часть их накапливается в бассейне, создавая запасы почвенной и грунтовой воды) и 2) в засушливые годы дополнительные запасы почвенных и грунтовых вод расходуются полностью. За многолетний же период ΔU равняется нулю. Поэтому для средних многолетних величин можно написать

$$\overline{x} = \overline{z} + \overline{y}. \qquad (48а)$$

Из формулы следует, что в среднем за много лет сумма осадков равна сумме испарения и стока. Разделив обе части уравнения на $\bar{x}$, получим

$$\frac{\bar{z}}{\bar{x}} + \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = 1. \qquad (48б)$$

Величина $\frac{y}{x}$ — коэффициент стока. По аналогии $\frac{z}{x}$ называется коэффициентом испарения. Из формулы следует, что сумма коэффициентов средних многолетних величин стока и испарения в речном бассейне равна единице. В бессточных речных или озерных бассейнах (не имеющих стока в океан) $\bar{y} = 0$, а $\bar{x} = \bar{z}$. Последнее выражение верно для замкнутых бассейнов Каспийского, Аральского и других морей.

24. Факторы, влияющие на речной сток

Какие факторы воздействуют на пространственное изменение фазовооднородных величин стока? От чего зависит норма годового или весеннего стока в различных природных зонах? Почему модули стока юго-восточных рек СССР (например, Большого Узеня) меньше модулей стока северных рек (Оби)? От чего зависит изменение стока одного и того же бассейна во времени? Например, почему сток р. Дона неодинаков по величине в разные годы?

Влияние климата на сток. Из формулы (48 а) следует, что норма стока зависит от осадков и испарения ($\bar{y} = \bar{x} - \bar{z}$). Обе эти величины являются основными показателями климата и связаны с влажностью, температурой воздуха и скоростью ветра. Поэтому и средний многолетний сток зависит от климатических факторов. Климат каждой зоны, а также речного бассейна не меняется в течение многих лет; столь же устойчивой является и норма стока каждого речного бассейна.

Однако климатические условия постепенно изменяются в пространстве: в направлении с северо-запада ЕТС на юго-восток уменьшается норма осадков, возрастают температуры воздуха, увеличивается потенциальная возможность испарения. Норма стока в этом направлении постепенно уменьшается.

Влияние растительного покрова и почв на сток. Растительный покров и почвы разных географических зон являются производными климата. С севера на юг растительность от мхов и лишайников тундры переходит к смешанным лесам тайги, хвойным и лиственным лесам лесной зоны. К юго-востоку леса постепенно исчезают и сменяются степной растительностью. В этом же направлении меняется почвенный покров. С изменением климата и состава растительности при одинаковых почвообразующих породах происходят изменения в почвообразовательном процессе. Поэтому пространственное изменение стока целиком зависит от климата.

Рассмотрим, например, речной бассейн, состоящий из нескольких более мелких бассейнов. Допустим, что в реку впадают два небольших притока, которые находятся в одинаковых климатических условиях. Водосбор одного из них сложен песками, а другого — глинистыми грунтами. Будет ли норма стока обоих водосборов одинакова? В первом случае просачивание больше. Следовательно, поверхностный сток с первого меньше, чем со второго бассейна. Что касается подземного стока, то его величина зависит не только от почвенных условий, но и от геологического строения бассейнов. Если песчаные почвы на небольшой глубине подстилаются водонепроницаемыми (водоупорными) грунтами, которые вскрываются руслом реки, то может сформироваться большой подземный сток (рис. 48 *а*). Здесь возможна одинаковая величина среднего многолетнего годового стока с обоих водосборов.

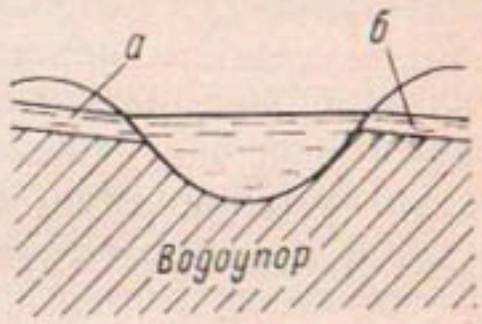


Рис. 48. Направление движения грунтовых вод в водоносном горизонте, прорезанном руслом реки.
а — к руслу; *б* — от русла.

Если же водоносный горизонт не вскрывается руслом реки и река не имеет подземного стока, то годовой сток притока, у которого бассейн сложен песками, будет меньше годового стока второго притока, сложенного глинами. Больше того, при наличии мощного слоя песков возможны потери стока вдоль русла реки. Потери стока возможны и в том случае, если водонепроницаемые грунты, прорезанные руслом, имеют уклон в сторону от русла (рис. 48 *б*).

Бассейны рек в лесостепной зоне частично или полностью облесены. Корни древесных пород проникают на большую глубину, как бы рыхлят почву. В пористую почву быстрее просачиваются талые и дождевые воды. Помимо этого, почва в лесу лучше утеплена снегом и лесной подстилкой, а потому меньше промерзает. В такую почву весной вода просачивается интенсивнее. Таким образом, лес содействует снижению и весеннего и дождевого стока. За счет уменьшения поверхностного стока несколько увеличивается подземный сток, если геологические условия благоприятствуют этому.

Влияние рельефа бассейна на сток. Рельеф бассейна — это совокупность неровностей (изрезанность гидрографической сетью), уклонов склонов и высоты над уровнем моря. С увеличением высоты бассейна понижается температура воздуха, увеличиваются атмосферные осадки и уменьшается испарение, а следовательно, увеличивается сток. Увеличение стока по высоте характерно для Кавказа, Памира, Урала и других горных районов.

С увеличением уклонов поверхности бассейна повышается скорость движения воды, вследствие чего сокращается продолжительность ее стояния на поверхности почвы и в русле. В почву просачивается меньше воды. Поэтому с увеличением крутизны склонов возможно некоторое увеличение поверхностного стока. Это наибо-

лее характерно для дождевого паводка и в меньшей мере для весеннего половодья.

Влияние величины и формы бассейна на сток. Размеры бассейна оказывают существенное влияние на величину стока потому, что обычно с увеличением площади водосбора возрастает различие в климатических и почвенно-геологических условиях. Так, сток Лены, Оки, Чусовой и других рек, текущих в направлении от менее увлажненных районов к более увлажненным, постепенно возрастает. Сток же Нижней Волги (на участке от г. Камышина до устья) уменьшается, так как здесь потери из реки не компенсируются притоком грунтовых вод, а поверхностный сток почти отсутствует.

Различие в нормах стока больших и малых водосборов объясняется разными условиями грунтового питания. В больших речных бассейнах часть инфильтрующейся воды пополняет грунтовые воды. Русла больших рек прорезают водоносные горизонты, которые становятся источниками их питания. Чем больше водоносных горизонтов вскрывается (дренируется) рекой, тем больше подземный сток.

Русла балок, оврагов и рек малых бассейнов вскрывают водоносные горизонты лишь частично, а в некоторых случаях и вовсе не вскрывают. Поэтому с увеличением водосборов рек возрастает норма годового стока. Глубина залегания грунтовых вод, а следовательно, и возможность дренирования их руслами больших и малых рек тоже подчиняется определенной географической закономерности. На севере грунтовые воды залегают близко от поверхности земли. Здесь разница в стоке больших и малых речных бассейнов невелика. С продвижением к юго-восточным засушливым районам глубина залегания грунтовых вод возрастает. Увеличивается и разница в нормах стока с больших и малых водосборов.

Размер бассейна не оказывает влияния на величину стока, если не изменяются факторы стока. При одинаковом растительном покрове, рельефе, в аналогичных климатических, почвенных и геологических условиях сток с большого или малого водосборов одинаков. Наблюдения, выполненные в Заволжье на водосборах площадью 1, 3, 5, 110, 2500 км² и больше, показали, что все они питаются только за счет стока талых вод. Площадь водосбора не оказывает здесь никакого влияния на норму стока.

В Казахстане, Прикаспийской низменности и других засушливых районах норма стока в значительной мере зависит от площади бессточных понижений, аккумулирующих талые и дождевые воды. Поэтому с увеличением площади бассейна сток уменьшается. Так, в бассейне р. Ишима до г. Целиноград бессточные площади составляют около 25%, а в бассейне р. Тобола — около 20%.

В равнинных районах возможен перенос снега из одного бассейна в другой. Разные запасы снега в соседних бассейнах могут повлиять на формирование различных величин стока с них в отдельные годы.

Форма бассейна, т. е. его ширина и протяженность, также оказывает влияние на величину стока. Чем уже бассейн, тем короче путь добегания воды от водораздела до русла, меньше потери стока на просачивание в почву и больше поверхностный сток.

Влияние озерности и заболоченности бассейна на сток. В болотах, как и в озерах, сток задерживается. Поэтому с увеличением площади озер и заболоченности сток уменьшается.

Многие реки (Нева, Ангара и др.) берут начало из озер. Озеро служит как бы регулирующим водохранилищем: во время весеннего снеготаяния сток в реке нарастает медленно, так как часть его накапливается в озере; в межень накопленный объем воды в озере постепенно срабатывается. Внутригодовое распределение стока в такой реке более равномерно.

Влияние деятельности человека на сток. Строительство гидростанций, регулирование рек в целях улучшения судоходства, устройство каналов для переброски воды из одних рек в другие, использование воды для орошения и обводнения, осушение территорий и т. д. — все это вносит большие изменения в гидрологический режим малых и больших рек. Хозяйственные мероприятия приводят к уменьшению или увеличению стока, к изменению внутригодового распределения его.

В основе комплексного регулирования стока лежит всестороннее использование водных ресурсов для народного хозяйства. Примерами комплексного регулирования стока могут служить крупные водохранилища, построенные на Волге; они обеспечивают выработку электроэнергии, улучшение водного пути, позволяют создать запасы воды для орошения. Однако вследствие увеличения площади водного зеркала возрастают потери на испарение и фильтрацию, поэтому сток Волги несколько уменьшился.

Коренным образом изменится величина стока и режим рек после переброски воды одних рек в речные бассейны других рек. Таков проект переброски вод северных рек для орошения земель в республиках Средней Азии и в Волгу для орошения Заволжья и улучшения питания Каспийского моря.

Изменение режима стока отражается на гидрологическом режиме во всем бассейне реки. Уменьшение стока при орошении зачастую сопровождается повышением уровней грунтовых вод, а иногда и небольшим увеличением подземного, т. е. меженного стока при одновременном уменьшении общего стока. Осушение больших площадей плавней, занятых тростниками и камышами в дельте р. Амударьи, привело к резкому снижению испарения с их поверхности. Поэтому, несмотря на значительное изъятие стока для орошения, все же до 60-х годов не наблюдалось уменьшение годового стока этой реки.

Значительное влияние на режим стока в засушливой и полузасушливой зонах оказывают агротехнические мероприятия. Влага в этих зонах является главным и решающим фактором урожая. Агротехника здесь направлена в первую очередь на сбережение и

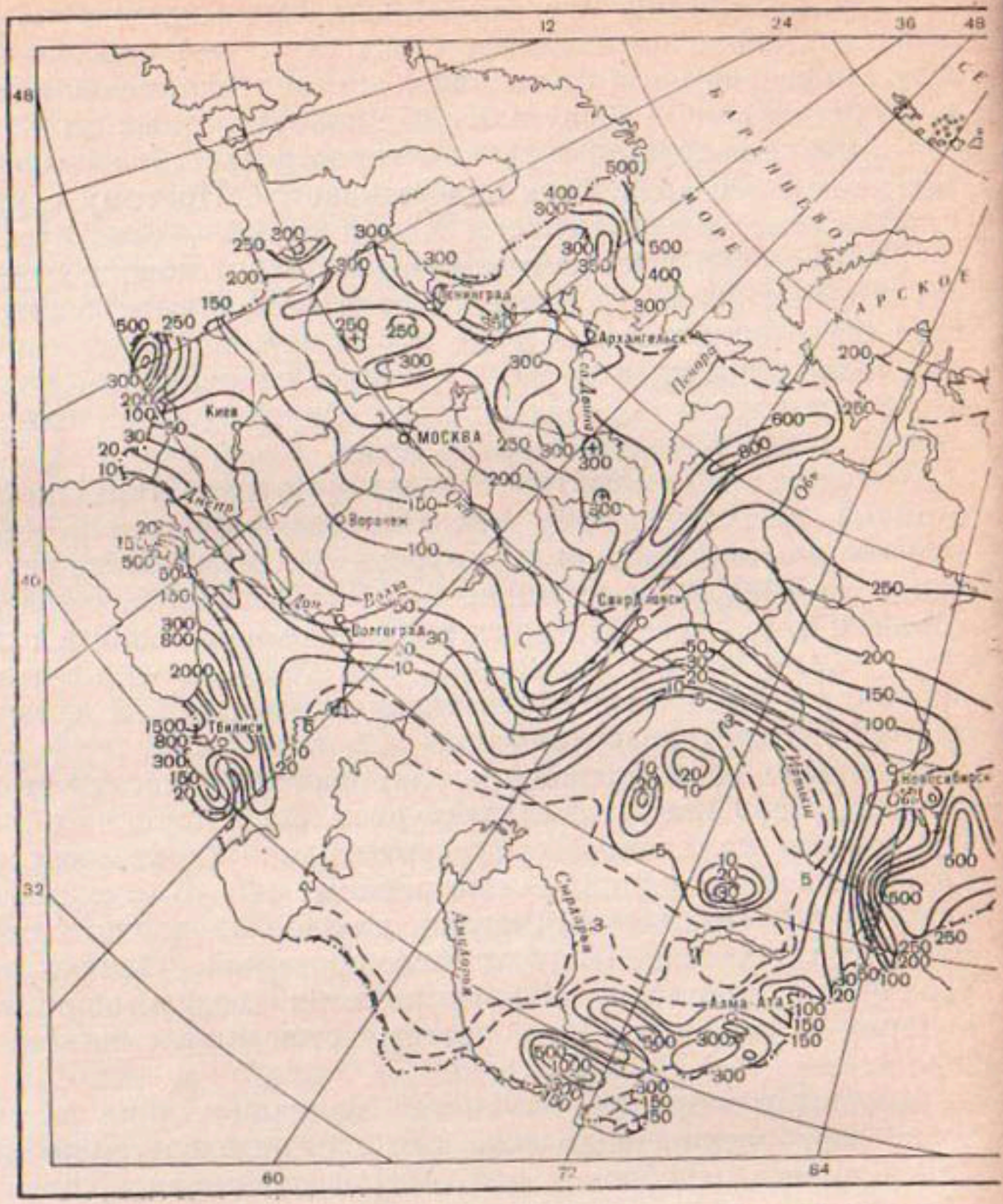


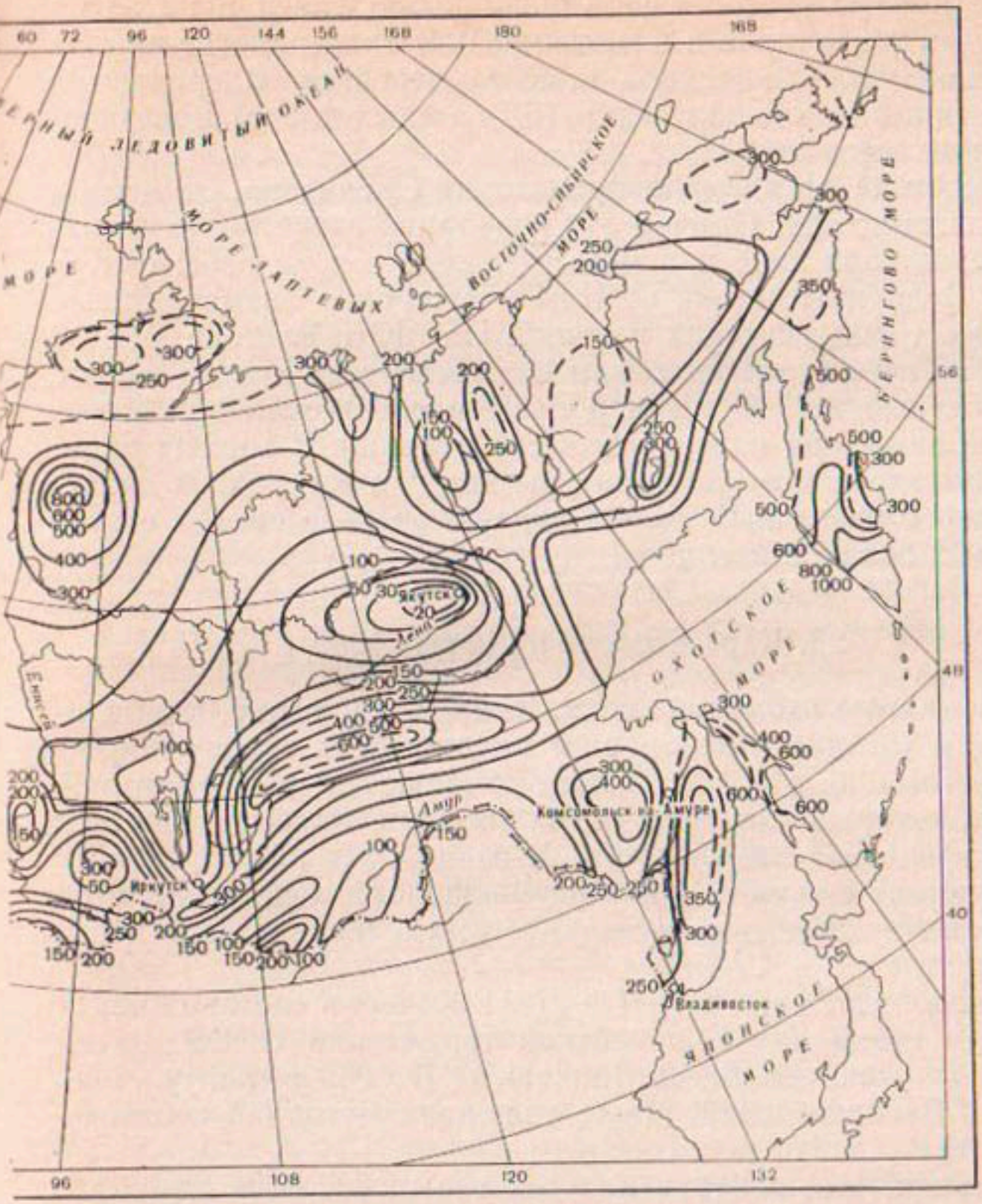
Рис. 49. Годовой

накопление влаги в почве. К этим мероприятиям относятся: снегозадержание, зяблевая вспашка поперек склона, углубленная пахота, своевременное весеннее боронование зяби и полезащитное лесоразведение. Исследованиями установлено:

1. Глубоко вспаханная почва более водопроницаема, а потому в маловодные и средние по водности годы сток с нее значительно меньше, чем с залежи, озимых посевов и т. д. В очень многоводные годы, когда и зябь сильно уплотнена, сток с зяби может оказаться таким же, как и на других сельскохозяйственных угодьях.

2. Чем засушливее климат, тем разче проявляется влияние зяби на уменьшение весеннего стока.

3. Поверхностный сток в засушливой зоне уменьшается вследствие распашки земель, увеличения площади зяби и проведения мероприятий по снегозадержанию (табл. 15).



сток рек СССР (мм).

Таблица 15

Поправочные коэффициенты к стоку в Поволжье в зависимости от площади зяби на водосборе

Природная зона	Площадь зяби в % от всей площади водосбора		
	100	75	50
Северное (Высокое) Заволжье	0,70	0,80	0,90
Центральное (Сыртовое) Заволжье	0,64	0,70	0,84
Правобережье	0,70	0,80	1,0

4. Лесные полосы способствуют накоплению влаги в почве на занимаемой ими территории и в межполосном пространстве на расстоянии, равном 20—30-кратной высоте деревьев. В среднем в степной зоне при 5%-ном облесении (5% лесных полос) поверхностный сток снижается на 30%.

Изменение стока во времени происходит ежедневно, от месяца к месяцу, от года к году. Причем эти колебания стока резче проявляются в засушливой зоне и в меньшей мере в зоне избыточного увлажнения. Величины стока по годам синхронно изменяются с изменением метеорологических условий. На Юго-Востоке СССР колебания весеннего стока по годам составляют от нуля в годы с засушливой осенью до 120 мм и больше после дождливой осени, многоснежной зимы при интенсивном снеготаянии. В горных районах сток летом зависит от температуры воздуха в горах. В ливнеопасных районах ежегодный сток в первую очередь связан с суммами дождевых осадков и т. д.

25. Карты изолиний норм стока

Построение карты изолиний стока. Как было указано, климатические факторы (осадки и испарение) подчиняются закону широтной зональности, т. е. они постепенно изменяются по территории. Поэтому сток, который зависит от этих величин, тоже подчиняется закону географической зональности. В горных же районах, где с высотой возрастает сумма осадков и уменьшается испарение, сток подчиняется закону высотной зональности: увеличивается с повышением местности.

Исходя из этого впервые в 1927 г. Д. И. Кочерин составил карту изолиний норм стока для Европейской территории СССР. Затем эта карта была уточнена Б. Д. Зайковым. В 1962 г. карту стока уточнил К. П. Воскресенский. Ниже изложена методика составления этой карты.

На гидрографическую карту наносят все имеющиеся данные о стоке по каждому речному бассейну. Норму стока записывают не в пункте ее измерения, а в центре всего водосбора. Этим подчеркивается, что сток является средней величиной, отнесенной ко всему бассейну, а не к пункту его измерения. После нанесения на карту всех имеющихся данных проводят линии равных величин стока, или изолинии стока. Их вычерчивают точно так же, как и горизонтали. На рис. 49 приведена карта изолиний годового стока рек СССР.

Распределение норм стока на территории СССР. Слой стока уменьшается с севера на юг и с запада на восток, так как в этом направлении снижается увлажненность территории и повышается континентальность климата. Слой стока падает от 310—380 мм в бассейне р. Северной Двины и на Кольском полуострове до 15 мм и ниже в Прикаспийской низменности. На Хибинской возвышенности Кольского полуострова и на Северном Урале средний годовой сток достигает 600—900 мм, а на юго-западном склоне Кавказа — 2000 мм и больше.

Изолинии стока имеют меридиональное направление вдоль Верхоянского горного хребта в Восточной Сибири и Приморском Крае. Резкое возрастание стока с увеличением высоты отмечается также в горных районах Карпат, Средней Азии, Алтая и Саян. Зональные карты составлены для Поволжья, Украины, Средней Азии и т. д.

26. Изменчивость величин стока

При определении нормы стока возможны два случая: 1) имеются данные многолетних наблюдений; 2) данных наблюдений мало или их вообще нет.

1. При наличии многолетних наблюдений норма стока рассчитывается как среднеарифметическая из всех наблюденных величин по формулам (42) — (44). Этот расчет одинаково применим как для годового стока, так и для отдельных фаз режима.

Возникает вопрос: какова должна быть величина n, т. е. продолжительность наблюдений, чтобы определить среднюю многолетнюю величину, или норму, с заданной точностью? Очевидно, чем длиннее ряд наблюдений, тем точнее средняя многолетняя величина. При одинаковой продолжительности точность определения средней многолетней зависит от изменчивости величин каждого ряда. Рассмотрим для примера ряды одновременных наблюдений по двум рекам, протекающим в различных природных зонах СССР. Годовые модули стока р. Тихвинки у с. Горелухи за 1911—1964 гг. находятся в пределах 6,6—13,2 л/(с · км^2). Изменчивость стока невелика: в самом многоводном году сток в 2,0 раза больше, чем в самом маловодном. На Юго-Востоке СССР сток р. Малый Узень у с. Малоузенска колеблется в огромных пределах: от 0,04 до 3,05 л/(с · км^2) (или в 76 раз). Естественно, что для получения нормы стока с одинаковой точностью на реках засушливой зоны требуется значительно больший ряд наблюдений, чем на реках зоны устойчивого и избыточного увлажнения.

Наиболее устойчив и мало изменчив сток Невы, Ангары и других рек озерного питания. В этом случае нужен небольшой ряд наблюдений для получения нормы стока с высокой точностью.

Мерой изменчивости величин исследуемого ряда служит среднее квадратическое отклонение. Имеется ряд наблюденных величин стока $y_1, y_2, y_3, \ldots, y_n$, за n лет и средняя многолетняя величина этого ряда $\overline{y}$. Отклонение каждого члена ряда от среднего его значения составляет $(y_1 - \overline{y})$, $(y_2 - \overline{y})$, $(y_3 - \overline{y})$, $\ldots$, $(y_n - \overline{y})$ или в общем виде $(y_i - \overline{y})$. Сумма всех отклонений равна нулю, а среднее отклонение тоже равно нулю. Поэтому для характеристики изменчивости ряда или среднего отклонения нельзя воспользоваться разностью наблюденных и средних величин. В статистике применяют не разность отклонений, а квадрат разности этих величин, так как при возведении во вторую степень как положительные, так и отрицательные отклонения всегда дают положительную ве-

личину. Вместо величины $\Sigma(y_i-\bar{y})$, всегда равной нулю, принимают $\sqrt{\Sigma(y_i-\bar{y})^2}$. Тогда среднее квадратическое отклонение

$$\sigma=\sqrt{\frac{\Sigma(y_i-\bar{y})^2}{n}}. \tag{49}$$

Вероятная же ошибка вычисления средней величины

$$E_{50\%}=\pm 0{,}674\frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \tag{50}$$

Тогда средняя величина

$$\bar{y}=\frac{\Sigma y}{n}\pm E_{50\%}. \tag{51}$$

Среднее квадратическое отклонение получается всегда в абсолютных величинах. Так, если оно рассчитано для многолетнего ряда годовых величин стока, выраженных в л/(с · км²), то и среднее квадратическое отклонение получается в л/(с·км²). Для возможности сравнения отдельных рядов необходимо среднее квадратическое отклонение вычислить не в абсолютных величинах, а в относительных (отношение σ к средней величине ряда y). Это отношение называется коэффициентом изменчивости, или коэффициентом вариации, и обозначается через C_v

$$C_v=\frac{\sigma}{\bar{y}}=\frac{\sqrt{\frac{\Sigma(y_i-\bar{y})^2}{n}}}{\bar{y}}. \tag{52}$$

Если $\bar{y}$ подвести под радикал, то формула примет следующий вид:

$$C_v=\sqrt{\frac{\Sigma(y_i-\bar{y})^2}{n\bar{y}^2}}=\sqrt{\Sigma\left(\frac{y_i-\bar{y}}{\bar{y}}\right)^2\frac{1}{n}}. \tag{53}$$

В формуле (46) $\frac{y_i}{\bar{y}}$ (отношение наблюденной величины к средней) названо модульным коэффициентом.

Обозначив $\frac{y_i}{\bar{y}}=k$, формулу (53) можно переписать так:

$$C_v=\sqrt{\frac{\Sigma(k-1)^2}{n}}. \tag{54}$$

При числе членов ряда $n<30$ в формулах (49) и (54) вместо

n принимают $n-1$. Тогда σ и C_v определяют из следующих формул:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (y_i - \overline{y})^2}{n-1}}, \tag{55}$$

$$C_v = \sqrt{\frac{\Sigma (k-1)^2}{n-1}}. \tag{56}$$

Коэффициент C_v показывает степень изменчивости чисел в ряду наблюденных величин. Чем больше $\Sigma (y_i - \overline{y})^2$, тем больше и коэффициент изменчивости.

Согласно СН 435-72, формула (56) пригодна для расчетов при $C_v \leqslant 0{,}5$.

При $C_v > 0{,}5$ расчет его производится методом наибольшего правдоподобия в зависимости от статистик λ_2 и λ_3:

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lg k_i}{n-1}; \tag{57}$$

$$\lambda_3 = \frac{\Sigma k_i \lg k_i}{n-1}. \tag{58}$$

Обозначения — прежние.

В СН 435-72 дана номограмма для определения C_v при разных λ_2 и λ_3.

При ограниченном числе наблюдений, как это часто бывает при гидрологических расчетах, средняя арифметическая величина стока $y_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \ldots + y_{n-1} + y_n}{n}$ отличается от нормы стока $\overline{y}$ на некоторую величину $\xi_{y0} = \overline{y} - y_0$. Величина эта называется ошибкой арифметической середины.

Ошибка арифметической середины может быть выражена в долях от среднего квадратического отклонения. Тогда относительная средняя квадратическая ошибка среднего арифметического

$$\xi_{y0} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\%. \tag{59а}$$

С помощью этой формулы можно определить число лет наблюдений, которое необходимо для получения нормы стока с заданной точностью, а именно

$$n = \frac{C_v^2 \cdot 10^4}{\xi y_0^2}. \tag{59б}$$

Чем больше коэффициент изменчивости, т. е. чем разнообразнее наблюденные величины стока, тем большее число лет необходимо для получения норм стока с заданной степенью точности. В табл. 16 приведены эти величины и нормы стока с допустимой точностью 5 и 10%.

Таблица 16

Число лет наблюдений, необходимых для определения нормы стока с точностью 5 и 10% при разных значениях C_v

Точность определения нормы стока, %	C_v									
	0.10	0.20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00	1.20
±5	4	16	36	64	100	144	196	256	400	576
±10	1	4	9	16	25	36	49	64	100	144

Величина относительной средней квадратической ошибки коэффициента изменчивости определяется по формуле

$$\xi C_v = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} \cdot 100\%. \qquad (59в)$$

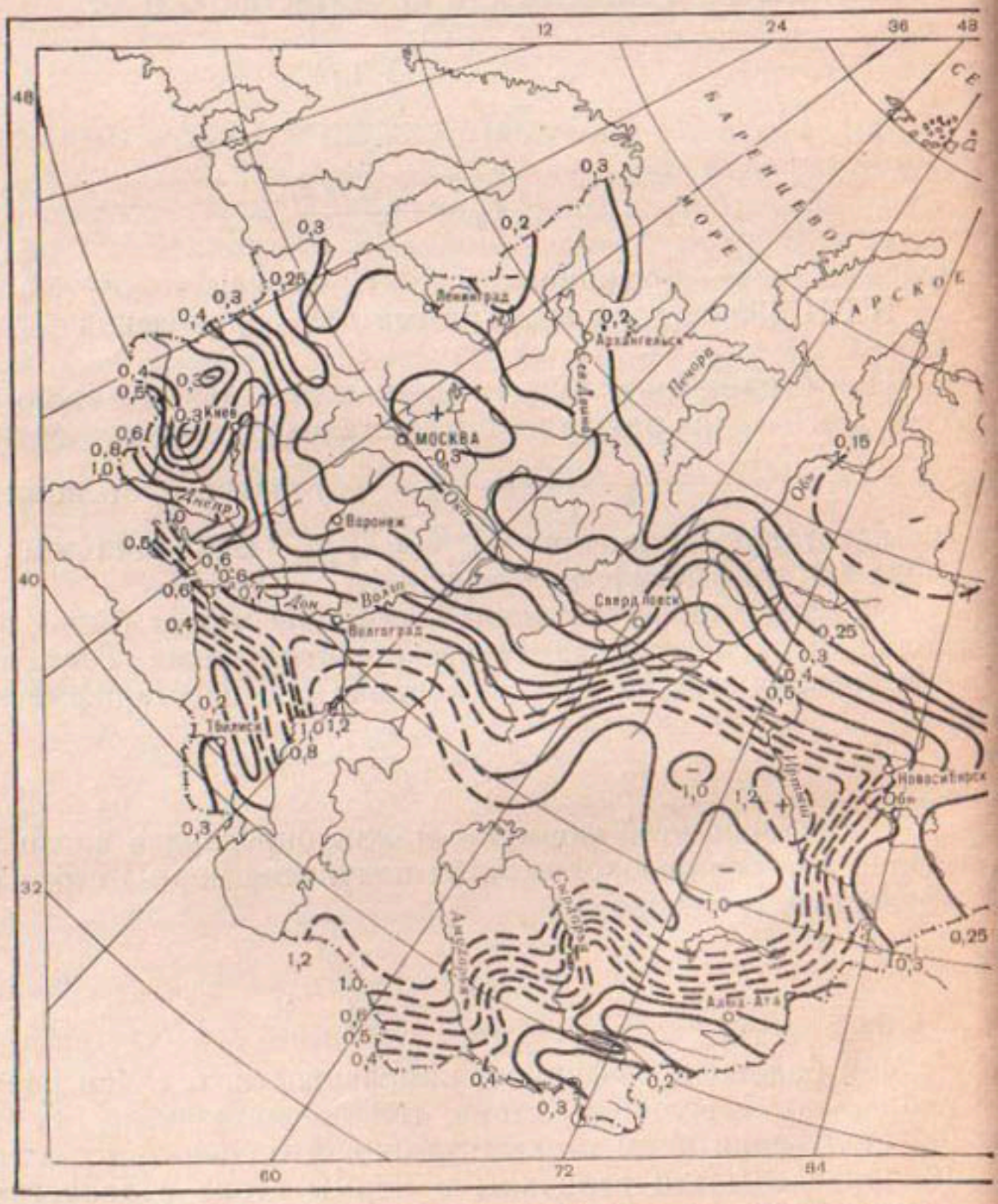
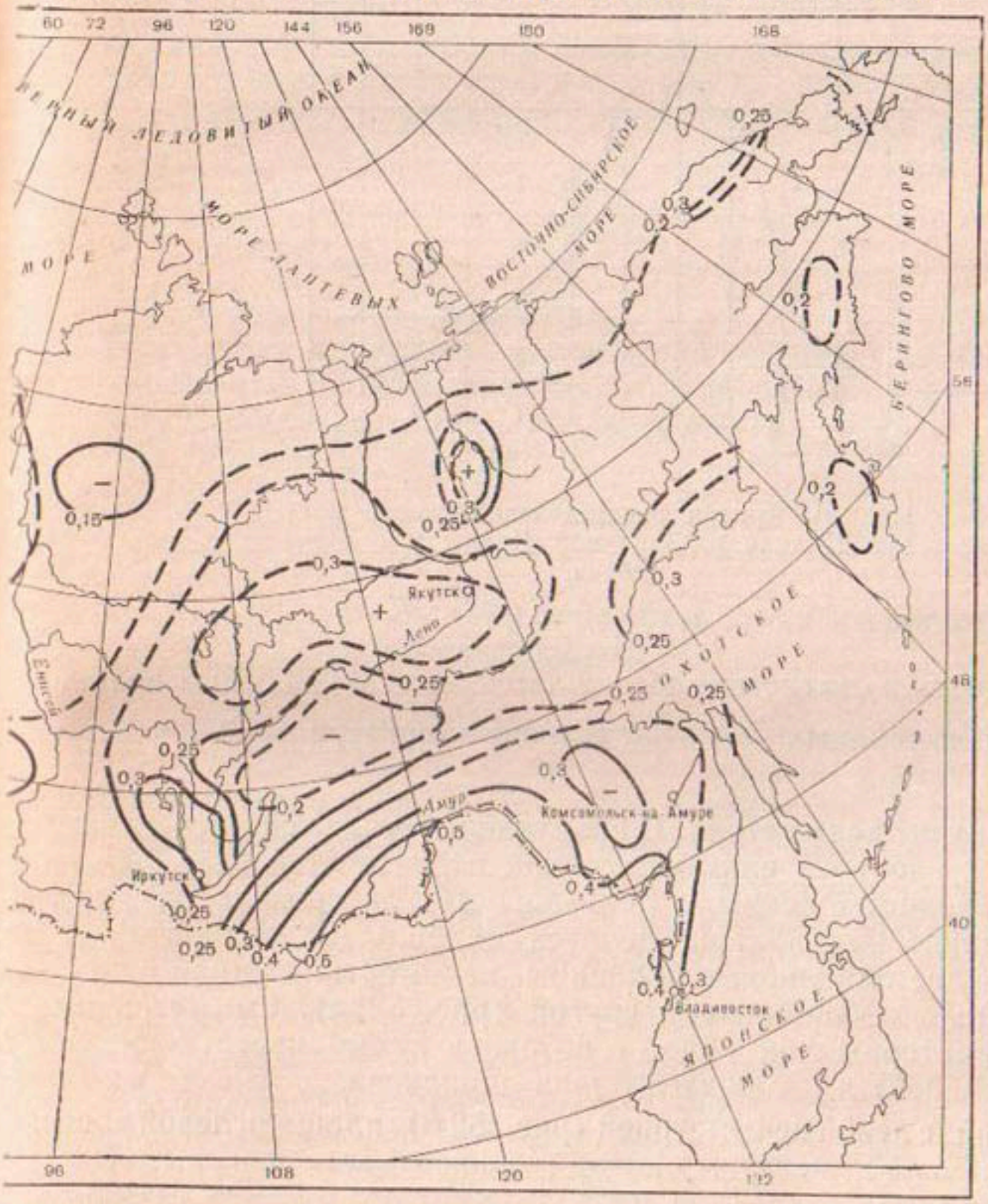


Рис. 50. Значения коэффициентов

2. Коэффициенты изменчивости годового стока при отсутствии наблюдений можно определять по карте изолиний C_v. Изменчивость годового стока зависит от географических условий и закономерно возрастает от 0,20 на северо-западе Европейской территории СССР до 1,2 на юго-востоке (рис. 50). В горных районах коэффициент изменчивости уменьшается с высотой. Так, для горной реки Или в истоке $C_v = 0{,}20$, в устье $C_v = 1{,}0$. Коэффициент изменчивости равняется нулю для такой воображаемой реки, у которой ежегодно наблюдается одна и та же величина стока.

27. Кривые распределения

В теме 5 подробно рассмотрены расчеты повторяемости, или частоты и обеспеченности, стояния уровней воды. Точно так же можно рассчитать частоту и продолжительность стока.



изменчивости годового стока.

На рис. 51 построена кривая распределения частоты, или повторяемости, годового стока р. Западной Двины у г. Витебска за 1877—1946 гг., или за 70 лет. Полученная кривая называется кривой распределения вероятностей. Так как основной фактор стока—климат — в многолетнем разрезе мало или вовсе не меняется, то и величина стока должна быть почти неизменной. Поэтому если частота появления стока в интервале, например 6,5—7,5 л/(с · км²), равна 12, то и в будущем, вероятно, она будет равна 12 из общего числа 70 лет наблюдений. Вероятность стока в интервале 6,51—7,50 л/(с · км²) составляет $n = 12$ раз из 70 лет или в общем виде n_i раз из общего числа n.

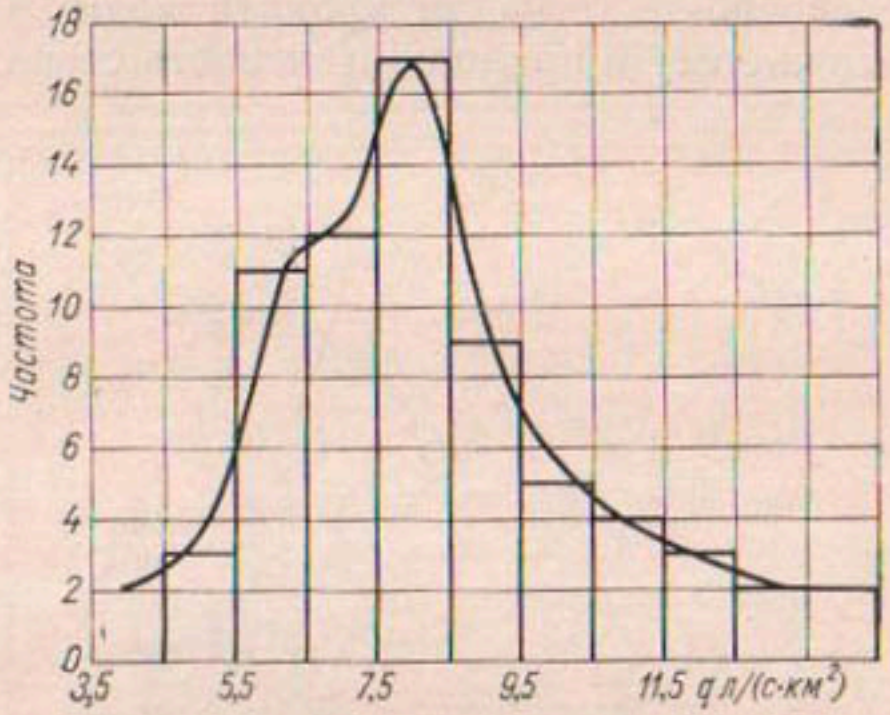


Рис. 51. Кривая распределения частот модулей стока р. Западной Двины у г. Витебска.

Вероятность в статистике выражается не в абсолютных величинах, а в относительных: $p = \frac{n_i}{n}$. В нашем примере $p = \frac{12}{70} = 0{,}173$, или 17,3%.

Коэффициент асимметрии. В практике встречаются три основных типа кривых распределения частот или вероятностей (рис. 52).

В симметричных кривых (нормального распределения) площадь, ограниченная кривой, делится наибольшей ординатой *АБ* (модой) на две одинаковые половины, из которых каждая является зеркальным отображением другой (рис. 52 *а*). Симметричные кривые характерны для ряда, у которого сумма частот у малых (меньше средней) и больших величин одинакова.

У кривой с левой асимметрией (рис. 52 *б*) площадь левой части, отсекаемой модой, меньше площади правой части фигуры. Левая асимметрия характерна для ряда, у которого малые величины реже повторяются в многолетнем ряду, чем большие величины.

При правой асимметрии имеет место обратное явление. Например, на реках Юго-Востока Европейской территории СССР маловодные годы бывают 65 раз в 100 лет, а многоводные — 35 раз.

Гидрологические ряды характеризуются, как правило, асимметричными кривыми.

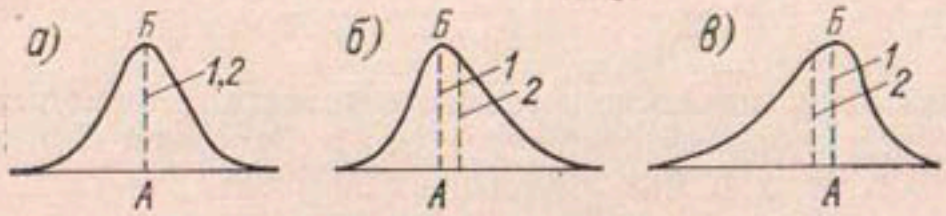


Рис. 52. Основные типы кривых распределения.
а — симметричная кривая; *б* и *в* — асимметричные кривые: *1* — мода, *2* — средняя арифметическая.

Асимметричность кривых распределения вероятностей характеризуется коэффициентом асимметрии C_s. При наличии большого ряда наблюдений коэффициент асимметрии вычисляют по формуле

$$C_s = \frac{\sum (k-1)^3}{(n-1)\, C_v^3}, \qquad (60)$$

где k — модульный коэффициент.

При малом числе лет наблюдений расчеты по этой формуле дают большую ошибку. Значения C_s при разных величинах λ_2 и λ_3 даны в упомянутой номограмме (СН 435-72).

При уровенных расчетах C_s может принимать и отрицательные значения.

28. Обеспеченность стока и построение кривой обеспеченности

Расположив наблюденные величины годового стока р. Западной Двины у г. Витебска в убывающем порядке (табл. 17), можно выбрать из этого ряда наибольшую и наименьшую величины q — соответственно 13,6 и 3,7 л/(с · км²). Среднее многолетнее $\overline{q} = 8{,}25$ л/(с · км²). Какая же из 70 наблюденных величин является расчетной при проектировании водохранилищ? Очевидно, что водохранилище, рассчитанное на задержание стока самого многоводного года, будет в 3,68 раза больше по объему $\left(\frac{13{,}6}{3{,}7} = 3{,}68\right)$, чем рассчитанное на задержание стока самого маловодного года.

Если расчет водохранилища или гидростанции вести на сток 1902 и 1927 гг., т. е. на 13,6 л/(с · км²), то эти объекты будут обеспечены водой 2 раза в продолжение 70 лет, так как в остальные годы сток был меньше 13,6 л/с. Таким образом, обеспеченность водой, или обеспеченность стока, составит

$$p = \frac{2 \cdot 100}{70} = 2{,}86\%.$$

В 1878 и 1908 гг. сток р. Западной Двины был несколько меньше, чем в 1902 и 1927 гг. Он составлял 13,2 л/(с · км²). Рассуждаем по-прежнему, т. е. предполагаем, что водохранилище проек-

Таблица 17

Вычисление коэффициентов изменчивости, асимметрии и обеспеченностей годового стока р. Западной Двины у г. Витебска ($F = 27\,300$ км²)

№ п/п	Год	Модули стока в убывающем порядке л/(с·км²)	Модульный коэффициент k	$(k-1)$	$(k-1)^2$	$(k-1)^3$	Обеспеченность, %
1	1902	13,6	1,65	0,65	0,42	0,27	1,0
2	1927	13,6	1,65	0,65	0,42	0,27	2,4
3	1878	13,2	1,60	0,60	0,36	0,22	3,8
4	1908	13,2	1,60	0,60	0,36	0,22	5,3
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
69	1921	4,8	0,45	—0,55	0,30	—0,16	97,6
70	1939	3,7	0,45	—0,55	0,30	—0,17	99,1
	Сумма	577,3	70,0	0,00	4,97	0,69	—
	Среднее $\overline{q} = 8{,}25$						

тируется несколько меньших размеров с расчетом наполнения его стоком в 13,2 л/(с · км²). Такое водохранилище обеспечено водой в 1878, 1908 и предыдущих годах (1902 и 1927) со стоком, превышающим 13,2 л/(с · км²). Сток 13,2 л/(с · км²) обеспечен 4 раза из 70 лет, или

$$p = \frac{4 \cdot 100}{70} = 5{,}72\%.$$

Здесь «4» — порядковый номер наблюденной величины стока в убывающем ряду, а «70» — число членов ряда.

Понятие обеспеченность равнозначно в математической статистике понятию вероятность превышения. Частота модуля стока, большего или равного 13,2 л/(с · км²), составляет 4 раза из 70 лет, а вероятность, или обеспеченность его, — 5,72%.

В гидрологической литературе встречаются оба выражения: «обеспеченность» и «вероятность превышения», являющиеся равнозначными.

Из изложенного ясно, что для расчета обеспеченности любого члена гидрологического ряда необходимо наблюденные величины расположить в убывающем порядке. Обеспеченность каждого члена ряда вычисляют по формуле

$$p = \frac{m}{n} \cdot 100\%, \qquad (61)$$

где p — обеспеченность в %; m — порядковый номер убывающего члена ряда; n — общее число членов ряда.

Судя по этой формуле, обеспеченность, или вероятность, последнего члена ряда равна 100%. Между тем не исключена возможность, что в будущем при продолжении наблюдений эта величина может оказаться еще меньшей (например, в случае более засушливого года при меньшей сумме осадков). Расчетная вероятность 100% не реальна. Для вычисления вероятности превышения p наблюденных величин стока рекомендованы следующие формулы:

$$p = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%, \tag{62}$$

$$p = \frac{m-0{,}3}{n+0{,}4} \cdot 100\%. \tag{62а}$$

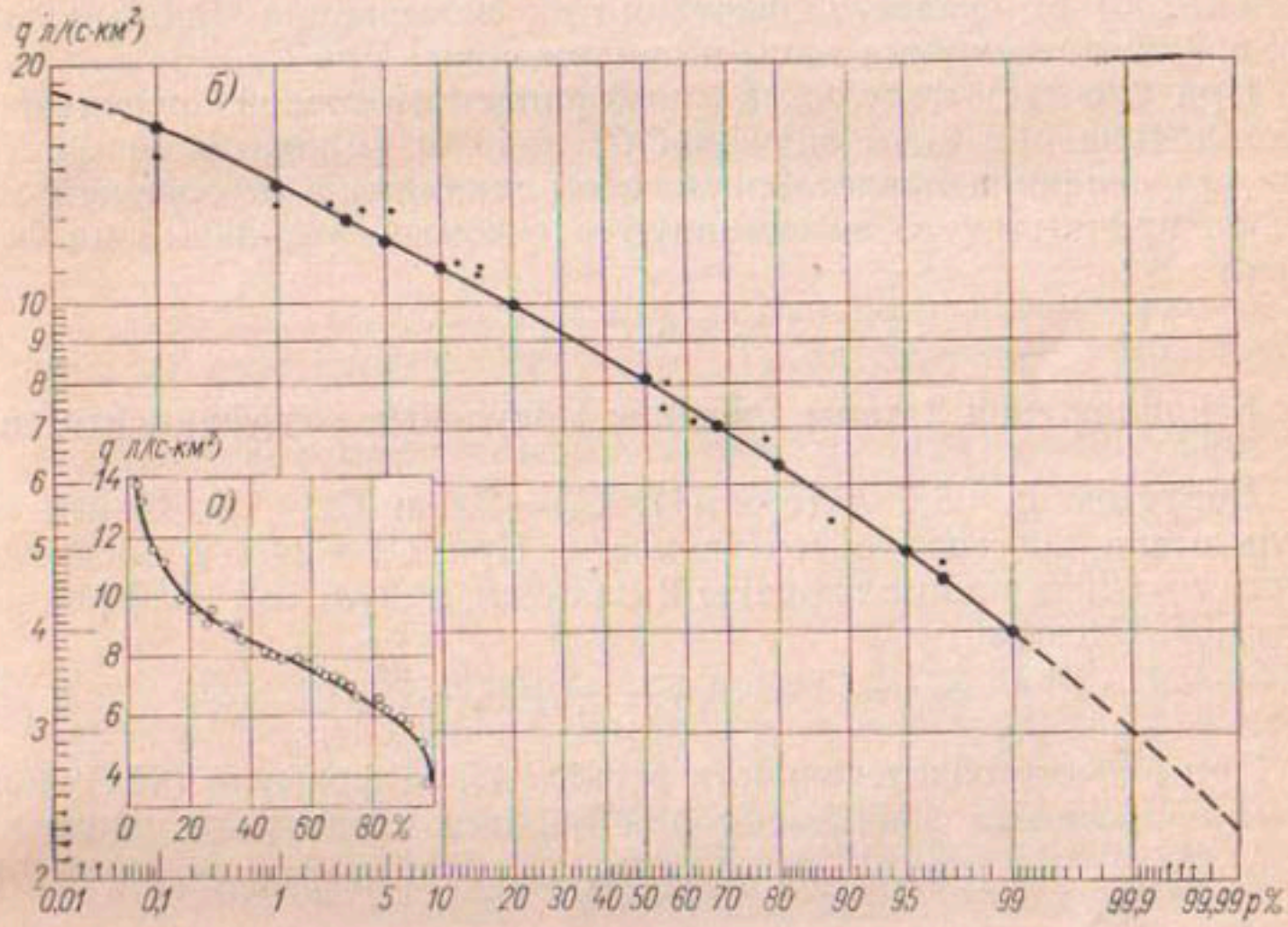


Рис. 53. Кривая обеспеченности модулей годового стока р. Западной Двины у г. Витебска.

а — на миллиметровой бумаге; *б* — на клетчатке вероятности с умеренной асимметричностью.

Формула (62 а) использована при расчетах в последней графе табл. 17.

Расчеты обеспеченности имеют огромное значение в практике проектирования. Недорогие мелиоративные мероприятия (например, лиманное орошение) должны проектироваться на сток 30—70% обеспеченности. Это значит, что в течение 30—70 лет из 100 участок лиманного орошения полностью обеспечен водой; в остальные годы (70—30 лет из 100) не вся площадь будет полита. Пруды и водохранилища, служащие для регулярного орошения,

проектируют обычно на задержание стока 70—80% вероятности превышения.

Построение кривых обеспеченности при наличии данных наблюдений. Рассчитанные в табл. 17 величины изображаются графически в виде кривой (рис. 53 *а*). Для построения кривой обеспеченности на оси абсцисс откладывают значения обеспеченностей (в процентах), а на оси ординат величины стока или их модульные коэффициенты. Из приведенного графика видно, что с увеличением обеспеченности уменьшаются значения членов ряда. Эмпирическую кривую обеспеченности, построенную по данным наблюдений, проверяют путем построения теоретической кривой. Для этого достаточно знать среднее значение членов ряда и коэффициент изменчивости C_v. Значение C_s подбирается так, чтобы точки осредненной эмпирической и теоретической кривых совпадали. Отклонения ординат Ф от среднего значения так называемой биномиальной кривой обеспеченности даны в приложении 1 при $C_v = 1$.

При расчете модульных коэффициентов любой вероятности превышения при ином значении C_v надо Ф умножить на C_v. Так как эта величина представляет собой отклонение от среднего значения, принимаемого за единицу, то искомый модульный коэффициент

$$k_l = \Phi C_v + 1. \tag{63}$$

В приложении 2 даны значения модульных коэффициентов при $C_s = 2C_v$.

Допустим $q = 3{,}6$ л/(с · км²), $C_v = 0{,}8$ и $C_s = 1{,}6$. Найти модуль стока 20%-ной обеспеченности. При $C_s = 2C_v$ и обеспеченности $p = 20\%$ по приложению 2 находим модульный коэффициент $k = 1{,}54$. Отсюда

$$q_{20\%} = 1{,}54 \cdot 3{,}6 = 5{,}54 \text{ л/(с·км²)}.$$

При расчете обеспеченности в табл. 17 по формуле (62а) получаем наименьшее значение p для первого члена ряда, а именно $p_1 = \frac{1-0{,}3}{70+0{,}4} \cdot 100 = 1{,}0\%$ и наибольшую обеспеченность $p_{70} = \frac{70-0{,}3}{70+0{,}4} \cdot 100 = 99{,}1\%$. Значения ординат кривой обеспеченности, меньших 1,0% и больших 99,1%, можно установить путем графического продолжения (графической экстраполяции) теоретической кривой обеспеченности. Однако на обычной миллиметровой бумаге графическая экстраполяция невозможна (рис. 53 *а*), так как в верхней и нижней частях кривая имеет сложные очертания. Для спрямления кривых обеспеченности применяют клетчатку вероятности: с умеренной асимметричностью при $C_v \leqslant 0{,}5$ и со значительной асимметричностью при $C_v > 0{,}5$. Кривая обеспеченности годовых модулей стока р. Западной Двины вычерчена на клетчатке с умеренной асимметричностью (рис. 53 *б*). Эта кривая экстраполирована графически до обеспеченности $p = 0{,}01\%$, при которой $q_{0{,}01\%} = 18{,}7$, а $q_{99{,}9\%} = 3{,}0$ л/(с·км²).

29. Расчеты годового стока

Настоящие расчеты, равно как и последующие, внутригодового распределения стока и максимальных расходов выполняются в соответствии с СН 435-72 Госстроя СССР.

Возможны следующие три основных случая расчета годового стока: 1) имеется достаточно длинный ряд наблюдений за стоком; 2) данных наблюдений недостаточно для расчета нормы стока; 3) наблюдения отсутствуют.

Расчет стока при наличии наблюдений. Продолжительность наблюдений достаточна для определения нормы стока, если относительная средняя квадратическая ошибка

$$\xi y_0 \leqslant 5 \div 10\%, \text{ а } \xi C_v \leqslant 10 \div 15\%.$$

В этом случае норма стока определяется по формулам (42) — (44), а значения C_v и C_s — согласно п. 26 и 27. Строится эмпирическая кривая обеспеченности, проверяемая теоретической кривой путем подбора значения C_s. Для водосборов площадью менее 1000 км² C_v определяется по данным наблюдений на реке-аналоге.

Рекой-аналогом называют реку, имеющую многолетний ряд наблюдений, водосбор которой сходен по своим физико-географическим условиям (климатическим, почвенным, геологическим, составу растительности, рельефу и т. д.) с исследуемой рекой, имеющей короткий ряд наблюдений.

Коэффициент изменчивости для малого водосбора определяется по формуле

$$C_v = C_{va} \frac{y_a}{y_0}, \qquad (64)$$

где C_v и C_{va} — коэффициенты изменчивости для малого водосбора и ближайшей крупной реки-аналога: y_a и y_0 — средний слой стока в бассейне реки-аналога и исследуемой реки.

Расчет стока при недостаточности данных наблюдений. Если данных наблюдений недостаточно для определения нормы с заданной точностью, применяют приведение ряда к многолетнему периоду по данным наблюдений на реке-аналоге.

Для удлинения короткого ряда устанавливают графическую связь между величинами стока обеих рек. Подсобным материалом для построения графика служит ведомость стока за годы одновременных наблюдений. По оси абсцисс откладывают данные реки-аналога, а по оси ординат — реки с коротким рядом наблюдений. На обеих координатных осях откладывают соответствующие величины стока за годы параллельных наблюдений. По полученным в пересечениях координат точкам проводят прямую или плавную кривую линию так, чтобы она занимала среднее положение относительно всех точек.

График связи модулей стока для р. Урала у с. Кушум с коротким рядом и р. Сакмары у ст. Сакмарской с многолетним рядом

наблюдений приведен на рис. 54. В этом случае связь выражена прямой линией. Причем прямая проходит через центры тяжести относительно групп точек. Из графика видно, что при норме стока р. Сакмары $\overline{q}_a = 5{,}3$ л/(с·км²) норма стока р. Урала у с. Кушум $\overline{q} = 2{,}47$ л/(с · км²). По графику связи можно составить ведомость стока р. Урала, включая и годы, когда не было наблюдений.

При криволинейной связи по графику восстанавливаются недостающие ежегодные значения стока, после чего норма стока рассчитывается по формуле (42).

Обязательным условием приведения к многолетнему периоду является наличие данных наблюдений в расчетном створе реки не менее чем за 6 лет, а амплитуда годового стока реки-аналога должна быть освещена не менее чем на 70—80%.

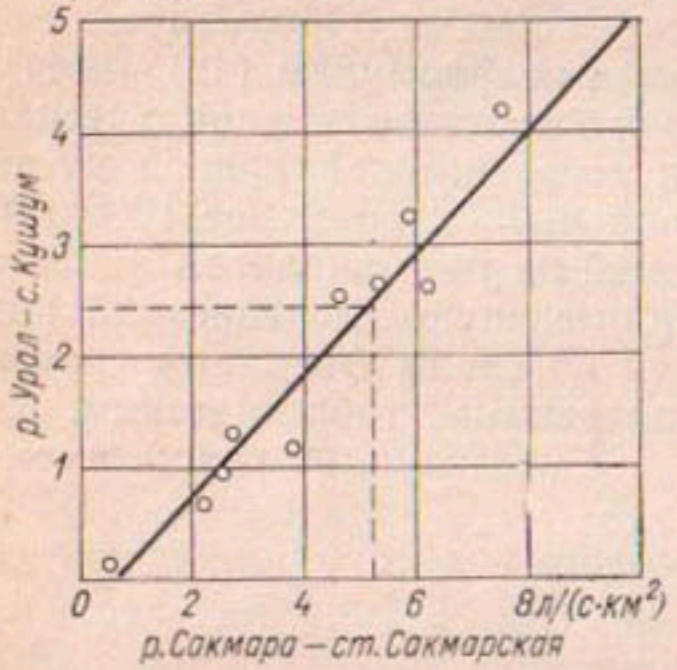


Рис. 54. Связь между годовыми величинами стока р. Урала у с. Кушум и р. Сакмары у ст. Сакмарской.

Расчет стока при отсутствии наблюдений. Существует несколько способов определения нормы стока при отсутствии наблюдений. Из них наиболее распространенным является определение нормы стока по картам изолиний. Однако нельзя забывать, что на карте изолиний данные наблюдений отнесены не к створу, где производятся гидрометрические работы, а к центру всего бассейна. Поэтому предварительно нужно нанести на карту координаты центра бассейна. Если точка расположена между двумя изолиниями, искомую величину определяют интерполяцией.

Этот способ применим только для равнинных условий, где изолинии стока более или менее равномерно распределены по территории.

Норма стока $\overline{q}$ для бассейна, пересекаемого несколькими изолиниями, определяется точно так же, как и норма осадков [см. формулу (16)]:

$$\overline{q} = \frac{\frac{q_1 + q_2}{2} f_1 + \frac{q_2 + q}{2} f_2 + \ldots + \frac{q_{n-1} + q_n}{2} f_n}{F}, \qquad (65)$$

где $f_1, f_2, \ldots, f_n$ — площади между двумя соседними изолиниями в пределах границ водосбора.

По карте изолиний норма стока определяется достаточно точно только для водосборов рек, равных (но не свыше 50 000 км²) и аналогичных тем, которые использованы при составлении карты.

Если норму стока определяют для малых рек, русла которых не полностью дренируют подземные воды, в значение, полученное по карте, рекомендуется внести поправки, приведенные в табл. 18.

Таблица 18

Поправочные коэффициенты к норме стока при неполном дренировании реками подземных вод

Район	Площадь водосбора, км²						
	10	30	50	100	500	1000	2000
Лесостепные и степные районы Европейской территории СССР (равнинная часть)	0,70	0,85	0,90	0,95	1,00	—	—
Волыно-Подольская возвышенность	—	—	0,55	0,60	0,80	0,90	1,00
Донецкая и Приазовская возвышенности	—	—	—	0,70	0,90	0,95	1,00
Сальские степи, Кумо-Манычская впадина и Заволжье	Поправки не вносятся						
Казахстан и Западная Сибирь . .	—	—	0,70	0,80	0,85	0,90	1,00
Минусинская и Тувинская котловины	—	—	0,70	0,80	0,90	0,95	1,00
Забайкалье	—	—	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Центрально-Якутская низменность	—	—	—	0,60	0,80	0,90	1,00

В степных районах многие крупные водосборы изобилуют понижениями, в которых аккумулируется часть весеннего стока. С увеличением водосбора увеличиваются потери на испарение. В этом случае с увеличением площади бассейна сток уменьшается. Поэтому в норму стока, определенную по карте изолиний, необходимо ввести поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 19.

Таблица 19

Поправочные коэффициенты к норме стока по карте в зависимости от площади водосбора

Норма стока по карте, л/(с·км²)	Площадь водосбора, км²								
	10	30	50	100	250	500	1000	2000	3000
Молдавия, юг Украины, Крым, Приазовье, Прикаспийская низменность, Казахстан, Забайкалье									
⩽0,5	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	—
0,3	3,0	2,5	2,3	2,0	1,6	1,5	1,3	1,1	1,0
0,2	3,5	3,0	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
⩽0,1	5,0	3,7	3,2	2,5	2,1	1,9	1,4	1,3	1,0
Арало-Каспийская низменность									
⩽0,1	—	—	3,6	2,9	1,0				

Коэффициенты изменчивости при отсутствии наблюдений определяются по карте изолиний (см. рис. 50). Коэффициенты асимметрии принимаются: а) для арктической, лесной и лесостепной зон $C_s = 2\,C_v$ и б) для зоны недостаточного увлажнения при наличии лет с полным отсутствием стока $C_s = 1{,}5\,C_v$.

ТЕМА 7. ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА

Помимо годовых величин стока, часто необходимо установить характерные величины по отдельным фазам режима реки — по сезонам года, месяцам, декадам — или суточные значения расходов.

Расчет внутригодового распределения стока зависит прежде всего от схемы его использования. Так, при сезонном регулировании стока водохранилищами чаще всего используется весенний сток. При проектировании орошения без применения регулирования необходимо установить распределение стока в течение вегетационного периода. При использовании реки для судоходства основной интерес представляет навигационный период, а для энергетических целей — зимний режим реки.

Расходы воды в реке в разные периоды года различны, т. е. внутригодовое распределение стока неравномерное. Причем соотношение между величинами стока по периодам в разных зонах носит специфический характер. Внутригодовое распределение стока зависит от климатических условий (от распределения осадков, температур), гидрогеологических, почвенных условий, наличия болот, озер и лесов в той или иной природной зоне. Накопление значительных масс снега, интенсивное снеготаяние весной при отсутствии значительного подземного питания создают реки с преимущественным весенним стоком. При обильных ливнях и дождях и отсутствии снега или при небольших снегозапасах реки имеют преимущественно дождевое питание. При обилии озер, лесов снижается весеннее, увеличивается подземное питание, выравнивается внутригодовое распределение стока.

30. Расчет внутригодового распределения стока при наличии данных гидрометрических наблюдений

Расчет календарного внутригодового распределения стока ведется методом компоновки. Метод этот применим при наличии данных наблюдений не менее чем за 10 лет в том случае, если в этот период входят многоводные, средневодные и маловодные годы. При наличии же данных наблюдений не менее чем за 20 лет

внутригодовое распределение стока может быть принято для определенного реального года.

Метод компоновки. Расчет выполняется в два приема:

1) определяется более точно межсезонное распределение стока,

2) рассчитывается приближенно внутрисезонное распределение — по месяцам или декадам.

При расчетах должно быть соблюдено равенство годового стока и суммы сезонных величин. В расчетах межсезонного распределения стока год принято обычно делить на два периода: многоводный и маловодный, причем один из периодов принимается за лимитирующий. Один из периодов можно разделить на два сезона. Всего в году должно быть не более трех сезонов.

Лимитирующим называется период, в котором создаются неблагоприятные условия для работы проектируемого водохозяйственного объекта. Внутри лимитирующего периода может быть выделен лимитирующий сезон. Так, при орошении из рек с преобладающим весенним стоком лимитирующим будет летний период, а при наличии влагозарядковых поливов — и осень, т. е. лимитирующим будет летне-осенний сезон.

В тех же условиях при энергетическом использовании реки многоводным периодом является весна, а маловодным — межень. Лимитирующий период — межень — включает два сезона: летне-осенний и зимний. Лимитирующим, наименее благоприятным для работы гидростанции является зимний сезон.

При ирригационном использовании высокогорных рек с летним половодьем в маловодный лимитирующий период входит осень, зима и весна. Лимитирующим сезоном является весенний.

При продолжительности наблюдений менее 20 лет необходимо прежде всего сопоставить характеристики стока рассматриваемого пункта с коротким рядом наблюдений и реки-аналога с длинным рядом наблюдений.

Если распределения стока по сезонам (в долях от годового) на обеих реках близко совпадают, то для расчетов может быть использован короткий ряд. При значительном расхождении средних значений годового стока, лимитирующего периода и сезона следует привести короткие ряды к длинному ряду.

Расчет внутригодового распределения стока начинают не с начала календарного года, а с многоводного периода. Так, если наиболее многоводной является весна, начало которой принимается в апреле, то расчетный водохозяйственный год включает апрель—декабрь одного года и январь — март следующего года.

Сроки сезона принимаются едиными для всех лет наблюдений с округлением до целого месяца. Примерно сроки гидрологических сезонов в разных районах СССР даны в приложении к СН 435-72.

Сток по сезонам получают суммированием месячных расходов каждого сезона. Так, если летняя межень включает май — сен-

тябрь, то, суммируя расходы каждого года за эти месяцы, получают ряд величин стока за этот сезон. Таким образом можно получить сток за год ($\Sigma Q_{мг}$), за всю межень ($\Sigma Q_{мм}$), за каждый сезон межени и за весенний период ($\Sigma Q_{мв}$), где $\Sigma Q_м$ означает сумму месячных расходов.

Расчетную обеспеченность стока принимают единой для всех сезонов года.

Расположив сезонные величины стока за все годы наблюдений $\Sigma Q_м$ в убывающем порядке, вычисляют $\Sigma Q_м$, $k_м = \frac{\Sigma Q_{мi}}{\overline{\Sigma Q_м}}$, C_v каждого сезона и всего года. По этим данным можно построить кривые обеспеченности стока по сезонам, подобрав C_s с условием наилучшего совпадения фактических и теоретически вычисленных точек, в особенности в нижней части кривой обеспеченности. Приближенно можно принять $C_s=2C_v$.

Расчетная обеспеченность годового стока и стока лимитирующего сезона принимается одинаковой. Сток нелимитирующего сезона определяют по разности лимитирующего периода и сезона. Так, в ирригационных проектах лимитирующим является летне-осенняя межень расчетной обеспеченности (80—85%). Принимая такой же обеспеченность стока всего меженного периода (включая и зимнего сезона), вычисляют зимний сток по разности стока всего меженного периода и стока летне-осеннего сезона.

Внутрисезонное распределение стока рассчитывается для трех групп водности: многоводная с обеспеченностью, меньшей 33%, средняя с обеспеченностью 33—66% и маловодная с обеспеченностью, большей 66%. Для меженного периода определяют помесячное распределение стока, а для периода половодья—подекадное.

Для каждого сезона расчет выполняется в табличной форме в следующем виде: по вертикали размещают величины сезонного стока в порядке убывания и вычисляют их обеспеченность. По горизонтали выписывают за каждый год помесячные или (за весеннее половодье) подекадные величины стока. Ряд величин стока по вертикали разбивают на три перечисленные выше группы водности. Количество членов ряда в каждой группе должно быть примерно одинаковым. Для каждой группы производится суммирование месячных или декадных величин стока с одинаковым порядковым номером, а также суммы месячных расходов за сезон. Относительное распределение стока по месяцам находят путем деления суммы расходов за каждый месяц на сумму расходов за сезон. Таким же путем вычисляют среднее распределение стока по месяцам по всем группам водности. Выявляют, какие календарные месяцы и сколько раз встречались для каждого порядкового номера месяца.

Из вычисленных относительных величин месячного стока (в процентах от сезонного) за расчетную принимается наиболее часто встречающаяся величина календарного месяца заданного порядкового номера.

Месячные и декадные расходы за год расчетной обеспеченности получают умножением процентного внутрисезонного распределения на величину стока за сезон. Полученное таким образом распределение стока в году не содержит в себе индивидуальных особенностей, свойственных отдельным реальным годам.

Метод реального года. Внутригодовое распределение принимается для такого реального года из числа наблюденных, у которого обеспеченность годового стока, лимитирующего периода и сезона близка к расчетной. Для этой цели по данным наблюдений составляется таблица, в которой выписываются в убывающем порядке величины годового стока и стока за лимитирующий период и сезон, вычисляется обеспеченность каждой величины по формуле (62). По этой таблице выбирается год, отвечающий основному поставленному требованию.

31. Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии и недостатке данных наблюдений

При отсутствии и недостатке наблюдений внутригодовое распределение принимают по аналогии с изученной рекой или по типовым схемам, если на обеих реках имеются одновременные хотя бы одногодичные наблюдения.

При выборе аналога нельзя забывать, что в связи с многообразием почвенных, геологических и растительных условий находящиеся в одном физико-географическом районе (и относящиеся к классу с одинаковым режимом питания) реки могут все же отличаться по внутригодовому распределению стока. Поэтому на неизученных реках следует организовать гидрометрические наблюдения, выполняемые одновременно и на реке-аналоге.

Расчетные параметры распределения (нормы стока годового, лимитирующего периода и сезона, их коэффициенты вариации) принимают по реке-аналогу.

На рис. 55 дана схематическая карта изолиний весеннего стока (I) в мм и коэффициентов изменчивости C_v (2). В ГГИ составлены карты для летней и зимней межени.

Коэффициент вариации весеннего поверхностного стока для малых водотоков ($C'_{vв}$) может быть определен по коэффициенту вариации больших водотоков (имеющих подземный сток) по формуле

$$C'_{vв} = 1{,}5\, C_{vв}. \qquad (66)$$

32. Кривые обеспеченности суточных расходов

При проектировании водоснабжения, мелиоративных систем и гидростанций часто нужно знать, обеспечивается ли потребность в воде в отдельные периоды (при минимальном уровне реки во

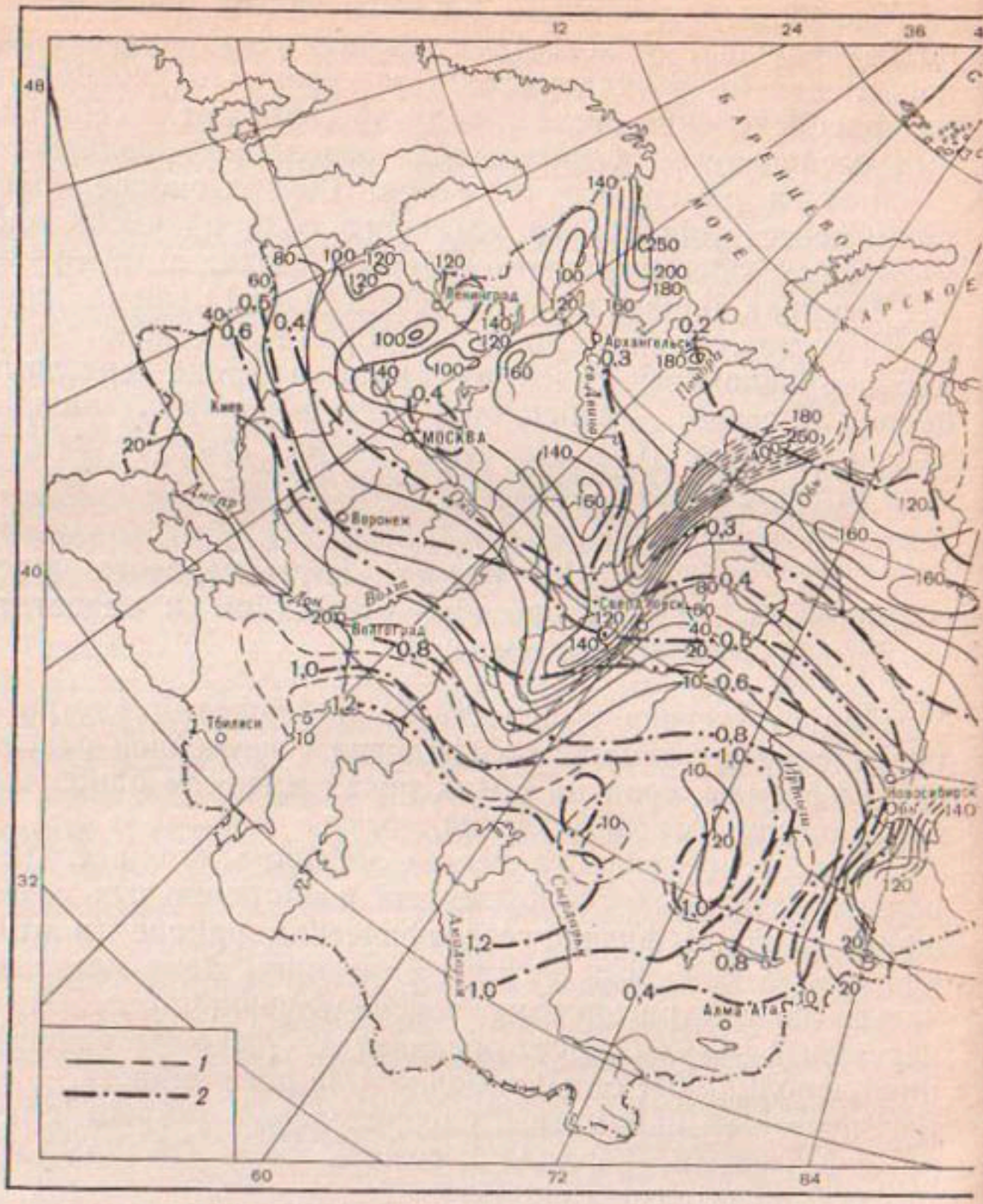


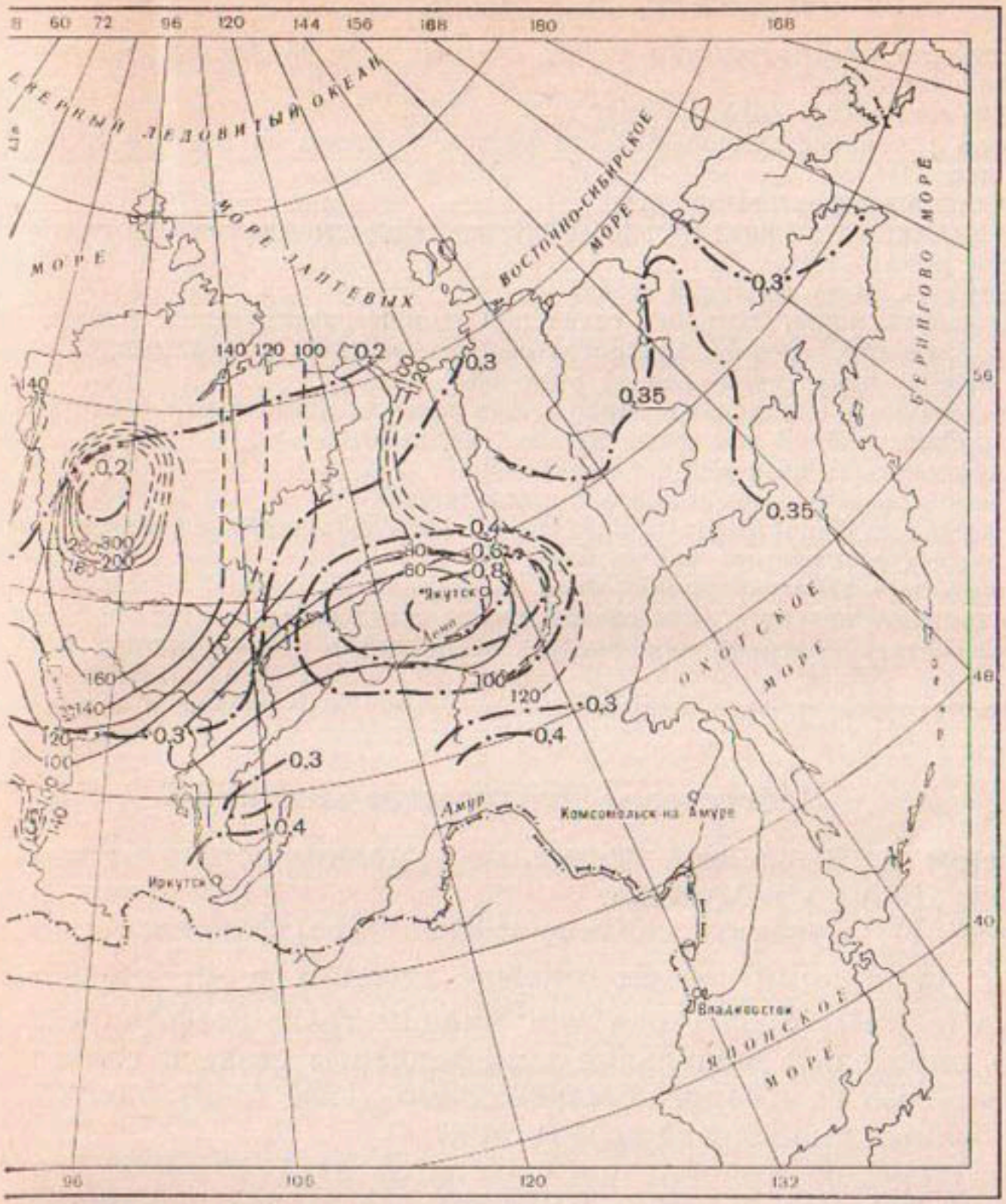
Рис. 55. Весенний сток рек СССР (*1*) и значения

время вегетации, весной и осенью при влагозарядковых и промывных поливах). В этом случае строят кривые обеспеченности суточных расходов.

Если есть данные наблюдений, кривую обеспеченности можно построить в обобщенном виде или в виде средней кривой. Для построения обобщенной кривой применяют обычный способ, т. е. все суточные расходы имеющегося ряда из *n* лет наблюдений располагают в убывающем порядке и вычисляют обеспеченность каждого из них.

По этим данным и строят обобщенную кривую обеспеченности суточных расходов.

В «Материалах по режиму рек СССР» и справочниках по «Ресурсам поверхностных вод СССР» опубликованы за каждый год



коэффициентов изменчивости C_v (2).

ординаты кривых обеспеченности — наибольшая, 30-дневная, или 8,3% обеспеченности, 90-дневная, или 25%, 180-дневная, или 50%, 270-дневная, или 75%, 355-дневная, или 97% обеспеченности, и наименьшая.

Осредненные значения перечисленных характерных расходов представляют собой ординаты кривой обеспеченности суточных расходов.

Кривая обеспеченности средних суточных расходов при отсутствии наблюдений может быть построена методом гидрологической аналогии. Для этого суточные расходы различной обеспеченности реки-аналога выражают в долях (β) от нормы стока этой реки. Тогда $Q_p = \beta \overline{Q}$, где Q_p — суточный расход расчетной обеспеченности p%.

Вопросы для самопроверки

1. Как сосчитать объем годового стока, средний годовой расход, модуль стока и коэффициент стока?
2. Что такое модульный коэффициент?
3. Объяснить уравнение водного баланса речного бассейна за год и в среднем за много лет.
4. Каковы основные факторы стока?
5. В чем выражается влияние хозяйственной деятельности человека на сток?
6. Что такое норма стока?
7. Как составить карту изолиний стока?
8. Как вычислить норму годового стока при наличии фактических данных многолетних наблюдений, среднее квадратическое отклонение, коэффициент изменчивости и ошибку вычисления средней величины?
9. Какими методами определяют норму стока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений? В чем сущность этих методов?
10. Что характеризует коэффициент асимметрии?
11. Что такое обеспеченность и как она вычисляется?
12. Как рассчитать и построить эмпирическую кривую обеспеченности стока при наличии данных многолетних наблюдений?
13. Как рассчитать теоретическую кривую обеспеченности стока?
14. Как рассчитать внутригодовое распределение стока методом компоновки?
15. Как рассчитать внутригодовое распределение стока при отсутствии наблюдений?
16. Для чего служит кривая обеспеченности суточных расходов и как ее построить?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 9. Вычислить основные характеристики стока р. Северского Донца у г. Чугуева.

Требуется: 1) вычислить средние многолетние величины: расход $\overline{Q}$ в м³/с; суммарный объем годового стока $\overline{W}$ в м³; модуль стока $\overline{q}$ в л/(с·км²); слой стока $\overline{y}$ в миллиметрах; коэффициент стока η; 2) определить модульные коэффициенты стока k самого многоводного 1955 г. и самого маловодного 1954 г.; 3) оценить вероятную ошибку вычисления нормы стока.

Дано: 1) средние годовые расходы воды за 1944—1958 гг. (табл. 20); 2) площадь бассейна F=10 300 км²; 3) средняя многолетняя сумма осадков в бассейне $\overline{x}$=475 мм.

Решение. 1. При наличии данных наблюдений за достаточно продолжительный период средний многолетний расход воды или норму стока вычисляем по формуле (44). В нашем упражнении сумма средних годовых расходов ΣQ=399, число лет наблюдений n=15.

Отсюда $$\overline{Q} = \frac{399}{15} = 26{,}6 \text{ м}^3/\text{с};$$

Суммарный годовой сток воды $\overline{W}$ вычисляем по формуле (37):
$\overline{W} = 26{,}6 \cdot 365 \cdot 86\,400 = 26{,}6 \cdot 31{,}5 \cdot 10^6 = 838 \cdot 10^6$ м³.

Средний многолетний модуль стока $\overline{q}$ определяется по формуле (38)

$$\overline{q} = \frac{26{,}6 \cdot 1000}{10\,300} = 2{,}58 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2).$$

Таблица 20

Вычисление нормы стока $\overline{q}$, среднего квадратического отклонения σ и вероятной ошибки нормы стока $E_{50\%}$ р. Северский Донец у г. Чугуева

Год	Средний годовой расход Q м³/с	Модуль стока q л/(с·км²)	$q-\overline{q}$	$(q-\overline{q})^2$
1944	16,9	1,64	—0,94	0,884
1945	23,8	2,31	—0,27	0,073
1946	39,5	3,83	+1,25	1,563
1947	34,4	3,34	+0,76	0,578
1948	21,2	2,06	—0,52	0,270
1949	20,4	1,98	—0,60	0,360
1950	18,2	1,76	—0,82	0,672
1951	29,4	2,84	+0,26	0,068
1952	32,2	3,12	+0,54	0,292
1953	40,7	3,94	+1,36	1,850
1954	13,4	1,30	—1,28	1,638
1955	46,1	4,47	+1,89	3,572
1956	20,8	2,02	—0,56	0,314
1957	21,6	2,09	—0,49	0,240
1958	20,7	2,00	—0,58	0,336
Сумма	399	38,70	+6,06 —6,06 0,00	12,71

Средний многолетний слой стока — по формуле (40)

$$\overline{y} = \frac{838 \cdot 10^6}{10\,300 \cdot 1000} = 81 \text{ мм}.$$

Правильность вычисления модуля стока проверяем по формуле (41)

$$\overline{q} = 0{,}0317 \cdot 81 = 2{,}58 \text{ л/(с·км}^2\text{)}.$$

Средний многолетний коэффициент стока η вычисляем по формуле (45)

$$\eta = \frac{81}{475} = 0{,}17.$$

2. Модульные коэффициенты стока 1955 и 1954 гг. вычисляем по формуле (46):

$$k_1 = \frac{46{,}1}{26{,}6} = 1{,}73; \quad k_2 = \frac{13{,}4}{26{,}6} = 0{,}50.$$

3. Среднее квадратическое отклонение σ рассчитано по формуле (55). Для этого в табл. 20 вычислены отклонения модулей стока каждого года от их среднего арифметического значения, т. е. $q-\overline{q}$.

Контролем правильности вычислений служит алгебраическая сумма отклонений, равная нулю. В табл. 20 даны квадраты отклонений $(q-\overline{q})^2$. Сумма квадратов отклонений составляет $\Sigma(q-\overline{q})^2 = 12{,}71$. Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{12{,}71}{15-1}} = \pm 0{,}95 \text{ л/(с·км}^2\text{)}.$$

Согласно формуле (50), вероятная ошибка средней величины

$$E_{50\%} = \pm \frac{0{,}674 \cdot 0{,}95}{\sqrt{15}} = \pm 0{,}16 \text{ л/(с·км}^2\text{)},$$

а в процентах от нормы стока

$$E_{50\%} = \pm \frac{0{,}16}{2{,}58} \cdot 100 = \pm 6{,}2\%.$$

Вероятное значение нормы стока — от $(2{,}58 + 0{,}16)$ до $(2{,}58 - 0{,}16)$ или 2,74 — 2,42 л/(с·км²).

Упражнение 10. Определить по карте изолиний норму годового стока р. Вычегды у г. Сыктывкара.

Дано: координаты центра бассейна $\varphi = 61°57'$ с. ш., $\lambda = 53°20'$ в. д.

Решение. На карту (см. рис. 49) накладываем координаты центра бассейна. Центр находится между изолиниями со значениями $\overline{y}$, равными 200 и 250 мм. Искомую величину определяем интерполяцией между ними.

Расстояние от центра бассейна до изолинии 200 мм в 1,3 раза больше, чем до изолинии 250 мм. Отсюда норма стока

$$\overline{y} = 200 + \frac{250-200}{1{,}3+1{,}0} \cdot 1{,}3 = 228 \text{ мм}$$

или при расчете от изолинии 250 мм

$$\overline{y} = 250 - \frac{250-200}{1{,}3+1{,}0} \cdot 1{,}0 = 228 \text{ мм}.$$

Средний многолетний модуль стока

$$\overline{q} = 0{,}0317 \cdot 228 = 7{,}23 \text{ л/(с · км}^2\text{)}.$$

Упражнение 11. Определить норму стока р. Десны до устья по карте среднего многолетнего годового стока.

Дано: карта изолиний нормы годового стока р. Десны (рис. 56).

Решение. Норму годового стока бассейна, пересекаемого несколькими изолиниями, определяем по формуле (65). Для этого наносим на карту водораздельную линию. Вся площадь водосбора разбивается на отдельные зоны I, II, III и т. д., ограниченные во-

доразделной линией и одной или двумя изолиниями стока. Расчеты выполняем в табл. 21. Норма стока

$$\overline{q} = \frac{275\,488}{64\,640} = 4{,}26 \text{ л/(с·км}^2\text{)}.$$

Таблица 21

Вычисление нормы стока р. Десны

№ зоны	Изолинии стока в зоне q л/(с·км²)	Средний модуль стока в зоне $q_{ср}$ л/(с·км²)	Площадь зоны f км²	$q_{ср} f$
I	6,5—6,0	6,25	4 480	28 000
II	6,0—5,0	5,50	10 880	59 840
III	5,0—4,0	4,50	19 200	86 400
IV	4,0—3,0	3,50	24 320	85 120
V	3,0—2,6	2,80	5 760	16 128
		Сумма	64 640	275 488

При рассмотрении табл. 21 обратите внимание, что верхняя изолиния в первой зоне принята 6,5 л/(с·км²). Водораздел здесь не достигает изолинии 7,0. Значение q определено интерполяцией между 6 и 7 л/(с · км²). Аналогично определено $q = 2{,}6$ л/(с · км²) на юге пятой зоны.

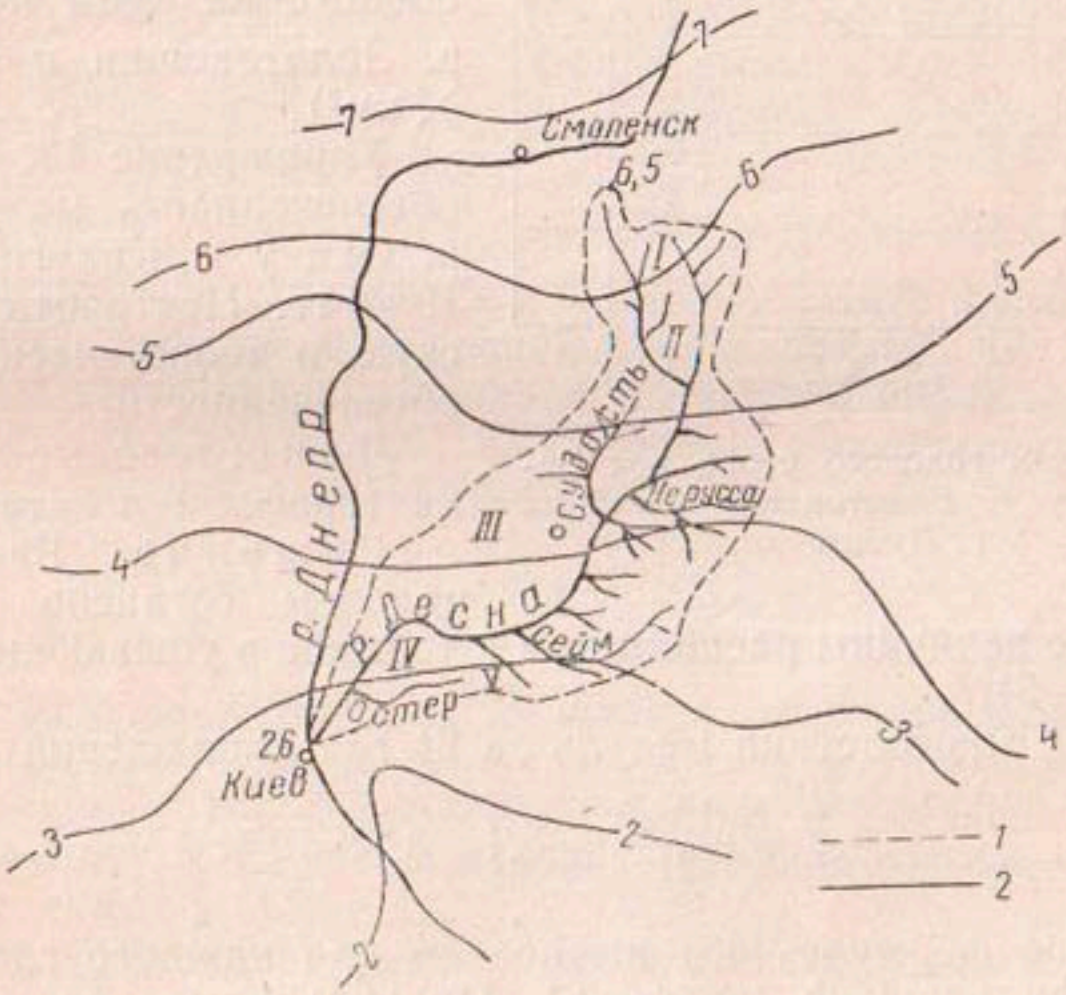


Рис. 56. Годовой сток в бассейне р. Десны.
1 — водораздел, *2* — изолинии модуля стока в л/(с·км²).

Упражнение 12. Определить методом аналогии норму стока р. Золотоношки у г. Золотоноши. В качестве аналога принять р. Сулу у г. Лубны.

Дано: модули стока р. Золотоношки у г. Золотоноши и р. Сулы у г. Лубны за 6 лет параллельных наблюдений (табл. 22). Норма стока р. Сулы, определенная по данным многолетних наблюдений, $\overline{q}_a = 2{,}1$ л/(с · км²).

Таблица 22

Модули стока q (л/(с · км²)) рек Золотоношки и Сулы

Река — пункт	1949 г.	1950 г.	1951 г.	1952 г.	1953 г.	1954 г.
Золотоношка — г. Золотоноша . . .	1,38	0,99	2,28	2,08	3,30	0,65
Сула — г. Лубна	1,10	1,18	2,09	1,65	2,58	0,78

Решение. Строим график связи между значениями стока обеих рек (рис. 57, табл. 22). Проводим линию связи так, чтобы она занимала среднее положение между точками. Полученная прямая и есть график связи стока малоизученной р. Золотоношки и р. Сулы—реки-аналога.

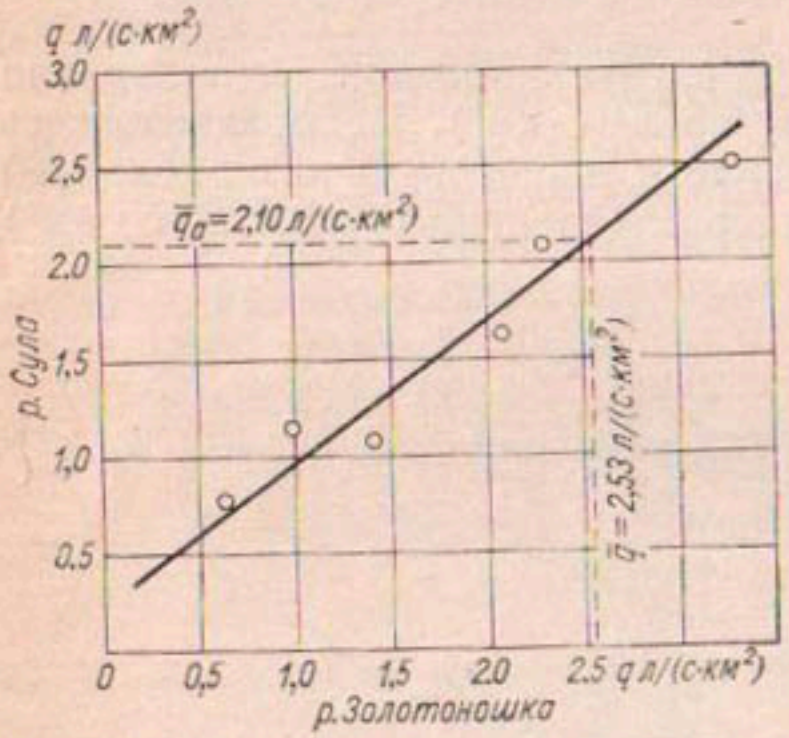


Рис. 57. Связь годового стока рек Золотоношки у г. Золотоноши и Сулы у г. Лубны.

Отложив норму стока реки-аналога на вертикальной оси $\overline{q}_a = 2{,}1$ л/(с·км²), на оси абсцисс находим норму стока р. Золотоношки $\overline{q} = 2{,}53$ л/(с × × км²).

Упражнение 13. Рассчитать обеспеченность модулей стока р. Оки у г. Калуги за 1920—1940 гг. Построить эмпирическую и теоретическую кривые обеспеченности.

Дано: годовые модули стока (графы 1 и 2 табл. 23).

Решение. Расчеты выполняем согласно п. 26; наблюденные величины располагаем в таблице в убывающем порядке (графы 3—5).

Средний многолетний модуль за 21 год наблюдений составляет

$$\overline{q} = \frac{108{,}0}{21} = 5{,}15 \text{ л/(с·км²)}.$$

Затем по формуле (46) вычисляем для каждого года модульные коэффициенты k (графа 6). Правильность расчетов проверяем по сумме модульных коэффициентов. Она равна числу чле-

Таблица 23

Вычисление коэффициента вариации и обеспеченности стока р. Оки у г. Калуги ($F = 54\,900$ км²)

Годы в хронологическом порядке	Модуль стока q л/(с·км²)	№ п/п	Год	Модуль стока в убывающем порядке q л/(с·км²)	Модульный коэффициент k	$k-1$	$(k-1)^2$	$p=\frac{m-0{,}3}{n+0{,}4}\cdot 100\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1920	4,7	1	1933	8,1	1,57	0,57	0,325	3,3
1921	2,5	2	1931	7,4	1,44	0,44	0,194	7,9
1922	3,4	3	1928	7,0	1,36	0,36	0,130	12,6
1923	4,7	4	1926	6,6	1,28	0,28	0,078	17,3
1924	5,2	5	1927	6,6	1,28	0,28	0,078	21,9
1925	4,3	6	1932	6,3	1,22	0,22	0,078	26,6
1926	6,6	7	1929	5,7	1,11	0,11	0,012	31,3
1927	6,6	8	1937	5,5	1,07	0,07	0,005	36,0
1928	7,0	9	1924	5,2	1,01	0,01	0,000	40,7
1929	5,7	10	1936	5,1	0,99	—0,01	0,000	45,3
1930	3,2	11	1934	5,0	0,97	—0,03	0,001	50,0
1931	7,4	12	1920	4,7	0,91	—0,09	0,008	54,7
1932	6,3	13	1923	4,7	0,91	—0,09	0,008	59,3
1933	8,1	14	1940	4,6	0,89	—0,11	0,012	64,0
1934	5,0	15	1925	4,3	0,84	—0,16	0,026	68,7
1935	4,0	16	1938	4,2	0,82	—0,18	0,032	73,5
1936	5,1	17	1935	4,0	0,78	—0,22	0,048	78,1
1937	5,5	18	1939	4,0	0,78	—0,22	0,048	82,7
1938	4,2	19	1922	3,4	0,66	—0,34	0,116	87,5
1939	4,0	20	1930	3,2	0,62	—0,38	0,144	92,0
1940	4,6	21	1921	2,5	0,49	—0,51	0,260	96,7
Сумма	108,1	—		108	21,0	+2,34	1,603	—
Среднее	5,15	—	—	5,15		—2,34		
						0		

нов гидрологического ряда, т. е. 21. После этого подсчитываем обеспеченности модулей стока по формуле (62а).

В графе 9 даны результаты этих расчетов. Например, для первого члена ряда, а именно для 1933 г., $m=1$; при общей продолжительности наблюдений $n = 21$, обеспеченность

$$p = \frac{1-0{,}3}{21+0{,}4}\cdot 100 = 3{,}3\%.$$

По данным граф 5 или 6 и 9 строим эмпирическую кривую обеспеченности (рис. 58) на клетчатке вероятностей с умеренной асимметричностью. По горизонтальной оси откладываем значения p в процентах, а по вертикальной — средние годовые значения стока, приведенные в графе 5.

Для построения теоретической кривой обеспеченности необходимо сначала вычислить параметры кривой распределения: среднюю многолетнюю величину $\overline{q}$ [в упражнении $\overline{q} = 5{,}15$ л/(с · км²)],

коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s. Судя по карте изолиний (см. рис. 50), $C_v < 0{,}50$, поэтому расчет этой величины выполняем по формуле (56). В графах 7—8 приведены значения $(k-1)$ и $(k-1)^2$. Проверкой правильности арифметических подсчетов служит $\Sigma(k-1)$, которая всегда равна нулю (см. сумму графы 7). Подставив в формулу (56) значения $\Sigma(k-1)^2 = 1{,}603$ и $n = 21$, вычисляем коэффициент изменчивости

$$C_v = \sqrt{\frac{1{,}603}{21-1}} = 0{,}28.$$

Относительная средняя квадратическая ошибка среднего арифметического вычислена по формуле (59а)

$$\xi_{y_0} = \frac{0{,}28}{\sqrt{21}} \cdot 100 = 6{,}0\%.$$

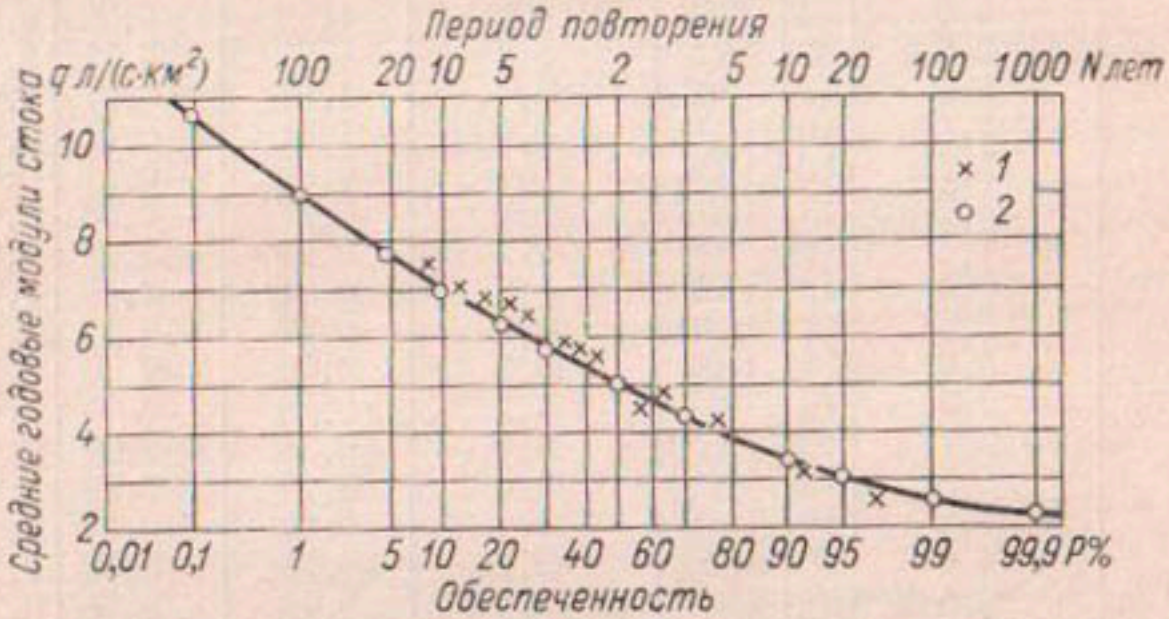


Рис. 58. Кривая обеспеченности средних годовых модулей стока р. Оки у г. Калуги.

1 — точки эмпирической кривой; *2* — теоретически вычисленные точки.

Ошибка меньше 10%, следовательно, данных наблюдений достаточно для последующих расчетов. Так как сток р. Оки не имеет нулевых значений, то коэффициент асимметрии C_s принимаем равным двум коэффициентам вариации: $C_s = 2 \cdot 0{,}28 = 0{,}56$ (см. стр. 102). Расчеты модульных коэффициентов выполняем по формуле (63) в табл. 24.

Отклонения ординат кривой обеспеченности Ф от среднего значения Ф (принимаемого за единицу) при $C_v = 1{,}0$ и $C_s = 0{,}56$ определяем по приложению 1. В приложении ближайшие к 0,56 значения C_s составляют 0,50 и 0,70. Поэтому искомые величины Ф определяем интерполяцией.

Так как в приложении значения Ф даны для $C_v = 1{,}0$, то при $C_v = 0{,}28$ отклонения составляют $\Phi = 0{,}28$. Например, для модуля стока 0,1%-ной обеспеченности при $C_s = 0{,}50$ $\Phi = 3{,}81$, а при $C_s = 0{,}70$ $\Phi = 4{,}10$. Следовательно, при $C_s = 0{,}56$ $\Phi = 3{,}90$. Поэтому $\Phi C_v = 3{,}90 \cdot 0{,}28 = 1{,}09$. $k = \Phi C_v + 1 = 1{,}09 + 1{,}0 = 2{,}09$.

Таблица 24

Вычисление ординат теоретической кривой обеспеченности годовых модулей стока р. Оки у г. Калуги

$\overline{q} = 5{,}15$ л/(с·км²), $C_v = 0{,}28$, $C_s = 0{,}56$, $F = 54\,900$ км²

Расчетные величины	Обеспеченность p %						
	0,1	1	3	5	10	20	30
Ф	3,90	2,73	2,10	1,78	1,32	0,80	0,45
ΦC_v	1,09	0,76	0,59	0,50	0,37	0,22	0,13
$k_{p\%} = \Phi C_v + 1$	2,09	1,76	1,59	1,50	1,37	1,22	1,13
q л/(с·км²)	10,76	9,06	8,19	7,73	7,06	6,28	5,82

Расчетные величины	Обеспеченность p %					
	50	70	80	95	97	99
Ф	—0,092	—0,582	—1,208	—1,466	—1,634	—1,912
ΦC_v	—0,03	—0,16	—0,34	—0,41	—0,46	—0,54
$k_{p\%} = \Phi C_v + 1$	0,97	0,84	0,64	0,59	0,54	0,46
q л/(с·км²)	5,00	4,33	3,30	3,04	2,78	2,37

Зная модульные коэффициенты k и средний многолетний модуль стока q, вычисляем модули стока $q_{p\%}$ любой обеспеченности. При $\overline{q} = 5{,}15$ и модульном коэффициенте $k_{0,1} = 2{,}09$ получаем $q_{0,1\%} = 2{,}09 \cdot 5{,}15 = 10{,}8$ л/(с. · км²).

Модульные коэффициенты k можно получить также по приложению 2 нашего учебника. Так, при $\overline{q} = 5{,}15$ л/с, $C_v = 0{,}28$ и при $C_s = 2C_v$ и обеспеченности $p = 0{,}1\%$ $k = 2{,}10$. Отсюда $q_{0,1\%} = 2{,}10 \times 5{,}15 \times 10{,}8$ л/(с · км²).

Полученные значения $q_{p\%}$ наносим на рис. 58. На нем видно, что точки эмпирической и теоретической кривой удовлетворительно совпадают.

Упражнение 14. Построить кривую обеспеченности средних годовых расходов $Q_{\text{ср. год}}$ р. Камышной (бассейн р. Северского Донца) при отсутствии наблюдений.

Дано: площадь бассейна р. Камышной $F = 520$ км² и координаты центра бассейна $\varphi = 49°40'$ с. ш., $\lambda = 39°45'$ в. д.

Учащимся рекомендуется расчеты выполнить самостоятельно. Напомним, что норму стока и C_v следует определять по соответствующим картам.

Упражнение 15. Рассчитать внутригодовое распределение стока р. Белой у г. Стерлитамака для года 90%-ной обеспеченности по стоку (предполагается использование стока в энергетических целях). Расчетным является зимний сезон.

Дано: средние месячные расходы воды $Q_м$ за период 1919—1940 гг. (табл. 25).

Таблица 25

Средние месячные расходы воды ($Q_м$ м³/с) р. Белая у г. Стерлитамака за 1919—1940 гг.
$F = 21\,000$ км², $L = 648$ км

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1919	6,7	6,3	7,2	650	248	85	25,0	17,0	15,7	18,0	13,4	17,4
1920	10,5	8,0	9,1	656	201	33	13,3	10,2	9,9	9,7	6,4	4,9
1921	4,4	4,8	5,6	547	291	41	11,3	12,5	10,1	10,1	25,6	14,6
1922	9,9	6,2	7,1	755	542	170	68,5	40,7	71,5	122,0	146,0	152,0
1923	82,1	24,0	37,1	396	980	128	56,5	45,7	41,0	41,6	44,7	17,2
1924	13,7	14,8	12,8	295	162	50	41,2	37,0	32,6	32,1	31,5	22,2
1925	18,9	19,0	22,2	544	632	95	44,5	33,4	30,5	101,0	127,0	46,0
1926	31,1	23,3	19,6	244	1254	215	284,0	203,0	299,0	212,0	179,0	85,0
1927	70,2	50,3	45,7	606	457	93	64,2	48,7	52,3	72,8	327,0	66,4
1928	35,4	38,8	34,6	334	657	179	90,0	106,0	79,8	115,0	114,0	70,9
1929	39,3	38,0	32,6	538	815	101	50,6	35,6	40,7	49,2	40,0	15,0
1930	13,2	10,9	13,5	523	317	65	42,3	28,0	28,6	31,9	28,4	13,5
1931	14,3	18,2	14,9	310	137	37	17,8	19,5	33,4	91,1	112,0	22,7
1932	18,0	16,3	17,8	795	238	45	43,3	28,7	24,5	27,5	41,3	21,0
1933	17,9	14,1	13,1	331	374	66	30,1	26,2	21,0	21,0	18,1	21,8
1934	16,7	14,9	15,2	163	590	120	93,7	38,4	28,2	28,8	20,8	13,3
1935	22,9	18,6	12,9	13	177	94	216,0	47,1	31,2	37,4	23,4	19,9
1936	9,1	9,3	9,5	325	200	62	28,7	18,6	17,1	25,1	30,4	13,1
1937	13,1	10,5	14,0	251	317	122	61,2	30,1	21,3	20,9	17,9	9,8
1938	9,4	10,9	11,2	403	352	68	42,4	33,2	21,4	25,1	25,6	12,6
1939	7,9	8,1	7,5	445	223	67	29,8	23,2	22,3	27,1	21,7	9,5
1940	8,0	7,0	18,7	629	207	96	42,8	22,3	17,5	17,4	19,1	14,5

Требуется 1) рассчитать распределение стока по месяцам за зимний сезон; 2) определить средний годовой расход воды $Q_г$.

Решение. Упражнение выполняем методом компоновки в соответствии с § 30.

Так как р. Белая относится к группе рек с преобладающим снеговым питанием, то год делим на два периода: многоводный (весенний) и маловодный (межень), включающий в себя два сезона — летне-осенний и зимний. Лимитирующим сезоном является зимняя межень. Сроки отдельных сезонов: весна — апрель — июнь, лето—осень — июль—ноябрь, зима — декабрь—март.

В табл. 26 для отдельных лет подсчитаны суммы средних месячных расходов воды $\Sigma Q_м$ за отдельные сезоны и за год. Расчет внутригодового распределения стока начинаем с многоводного периода, т. е. с весны, и кончаем зимней меженью. Поэтому в водохозяйственном 1919-20 г. сток весны равен $650+248+85=983$ м³/с. Таким же образом подсчитан сток летне-осеннего сезона — 89 м³/с, зимнего — 45 м³/с, годовой сток составляет $983+89+45=1117$ м³/с. Сток всего маловодного периода (межени) равен 134 м³/с.

Располагая вычисленные суммы средних месячных расходов воды $\Sigma Q_м$ за зимний сезон и за год в убывающем порядке

Таблица 26

Суммы средних месячных расходов воды ($\Sigma Q_м$ м³/с) за год и отдельные сезоны

№ п/п	Водохозяйственный год	Весна (IV—VI)	Межень (VII—III)	Лето — осень (VII—XI)	Зима (XII—III)	Год
1	1919–20	983	134	89	45	1117
2	1920–21	890	69	49	20	959
3	1921–22	879	108	70	38	987
4	1922–23	1467	744	449	295	2211
5	1923–24	1504	288	230	58	1792
6	1924–25	507	256	174	82	763
7	1925–26	1271	456	336	120	1727
8	1926–27	1713	1428	1177	251	3141
9	1927–28	1156	740	565	175	1896
10	1928–29	1170	686	505	181	1856
11	1929–30	1454	269	216	53	1723
12	1930–31	905	220	159	61	1125
13	1931–32	484	349	274	75	833
14	1932–33	1078	231	165	66	1309
15	1933–34	771	185	116	69	956
16	1934–35	873	278	210	68	1151
17	1935–36	284	403	355	48	687
18	1936–37	587	171	120	51	758
19	1937–38	690	192	151	41	882
20	1938–39	823	184	148	36	1007
21	1939–40	735	167	124	43	902
	Сумма	20 224	7558	5682	1876	27782

(табл. 27), вычисляем средние значения $\Sigma\overline{Q}_м$ и коэффициенты изменчивости C_v. В результате вычислений получено:
для зимы

$$\Sigma\overline{Q}_{м.\,з} = \frac{1876}{21} = 89{,}3 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$C_{v\,з} = \sqrt{\frac{13{,}784}{21-1}} = 0{,}83;$$

для года

$$\Sigma\overline{Q}_{м.\,г} = \frac{27\,782}{21} = 1323 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$C_{v\,г} = \sqrt{\frac{4 \cdot 269}{21-1}} = 0{,}46.$$

Принимая приближенно коэффициент асимметрии $C_s = 2C_v$, по найденным значениям $\Sigma\overline{Q}_м$ и коэффициентам вариации C_v определяем расчетные значения стока $\Sigma Q_м$ за год и за зиму (лимитирующий сезон). Значения модульных коэффициентов расчет-

Таблица 27

Вычисление средних значений (нормы) сумм средних месячных расходов воды ($\Sigma\overline{Q}_м$ м³/с) и коэффициентов вариации C_v для года и зимнего сезона р. Белой у г. Стерлитамака за 1919—1940 гг.

№ п/п	За год					Зима (XII-III)				
	Год	$\Sigma Q_{м.г}$	k	$k-1$	$(k-1)^2$	Год	$\Sigma Q_{м.з}$	k	$k-1$	$(k-1)^2$
1	1926–27	3141	2,38	1,38	1,904	1922–23	295	3,30	2,30	5,290
2	1922–23	2211	1,67	0,67	0,449	1926–27	251	2,81	1,81	3,276
3	1927–28	1896	1,43	0,43	0,185	1928–29	181	2,03	1,03	1,061
4	1928–29	1856	1,40	0,40	0,160	1927–28	175	1,96	0,96	0,922
5	1923–24	1792	1,35	0,35	0,122	1925–26	120	1,34	0,34	0,116
6	1925–26	1727	1,30	0,30	0,090	1924–25	82	0,93	—0,07	0,005
7	1929–30	1723	1,30	0,30	0,090	1931–32	75	0,84	—0,16	0,026
8	1932–33	1309	0,98	—0,02	0,000	1933–34	69	0,77	—0,23	0,053
9	1934–35	1151	0,87	—0,13	0,017	1934–35	68	0,76	—0,24	0,058
10	1930–31	1125	0,85	—0,15	0,022	1932–33	66	0,74	—0,26	0,068
11	1919–20	1117	0,84	—0,16	0,026	1930–31	61	0,69	—0,31	0,096
12	1938–39	1007	0,80	—0,20	0,040	1923–24	58	0,65	—0,35	0,122
13	1921–22	987	0,75	—0,25	0,062	1929–30	53	0,59	—0,41	0,168
14	1920–21	959	0,72	—0,28	0,078	1936–37	51	0,57	—0,43	0,185
15	1933–34	956	0,72	—0,28	0,078	1935–36	48	0,54	—0,46	0,212
16	1939–40	902	0,68	—0,32	0,102	1919–20	45	0,50	—0,50	0,250
17	1937–38	882	0,66	—0,34	0,116	1939–40	43	0,48	—0,52	0,270
18	1931–32	833	0,63	—0,37	0,137	1937–38	41	0,46	—0,54	0,292
19	1924–25	763	0,58	—0,42	0,176	1921–22	38	0,42	—0,58	0,336
20	1936–37	758	0,57	—0,43	0,185	1938–39	36	0,40	—0,60	0,360
21	1935–36	686,9	0,52	—0,48	0,230	1920–21	20	0,22	—0,78	0,608
Сумма		27 782	21	+3,83 —3,83 0,00	4,269		1876	21	+6,44 —6,44 0,00	13,784
Среднее										
	$\Sigma\overline{Q}_{м.г} = 1323$					$\Sigma\overline{Q}_{м.з} = 89,3$				

ной 90%-ной обеспеченности, вычисляемых по формуле (62), определяем по приложению 2 учебника.

Вычисления дают для года 90%-ной обеспеченности при $C_v = 0,46$; $k_{90\%} = 0,474$, а $\Sigma Q_{м.г\ 90\%} = 0,474 \cdot 1323 = 627$ м³/с; для зимнего сезона (при $C_v = 0,83$) $k_{90\%} = 0,196$, а $\Sigma Q_{м.з\ 90\%} = 0,196 \cdot 89,3 = 17,5$ м³/с.

Результаты расчетов межсезонного распределения стока записываем в табл. 28.

Таблица 28

Межсезонное распределение стока для года 90%-ной обеспеченности

Период	C_v	Норма стока $\Sigma\overline{Q}_м$ м³/с	Сток $\Sigma Q_м$ м³/с	Обеспеченность p %	Сток в % от годового
Год	0,46	1323	627	90	100
Зима	0,82	89,3	17,5	90	2,8

Распределение средних месячных расходов воды $Q_м$ в м³/с за зимний сезон (декабрь — март) р. Белой у г. Стерлитамака за период наблюдений 1919—1940 гг.

№ п/п	p%	Год	$\Sigma Q_{м.з}$	$Q_м$	Месяц	$Q_м$	Месяц	$Q_м$	Месяц	$Q_м$	Месяц
						Многоводные годы					
1	3,3	1922–23	295	152,0	XII	82,1	I	37,1	III	24,0	II
2	7,9	1926–27	251	85,0	XII	70,2	I	50,3	II	45,7	III
3	12,6	1928–29	181	70,9	XII	39,3	I	38,0	II	32,6	III
4	17,3	1927–28	175	66,4	XII	38,8	II	35,4	I	34,6	III
5	21,9	1925–26	120	46,0	XII	31,1	I	23,3	II	19,6	III
6	26,6	1924–25	82	22,2	XII	22,2	III	19,0	II	18,9	I
7	31,3	1931–32	75	22,7	XII	18,0	I	17,8	III	16,3	II
Сумма			1179	465		302		221		192	
Распределение, %			100	39,5		25,5		18,8		16,2	
						Средние по водности годы					
8	36,0	1933–34	69	21,8	XII	16,7	I	15,2	III	14,9	II
9	40,7	1934–35	68	22,9	I	18,6	II	13,3	XII	12,9	III
10	45,3	1932–33	66	21,0	XII	17,9	I	14,1	II	13,1	III
11	50,0	1930–31	61	18,2	II	14,9	III	14,3	I	13,5	XII
12	54,7	1923–24	58	17,2	XII	14,8	II	13,7	I	12,8	III
13	59,3	1929–30	53	15,0	XII	13,5	III	13,2	I	10,9	II
14	64,0	1936–37	51	14,0	III	13,1	I	13,1	XII	10,5	II
Сумма			426	130		110		97		89	
Распределение, %			100	30,6		25,8		22,8		20,8	
						Маловодные годы					
15	68,7	1935–36	48	19,9	XII	9,5	III	9,3	II	9,1	I
16	73,5	1919–20	45	17,4	XII	10,5	I	9,1	III	8,0	II
17	78,1	1939–40	43	18,7	III	9,5	XII	8,0	I	7,0	II
18	82,7	1937–38	41	11,2	III	10,9	II	9,8	XII	9,4	I
19	87,5	1921–22	38	14,6	XII	9,9	I	7,1	III	6,2	II
20	92,0	1938–39	36	12,6	XII	8,1	II	7,9	I	7,5	III
21	96,7	1920–21	20	5,6	III	4,9	XII	4,8	II	4,4	I
Сумма			271	100		63		56		52	
Распределение, %			100	36,9		23,4		20,7		19,0	
Всего			1876	695	XII/15	475	XII/2	374	XII/3	332	XII/1
					I/1		I/10		I/6		I/4
Приняты:					II/1		II/5		II/7		II/8
Распределение					III/4		III/4		III/5		
в % и месяцы			100	37,1	XII	25,3	I	19,9	II	17,7	III

Для внутрисезонного распределения стока составляем табл. 29, в которой величины сезонного стока $\Sigma Q_м$ размещаем по вертикали в убывающем порядке и вычисляем их обеспеченность.

Для каждого года по горизонтали выписаны из табл. 25 средние месячные расходы воды $Q_м$ в убывающем порядке и соответствующие им календарные месяцы. Ряды сезонных величин стока разбиты по вертикали на три градации водности: многоводную ($p \leqslant 33\%$), среднюю ($p = 33 \div 66\%$) и маловодную ($p > 66\%$).

Для каждой градации водности сезона суммируем средние месячные расходы воды $Q_м$ с одинаковым порядковым номером внутри сезона, подсчитываем суммы месячных расходов $\Sigma Q_м$ за сезон и относительное распределение стока по месяцам в процентах от стока за сезон. Например, для первой градации водности сток первого месяца зимы составляет $\frac{465}{1179} \cdot 100 = 39{,}5\%$ стока за этот сезон. Сток того же первого месяца зимы по всем группам водности составляет $\frac{695}{1876} \cdot 100 = 37{,}1\%$ стока за зиму.

Относительную величину месячного стока (в процентах от сезонного) относим к тому календарному месяцу, который встречается наиболее часто для данного порядкового номера месяца. Например, относительная величина стока первого месяца зимы, равная 37,1% стока за сезон, отнесена к декабрю, так как этот месяц встречается наиболее часто (15 раз из 21) (см. табл. 29).

Умножая принятое процентное распределение стока по месяцам внутри сезона на величины стока $\Sigma Q_м$, получаем средние месячные расходы $Q_м$ для года расчетной 90%-ной обеспеченности. Например, средний месячный расход декабря

$$Q_{м\ XII} = \frac{37{,}1}{100} \cdot 17{,}5 = 6{,}5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Просуммировав средние месячные расходы воды $Q_м$ за год и разделив эту сумму $\Sigma Q_м$ на 12, получим средний годовой расход

$$Q_0 = \frac{\Sigma Q_м}{12} = \frac{627}{12} = 52{,}2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Внутрисезонное распределение стока за зиму приведено в табл. 30.

Таблица 30

Внутрисезонное распределение стока за зиму

	XII	I	II	III	За зиму	
					%	$\Sigma Q_{м.з}$
Сток в % от сезонного	37,1	25,3	19,9	17,7	100	
Среднемесячные расходы, м³/с	6,5	4,4	3,5	3,1	—	17,5

ТЕМА 8. ХАРАКТЕРНЫЕ РАСХОДЫ ВОДЫ

33. Максимальные расходы талых и дождевых вод

В годовом режиме реки наблюдаются два характерных расхода: наивысший, или максимальный, и наинизший, или минимальный. В период прохождения максимальных расходов уровень в реках повышается, затапливается пойма, что оказывает положительное влияние на продуктивность лугов и на рыбоводство. Зачастую, однако, паводки наносят и большой материальный ущерб народному хозяйству: при катастрофических паводках затапливаются населенные пункты, иногда имеют место аварии и даже разрушения плотин, мостов и других гидротехнических сооружений. Расчет максимальных расходов является одним из наиболее ответственных элементов водохозяйственного проектирования. Завышение максимального расхода снижает экономическую эффективность, а занижение его может привести к авариям, к перебоям в работе сооружений и даже к их разрушению.

Максимальные расходы на реках Европейской территории СССР чаще всего формируются в период весеннего половодья. На малых же водосборах наибольшие расходы во время ливней могут значительно превышать максимумы талых вод.

На некоторых крупных реках, таких, как Амур и Дунай, максимальные расходы формируются после продолжительных дождей. Иногда образуются смешанные паводки в результате одновременного таяния снега и выпадения интенсивных ливней.

34. Обеспеченность максимальных расходов

Понятие «обеспеченность», или «вероятность превышения», максимальных расходов аналогично изложенной выше обеспеченности стока. Так, при 1%-ной вероятности превышения максимальный расход равен или больше расчетной величины 1 раз в 100 лет, а при 0,1% — 1 раз в 1000 лет.

Применяя в гидрологических расчетах методы математической статистики, необходимо глубоко понять смысл этих методов. Если расход или сток 1%-ной вероятности превышения был 1 раз в 100 лет, то это еще не значит, что он не повторится в том же столетии второй раз. Так, на р. Дунае в 1897 и 1899 гг. прошли два катастрофических паводка 1%-ной обеспеченности. В течение же очень длинного периода окажется, что максимальный расход 1%-ной обеспеченности повторяется в среднем только 1 раз в 100 лет, а за 500 лет — 5 раз и т. д.

В табл. 31 приведены наблюденные максимальные расходы некоторых рек СССР и вероятность их превышения.

Расчетный максимальный расход. Выбор вероятности превышения максимального расхода обосновывается экономическими рас-

Таблица 31

Вероятность превышения максимальных расходов на некоторых реках СССР

Река — пункт	Год	Максимальный расход, м³/с	Вероятность превышения, %
Днепр — Киев	1931	23 000	0,4—1,0
Волга — Тетюши	1926	67 800	0,3
Дон — Георгиу-Деж	1888	11 180	0,6
Обь — Новосибирск	1937	15 090	0,25—0,30

четами и соображениями безаварийной работы проектируемых сооружений. С уменьшением обеспеченности возрастает величина максимального расхода и размеры сооружения, а соответственно и стоимость его. Увеличение же расчетной обеспеченности максимального расхода приводит к снижению стоимости сооружения, но зато повышается вероятность его повреждения. Естественно, чем больше народнохозяйственное значение сооружения, тем меньшей должна быть расчетная обеспеченность максимального расхода.

Расчетная вероятность превышения максимальных расходов зависит от класса капитальности сооружений. Класс капитальности для гидротехнических речных сооружений и для сооружений мелиоративных систем определяется по табл. 32.

Таблица 32

Распределение сооружений по классам капитальности

Объекты гидротехнического строительства и показатели их народнохозяйственного значения	Класс капитальности сооружений	
	основных	второстепенных
Гидроэлектростанции мощностью > 1 000 000 кВт	I	III
Гидроэлектростанции мощностью 301 000 — 1 000 000 кВт	II	III
Гидроэлектростанции мощностью 51 000 — 300 000 кВт	III	IV
Гидроэлектростанции мощностью 50 000 кВт и менее	IV	IV
Сооружение, обслуживающее мелиорируемую оросительную площадь 400 тыс. га и более . .	II	III
Сооружение, обслуживающее мелиорируемую площадь орошения от 50 до 400 тыс. га или осушения 50 тыс. га и более	III	IV
Сооружение, обслуживающее мелиорируемую площадь орошения или осушения менее 50 тыс. га	IV	IV

Постоянные сооружения делятся на основные и второстепенные. К основным сооружениям относятся такие, прекращение работы которых влечет за собой остановку или значительное умень-

шение мощности гидроэлектростанции, прекращение или сокращение судоходства, лесосплава и т. д. К основным сооружениям мелиоративных систем относятся те, прекращение работы которых в случае ремонта или аварии вызывает значительное и длительное уменьшение подачи воды в оросительную систему, подтопление осушаемой и затопление обвалованной территории.

Второстепенными называют сооружения и конструкции, прекращение работы которых не вызывает последствий, указанных для основных сооружений.

К постоянным относятся гидротехнические сооружения, используемые при постоянной эксплуатации объекта, к временным — сооружения, используемые только в период строительства или ремонта объекта (перемычки, строительные водоводы, водосбросы и т. д.).

Временные гидротехнические сооружения относят к IV классу капитальности, если авария этого сооружения может вызвать последствия катастрофического характера для строительной площадки. В остальных случаях они относятся к V классу капитальности.

Расчетная ежегодная вероятность превышения максимальных расходов для сооружений разных классов капитальности приведена в табл. 33.

При проектировании временных земляных и каменнонабросных гидротехнических сооружений V класса расчетную вероятность превышения принимают равной 10%, для прочих конструкций — 5%.

Таблица 33

Расчетная вероятность превышения максимальных расходов в процентах

Классы капитальности сооружений			
I	II	III	IV
0,01	0,1	0,5	1

Сооружения на малых водотоках рассчитывают на пропуск максимальных расходов с обеспеченностью, установленной различными ведомствами. В частности, водоспуски и водосбросные каналы прудов и водохранилищ рассчитывают в проектных институтах Министерства мелиорации и водного хозяйства на максимальный расход 5—10% и проверяют на расход вероятностью превышения 1—3%.

В расчетах принимаются мгновенные максимальные расходы при продолжительности их стояния $\leqslant$ 1 суток. При большей же продолжительности стояния принимаются средние суточные значения.

При расчетах возможны следующие два случая:

1) имеются данные наблюдений, 2) данных наблюдений нет.

35. Расчет максимальных расходов воды при наличии данных наблюдений

Если для рассматриваемого створа имеются наблюденные максимальные расходы за достаточно продолжительный ряд лет, то расчет сводится к построению эмпирической и теоретической кривых обеспеченности аналогично изложенному в § 28. При этом продолжительность ряда непрерывных наблюдений должна составлять: в тундре и лесной зоне не менее 25 лет, в лесостепной 30, в степной зоне и в горных районах 40, а в сухостепной и полупустынной зонах не менее 50 лет.

Ряды меньшей продолжительности оказываются достаточными, если значения $\overline{Q}_{max}$, $C_{v\,max}$ и $C_{s\,max}$, рассчитанные за те же годы для реки-аналога, отличаются от тех же величин для ряда большей продолжительности не больше чем на 10—15%.

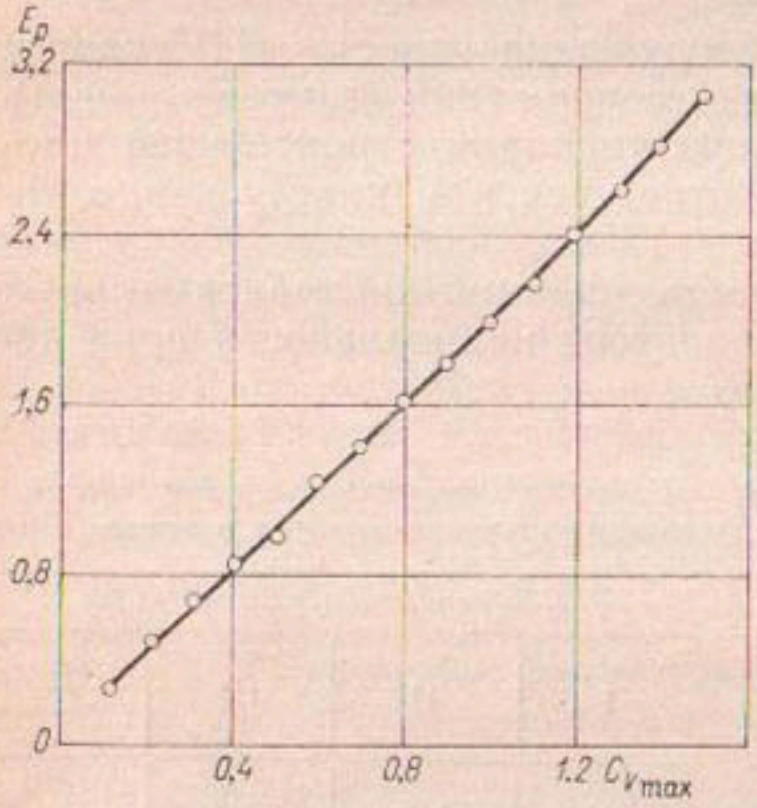


Рис. 59. Ошибка E_p максимального расчетного расхода обеспеченностью 0,01% при разных значениях коэффициента вариации C_{v_m}.

Для построения кривой обеспеченности параметры $\overline{Q}_{max}$, $C_{v\,max}$ и $C_{s\,max}$ рассчитываются согласно изложенному в п. 26 и 27.

При построении теоретической кривой обеспеченности снеговых максимумов коэффициент асимметрии $C_{s\,max}$ принимают равным $2C_{v\,max}$ — $2{,}5C_{v\,max}$; для дождевых максимумов равнинных рек и горных рек с муссонным климатом $C_{s\,max}=3C_{v\,max}\div 4C_{v\,max}$; для остальных горных рек $C_{s\,max}=4C_{v\,max}$. При значительном несоответствии между теоретической кривой и данными наблюдений можно принять иное соотношение между $C_{s\,max}$ и $C_{v\,max}$. Обеспеченность наблюденных ежегодных максимальных расходов воды рассчитывается по формуле (62).

Гарантийная поправка к максимальному расходу. Период гидрометрических наблюдений не охватывает всего многообразия метеорологических условий, благоприятствующих формированию особенно высоких паводков, поэтому максимальный расход, рассчитываемый по кривой обеспеченности может получиться заниженным. Поэтому к расчетному расходу с вероятностью превышения 0,01% прибавляют гарантийную поправку

$$\Delta Q=\frac{aE_p}{\sqrt{n}}Q_{max}, \qquad (67)$$

где ΔQ — величина поправки, прибавляемой к расходу воды рас-

четной обеспеченности, в м³/с; n — число лет наблюдений над максимальными расходами; a — коэффициент, равный 0,7 для хорошо изученных рек и 1,5 — для слабо изученных рек; E_p — ошибка максимального расхода, определяемая по рис. 59.

Расчетный расход

$$Q_p = Q_{max} + \Delta Q. \tag{68}$$

Величина гарантийной поправки является критерием достаточной или недостаточной длительности имеющегося ряда наблюденных величин Q_{max}, а именно, если $\Delta Q \leqslant 0{,}2\,Q_{max}$, продолжительность наблюдений достаточна и удлинение ряда не требуется.

36. Расчет максимального расхода талых вод при недостаточности или отсутствии гидрометрических наблюдений

Расчет максимального расхода базируется на следующих соображениях, положенных в основу формулы Д. Л. Соколовского.

Допустим, максимальная интенсивность снеготаяния составляет a (мм/ч). Из этого слоя образовавшейся воды в русло реки стекает лишь часть η. Следовательно, максимальная интенсивность стока составляет $a\eta$ мм/ч. Умножив величину слоя стока на площадь водосбора F (км²), получаем после приведения всех величин к метрам

$$Q'_{p\%} = \frac{a\eta}{1000} F \cdot 1000 \cdot 1000 = a\eta F \cdot 10^3 \ \text{м}^3/\text{ч}, \tag{69}$$

или в 1 секунду

$$Q'_{p\%} = \frac{a \cdot \tau_i \cdot F \cdot 1000}{3600} = 0{,}28 a\eta F \ \text{м}^3/\text{с}, \tag{70}$$

где $Q'_{p\%}$ — максимальный расход обеспеченностью $p\%$.

Величина $a\eta$ представляет собой максимальный мгновенный сток или максимальную водоотдачу соответствующей обеспеченности в мм/ч. Заменив $a\eta = A$, получаем

$$Q'_{p\%} = 0{,}28\, A_{p\%} F, \tag{71}$$

где $A_{p\%}$ — максимальная водоотдача обеспеченностью $p\%$ в мм/ч.

С увеличением площади меняется интенсивность снеготаяния на отдельных участках бассейна, возрастает неодновременность добегания воды к расчетному створу со всей площади водосбора. Вследствие этого с увеличением площади бассейна происходит уменьшение (или редукция) максимального стока с единицы площади. Максимальный расход пропорционален на всей площади водосбора F, как это показано в формуле (71), а

$$Q_{p\%} = \frac{0{,}28\, A_{p\%} F}{(F+1)^n}. \qquad (72)$$

Значения A для разных рек установлены по данным фактических наблюдений. Показатель степени n называется параметром редукции максимальных расходов.

В расчетах принимают, что годы максимальных расходов совпадают с годами максимального стока, поэтому максимальную водоотдачу $A_{p\%}$ следует рассматривать в зависимости от слоя весеннего стока. Установлено, что интенсивность водоотдачи $A_{p\%}$ прямо пропорциональна слою стока $y_{p\%}$ или

$$A_{p\%} = k y_{p\%}. \qquad (73)$$

Норма стока талых вод определяется по карте изолиний (см. рис. 55), а модульные коэффициенты k расчетной обеспеченности — по приложению 2 с учетом коэффициента вариации.

Заменив $0{,}28k$ буквой k_0 и учитывая неравенство C_v слоя стока и максимального расхода соответствующим коэффициентам μ, формула (72) приобретает следующий вид:

$$Q_{p\%} = \frac{k_0 y_{p\%} F \mu}{(F+1)^n}, \qquad (74)$$

где k_0 — коэффициент дружности половодья.

При наличии болот, проточных озер и лесов в бассейне максимальный расход снижается. Поэтому в формулу (74) вводятся дополнительные эмпирические коэффициенты: δ_1 — для учета снижения максимального расхода воды в зависимости от зарегулированности озерами и δ_2 — в зависимости от залесенности и заболоченности бассейна. Формула максимального расхода талых вод окончательно принимает следующий вид:

$$Q_{p\%} = q_{p\%} F = \frac{k_0 y_{p\%} F \mu}{(F+1)^n} \delta_1 \delta_2. \qquad (75)$$

В этой формуле $q_{p\%} = Q_{p\%}/F$, где $q_{p\%}$ — максимальный модуль стока, или максимальный расход с 1 км².

Значения k_0 и n даны в табл. 34. В таблице приняты следующие категории рельефа:

I категория — бассейны рек расположены в пределах холмистых и платообразных возвышенностей (Среднерусская, Струго-Красненская, Судомская, Среднесибирское плоскогорье и др.).

II категория — холмистые возвышенности чередуются с понижениями между ними.

III категория — плоские низменности (Молого-Шекснинская, Мещерская, Белорусское Полесье, Приднепровская, Васюганье и др.), а также реки, имеющие широкие заболоченные поймы.

Категория рельефа может быть установлена по формуле

$$a = \frac{I_{ср}}{I_t},$$

Таблица 34

Параметры n, k_0 и μ для равнинных рек

Природная зона (район)	n	k_0 для категорий рельефа		
		I	II	III
Зоны тундры и лесная:				
Европейская часть, Восточная Сибирь	0,17	0,010	0,008	0,006
Западная Сибирь	0,25	—	0,013	0,010
Лесостепная и степная зоны:				
Европейская часть (без Северного Кавказа)	0,25	0,030	0,017	0,012
Северный Кавказ	0,25	0,030	0,025	0,015
Западная Сибирь	0,25	0,030	0,020	0,015
Зона засушливых степей и полупустынь:				
Западный и Центральный Казахстан	0,35	0,060	0,040	0,030

Продолжение

Природная зона	μ при вероятности превышения, %					
	0,1	1	3	5	10	25
Зоны тундры и лесная:						
Европейская территория СССР . .	1,16	1,0	0,95	0,92	0,88	0,80
Восточная и Западная Сибирь . .	1,04	1,00	0,98	0,96	0,94	0,89
Лесостепная и степная зоны:						
При $F \geqslant 200$ км²	1,05	1,00	0,96	0,94	0,92	0,87
При $F < 200$ км²	1,10	1,00	0,93	0,87	0,79	0,64
Зона засушливых степей и полупустынь	1,02	1,00	0,98	0,97	0,96	0,92

где $I_{ср}$ — средневзвешенный уклон главного водотока; $l_t = 25\sqrt{F+1}$.

При $a = 1{,}0$ бассейн относится к категории I, при $a = 1{,}0 \div 0{,}5$ к категории II, а при $a < 0{,}5$ к категории III.

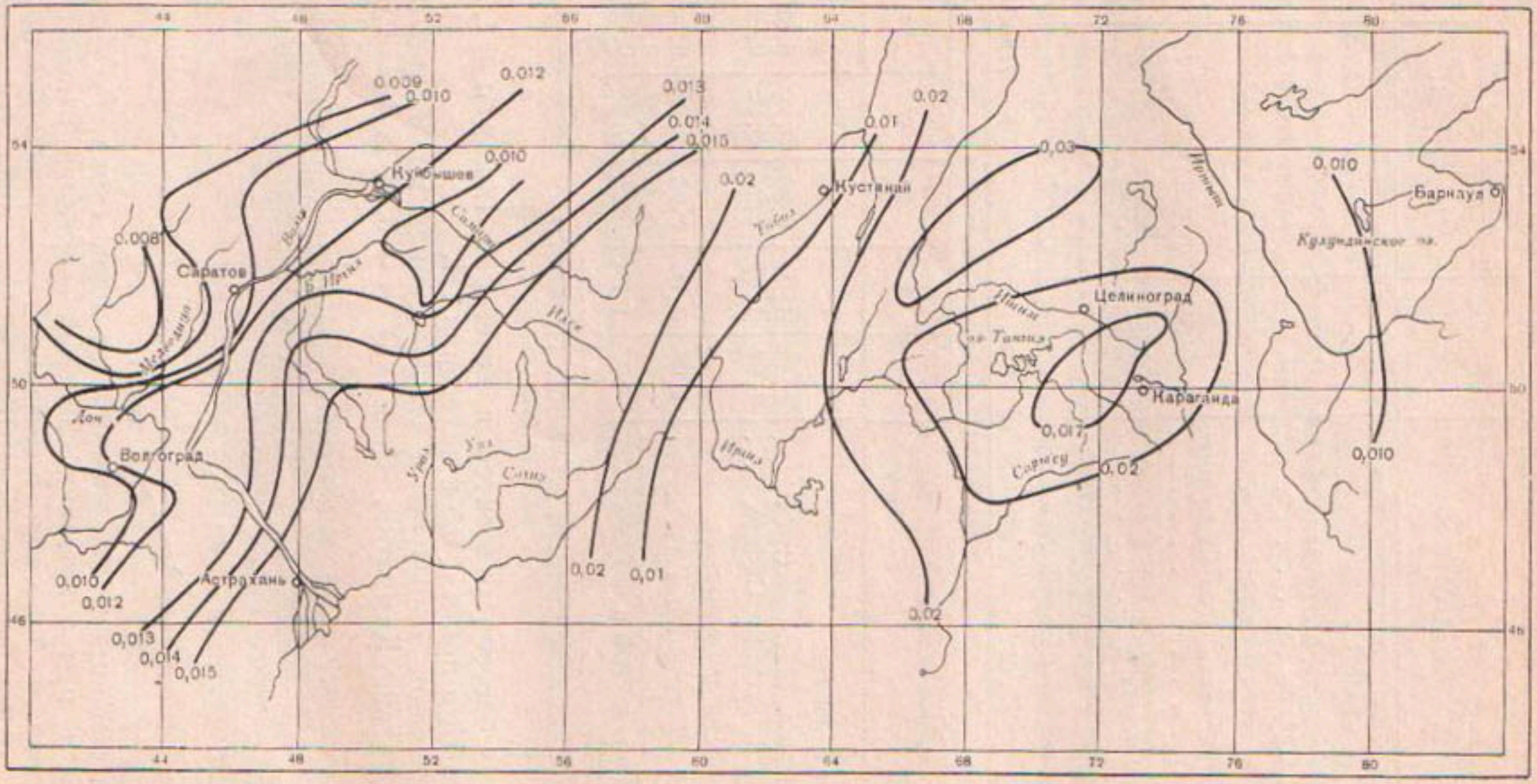
Для бассейнов горных рек с летне-весенним половодьем (Урал, Карпаты, Алтай, Камчатка, Сахалин) $n = 0{,}15$, а $k_0 = 0{,}0010 \div 0{,}0030$.

Для некоторых районов СССР составлены карты коэффициента k_0. Так, для Поволжья и Западного Казахстана такая карта составлена И. А. Кузником (рис. 60).

Согласно опытным данным, коэффициент

$$\delta_1 = \frac{1}{1 + c_{оз} f'_{оз}}, \qquad (76)$$

где $c_{оз}$ — коэффициент, зависящий от слоя стока, $f'_{оз}$ — средневзвешенная, а при отсутствии сведений — средняя относительная площадь озер в бассейне. Коэффициент $c_{оз}$ равен 0,2 при $y \geqslant 100$ мм; 0,2 — 0,3 при $y = 100 \div 50$ мм; 0,3 — 0,4 при $y = 50 \div 20$ мм и 0,4 при $y < 20$ мм.


0,009
0,010
0,012
0,013
0,014
0,015
0,008
0,010
0,02
0,01
0,03
0,010
0,017
0,02
0,02
0,01
0,02
0,010
0,012
0,013
0,014
0,015
Куйбышев
Саратов
Кустанай
Целиноград
Караганда
Барнаул
Волгоград
Астрахань
Кулундинская ст.
Волга
Ерик
Иргиз
Тобол
Ишим
Сарысу
Нура
Ишим
Ишим
Ишим

При наличии в бассейне большого числа малых озер, рассредоточенных по всему бассейну и расположенных вне главного русла, $\delta_1 = 0{,}8$ независимо от степени озерности.

При озерности менее 1%, если озера расположены вне главного русла, коэффициент снижения не учитывается.

Коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода в залесенных и заболоченных районах, составляет

$$\delta_2 = 1 - 0{,}8 \lg (0{,}05 f_л + 0{,}1 f_б + 1), \qquad (77)$$

где $f_л$ — площадь лесов и $f_б$ — площадь болот в % от площади водосбора.

Залесенность менее 5%, озерность менее 2% и заболоченность менее 3% не учитываются. При заболоченности более 50% и преобладании верховых болот коэффициент может быть увеличен до 30—40%. При озерности, превышающей 20%, влияние залесенности и заболоченности не учитывается.

Слой весеннего стока $y_{p\%}$ в формуле (75) определяют по параметрам кривой обеспеченности $\overline{y}$ и C_v (см. рис. 55) с учетом поправок (см. 101 и 105). C_s принимают равным $2C_v$. В районах, где в формировании стока принимают участие и дождевые паводки, $C_s = 3C_v$. Для водосборов, меньших 200 км², в коэффициент изменчивости C_v вносятся следующие поправки α: при $F = 0 \div 50$ км² $\alpha = 1{,}25$; при $F = 50 \div 100$ км² $\alpha = 1{,}25 \div 1{,}20$; для $F = 100 \div 150$ км² $\alpha = 1{,}20 \div 1{,}15$ и для $F = 150 \div 200$ км² $\alpha = 1{,}15 \div 1{,}05$.

Определение максимальных расходов талых вод методом аналогии. При недостатке и отсутствии наблюдений максимальные расходы талых вод могут быть определены методом аналогии. При недостатке наблюдений строят кривые связи максимальных расходов исследуемых рек, имеющих короткие ряды наблюдений, и реки-аналога с длинным рядом наблюдений. Эти кривые служат для удлинения ряда исследуемой реки. Аналогами могут служить лишь реки с однородными физико-географическими условиями, если площадь бассейна аналога отличается от площади бассейна исследуемой реки не более чем в 5 раз при $F \geqslant 1000$ км² и в 10 раз при $F < 1000$ км². Такое приведение к многолетнему ряду допускается при наличии не менее пяти — семи одновременно наблюденных максимумов, из которых 1—2 относятся к высоким паводкам.

Используя данные реки-аналога, по формуле (75) можно рассчитать максимальный расход талых вод в расчетном створе $Q_{p\%}$, исходя из следующего соотношения:

$$\frac{Q_{p\%\,а}}{Q_{p\%}} = \frac{k_0 y_{p\%} F_а \mu \delta_{1а} \delta_{2а} (F+1)^n}{k_0 y_{p\%} F \mu \delta_1 \delta_2 (F_а + 1)^n}.$$

Сократив k_0 и μ и заменив $\frac{Q_{p\%\,а}}{F_а} = q_{p\%а}$, получаем максимальный расход в расчетном створе

$$Q_{p\%} = q_{p\%а} \frac{y_{p\%}}{y_{p\%а}} \left(\frac{F_а + 1}{F+1} \right)^n \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_{1а} \delta_{2а}} F. \qquad (78)$$

Все буквенные обозначения с индексом «а» относятся к реке-аналогу.

Желательно исследовать несколько смежных бассейнов, отвечающих требованиям аналогии. Если полученные величины отличаются друг от друга более чем на 20%, то принимают в расчет бóльшую из них.

Максимальные расходы снеговых половодий горных рек. В горных условиях редукция максимальных расходов талых вод несколько меньше, чем на равнинных бассейнах. Исключается заболоченность территории. Поэтому формула максимальных расходов имеет следующий вид:

$$Q_{p\%} = \frac{k_0 y_{p\%} F \mu}{(F+1)^{0,15}} \delta_1. \qquad (79)$$

Обозначения — прежние.

Значение $y_{p\%}$ определяется обычным порядком; $\overline{y}$ и C_v — по картам изолиний; C_s принимается равным $(3 \div 4)\, C_v$. Значения k_0 даны в СН 435-72.

Региональная формула для расчета Q_{max} с малых водосборов в Нижнем Поволжье. Предложенные методы расчета неприемлемы для малых водосборов, где гидрограф представляется в виде, изображенном на рис. 61 *а*. В этом случае ежедневно снеготаяние начинает усиливаться с 9 ч утра. Соответственно параллельно с повышением температуры воздуха увеличивается расход. В 19 ч снеготаяние полностью или почти полностью прекращается. Небольшой сток продолжается вследствие таяния снега в ночные часы, а главным образом за счет добегания дневного стока с вышерасположенных частей водосбора. Поэтому максимальный расход весеннего половодья Q_{max} рассчитывают из предположения, что суточный график колебания расходов имеет вид треугольника, а следовательно, и объем максимального суточного стока W_{max} равен площади треугольника, основание которого — продолжительность стока T секунд, а ордината — максимальный расход Q_{max} м³/с (рис. 61 *б*).

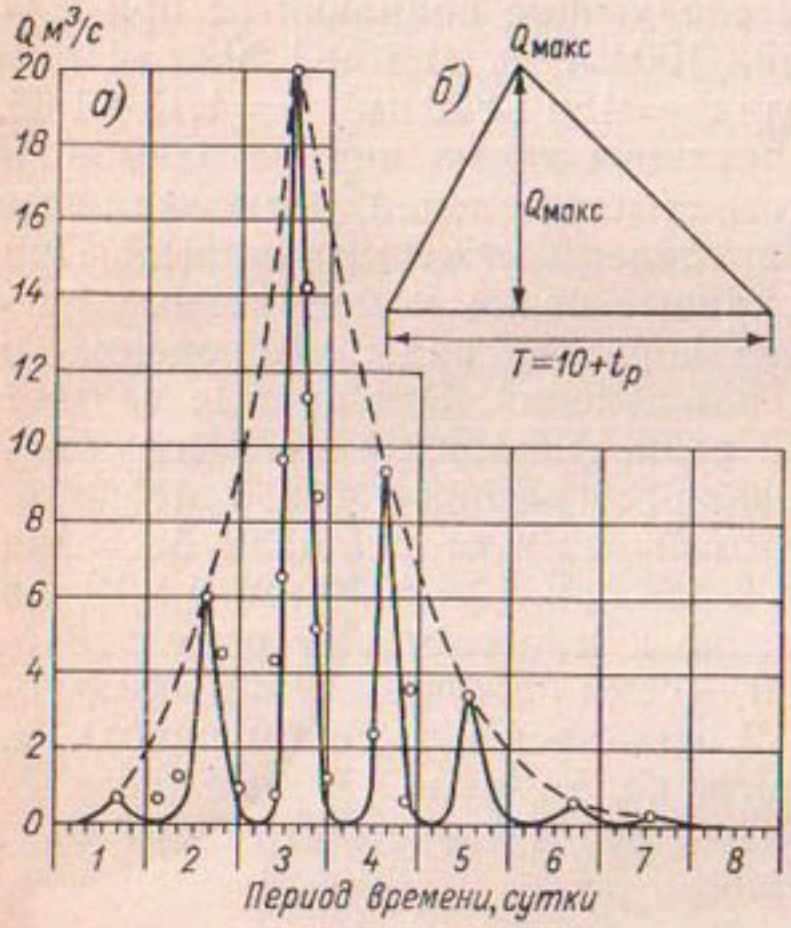


Рис. 61. К расчету максимальных расходов с малых водосборов.

а — многовершинный график расхода с малого водосбора; *б* — схема суточного гидрографа (точками обозначены фактические данные).

Расчет ведут по следующей, предложенной автором схеме:

$$W_{max} = Q_{max}\frac{T}{2} = y_{max}F \cdot 10^3,$$

где y_{max} — слой максимального суточного стока.

Отсюда

$$Q_{max} = \frac{2\, y_{max}F \cdot 10^3}{T}. \qquad (80)$$

Например, для условий Нижнего Поволжья слой максимального суточного стока $y_{max1\%} = 35$ мм, $y_{max3\%} = 30$ мм, $y_{max5\%} = 26$ мм и $y_{max10\%} = 23$ мм.

Продолжительность суточного стока T в часах складывается из продолжительности суточного снеготаяния t и добегания $t_р$

$$T = t + t_р\,[\text{час}] = (t + t_р) \cdot 3600\,[\text{с}]. \qquad (81)$$

Продолжительность снеготаяния составляет 10 ч (с 9 до 19 ч), а продолжительность добегания (в часах)

$$t_р = \frac{24\,L}{v}, \qquad (82)$$

где L — длина оврага в километрах; v — скорость в км/сут.

Скорость v определяют по графику (рис. 62).

Так как величина Q_{max} является искомой и в то же время служит для определения v, то задача решается путем подбора.

Предложенный метод расчета применим только при $t_р \leqslant 14$ ч.

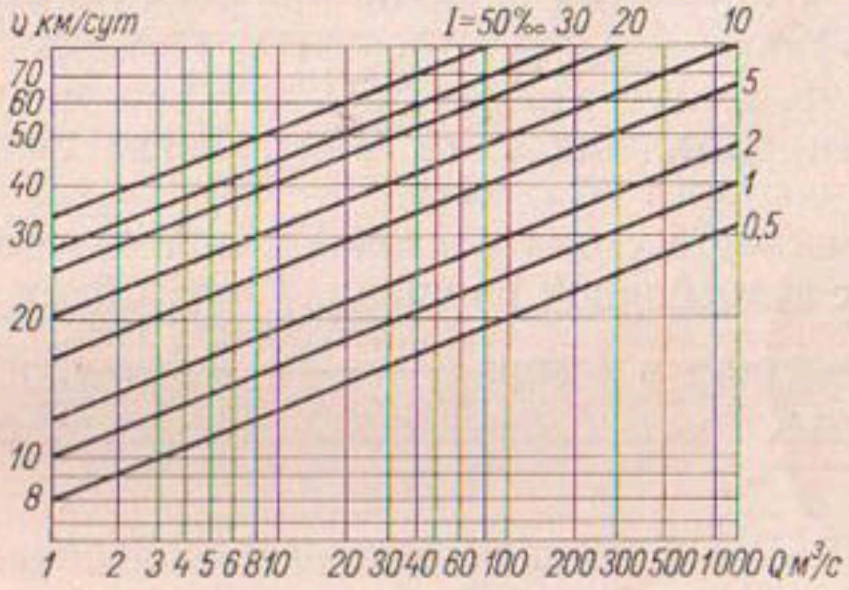


Рис. 62. Скорость добегания в зависимости от максимального расхода при разных уклонах.

37. Определение максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии наблюдений

Максимальные расходы дождевых паводков при отсутствии наблюдений определяются: 1) формулой предельной интенсивности стока, 2) эмпирической редукционной формулой. Обе формулы раз-

работаны А. И. Чеботаревым с учетом теоретических положений Г. А. Алексеева, А. Н. Бефани и др.

В разных физико-географических зонах каждая из этих формул применима при определенных площадях водосборов (табл. 35).

Таблица 35

Границы применимости формул максимальных расходов дождевых паводков в разных природных зонах в зависимости от площади водосбора

Природная зона	Формула предельной интенсивности	Эмпирическая редукционная формула
	при площади водосбора, км²	
Равнинная территория:		
тундра, лесная и лесостепная	$\leqslant 50$	50—30 000
степная	$\leqslant 200$	200—10 000
засушливые степи	$\leqslant 200$	200—1 000
полупустыни	$\leqslant 200$	—
Горные районы $500 < H_{ср} < 2000$ м: ($H_{ср}$ — средняя высота бассейна)		
Районы Средней Азии	$\leqslant 200$	—
Прочие районы	$\leqslant 200$	200—10 000

1. Формула предельной интенсивности стока обоснована следующими соображениями. Пусть сумма суточных осадков 1%-ной вероятности превышения $H_{1\%}$. В соответствии с изложенным в § 8 сумма осадков продолжительностью τ принимается с коэффициентом редукции $\psi(\tau)$. При расчете максимальных расходов продолжительность дождя принимается равной продолжительности добегания τ (в мин). Тогда сумма осадков (в миллиметрах) составит $H_{1\%}\,\psi(\tau)$.

При коэффициенте стока φ сток 1%-ной обеспеченности равен $\varphi H_{1\%}\,\psi(\tau)$, а с водосборной площади F км² объем стока составит $\frac{\varphi H_{1\%}\psi(\tau)F\cdot 10^6}{10^3}$ или в 1 мин $\frac{\varphi H_{1\%}\psi(\tau)F\cdot 10^3}{\tau}$, а в 1 с $Q_{max1\%} = \frac{16{,}67\varphi H_{1\%}\psi(\tau)F}{\tau}$.

Величину $16{,}67\,\frac{\psi(\tau)}{\tau}$ заменяем буквой $A_{1\%}$. Величина $A_{1\%}$ зависит от $\psi(\tau)$, т. е. от типа кривой редукции осадков, от τ — продолжительности добегания, а следовательно, от гидроморфометрических характеристик русла и склонов бассейна. Выражая коэффициент перехода от вероятности превышения $p = 1\%$ к любой иной через λ_p и коэффициент снижения максимального расхода за счет озерности δ_1, получаем формулу для расчета максимального расхода любой обеспеченности в окончательном виде

$$Q_{max\,p\%} = A_{1\%}\varphi H_{1\%}\delta_1\lambda_{p\%}F. \qquad (83)$$

Значения величин, приведенных в формуле, определяются следующим образом:

Таблица 36

Коэффициенты стока φ

Наименование почв или грунтов	$H_{1\%}$ мм	Площадь водосбора, км²				
		< 0,1	0,1—1,0	1,0—10	10—100	> 100
Подзолистые и серые лесные почвы суглинистые, сероземы тяжелосуглинистые, тундровые и болотистые почвы	⩽ 80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45
	81—100	0,80	0,75	0,70	0,65	0,65
	101—150	0,85	0,80	0,75	0,65	0,65
	151—200	0,85	0,85	0,80	0,70	0,70
	> 200	0,90	0,90	0,80	0,75	0,75
Тяжелосуглинистые, чернозем обыкновенный и южный, темнокаштановые и каштановые почвы	⩽ 80	0,55	0,54	0,45	0,35	0,20
	81—150	0,65	0,63	0,56	0,45	0,30
	151—200	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55
	> 200	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
Песчаные, гравелистые почвы		0,25	0,20	0,15	0,10	0,10

$H_{1\%}$ принимается по карте изолиний (см. рис. 16); φ — в зависимости от характера почв и грунтов для разных площадей водосборов приведены в сокращенном виде в табл. 36. $\lambda_{p\%}$ — для вероятностей превышения от 0,3 до 10% для районов I—III даны в табл. 37, δ_1 — определяется по формуле (76).

Таблица 37

Переходные коэффициенты $\lambda_{p\%}$ от вероятности превышения $p = 1\%$ к другой вероятности (при $p = 1\%$ $\lambda_{p\%} = 1{,}0$)

№ района по карте (рис. 64)	Площадь водосбора, км²	Вероятность превышения, %			
		0,3	2	5	10
I	> 0	1,17	0,90	0,75	0,62
II	> 0	1,25	0,87	0,69	0,55
III	> 100	1,32	0,85	0,64	0,48
	50—100	1,35	0,85	0,64	0,47
	10—50	1,40	0,82	0,60	0,42
	1—10	1,45	0,77	0,50	0,34
	< 1	1,50	0,74	0,46	0,30

Для определения $A_{1\%}$ вычисляется:

а) гидроморфометрическая характеристика русла

$$\Phi_p = \frac{1000\,L}{m I^{1/3} F^{1/4} (\varphi H_{1\%})^{1/4}}, \qquad (84)$$

где L — длина реки в километрах; m — коэффициент, зависящий от шероховатости русла и поймы (табл. 38); I — средневзвешенный уклон реки, ‰;

Таблица 38

Значения коэффициентов шероховатости русел m

№	Характеристика русла и поймы	m
1	Сравнительно чистые русла постоянных равнинных водотоков. Русла периодических водотоков в относительно благоприятных условиях	11
2	Русла больших и средних рек, значительно засоренные, извилистые и частично заросшие. Периодические водотоки, несущие во время паводка значительные количества наносов с крупногалечным и покрытым растительностью ложем	9
3	Галечно-валунные русла горного типа. Русла периодических водотоков сильно засоренные и извилистые . . .	7

б) гидроморфометрическая характеристика склонов

$$\Phi_{ск} = \frac{(1000\,\overline{l})^{1/3}}{m_1 I_{ск}^{1/4} (\varphi I_{1\%})^{1/2}}, \qquad (85)$$

где $\overline{l}$ — средняя длина склонов в километрах, определяемая по формуле (35, а); $I_{ск}$ — средний уклон склонов водосборов в ‰.

Коэффициенты шероховатости m_1 приведены в табл. 39.

Таблица 39

Коэффициенты шероховатости склонов m_1

Характеристика поверхности склонов	Травяной покров		
	редкий или отсутствует	средний	густой
Гладкие поверхности (асфальт, бетон)	0,50	—	—
Укатанная спланированная грунтовая поверхность	0,40	0,30	0,25
Хорошо обработанная пашня, боронованная; невспаханная, без кочек, булыжная мостовая; поверхность в населенных пунктах с застройкой менее 10%	0,30	0,25	0,20

В зависимости от гидроморфометрической характеристики склонов $\Phi_{ск}$ определяется продолжительность склонового добегания $\tau_{ск}$ (табл. 40).

Продолжительность склонового добегания на водосборах площадью более 10 км² при отсутствии данных принимается: для лесной зоны и для незаболоченных бассейнов тундры 60—100 мин; для заболоченных бассейнов — 150 мин; в лесостепной зоне — 40—60 мин; в степной и сухостепной зонах — 20—40 мин; в полупустынной зоне — 10—15 мин и в горных районах — 10—60 мин.

Таблица 40

Продолжительность склонового добегания, мин.

$\varphi_{ск}$	Типы кривых редукции $\varphi(\tau)$ по карте (рис. 19)			$\varphi_{ск}$	Типы кривых редукции $\varphi(\tau)$ по карте (рис. 19)		
	3; 3а; 6; 13а; 23; 28	2; 9; 13; 20; 24; 26	1; 8; 14; 18; 27		3; 3а; 6; 13а; 23; 28	2; 9; 13; 20; 24; 26	1; 8; 14; 18; 27
0,5	2,7	2,7	3,2	6	62	70	82
1	5,3	5,5	6,7	8	100	110	130
2	12	14	17	10	150	160	180
3	22	24	30	12	200	220	250
4	34	37	45	15	300	300	360
5	47	52	62				

Значения максимальных модулей дождевого стока A_1 в сокращенном виде даны в табл. 41 для четырех типов кривых редукции осадков.

Таблица 41

Максимальные модули дождевого стока $A_{1\%}$

Типы кривых редукции осадков (рис. 19)	$\tau_{ск}$ мин.	Значения φ_p					
		0	1	20	50	100	300
3, 3а, 6, 13а, 23, 28	10	0,45	0,42	0,15	0,060	0,030	0,0085
	30	0,25	0,24	0,12	0,054	0,028	0,0084
	60	0,16	0,15	0,088	0,049	0,026	0,0082
	100	0,11	0,10	0,068	0,047	0,024	0,0082
	150	0,075	0,074	0,055	0,038	0,023	0,0080
	200	0,062	0,060	0,048	0,032	0,021	0,0078
1, 8, 14, 18, 27	10	0,32	0,29	0,10	0,046	0,025	0,0086
	30	0,16	0,15	0,083	0,044	0,025	0,0086
	60	0,11	0,11	0,066	0,039	0,024	0,0085
	100	0,075	0,074	0,053	0,035	0,022	0,0083
	150	0,060	0,059	0,046	0,031	0,021	0,0081
	200	0,050	0,048	0,038	0,027	0,020	0,0079
2, 9, 13, 20, 24, 26	10	0,42	0,38	0,13	0,055	0,027	0,0084
	30	0,23	0,22	0,10	0,050	0,026	0,0082
	60	0,14	0,13	0,079	0,044	0,024	0,0081
	100	0,093	0,090	0,062	0,039	0,023	0,0081
	150	0,069	0,068	0,052	0,034	0,021	0,0079
	200	0,056	0,055	0,044	0,030	0,020	0,0078
4, 4а 11, 22, 29	10	0,52	0,47	0,16	0,066	0,030	0,0084
	30	0,27	0,26	0,13	0,059	0,029	0,0083
	60	0,17	0,16	0,096	0,052	0,027	0,0083
	100	0,11	0,11	0,074	0,045	0,025	0,0082
	150	0,082	0,080	0,060	0,038	0,023	0,0080
	200	0,066	0,065	0,0050	0,032	0,021	0,0077

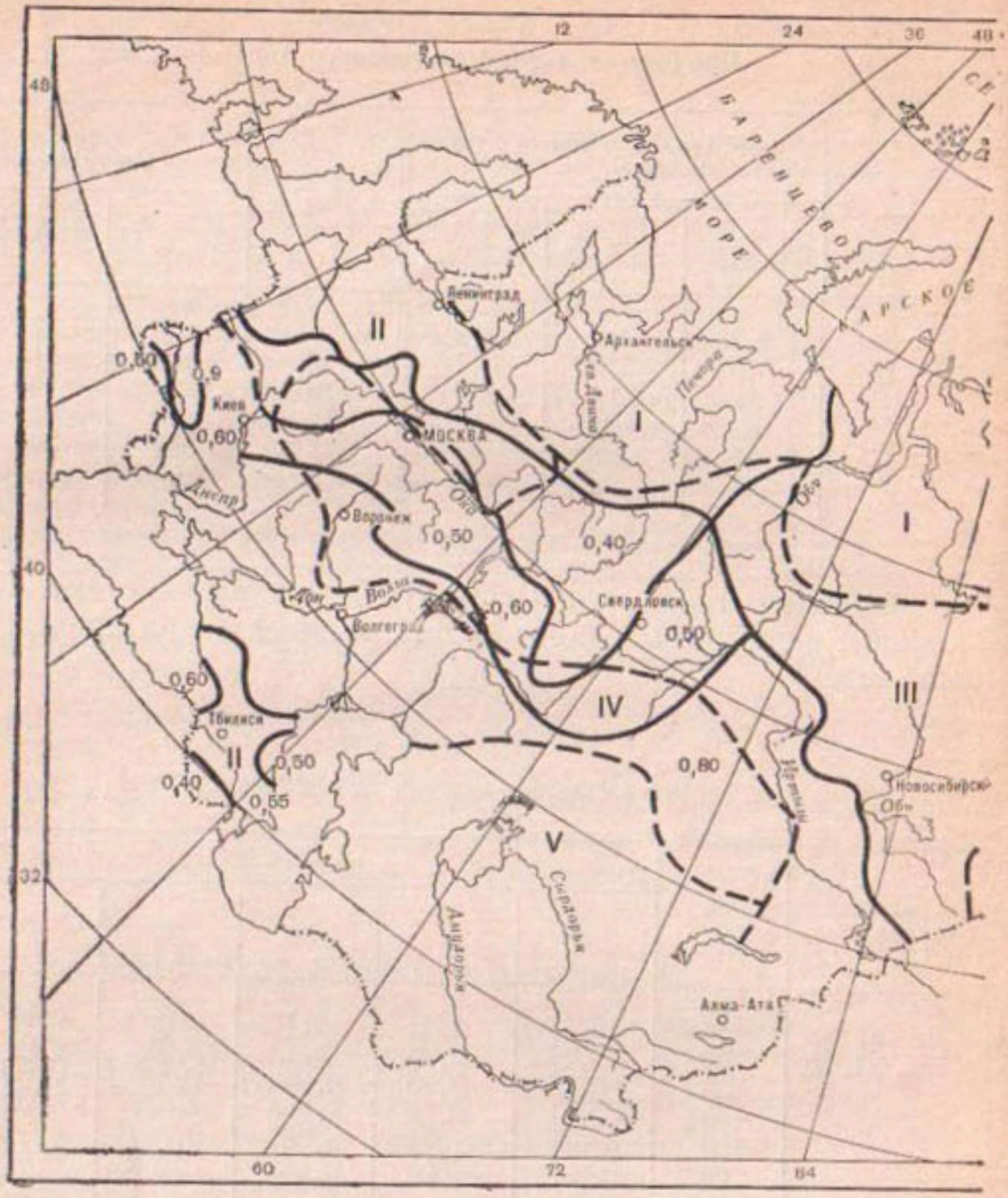
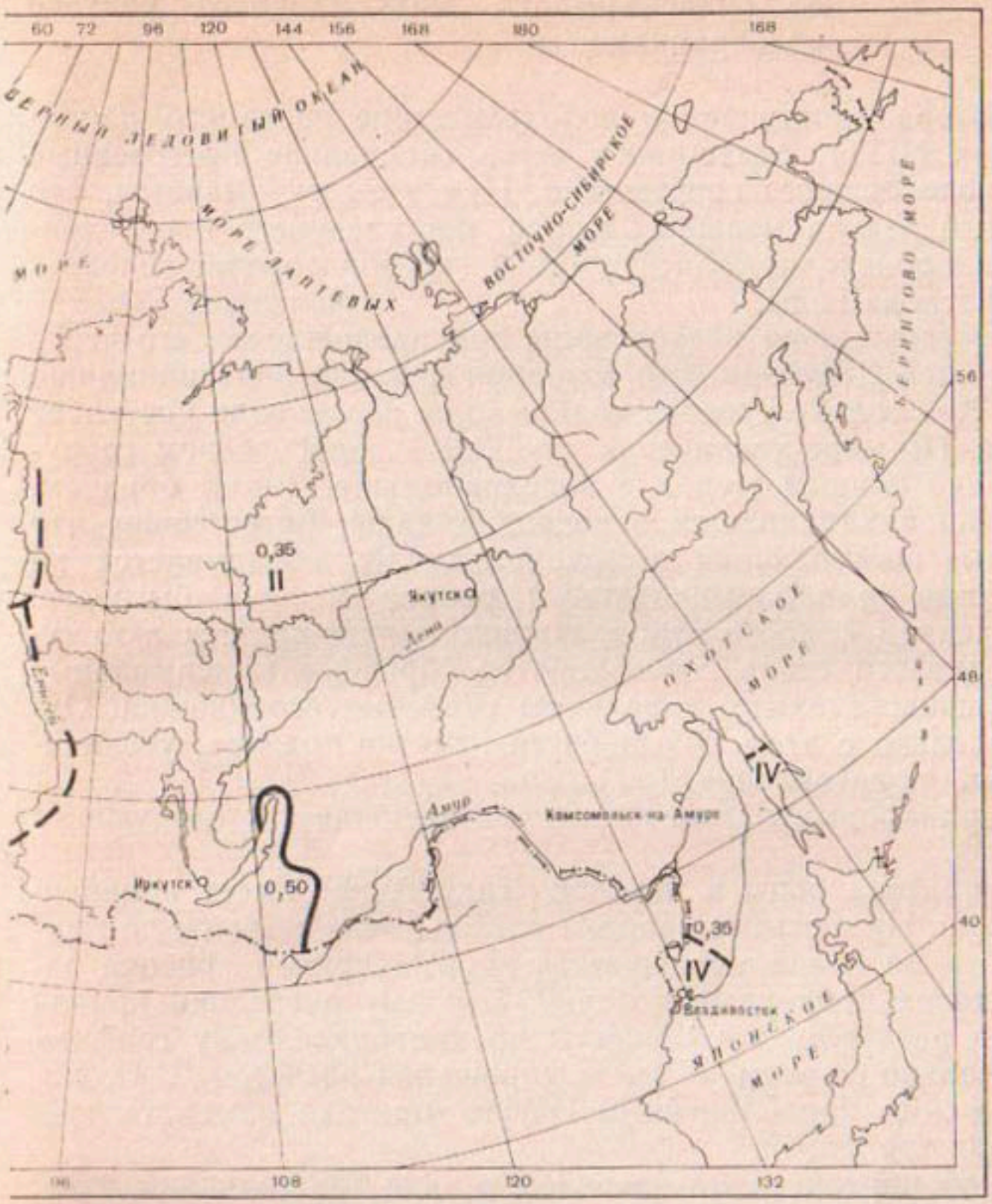


Рис. 64. Карта районов с постоянными

2. Редукционная формула максимальных расходов дождевого паводка представляется в следующем виде:

$$Q_{p\%} = q_{200}\left(\frac{200}{F}\right)^n F\delta_1\delta_2\lambda_{p\%}, \qquad (86)$$

где $Q_{p\%}$ — максимальный расход расчетной обеспеченностью $p\%$; q_{200} — модуль максимального расхода воды в м³/(с · км²) вероятностью превышения 1% (приведенный к площади водосбора 200 км²); $\left(\frac{200}{F}\right)^n$ — редукция максимального расхода с изменением площади водосбора F. Из приведенного выражения видно, что при $F = 200$ км² максимальный расход принимается с коэф-



значениями коэффициентов n (—) и $\lambda_{p\ \%}$ (---).

фициентом редукции, равным единице. При $F < 200$ км^2 эта величина больше единицы.

Отдельные величины формулы определяются следующим образом. q_{200} — по карте изолиний (рис. 63 см. на вклейке, стр. 144). Показатель степени редукции n дается для отдельных районов. Границы районов одинаковых значений n и $\lambda_{p\%}$ показаны на рис. 64. Коэффициент δ_1 определяется по формуле (76), δ_2 — по формуле (77). Коэффициенты $\lambda_{p\%}$ даны в табл. 37.

38. Трансформация максимального расхода водохранилищем

Воду, которая поступает в водохранилище после его наполнения (сверх НПУ), сбрасывают через специально построенные для этого водосбросные сооружения. При этом оказывается, что сбрасываемый расход меньше расхода, поступающего в водохранилище, т. е. происходит трансформация (преобразование водохранилищем) расхода воды.

Почему уменьшается расход воды при прохождении его через водохранилище? Допустим, что во время паводка водохранилище наполнено. Как только уровень поднимается выше, вода поступает в водосброс. По мере увеличения глубины в водосбросном сооружении уровень поднимается и в водохранилище. Таким образом, вода частично накапливается в водохранилище. Естественно, что расход воды, поступающий в водохранилище, сбрасывается не полностью или трансформированный расход меньше бытового.

С увеличением емкости водохранилища увеличивается аккумуляция паводкового стока, уменьшаются сбросные максимальные расходы, а следовательно, и размеры сбросных сооружений. Однако параллельно с этим повышаются отметки подпора, увеличиваются площади затопления.

Расчет трансформированного расхода выполняется следующим образом.

График притока воды в паводок (гидрограф) имеет криволинейную форму. На подъеме паводка расход увеличивается до максимального, а на спаде уменьшается. Форма кривой притока зависит от многих природных условий. Поэтому очертания кривой чрезвычайно разнообразны. Расчеты по криволинейному графику притока довольно сложны. В целях упрощения расчетов Д. И. Кочерин предложил криволинейный график притока заменить треугольным или трапецией.

На рис. 65 приток схематизирован в виде треугольника ABC, у которого основание T соответствует продолжительности паводка. Наибольшая ордината BB_1 является максимальным расходом притока $Q_{max} = Q_{пр}$. Наибольший сбросной расход $Q_{сб}$ соответствует ординате $ДД_1$. Площадь треугольника ABC равна объему стока за паводок, $АДС$ — объему сброса за время T. Площадь треугольника $АВД$ представляет объем форсировки $W_ф$.

Объем стока расчетной обеспеченности

$$W_{p\%} = \frac{Q_{max} T}{2},$$

где Q_{max} — максимальный расход паводка расчетной обеспеченности, м³/с; T — продолжительность паводка в секундах.
Отсюда

$$Q_{max} = \frac{2 W_{p\%}}{T}.$$

За время T из водохранилища сбрасывается объем воды:

$$W_{сб} = \frac{Q_{сб} T}{2}$$

или

$$Q_{сб} = \frac{2 W_{сб}}{T},$$

а объем форсировки

$$W_ф = W_{p\%} - W_{сб} = \frac{Q_{max} T}{2} - \frac{Q_{сб} T}{2} = \frac{Q_{max} T}{2}\left(1 - \frac{Q_{сб}}{Q_{max}}\right).$$

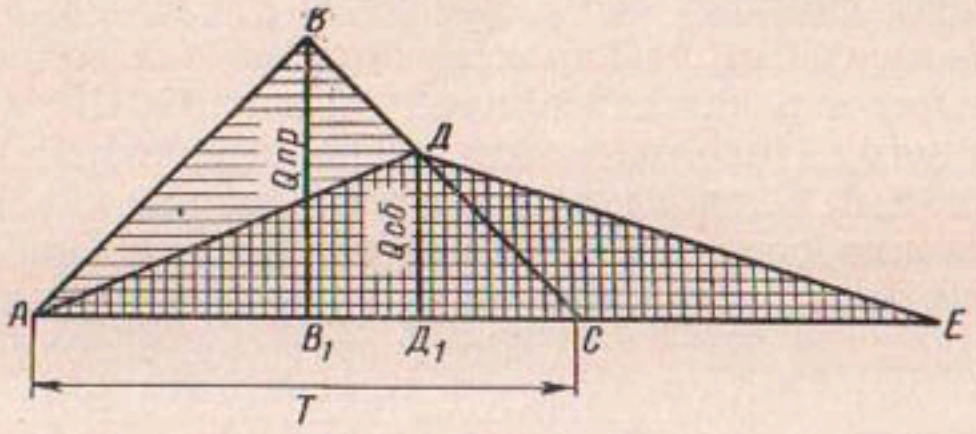


Рис. 65. Схема трансформации паводка при треугольной форме гидрографа.

Так как

$$\frac{Q_{max} T}{2} = W_{p\%},$$

то

$$W_ф = W_{p\%}\left(1 - \frac{Q_{сб}}{Q_{max}}\right).$$

Отношение $\frac{Q_{сб}}{Q_{max}} = \alpha$ показывает, какая часть расхода сбрасывается через сооружение. Эта величина называется коэффициентом трансформации. Исходя из этого можно записать:

$$\frac{W_ф}{W_{p\%}} = 1 - \frac{Q_{сб}}{Q_{max}},$$

$$Q_{сб} = \left(1 - \frac{W_ф}{W_{p\%}}\right) Q_{max}. \qquad (87)$$

Итак, для расчета трансформированного расхода необходимо определить объем форсировки $W_ф$ и сток расчетной обеспеченности $W_{p\%}$ (той же обеспеченности, что и максимальный расход). Из формулы (87) следует, что коэффициент трансформации

$$\alpha = \frac{Q_{сб}}{Q_{max}} = 1 - \frac{W_ф}{W_{p\%}}. \qquad (88)$$

39. Минимальный сток

Минимальный сток наблюдается во всех случаях, когда резко сокращается или полностью прекращается поверхностный сток, а основными источниками питания реки являются грунтовые воды. Поэтому минимальный сток зависит в первую очередь от условий грунтового питания водотока. Для бассейнов крупных рек эти величины в основном подчинены климатическим факторам. Поэтому и минимальный сток, как и годовой, удовлетворительно картируется. В Ленинградской области систематически промерзают реки с площадями бассейнов 50—100 км², а на Восточном Урале — до 10—15 тыс. км². Поэтому географическая зональность в распределении минимального стока характерна лишь для водосборов определенных размеров в каждой природной зоне СССР. Так, на водосборах Нижнего Поволжья эта закономерность наблюдается начиная с 2500 км². Следовательно, в этом районе карты минимального стока можно составлять с учетом данных наблюдений на реках с площадями бассейнов, превышающими 2500 км², а на Восточном Урале — 10 тыс. км². Эти карты непригодны для определения минимального стока рек с меньшими площадями бассейнов в этих районах.

Расчет минимального стока. Расчетная ежегодная обеспеченность минимального расхода воды принимается при проектировании: орошения — 85%, гидростанций — 90%, для хозяйственно-питьевых водопроводов в зоне избыточного увлажнения — 95%, а в зоне недостаточного увлажнения — 97%.

В расчетах используются данные наблюдений средних за 30 дней или средних суточных за зимний и летне-осенний периоды.

При наличии достаточно продолжительных данных наблюдений минимальный расход вычисляют обычными статистическими методами, изложенными в § 29. Вероятность превышения $p\%$ минимального стока определяется по формуле (62). Принятые в расчетах данные считаются достоверными, если средняя квадратическая ошибка не превышает 15%.

При недостаточности данных фактических наблюдений соответствующие расчетные величины можно определить методом аналогии, если только все физико-географические условия (в том числе и гидрогеологические) обоих водосборов действительно аналогичны. Доказательством правильности выбора реки-аналога может служить отношение расходов исследуемой реки Q_0 и реки-аналога Q_a. Если за годы одновременных наблюдений эти отношения для минимальных средних месячных или суточных расходов более или менее постоянны, считается, что аналог выбран правильно.

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений расчетные величины принимаются для средних рек по картам изолиний месячного минимального стока летне-осеннего и зимнего периодов 80%-ной обеспеченности, приведенных в СН 435-72.

Судя по картам изолиний, минимальный сток летне-осеннего периода уменьшается с 6 л/(с·км²) на Северо-Западе Европей-

ской территории СССР и 20—15 на Северном Урале до 0—0,5 на юге и юго-востоке. Гораздо меньше величины зимнего минимального стока. Он составляет 2—4 л/(с·км²) на севере и 0—0,25 на юге и юго-востоке ЕТС, возрастая на Черноморском побережье до 10—15 л/(с · км²).

Вопросы для самопроверки

1. Как и когда формируются ежегодные максимальные расходы в разных природных зонах СССР?
2. Какие соображения лежат в основе выбора расчетной обеспеченности максимальных расходов при проектировании гидротехнических сооружений?
3. Как рассчитать максимальный расход при наличии многолетних данных фактических наблюдений?
4. Как рассчитать максимальный расход при наличии непродолжительных наблюдений?
5. Объясните формулу для расчета максимальных расходов весеннего половодья при отсутствии наблюдений.
6. Как учитывают влияние озер, болот и лесов в формуле максимального расхода весеннего половодья?
7. Почему происходит трансформация максимального расхода при прохождении его через озера и водохранилища?
8. Как рассчитывают трансформированный максимальный расход?
9. Как рассчитывается максимальный расход дождевого паводка?
10. От чего зависят величины минимальных расходов рек?
11. Как определить средние месячные и суточные минимальные расходы при наличии данных гидрометрических наблюдений?
12. Как рассчитать минимальный сток при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 16. Рассчитать максимальные расходы весеннего половодья р. Вятки у г. Кирова для всех классов капитальности гидротехнических сооружений.

Дано: максимальные расходы весенних половодий за 25 лет (1910—1934) (графы 1 и 2 табл. 42).

Решение. Бассейн р. Вятки до г. Кирова расположен в лесной зоне. В этой зоне наличие 25-летнего ряда наблюдений достаточно для расчетов стока (см. § 35).

В соответствии с табл. 33 для сооружений различных классов капитальности принимается ежегодная вероятность превышения максимальных расходов воды: 0,01; 0,1; 0,5 и 1,0%.

Все наблюденные максимальные расходы Q_{max} располагаем в убывающем порядке и вычисляем: среднее значение $\overline{Q}_{max}$, обеспеченность $p\%$ каждого расхода, фактические модульные коэффициенты, коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s (табл. 42).

Средний многолетний максимальный расход

$$\overline{Q}_{max} = \frac{76\,000}{25} = 3040 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коэффициент изменчивости вычисляем по формуле (56)

$$C_v = \sqrt{\frac{1,1567}{25-1}} = 0,26.$$

Таблица 42

Расчеты модульных коэффициентов и обеспеченностей максимальных расходов

Год	Максимальный расход Q_{max} м³/с	№ п/п	Год	Q_{max} в убывающем порядке	$k = \frac{Q_{max}}{\bar{Q}_{max}}$	$k-1$	$(k-1)^2$	Обеспеченность $p = \frac{m}{n+1} \times 100\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1910	2260	1	1926	4160	1,37	0,37	0,137	3,9
1911	3450	2	1929	4080	1,35	0,35	0,122	7,7
1912	2550	3	1914	4070	1,34	0,34	0,116	11,5
1913	2540	4	1932	3900	1,28	0,28	0,078	15,4
1914	4070	5	1919	3880	1,28	0,28	0,078	19,2
1915	3730	6	1927	3850	1,27	0,27	0,073	23,1
1916	2950	7	1915	3730	1,23	0,23	0,053	26,9
1917	3100	8	1911	3450	1,13	0,13	0,017	30,7
1918	3400	9	1920	3420	1,12	0,12	0,014	34,6
1919	3880	10	1918	3400	1,12	0,12	0,014	38,4
1920	3420	11	1925	3320	1,09	0,09	0,008	42,3
1921	1850	12	1923	3260	1,07	0,07	0,005	46,2
1922	1960	13	1917	3100	1,02	0,02	0,000	50,0
1923	3260	14	1931	3000	0,99	—0,01	0,000	53,8
1924	2530	15	1928	2960	0,98	—0,02	0,000	57,7
1925	3320	16	1916	2950	0,97	—0,03	0,001	61,5
1926	4160	17	1912	2550	0,84	—0,16	0,026	65,4
1927	3850	18	1913	2540	0,84	—0,16	0,026	69,2
1928	2960	19	1924	2530	0,84	—0,16	0,026	73,1
1929	4080	20	1934	2300	0,76	—0,24	0,058	76,9
1930	1830	21	1910	2260	0,74	—0,26	0,068	80,8
1931	3000	22	1922	1960	0,65	—0,35	0,123	84,6
1932	3900	23	1921	1850	0,61	—0,39	0,152	88,4
1933	1650	24	1930	1830	0,60	—0,40	0,160	92,3
1934	2300	25	1933	1650	0,54	—0,46	0,212	96,2
Сумма	76000			76000		+2,67 —2,65	1,567	

Так как $C_s < 0{,}5$, то расчет этой величины по формуле (56) оправдан.

Коэффициент асимметрии (см. стр. 124) для снеговых максимумов равнинных рек $C_s = 2C_v = 2 \cdot 0{,}26 = 0{,}52$. Обеспеченности модульных коэффициентов максимальных расходов приведены в графе 9 табл. 42.

После этого приступаем к построению теоретической кривой обеспеченности модульных коэффициентов максимальных расходов при $C_s = 2C_v$. Эти величины приведены в табл. 43. Фактические модульные коэффициенты из табл. 42 и теоретически вычисленные из табл. 43 нанесены на рис. 66. На рисунке показана верхняя часть кривой обеспеченности в пределах 0,01—30%; нижняя часть кривой не является расчетной, поэтому не приведена.

Как видно из рис. 66, теоретические точки хорошо согласуются с фактическими. Это позволяет экстраполировать верхнюю часть

Таблица 43

Вычисление максимальных расходов весенних половодий р. Вятки у г. Кирова

Класс капитальности сооружений	Расчетная обеспеченность, p %	Модульные коэффициенты $k_{p\,\%}$	Максимальные расходы Q_{max} м³/с
I	0,01	2,10	6384
II	0,1	1,86	5654
III	0,5	1,69	5138
IV	1,0	1,61	4894

кривой обеспеченности, т. е. определить и ненаблюденные модульные коэффициенты для 0,01; 1 и 3%-ной вероятности превышения.

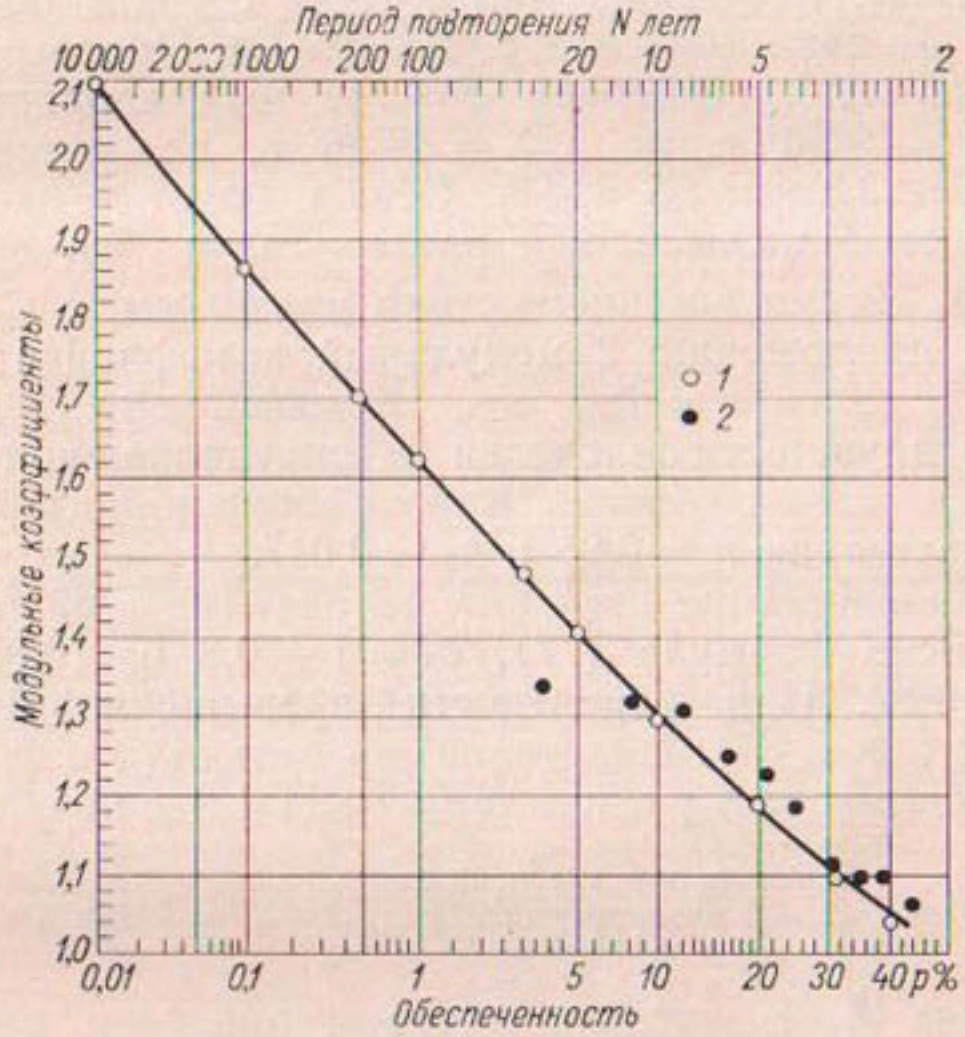


Рис. 66. Кривая обеспеченности модульных коэффициентов максимальных расходов р. Вятки у г. Кирова.

1 — теоретические точки; *2* — фактические (наблюденные).

Умножив средний многолетний максимальный расход $\overline{Q}_{max} = 3040$ м³/с на модульные коэффициенты $k_{p\%}$, получим максимальные расходы $Q_{max\,p\%}$ соответствующих обеспеченностей (табл. 43).

В полученную величину максимального расхода обеспеченностью 0,01% вводим гарантийную поправку, вычисляемую по формуле (67).

Значение коэффициента a для р. Вятки, расположенной в достаточно изученном в гидрологическом отношении районе, принимаем равным единице.

Значение E_p определено по рис. 59. При $C_v = 0{,}26$, $E_p = 0{,}51$.

Подставляя в формулу (67) значения $a = 1{,}0$, $n = 25$, $Q_{max\,0{,}01\%} = 6384$ м³/с, вычисляем гарантийную поправку для максимального расхода

$$\Delta Q = \frac{1 \cdot 0{,}51}{\sqrt{25}} \cdot 6384 = 651 \text{ м}^3/\text{с}.$$

С учетом гарантийной поправки расчетная величина максимального расхода будет:

$$Q_{max\,0{,}01\%} = 6384 + 651 = 7035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 17. При отсутствии наблюдений вычислить значение максимального расхода талых вод 1%-ной обеспеченности балки Сухой Маячки (бассейн р. Днепра) в Полтавской области.

Дано: площадь водосбора $F = 117$ км²; координаты центра водосбора $\varphi = 49°30'$ с. ш. и $\lambda = 38°26'$ в. д.; уклон балки $I = 1{,}4‰$, $L = 23{,}3$ км; $f_л = 14\%$. Озер и болот на водосборе нет.

Решение. Максимальный расход талых вод вычисляем по формуле (75). Норма весеннего стока $\overline{y} = 40$ мм, а $C_v = 0{,}65$ (см. рис. 55). По приложению 2 модульный коэффициент $k_{1\%} = 3{,}09$. Отсюда $y_{1\%} = 3{,}09 \cdot 40 = 124$ мм. Коэффициент редукции n и коэффициент дружности половодья k_0 определяем по табл. 34. Для лесостепной и степной зоны Европейской территории СССР и рельефа II категории $n = 0{,}25$ и $k_0 = 0{,}017$.

Так как на водосборе озер нет, то $\delta_1 = 1{,}0$. При $f_б = 0$ и $f_л = 14\%$, согласно формуле (77), $\delta_2 = 1 - 0{,}8 \lg (0{,}05 \cdot 14 + 0{,}1 \times \times 0{,}0 + 1) = 0{,}82$. При вероятности превышения 1% коэффициент $\mu = 1{,}0$ (табл. 34). Подставив эти величины в формулу (75), находим максимальный расход талых вод 1%-ной обеспеченности

$$Q_{max\,1\%} = \frac{0{,}017 \cdot 124 \cdot 0{,}82 \cdot 117}{(117+1)^{0{,}25}} \cdot 1 = 61{,}3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 18. Вычислить методом аналогии максимальный расход весеннего половодья 5%-ной обеспеченности р. Межи у с. Ордынок.

Дано: площадь водосбора $F = 6800$ км², $f_{оз} = 1{,}15\%$; $f_л = 53\%$, $f_б = 15\%$; координаты центра водосбора $\varphi = 55°54'$ с. ш. и $\lambda = 32°03'$ в. д. В качестве реки-аналога принять р. Западную Двину у г. Витебска, для которой соответственно: $F_а = 27\,300$ км², $f_{оз.а} = 0{,}5\%$, $f_{л.а} = 45\%$, $f_{б.а} = 30\%$, $\varphi = 55°11'$ с. ш. и $\lambda = 30°12'$ в. д. Максимальный расход талых вод 5%-ной обеспеченности р. Западной Двины у г. Витебска $Q_{max\,5\%} = 2390$ м³/с.

Решение. Максимальный расход талых вод 5%-ной обеспеченности р. Межи у с. Ордынок вычисляем по формуле (78). Норма весеннего стока $\overline{y} = 130$ мм, коэффициент вариации весеннего

стока $C_v = 0{,}35$. Приняв $C_s = 2C_v$, по приложению 2 определяем модульный коэффициент 5%-ной обеспеченности $k = 1{,}64$. Отсюда весенний сток 5%-ной обеспеченности

$$y_{5\%} = 1{,}64 \cdot 130 = 213 \text{ мм}.$$

Для реки-аналога соответственно имеем: $\overline{y}_a = 105$ мм, $C_{va} = 0{,}50$, $k = 1{,}94$.

$$y_{5\%\,a} = 1{,}94 \cdot 105 = 203 \text{ мм}.$$

Значения δ_1 и δ_2 для р. Межи рассчитываются по формулам (76) и (77).

При отсутствии озер $\delta_1 = 1{,}0$ и $\delta_{1a} = 1$.

Для р. Межи $\delta_2 = 1 - 0{,}8 \lg (0{,}05 \cdot 53 + 0{,}1 \cdot 15 + 1) = 0{,}43$, а для реки-аналога

$$\delta_{2\,a} = 1 - 0{,}8 \lg (0{,}05 \cdot 45 + 0{,}1 \cdot 30 + 1) = 0{,}36.$$

Модуль максимального стока р. Западной Двины

$$q_{5\%\,a} = \frac{Q_{\max\,a\,5\%}}{F_a} = \frac{2390}{27\,300} = 0{,}09 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2).$$

Подставив в формулу (78) полученные значения, находим искомый расход р. Межи

$$Q_{5\%} = 0{,}09 \cdot \frac{213}{203} \cdot \left(\frac{27\,300 + 1}{6800 + 1}\right)^{0{,}17} \cdot \frac{1 \cdot 0{,}43}{1 \cdot 0{,}36} \cdot 6800 = 970 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 19. Рассчитать максимальный расход ливневых паводков 0,3 и 5%-ной вероятности превышения р. Риони у с. Геби (бассейн Черного моря). Наблюдения отсутствуют.

Дано: площадь водосбора $F = 222$ км². Географические координаты центра бассейна $\varphi = 42°42'$ с. ш. и $\lambda = 43°10'$ в. д. Озер и болот в бассейне нет.

Решение. Упражнение решается в соответствии с § 37. Так как площадь водосбора превышает 50 и меньше 10 000 км² (см. табл. 35), то применяем для решения редукционную формулу (86).

В этой формуле максимальный модуль q_{200} определяется по карте (см. рис. 63 на вклейке). Величина $q_{200} = 1{,}0$ м³/(с·км²).

Показатель редукции определяем по карте районов с постоянным значением n (см. рис. 64). Эта величина составляет 0,45. При отсутствии озер и болот $\delta_1 = 1{,}0$ и $\delta_2 = 1{,}0$. Переходные коэффициенты от 1%-ной обеспеченности к расходам 0,3 и 5%-ной обеспеченности принимаются по табл. 37. Для района II расположения бассейна величины эти составляют: при обеспеченности $p = 0{,}3\%$ $\lambda_{0{,}3\%} = 1{,}25$, а при $p = 5\%$ $\lambda_{5\%} = 0{,}69$. Отсюда максимальный расход 0,3 и 5%-ной обеспеченности:

$$Q_{\max\,0{,}3\%} = 1{,}0 \cdot \left(\frac{200}{222}\right)^{0{,}45} \cdot 222 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}25 = 265 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_{\max\,5\%} = 1{,}0 \cdot \left(\frac{200}{222}\right)^{0{,}45} \cdot 222 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}69 = 146 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 20. Рассчитать максимальный расход 1%-ной обеспеченности ливневого паводка р. Сухой Маячки. Исходные данные те же, что и в упражнении 17.

Решение. Расчет максимального расхода дождевого паводка в степной зоне при площади водосбора $F < 200$ км^2 выполняем по формуле (83) предельной интенсивности стока.

Так как озер в бассейне нет, то $\delta_1 = 1{,}0$. Суточный слой осадков по карте изолиний (см. рис. 16) $H_{1\%} = 140$ мм.

Коэффициент паводочного стока по табл. 36 для обыкновенных черноземов $\varphi = 0{,}30$. Объем стока $W_{1\%} = 140 \cdot 0{,}3 \cdot 117 \cdot 10^3 = 4914 \cdot 10^3$.

При вероятности превышения 1% $\lambda_{1\%} = 1{,}0$. Максимальный модуль стока $A_{1\%}$ определяем в зависимости от гидроморфометрических характеристик русла $\Phi_р$, склонов $\Phi_{ск}$, продолжительности добегания по склонам $\tau_{ск}$ и типа кривых редукции осадков.

Подставив в формулу (84) значения отдельных величин, согласно заданию, получаем

$$\Phi_р = \frac{1000 \cdot 23{,}3}{9 \cdot 1{,}4^{1/3} \cdot 117^{1/4} \cdot (0{,}3 \cdot 140)^{1/4}} = 276.$$

Коэффициент шероховатости русла ($m = 9$) в этой формуле принят по табл. 38. Продолжительность склонового добегания для водосборов площадью более 10 км^2 для степной зоны $\tau_{ск} = 30$ мин (см. стр. 134). По типу кривых редукции осадков, согласно рис. 19, бассейн относится к району 4а. Для $\Phi_р = 276$, $\tau_{ск} = 30$ мин и типа кривых редукции осадков 4а максимальный модуль стока $A_{1\%} = 0{,}0092$.

Подставляя в формулу (83) значения $A_{1\%} = 0{,}0092$, $\varphi = 0{,}30$, $H_{1\%} = 140$ мм, $\lambda_{1\%} = 1{,}0$, $\delta_1 = 1{,}0$ и $F = 117$ км^2, вычисляем максимальный расход воды дождевого паводка 1%-ной обеспеченности.

$$Q_{max\ 1\%} = 0{,}0092 \cdot 0{,}3 \cdot 140 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 117 = 45{,}2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

ТЕМА 9. РАБОТА РЕК И НАНОСЫ

40. Формирование речного русла

Извилистость русла, плес, перекат. Распределение скоростей в реке определяется формами русла, очертанием его в плане. Русло равнинной реки, протекающей в аллювиальных отложениях (наносах реки), как это было изложено в § 15, имеет извилистую (меандрическую) форму.

Участки с большими глубинами, или плесы, расположены в изогнутых частях русла, а более мелкие места, или перекаты — на переходах от одного закругления к другому. Самая возвышен-

ная часть дна, лежащая между плесами, называется валом переката. Отмель, расположенная на выпуклом берегу, называется верхним побочнем переката.

Линия, соединяющая места наибольших глубин в плане, называется фарватером, динамической осью, или стрежнем реки. Если фарватер плавно переходит из одного плеса в другой, то глубины на участках большие. Речники называют такой перекат нормальным, хорошим. Если же фарватер представляет искривленную линию, глубина на таком участке небольшая, а перекат называют сдвинутым, «дурным» (см. рис. 38).

Продольный профиль реки. В начальной стадии формирования русла происходит интенсивный размыв его вследствие большого превышения верховьев русла на водоразделе над базисом эрозии

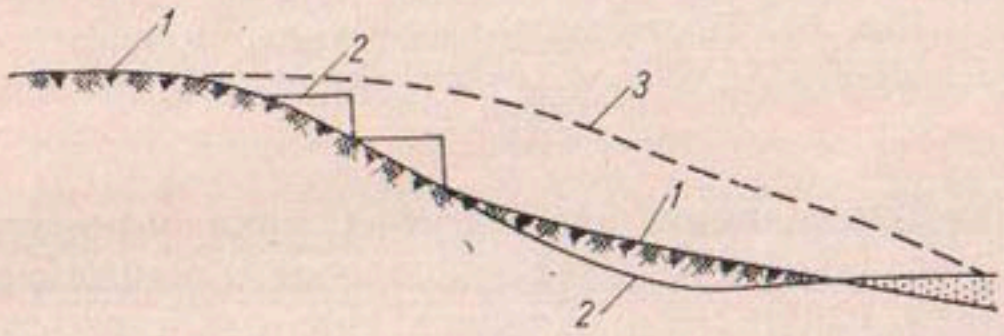


Рис. 67. Продольный профиль реки.
1 — профиль равновесия; *2* — начальный профиль; *3* — сбросовый профиль.

(рис. 67). Так как базис эрозии более или менее постоянен, то вначале происходит формирование русла в верховьях: углубление дна, образование перепадов и уступов. Смываемые в верховьях продукты разрушения откладываются в низовьях, на участке с меньшими уклонами. С течением времени по мере формирования русла уступы и перепады исчезают, русло врезается в долину, устанавливается профиль равновесия. Этот профиль более характерен для равнинных рек. Малые реки чаще всего имеют прямолинейный продольный профиль русла.

Для рек Карельской АССР и Кольского полуострова, берущих начало из озер этого района, характерен сбросовый профиль — с малыми уклонами в верховьях и большими в устьевой части (рис. 67, кривая *3*).

На сравнительно небольших участках реки уклоны воды меняются с изменением уровней. На пересыхающих реках (как правило, в засушливой зоне) по окончании паводка уровни воды в плесах находятся на отметках нижележащих перекатов (линия *АВ* на рис. 68). Русло представляет собой ряд разобщенных плесов. При возрастании расходов в такой реке и при низких уровнях на реках с постоянным течением вода переливается через гребни перекатов. Большие уклоны устанавливаются на перекатах и меньшие на плесах (линия *бб*). С увеличением расхода уклон постепенно уменьшается на перекате и увеличивается на плесе (линия *вв*). При высоком стоянии уровня (линия *гг*) уклон осредняется и выравнивается как на плесах, так и на перекатах.

Согласно формуле Шези (28), скорость движения воды повышается с увеличением уклона. Но на перекатах наибольший уклон соответствует низким уровням; в это время здесь возрастают скорости, вследствие чего дно на перекатах размывается, а на плесах отметка дна повышается. При высоких же уровнях происходит размыв дна плесов и наращивание перекатов.

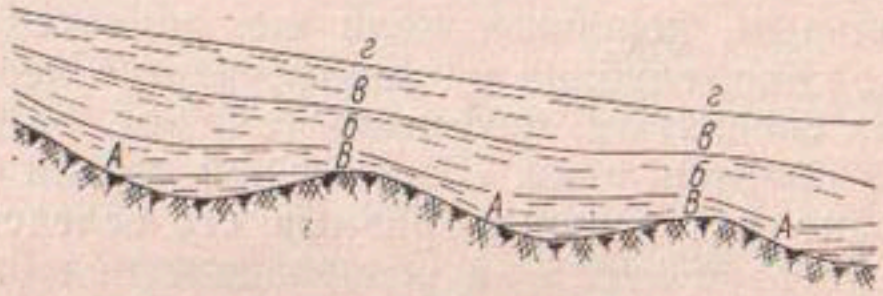


Рис. 68. Продольный профиль дна и поверхности воды в разные фазы режима реки.

Поперечная циркуляция. На изгибах реки у вогнутого берега струя *1* (на рис. 69 *а*) отклоняется от своего начального направления. Соседняя струя, не успевшая еще отклониться от своего основного направления, столкнувшись с прибрежной, отражается к противоположному берегу. Отраженная струя имеет меньшую



Рис. 69. Образование поперечной циркуляции.

скорость течения. Она не может противостоять напору соседних струй и опускается вниз. Так образуется придонное течение, направленное от вогнутого берега к противоположному выпуклому (струя *2* на рис. 69 *а*).

В поперечном сечении это движение набегающих поверхностных струй и отклоненных донных образует поперечную циркуляцию. Поверхностные струи, опускаясь вниз, подмывают вогнутый берег. Скорость отягощенных наносами струй уменьшается. Поэтому наносы откладываются на противоположном выпуклом берегу.

Поперечная циркуляция имеет тенденцию к винтообразному движению против часовой стрелки в плесах, изогнутых влево (рис. 69 *б*), и по часовой стрелке в плесах, изогнутых вправо (рис. 69 *в*).

Н. С. Лелявский, изучавший распределение струй на разных участках рек, назвал характер направления струй у вогнутого берега сходящимся, сбойным.

На перекатах характер движения струй совершенно иной. Здесь нет кривизны русла и струи разбрасываются по всему по-

перечному сечению потока. Такое расположение струй на перекате Н. С. Лелявский назвал веерообразным.

В соответствии с описанной схемой движения струй происходит следующее распределение глубин в реке:

1) наибольшие глубины бывают у вогнутых, а отмели — у выпуклых берегов;

2) чем круче закругление реки, тем больше глубины и резче выражены мели;

3) наибольшая глубина и наибольший выступ отмели расположены ниже (по течению) вершины кривой закругления.

Лабораторными и полевыми исследованиями М. В. Потапов показал возможность управления поперечной циркуляцией для улучшения режима русла, используя донные и поверхностные косо направленные щиты. Отклоняя струи от вогнутого берега щитками, удается уменьшить скорости и прекратить размыв.

Помимо перечисленного, на движущиеся струи воды действует сила вращения земли вокруг своей оси. Скорость вращения всякой точки на земной поверхности равна нулю у полюсов и возрастает от полюса к экватору. Поэтому струи воды в реках, текущих в северном полушарии с юга на север, смещаются из области больших скоростей в области с меньшими скоростями. Направление развивающихся при этом сил инерции совпадает с направлением вращения земли; они толкают частицу на восток или в сторону правого берега. В реках же, текущих с севера на юг, частицы воды перемещаются в области с большими скоростями. Ускорение направлено с запада на восток, а силы инерции — в противоположную сторону (с востока на запад) или тоже в сторону правого берега. Этим и объясняется, что у рек, текущих в северном полушарии, правый берег высокий, подмытый.

Деформация русла. Русла рек непрерывно изменяются, деформируются. Интенсивность деформации зависит от геологического строения русла и режима скоростей. Если русло сложено скальными, трудно размываемыми породами, то деформации практически нет. Наиболее подвижны дно и русла рек, сложенные песками.

Возможность деформаций в продольном направлении реки ограничена двумя неизменными отметками дна русла — отметкой водораздела и отметкой в месте впадения реки в озеро или в море. Последняя отметка называется базисом эрозии. Поэтому и общее падение большинства рек остается постоянным.

На горных реках резко выражена разница уклонов на отдельных участках реки. В верховьях, где скорости течения воды особенно велики, русло разрабатывается вглубь. На устьевом участке, где скорости малы, систематически откладываются наносы.

Отложение наносов на низовом участке реки в месте впадения в озеро или в мелководные участки моря приводит к образованию дельты, т. е. обширного пространства, занятого рукавами и островами (таковы дельты рек Волги, Дуная и др.).

Классификация рек по степени устойчивости русел. В зависимости от степени устойчивости русла или характера происходящих в нем деформаций реки делятся на пять типов.

1. Русло сложено очень подвижными грунтами. Скорости в реке большие. Во время паводка изменяется не только глубина, но и очертание русла в плане (например, Амударья, низовье Терека).

2. Русло сложено подвижными грунтами. Размыв и отложение наносов изменяют только глубину, но не изменяют очертание русла в плане. Положение плесов и перекатов меняется ежегодно.

3. Равнинные реки, на которых положение плесов и перекатов, равно как и очертание русла в плане, постоянны. Наращивание переката в паводок приблизительно равно размыву его в межень.

4. Русло реки сложено плохо размываемым крупным галечником. Так, русла Томи, Енисея и других рек изменяются незначительно.

5. Русло проходит в скальных, не поддающихся размыву породах. Деформаций в русле нет.

41. Речные наносы

Образование речных наносов и их классификация. Вода, стекая с поверхности бассейна, захватывает при своем движении частицы почвы или грунта. Явление смыва почвенных частиц стекающими талыми или ливневыми водами называется *водной эрозией* почв. Водная эрозия зависит от характера почвенного покрова, состояния поверхности почвы, рельефа, величины стока и т. д. Особенно подвержены смыву малоплодородные серые лесные почвы; в меньшей степени — мощные черноземы. Смыв ослабляется, если почва защищена густым травянистым покровом и лесом, но возрастает с увеличением уклонов. Поэтому сильно размыты речные бассейны рек Северного Кавказа. Сулак, Терек и другие реки несут огромное количество наносов. Горы Черноморского побережья, покрытые лесами, менее размыты.

При выпадении интенсивных ливней на горных склонах реки превращаются в грязе-каменные потоки, называемые *селями*, или селевыми потоками. Поверхностному смыву здесь способствует обломочный материал — продукт выветривания горных пород. Значительное количество наносов перемещается ледниками.

Продукты поверхностного смыва, попадая в реку, смешиваются с продуктами размыва дна и берегов русла, образуя *наносы* реки. Вода перемещает наносы во взвешенном состоянии или влечет их по дну. Влекомые наносы называются также *донными*.

Удельный вес твердых частиц больше, чем удельный вес воды. Почему же тяжелые частицы могут оставаться во взвешенном состоянии и не оседают на дно? Явление взвешивания твердых частиц объясняется следующим.

В турбулентном потоке скорость воды в каждой точке постоянно меняет величину и направление. Пусть в потоке движется твердая частица A (рис. 70 *а*). Она будет поддерживаться во взвешенном состоянии лишь в том случае, если равнодействующая всех приложенных к ней сил направлена под некоторым углом вверх и достаточна, чтобы поддержать эту частичку. Таким образом, должна существовать подъемная сила, которая больше силы тяжести твердой частицы, или вертикальная составляющая скорости, поддерживающая частицу во взвешенном состоянии. На частицу A действуют силы тяжести P и скорости v. Под влиянием этих двух сил частица движется в направлении равнодействующей. Разложим равнодействующую R (рис. 70 *б*) на горизонтальную N_x и вертикальную N_y составляющие. Вертикальная сила N_y и поддерживает частицу A во взвешенном состоянии.

Подъемная сила является основной причиной взвешивания мелких частиц грунта в русле потока.

При обтекании лежащих на дне частиц грунта образуются вихревые течения. Они захватывают лежащие на дне частицы грунта и поднимают их вверх.

Помимо подъемной силы, на частицы, лежащие на дне, действует лобовое давление. Если преобладает подъемная сила, то частицы находятся во взвешенном состоянии. Если же преобладает лобовое давление, частицы движутся по дну. При некоторой начальной скорости частица, лежащая на дне, начинает вибрировать и, срываясь с места, перекатывается на некоторое расстояние. Скорость, при которой начинается перемещение частиц, называется размывающей скоростью. Дальнейшее возрастание скоростей приводит к массовому влечению наносов в нижнем слое потока. Поэтому больше всего наносов в реке у дна или в придонном слое.

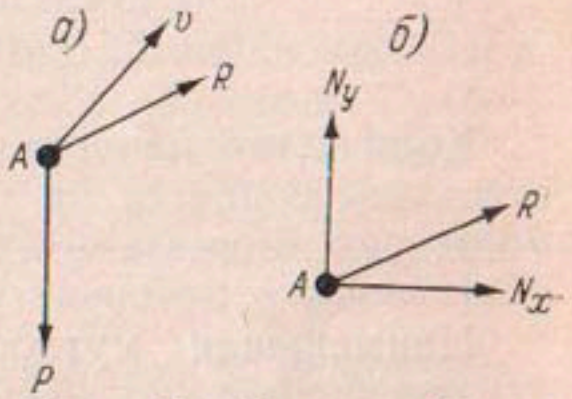


Рис. 70. Схема действия сил на взвешенную в воде частичку грунта.

Помимо взвешенных и влекомых наносов, речная вода содержит некоторое количество растворенных в ней веществ.

Мутность воды и расход наносов. Количество взвешенных наносов, приходящихся на единицу объема воды, называется мутностью. Мутность обозначается буквой ρ, измеряется в граммах на литр (г/л) или килограммах на кубометр (кг/м^3).

Если объем пробы речной воды в литрах составляет V, а вес наносов в граммах P, то мутность выражается формулой

$$\rho = \frac{P}{V}. \qquad (89)$$

Мутность в реке постепенно увеличивается от поверхности ко дну.

Аналогично расходу и стоку воды применяют понятия «расход» и «сток» наносов. Расход наносов представляет собой

количество твердого вещества, переносимого водой через живое сечение реки в единицу времени.

Расход наносов измеряется в кг/с, т/с или м³/с. Обозначим расход воды Q м³/с, тогда расход взвешенных наносов выразится в кг/с

$$r = \rho Q$$

или в т/с

$$r = \frac{\rho}{1000} Q, \tag{90}$$

где ρ — мутность в кг/м³.

Если расход наносов требуется вычислить в м³/с, то вес наносов делят на их объемный вес γ т/м³. Тогда расход

$$r' = \frac{r}{\gamma} = \frac{\rho Q}{1000\,\gamma}. \tag{91}$$

Количество наносов в некоторых реках СССР. Наибольшая мутность наблюдается на реках с наиболее крутыми уклонами. Мутность рек Кавказа — Сулака и Куры — достигает 4000 г/м³. Мутность воды в низовьях р. Амударьи превышает 3000 г/м³.

Наименьшая мутность ($\rho < 50$ г/м³) наблюдается в реках тундры и таежных районов Сибири с облесенными бассейнами.

Для характеристики средней многолетней мутности рек СССР служит карта зон мутности (рис. 71 на вклейке). В зоне *I* мутность рек меньше 25 г/м³, а в зоне *IX* она больше 5000 г/м³.

Объем наносов в селевых потоках достигает огромных значений — от 3,1 тыс. м³ с 1 км² в бассейне р. Селоканчай ($F = 120$ км²) до 46,6 тыс. м³ в бассейне р. Чкери ($F = 30$ км²), впадающей в р. Терек.

Твердый сток. Общее количество наносов (взвешенных и донных) и растворенных веществ, проносимых через живое сечение потока за определенный промежуток времени (сутки, месяц, год), называется твердым стоком.

Обозначая расход взвешенных наносов r, влекомых по дну (донных) наносов q и расход растворенных веществ m (кг/с), получаем суммарный твердый расход реки: $S = r + q + m$. Сток взвешенных наносов R, донных G и растворенных веществ M (в тоннах) за определенный отрезок времени T суток составляет:

$$R = \frac{rT \cdot 86\,400}{1000} = rT \cdot 86{,}4, \tag{92}$$

$$G = qT \cdot 86{,}4, \tag{92а}$$

$$M = mT \cdot 86{,}4, \tag{92б}$$

$$S = R + G + M = sT \cdot 86{,}4 = (r + q + m)\,T \cdot 86{,}4. \tag{93}$$

За год $T \cdot 86{,}4 = 31{,}5 \cdot 10^3$. Следовательно,

$$S = 31{,}5 \cdot 10^3 (r + q + m) = s \cdot 31{,}5 \cdot 10^3. \tag{94}$$

В большинстве случаев величиной M можно пренебречь, тогда

$$S = (r+q)\cdot 31{,}5\cdot 10^3\,[\text{т}] = \frac{(r+q)\cdot 31{,}5\cdot 10^3}{\gamma}\,[\text{м}^3]. \qquad (95)$$

Количество наносов, поступающих с 1 км² площади водосбора, представляет собой модуль твердого стока, который измеряется в т/км². Если твердый сток составляет S в тоннах, то модуль твердого стока

$$r_0 = \frac{S}{F}. \qquad (96)$$

Твердый сток можно представить как слой грунта, смываемого равномерно со всего водосбора. В этом случае сток выражается в микронах (мк), т. е. в тысячных долях миллиметра.

Пусть твердый сток составляет S (тонны), площадь водосбора F (км²), объемный вес наносов γ (т/м³), тогда слой твердого стока в микронах

$$\mu = \frac{S\cdot 1000\cdot 1000}{\gamma F\cdot 1000\cdot 1000} = \frac{S}{\gamma F} = \frac{r_0}{\gamma}. \qquad (97)$$

Определение твердого стока рек при отсутствии и недостаточности данных наблюдений. При отсутствии наблюдений средний многолетний твердый сток рек приближенно определяют по картам мутности.

Согласно исследованиям Г. В. Лопатина, коэффициент вариации твердого стока C'_v связан с коэффициентом вариации стока воды C_v:

для равнинных рек

$$C'_v = 1{,}64\,C_v, \qquad (98а)$$

для горных рек

$$C'_v = 3{,}33\,C_v, \qquad (98б)$$

для рек промежуточного типа

$$C'_v = 2{,}22\,C_v. \qquad (98в)$$

Зная средний многолетний сток наносов, коэффициент вариации C'_v и приняв $C'_s = 2C'_v$, можно построить кривую обеспеченности твердого стока.

При наличии короткого ряда наблюдений за твердым стоком и продолжительных наблюдений за стоком воды средний многолетний твердый сток приближенно принимают пропорциональным отношению среднего многолетнего и среднего стока воды за этот же период наблюдений

$$\overline{S} = S_i\frac{\overline{q}}{q_i}, \qquad (99)$$

где $\overline{S}$ и $\overline{q}$ — средний многолетний сток наносов и воды; S_i и q_i — средний сток наносов и воды за короткий период наблюдений.

Из элементов твердого стока больше всего изучен сток взвешенных наносов и меньше — сток донных наносов. Для определения последнего предложено много способов. Так, Б. В. Поляков на основании наблюдений главным образом на Дону и Волге сделал вывод, что сток донных наносов составляет 3—5% общего стока взвешенных наносов. И. И. Леви, М. А. Великанов, Г. И. Шамов и многие другие предложили формулы для расчета расхода этих наносов.

Твердый сток с малых водосборов изучен очень слабо. Между тем наблюдения на больших реках не могут быть механически перенесены на малые водосборы, где условия формирования твердого стока носят индивидуальный характер.

Так, из двух рядом расположенных оврагов один усиленно размывается, а русло другого задернованно и устойчиво. На этих оврагах мутность воды и твердый сток будут совершенно различными. В одном случае поверхность бассейна подвержена водной эрозии, во втором смыва может вообще не быть или величина его окажется ничтожной.

Пользуясь данными наблюдений по заилению малых водоемов в Центрально-Черноземных областях СССР, К. П. Воскресенский предложил принять мутность малых водотоков по мутности крупных рек с поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 44.

Таблица 44

Переходные коэффициенты для определения мутности воды малых водотоков

Площадь водосбора F км²	2	2—5	5—10	10—50	50—100	100—200	>200
Значение коэффициента	30	30—15	15—10	10—7	7—5	5—1	1,0

На основании исследований, выполненных в Поволжье, автор предложил рассчитывать твердый сток с водосборов, суходолов как сумму склоновой и русловой эрозии

$$\mu = \mu_c + \mu_p, \tag{100}$$

где буквенные индексы соответственно означают склоновый и русловый слой эрозии в микронах (мк).

Склоновая эрозия зависит от почвенного покрова, прямо пропорциональна уклону склона и величине стока воды. Поэтому, обозначив через μ_0 эрозионный коэффициент или смыв в микронах при уклоне, равном $1^0/_{00}$, и при величине стока воды, равной 1 мм, можно выразить склоновую эрозию

$$\mu_c = \mu_0 \overline{y} I, \tag{101}$$

где $\overline{y}$ — норма стока в миллиметрах; I — уклон в промилле ($^0/_{00}$).

Значения μ_0 в зависимости от характера почвы и состояния почвенного покрова приведены в табл. 45.

Таблица 45

Значения μ_0 для разных почв

Виды сельскохозяйственных угодий и пашни	Почвы		
	обыкновенный чернозем	темно-каштановые	южные черноземы
Зябь и старая пахота	0,09	0,30	0,15
Пласт и оборот пласта	0,025	0,12	0,035
Озимые			
по старопашке	0,030	0,050	0,030
по обороту пласта	0,020	0,007	0,020
Залежь и сеяные многолетние травы . .	0,004	0,008	0,005
Лес	0,003	—	—

Русловая эрозия $\mu_р$, помимо уклона, зависит от характера грунтов. Наблюдениями на оврагах установлено, что

$$\mu_р = b\,(\overline{y} - 14)\,I_р, \qquad (102)$$

где $I_р$ — уклон русла в $^0/_{00}$.

Для заросших устойчивых русел $b = 0$; для русел с пологими склонами и песчаным размываемым дном $b = 0{,}03$; для русел с крутыми обрывистыми песчаными берегами $b = 0{,}08$; для сильно размываемых русел $b = 0{,}15$.

Твердый сток (в м^3)

$$R + G = (\mu_с + \mu_р)\,F, \qquad (103)$$

Влияние речных наносов на работу гидротехнических сооружений, турбин и насосов. Гидротехнические сооружения, создавая подпоры, уменьшают скорость движения воды, что способствует отложению наносов. Наносы заполняют полезную емкость водохранилища, заиляют водозаборные узлы, магистральные и деривационные каналы, снижая их пропускную способность. Для улавливания наносов устраивают специальные сооружения — отстойники, которые периодически промывают.

Регулирование русел связано с производством землечерпательных работ и устройством выправительных сооружений для поддержания судоходных глубин. При проектировании таких мероприятий чрезвычайно важно учесть режим наносов.

Данные наблюдений показывают, что в дельте Амударьи происходит из года в год систематическое повышение дна реки (до 10 мм за год), а это приводит к постепенному снижению пропускной способности русла. Уровни во время паводков повышаются, затапливая земельные угодья и населенные пункты. Обвалование затапливаемых территорий не давало должного эффекта. Поэтому в низовьях горных рек (Терека, Амударьи и других) с наводнениями борются методом регулирования стока воды и наносов в верховьях бассейнов. Вследствие снижения скорости движения воды в верхнем бьефе водохранилищ наносы выпадают и откладываются на дне, что снижает заиление в низовьях.

Попадая на рабочие лопатки турбин, насосов и в насадки дождевальных машин, крупные наносы ускоряют их истирание. В связи с этим необходимо предусмотреть мероприятия по защите оборудования от вредного действия наносов.

Заиление каналов и водохранилищ. Каналы гидромелиоративных систем нужно рассчитывать и проектировать так, чтобы они не заилялись. Крупные наносы (диаметром более 0,10—0,15 мм) необходимо задерживать в головном участке. Взвешенные наносы небольшого диаметра могут поступать по каналам на орошаемые поля. Поэтому скорость движения в каналах должна быть такой, чтобы транспортирующая способность превышала заданную мутность поступающей воды.

Объем и продолжительность заиления водохранилищ можно приближенно рассчитать исходя из формулы (95).

Пусть объем заиления составляет $W_н$ м³. Тогда средняя продолжительность заиления в годах

$$T = \frac{W_н}{\overline{S}_0} = \frac{W_н \gamma}{(r+q)\cdot 31{,}5\cdot 10^3}. \qquad (104)$$

Объемный вес отложений в прудах при естественном их уплотнении ориентировочно можно принять равным 0,8 т/м³.

Фактически не все наносы откладываются в водохранилище. В зависимости от скорости течения воды, фракционного состава наносов устанавливается то или иное соотношение между аккумуляцией и транспортировкой наносов. Подробные расчеты заиления рассматриваются в курсах гидрологических расчетов.

42. Энергия рек

Вода при движении по земной поверхности совершает работу. Энергия потока равна произведению веса стекающей воды Q т/с и высоты падения H. Энергия расходуется на трение между частицами воды, трение воды о дно русла, удержание наносов во взвешенном состоянии, перекатывание наносов по дну и истирание грунта. В устье реки энергия сводится к минимуму.

Работа в единицу времени, т. е. мощность,

$$N = 1000\,QH \text{ кг/(м·с)} = \frac{1000\,QH}{75} = 13{,}33\,QH \text{ л. с.} = \frac{1000\,QH}{102} = 9{,}81\,QH \text{ кВт}. \qquad (105)$$

Различают мощность брутто, или кадастровую (участка реки или полную всей реки), и удельную километровую.

Кадастровую мощность вычисляют по формуле (105), где Q и H принимают для данного расчетного участка.

Полная мощность реки ΣN складывается из мощностей основной реки и всех притоков:

$$\Sigma N = 13{,}33 \Sigma Q_i H_i \text{ л. с.} = 9{,}81 \Sigma Q_i H_i \text{ кВт}. \qquad (106)$$

Удельная мощность, т. е. мощность на 1 км участка длиной L,

$$N_к = N/L. \qquad (107)$$

Вопросы для самопроверки

1. Что такое подвалье и побочень переката?
2. Что такое стрежень, фарватер или динамическая ось потока?
3. Каковы типы перекатов с точки зрения судоходства?
4. Как изменяется продольный уклон по длине реки и во времени на отдельных ее участках?
5. Что такое поперечная циркуляция? В каких случаях она образуется?
6. Каковы составные части твердого стока реки? В чем причина взвешивания наносов и влечения их по дну?
7. Что такое мутность и каковы единицы ее измерения?
8. Как выразить соотношения между мутностью, расходом и годовым стоком взвешенных наносов?
9. Как определить сток взвешенных наносов при отсутствии наблюдений и при наличии короткого ряда наблюдений?
10. Как рассчитать твердый сток с малых водосборов (суходолов)?
11. Как определить мощность реки (кадастровую, полную и километровую)?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 21. Вычислить средние многолетние характеристики твердого стока р. Северского Донца у г. Лисичанска: 1) расход взвешенных наносов r кг/с; 2) сток взвешенных наносов R т; 3) модуль твердого стока r_0 т/км^2.

Дано: площадь бассейна $F = 52\,400$ км^2; средний многолетний модуль стока $\overline{q} = 2{,}2$ л/(с·км^2); средняя годовая мутность воды $\rho = 93{,}0$ г/м^3.

Решение 1. Средний многолетний расход взвешенных наносов определяем по формуле (90). Для этого необходимо определить средний многолетний расход воды $\overline{Q}$, который вычисляем по формуле (38):

$$\overline{Q} = \frac{2{,}2 \cdot 52\,400}{1000} = 115 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда

$$\overline{r} = \frac{93{,}0 \cdot 115}{1000} = 10{,}7 \text{ кг/с}.$$

2. Средний многолетний годовой сток взвешенных наносов $\overline{R}$ вычисляем по формуле (92). Подставив в эту формулу значения $\overline{r}$ и T, получим

$$\overline{R} = 10{,}7 \cdot 365 \cdot 86{,}4 = 337\,435 \text{ т}.$$

3. Средний многолетний модуль твердого стока определяем по формуле (96):

$$\overline{r_0} = \frac{337\,435}{52\,400} = 6{,}4 \text{ т/км}^2.$$

При объемном весе $\gamma = 1{,}1$ т/м^3, согласно формуле (97), слой смываемого грунта

$$\mu = \frac{6{,}4}{1{,}1} = 5{,}82 \text{ мк}.$$

Упражнение 22. Рассчитать средний многолетний расход взвешенных наносов р. Синюхи у с. Синюхина Брода при наличии короткого ряда наблюдений.

Дано: площадь водосбора р. Синюхи 16 700 км^2; средние годовые расходы воды Q и взвешенных наносов r за 5 лет (табл. 46); средний многолетний расход воды $\overline{Q} = 41{,}8$ м^3/с; коэффициент вариации $C_v = 0{,}34$; $C_s = 2C_v = 0{,}68$.

Таблица 46

Средние годовые расходы воды и взвешенных наносов р. Синюхи у с. Синюхина Брода

Расход	1933 г.	1935 г.	1938 г.	1939 г.	1940 г.	Сумма	Среднее
Q м^3/с . .	36,1	35,8	12,0	11,8	75,0	171	34,1
r кг/с . . .	11,6	11,5	3,97	3,14	24,8	55	11,0

Решение. При наличии короткого ряда наблюдений за твердым стоком средний многолетний расход взвешенных наносов $\overline{r}$ вычисляют по формуле (99)

$$\overline{r} = 11{,}0 \cdot \frac{41{,}8}{34{,}1} = 13{,}5 \text{ кг/с}.$$

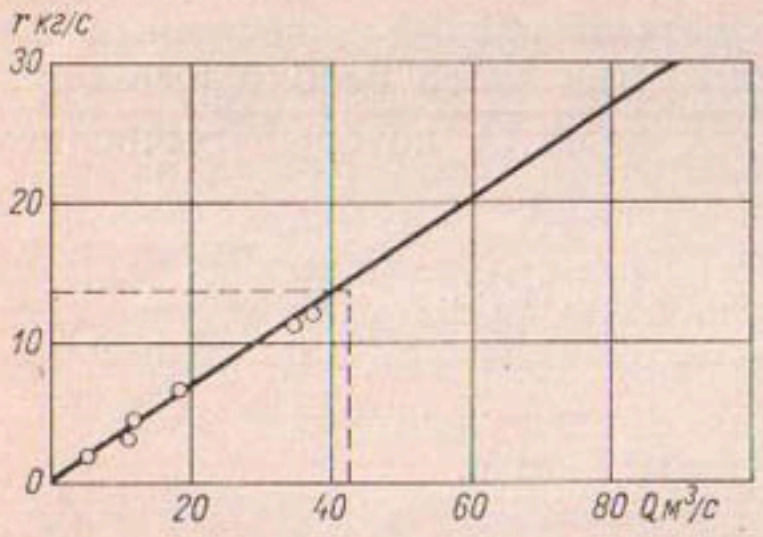


Рис. 72. Зависимость средних годовых расходов наносов от среднегодовых расходов воды р. Синюхи у с. Синюхина Брода.

То же решение может быть получено графически. Для этого, пользуясь данными табл. 46, построим график (рис. 72) связи между средними годовыми расходами воды Q (ось абсцисс) и средними годовыми расходами наносов r (ось ординат). Зависимость выразилась прямой, проходящей через начало координат; значит, между стоком воды и наносов существует прямая связь.

Воспользуемся графиком для определения среднего многолетнего расхода наносов. Для этого отложим на оси абсцисс средний многолетний расход воды 41,8 м^3/с. Отсюда восстановим перпендикуляр к оси x до точки пересечения с прямой. Из последней точки опустим перпендикуляр на ось ординат. Полученная точка на оси ординат и определяет средний многолетний расход наносов: $\overline{r} = 14{,}0$ кг/с.

Упражнение 23. Определить средний многолетний твердый сток р. Супой у с. Песчаного при отсутствии наблюдений.

Дано: площадь бассейна $F = 1900$ км², координаты центра бассейна $\varphi = 50°13'$ с. ш., $\lambda = 31°40'$ в. д.

Решение. По карте (см. рис. 49) для центра бассейна определяем норму стока $\overline{y} = 56{,}3$ мм, а $\overline{q} = 1{,}8$ л/(с · км²). По формуле (38) вычисляем средний многолетний расход воды $\overline{Q}$

$$\overline{Q} = \frac{1{,}8 \cdot 1900}{10^3} = 3{,}42 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По карте (см. рис. 71) определяем среднюю мутность ρ для бассейна р. Супой. Центр бассейна на карте находится в четвертой зоне, для которой средняя мутность колеблется в пределах 100—250 г/м³. Учитывая близость расположения до центра бассейна границы третьей зоны, для которой средняя мутность составляет 50—100 г/м³, а также невозможность резкого перехода мутности от одной зоны к другой, в качестве расчетной принимаем

$$\rho = 150 \text{ г/м}^3 = 0{,}15 \text{ кг/м}^3.$$

Средний многолетний годовой сток наносов в тоннах вычисляем по формуле (92). Величину $\overline{r}$ определяем по формуле (90). Тогда $\overline{r} = 0{,}15 \cdot 3{,}42 = 0{,}51$ кг/с и $\overline{R} = 0{,}51 \cdot 365 \cdot 86{,}4 = 16\,083$ т.

Упражнение 24. Рассчитать твердый сток в бассейне оврага Ростоши (у г. Воронежа).

Дано: координаты $\varphi = 52°00'$, $\lambda = 40°00'$; площадь водосбора $F = 60$ км²; уклон дна оврага $I = 7‰$; средний уклон бассейна $I_б = 15‰$. Почвы — тяжелосуглинистые обыкновенные черноземы; русло оврага сложено песком с галькой; бассейн распахан на 75%, гидрометрические наблюдения отсутствуют.

Решение. Задача решается двумя способами:

1) путем определения средней мутности по карте с внесением поправочного коэффициента (для малого водосбора);

2) с учетом природных особенностей водосбора.

Применяем второй способ. В этом случае твердый сток вычисляем по формуле (100). Необходимые значения μ_c и $\mu_р$ находим по формулам (101) и (102). По карте изолиний (рис. 55) для центра водосбора определяем норму весеннего стока $\overline{y} = 80$ мм. Вводим коэффициент снижения стока на распаханных водосборах $\alpha = 0{,}80$ (см. табл. 15). Тогда $\overline{y} = 0{,}80 \cdot 80 = 64$ мм.

Для обыкновенных черноземов и зяби (см. табл. 45) $\mu_0 = 0{,}09$ мк. Тогда по формуле (101) $\mu_c = 0{,}09 \cdot 64 \cdot 15 = 86{,}4$ мк. По формуле (102), принимая для песчаного грунта $b = 0{,}03$, вычисляем высоту слоя русловой эрозии $\mu_р = 0{,}03\ (64 - 14) \cdot 7 = 10{,}5$ мк. Суммарный слой эрозии $\mu = 86{,}4 + 10{,}5 = 96{,}9$ мк.

Суммарный твердый сток вычисляем по формуле (103): $R + G = 96{,}9 \cdot 60 = 5814$ м³. При объемном весе $\gamma = 1{,}2$ т/м³ твердый сток составит $1{,}2 \cdot 5814 = 6977$ т.

ТЕМА 10. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИИ И ПРОГНОЗЫ

43. Служба информации и прогноза

Цель и содержание гидрологических информаций и прогнозов. Отдельные отрасли народного хозяйства нуждаются в систематической или периодической информации о состоянии различных гидрологических явлений. Так, в районах орошения для водопользования необходимы сведения о расходах источников орошения. Сведения об уровнях воды, о сроках прохождения максимумов паводков необходимы транспортным и водохозяйственным учреждениям при организации охраны мостов, гидротехнических сооружений и их эксплуатации.

Многие явления следует предвидеть заблаговременно. Максимальный уровень прогнозируется для организации мер борьбы с наводнениями, наинизшие уровни — для организации судоходства, водоснабжения, использования гидроэнергии и т. д.

Гидрологическую информацию подают наблюдательные пункты (водомерные посты, станции), которые входят в так называемую информационную сеть УГМС (Управление гидрометеорологической службы).

Гидрологические информации делятся на три группы: текущие, эпизодические и экстренные. Текущие информации и оповещения выпускаются в строго установленные сроки — ежедневно, ежедекадно и т. д. Эпизодические информации подаются при наступлении особых явлений в режиме реки — при ледоставе, вскрытии рек и других, экстренные же информации — в исключительных случаях: при внезапном паводке, больших заторах льда и т. п.

Гидрологические информации выпускаются в виде ежедневных радиосводок, бюллетеней, месячных, сезонных и годовых обзоров. В горных районах выпускаются декадные обзоры.

Краткосрочные и долгосрочные прогнозы. Прогнозы, или предсказания того или иного режима реки, бывают краткосрочные и долгосрочные. Краткосрочные прогнозы дают за несколько дней (не более 10) до наступления какого-либо явления (например, ожидаемого максимального уровня); долгосрочные прогнозы — задолго до наступления того или иного явления. Последние делятся на предварительные (ориентировочные), качественные и количественные.

В предварительных прогнозах дают приблизительную характеристику, без цифровых данных. Например, «ожидается высокое половодье» или «ожидается очень высокий максимальный уровень» и т. д. В качественных прогнозах ожидаемое явление оценивается по трехбалльной системе, причем тремя баллами оценивается очень высокое стояние уровня или большой расход реки. В состав количественных прогнозов входит числовая оценка сроков наступающего явления, его размеров и ожидаемой точности.

В дореволюционные годы круг вопросов, освещаемых гидрологическими прогнозами, был очень узок. Составлялись лишь прогнозы максимальных уровней крупных рек по кривым связи уровней между водопостами. Так, например, уровни Волги в низовьях заблаговременно прогнозировались по уровню в устье Камы.

В связи с большим строительством в СССР возросло значение прогнозов. Больше изучен режим рек. Возросла и точность прогнозов, несмотря на большое разнообразие условий формирования режима разных рек на огромной территории СССР.

Для примера рассмотрим условия прогнозирования весеннего половодья рек степной и лесостепной зон. Основные факторы формирования весеннего половодья: осеннее увлажнение (играющее первостепенную роль), запасы воды в снежном покрове, сумма осадков периода снеготаяния и, наконец, состояние погоды и интенсивность снеготаяния. Уже в конце осени по сумме осенних осадков дается предварительный прогноз. После очень сухой осени вероятность формирования большого половодья мала, и наоборот, после многоводной осени (особенно после поздних осадков) нельзя ожидать низкого половодья. По условиям осеннего увлажнения, глубине промерзания и ожидаемому термическому режиму рано весной можно дать более точный прогноз размеров стока, максимальных расходов и т. д.

Методическое и научное руководство гидропрогнозами находится в ведении Гидрометцентра СССР, который выпускает фоновые прогнозы для больших территорий. На основе фоновых прогнозов управления на местах составляют местные прогнозы.

ТЕМА 11. ОЗЕРА, ВОДОХРАНИЛИЩА (ПРУДЫ) И БОЛОТА

44. Классификация озер и их морфометрические элементы

Замкнутое понижение (котловина и впадина), заполненное водой, поступающей в него подземным или поверхностным путем, называется о з е р о м. К озерам относятся и такие большие водоемы, как Каспийское и Аральское моря.

В зависимости от того, имеет ли вода связь с Мировым океаном, озера бывают бессточные (Эльтон, Баскунчак, Балхаш) и сточные (Байкал, Ладожское). Из сточных озер вытекают реки: Ангара из Байкала, Нева из Ладожского озера.

По условиям питания озера бывают бесприточные, приточные и приточно-сточные. Бесприточные озера не имеют притоков, они наполняются водами паводков и пересыхают в засушливое время года. Приточные озера питаются водами впадающих в них рек;

оттока из озер нет. В приточно-сточные озера реки впадают и вытекают из них.

К морфометрическим элементам озера относятся: площадь зеркала, длина, ширина, большая и малая оси и т. д.

Длина озера — кратчайшее расстояние между двумя наиболее удаленными точками, измеряемое отдельными короткими отрезками.

Средняя ширина озера — отношение площади зеркала к длине.

Большая ось озера — расстояние между двумя наиболее удаленными точками контура, измеряемое по прямой линии.

Малая ось озера — линия, перпендикулярная к большой оси, проведенная в месте наибольшей ширины.

Все морфометрические элементы озера изменяются с изменением уровня воды.

45. Режим озер и водохранилищ

Уровенный режим озер формируется приходно-расходными элементами водного баланса (притоком, осадками, испарением, фильтрацией через дно и берега), волнами, сгонами и нагонами и другими явлениями, описание которых приведено ниже.

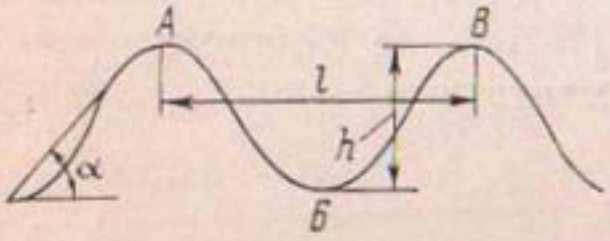


Рис. 73. Элементы волны.

Если сумма приходных элементов больше расходных, то к концу года уровень воды повышается, и наоборот, когда расход воды больше притока, уровень понижается. В течение многих лет уровень озера остается более или менее постоянным, исключая случаи резкого изменения, вызываемого геологическими явлениями.

В отдельные периоды уровни воды в озере колеблются в довольно широких пределах, что зависит от метеорологических условий всего бассейна. Значительные колебания происходят в результате выполнения некоторых хозяйственных мероприятий. Так, в первые годы эксплуатации каскада гидростанций понизился уровень оз. Севан.

Волны — это колебания воды, вызванные ветром. Распространение ветровой волны не связано с переносом частиц воды, в чем можно убедиться, наблюдая, как ветер колеблет плавающий на поверхности воды предмет, оставляя его на том же месте.

Волна состоит из характерных элементов, представленных на рис. 73. Самая низкая точка волны *Б* называется подошвой, высшая точка (*А* и *В*) — вершиной, или гребнем. Высота волны *h* представляет разность отметок гребня и подошвы. Расстояние *l* между двумя вершинами называется длиной волны. Тангенс угла наклона касательной к профилю с горизонтальной линией называется крутизной волны. Время, в течение кото-

рого волна пробегает расстояние, равное ее длине l, называется периодом волны. Для создания волн необходимо, чтобы скорость ветра была больше 23,3 см/с.

В качестве примера для расчета высоты h и длины волны l (в метрах) приведем эмпирические формулы В. Г. Андреянова:

$$h = 0{,}0208\, v^{5/4} L^{1/3}; \tag{108}$$

$$l = 0{,}304\, v L^{0{,}5}, \tag{109}$$

где v — скорость ветра в м/с; L — длина разгона волны в километрах.

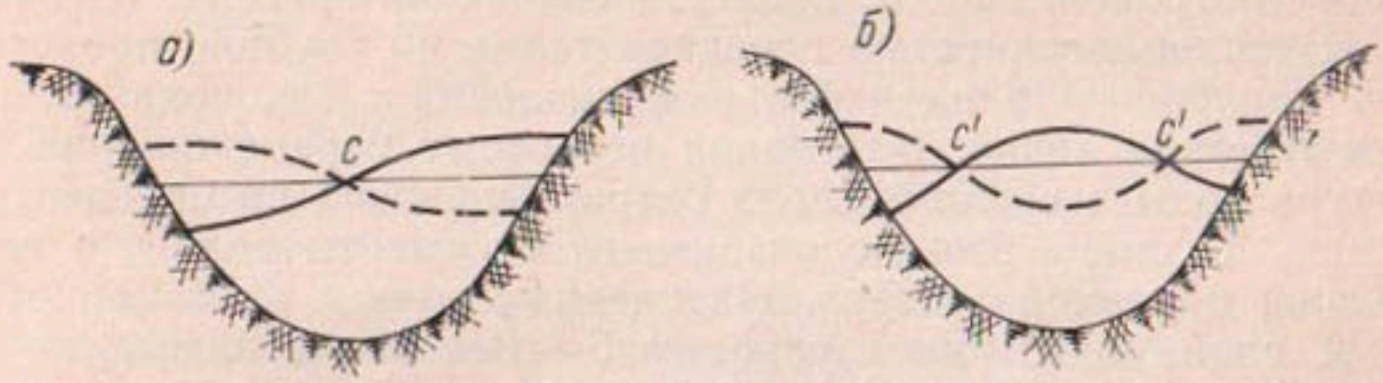


Рис. 74. Сейши.
а — одноузловые; *б* — двухузловые.

Ветер вызывает у наветренного пологого берега скопление воды и повышение уровня (нагон); у подветренного берега происходит понижение уровня (сгон). Такое изменение уровня приводит к наклону водной поверхности. В силу этого усиливается течение в направлении понижения, что приводит к восстановлению единого уровня. У глубоких озер с обрывистыми берегами (оз. Байкал) даже при штормовых ветрах сгонно-нагонное изменение уровня не превышает нескольких десятков сантиметров. На Аральском море подъем уровня при нагонах достигает 2 м.

Сейши — это стоячие волны. Если в какой-нибудь части озера создается отклонение от среднего уровня под действием атмосферного давления или ветра, то после прекращения действия этих сил вода приходит в колебательное движение. Сейши бывают одноузловые (рис. 74 *а*), двух- и многоузловые (рис. 74 *б*). Узлы — это точки неизменного уровня.

Амплитуда колебания сейш составляет от нескольких сантиметров до нескольких метров. Например, на Женевском озере она составляет 2 м.

Баланс воды в озерах и водохранилищах. Баланс воды представляет результат расчета приходных и расходных статей. К приходным элементам водного баланса относятся: осадки x на площадь зеркала, сток с площади водосбора y, грунтовой приток P и конденсация K (обычно не учитываемая). К расходным элементам водного баланса относятся: испарение с водной поверхности z, сток из озера y_1 и подземный отток y_2. Все величины измеряются в кубических метрах ($м^3$). Таким образом, изменение объема за какой-то промежуток времени

$$\Delta V = (x + y + P) - (z + y_1 + y_2). \quad (110)$$

Пользуясь уравнением водного баланса, обычно устанавливают неизвестную, трудно поддающуюся изучению величину — грунтовой приток или подземный отток. Б. Д. Зайков составил водный баланс Каспийского моря за 1930 — 1945 гг. Наблюдениями И. А. Кузника за элементами водного баланса водохранилищ в Заволжье установлена величина фильтрации и динамика ее снижения во времени.

Тепловой и ледовый режим озер. Основным источником, вызывающим нагревание воды, является солнечная энергия. В связи со слабой теплопроводностью передача тепла по глубине происходит очень медленно. Обладая большой теплоемкостью, вода является аккумулятором тепла. Благодаря ветровому перемешиванию, температура воды в верхних слоях озера выравнена до определенной глубины. Толщина этого слоя зависит от высоты волны, а следовательно, и размеров озера. На средних озерах равномерно прогретый слой воды имеет глубину 5 — 8 м. Ниже находится зона скачка (2 — 5 м), в которой температура резко понижается, иногда на 20°. Под этой зоной температура постепенно понижается с глубиной. Таким образом на поверхности залегает прогретый и вместе с тем наиболее легкий слой воды, который не может опуститься вниз и обеспечить путем тепловой конвекции (перемещение) выравнивание температуры во всей толще воды. С понижением температуры по глубине повышается плотность водной массы. Такое распределение температуры называется прямой термической стратификацией. Озера тропических стран относятся к группе теплых с прямой термической стратификацией. В умеренных широтах прямая стратификация в озерах имеет место летом.

Если температура всей водной массы находится в пределах 0 — 4°С, то в поверхностном более легком слое температура будет ниже, а дальше по глубине располагаются более плотные слои с более высокой температурой, близкой к 4°С. Такое расположение называется обратной термической стратификацией. Холодные озера Приполярья относятся к группе озер с обратной термической стратификацией.

В умеренных широтах осенью при охлаждении воды с увеличением плотности верхние слои опускаются вниз. При длительном охлаждении вся вода до дна примет однородную температуру наибольшей плотности, а при еще большем охлаждении на поверхности останется наиболее легкий и более охлажденный слой (обратная термическая стратификация). Озера умеренных широт относятся к группе смешанных с переменной стратификацией по временам года — прямой летом, обратной осенью.

После установления нулевой температуры озеро начинает замерзать с поверхности. При безветренной погоде или при слабом ветре лед вначале образуется у берегов, на отмелях, а затем и в более глубоких местах. При полном безветрии в первую холодную ясную ночь тонкая пленка льда покрывает всю поверхность озера.

В дальнейшем лед утолщается, превращаясь в ровный, гладкий ледяной покров. Как показывают наблюдения, замерзать начинают одновременно как озерные водоемы, так и водотоки. Однако сплошной ледостав наступает раньше на озерах и водохранилищах. Ледостав в верхнем бьефе Свирского водохранилища опережает в среднем на 8 дней образование ледостава в естественных условиях р. Свири.

Утолщение льда происходит снизу. При сильном ветре и волнении ледяной покров иногда разрушается. На крупных водоемах в глубинных местах лед вообще не образуется. Зато при сильном волнении переохлаждение распространяется на некоторую глубину, что способствует образованию внутриводного льда. Такие явления наблюдаются на Ладожском озере.

Таяние льда начинается при повышении температуры воздуха выше 0°С. В стоячих водоемах лед обычно тает на месте, а в проточных его увлекает течение воды.

Прозрачность и цвет воды в озерах. Прозрачностью, или глубиной видимости, называется та глубина, на которой белый диск диаметром 30 см становится невидимым наблюдателю (возвышение глаз над водой не более 2 м). В озерах с чистой водой прозрачность достигает порядка 40 м (наибольшая в оз. Байкал). В очень мутной воде прозрачность снижается до 0,2 — 0,3 м.

Под цветом воды понимают цвет, улавливаемый наблюдателем с борта судна или лодки. Цвет озера бывает зеленым в глубоких озерах с чистой водой, желтовато-зеленым в неглубоких и менее чистых водоемах и коричневым в озерах с болотной водой.

46. Болота и их гидрологические особенности

Б о л о т о м называется избыточно увлажненный участок земной поверхности, покрытый слоем торфа глубиной не менее 30 см в неосушенном и 20 см в осушенном виде. Избыточно увлажненные участки земли, имеющие слой торфа меньше 30 см или вовсе не имеющие торфа, называются з а б о л о ч е н н ы м и з е м л я м и.

Болота образуются в результате: 1) зарастания и заторфовывания водоемов; 2) заболачивания лесов и лесных пожарищ и 3) заболачивания лугов.

Причиной заболачивания в тундре является малое испарение с поверхности земли и неглубокое залегание слоя многолетне-мерзлых пород. Этот слой является водоупором, вследствие чего происходит накапливание воды в верхних слоях почвы.

В степной зоне заболачивание возможно в поймах рек вследствие застаивания воды.

Болота особенно распространены на северо-западе Европейской территории СССР. Здесь заболоченность достигает 40%, а в тундре она еще больше. Южнее Киева — Рязани — Пензы верховых болот уже нет. Обширные бессточные низменности (Полесье,

Мещера, Молого-Шекснинская низменность) богаты болотами. В Восточной Сибири встречаются мелкие торфяники.

Гидрологические расчеты в проектах осушения болот необходимы для определения размеров осушительных каналов. Основные расчетные характеристики следующие: средний многолетний сток, средний многолетний максимальный модуль стока, модуль стока предпосевного и посевного периодов. Карты изолиний среднего многолетнего стока отражают основные, осредненные для крупных водосборов характеристики, в том числе заболоченность и залесенность. Из этих соображений средний многолетний сток для заболоченных водосборов в лесной зоне определяют по карте изолиний годового стока. В центральных же районах РСФСР, граничащих с зоной лесостепи (южные части Калининской, Московской и прилегающих к ней областей, Мещерской низменности), сток с заболоченных небольших водосборов меньше, чем по карте изолиний, приблизительно на 15—17%.

Расчетными для осушительной системы являются модули стока предпосевного и вегетационного периодов из следующих соображений: почва должна быть своевременно подготовлена к посеву ранних зерновых культур, поэтому и каналы должны отвести воду с заболоченных массивов в предпосевной период. Недопустимо длительное затопление лугов и сенокосов. Поэтому осушительная сеть должна быть рассчитана на отвод дождевого стока вегетационного периода.

По исследованиям К. Е. Иванова, сток вегетационного периода в Смоленской, Орловской, Калужской, Брянской и Тульской областях составляет 0,02 л/(с·га); в Московской, Рязанской, Калининской, Ярославской и Владимирской — 0,04; в Горьковской, Кировской, Костромской и Ивановской — 0,05; Ленинградской, Новгородской и Псковской областях — 0,035 л/(с·га).

Сток предпосевного периода $q_{пр}$ рассчитывают в зависимости от максимального модуля стока q_{max} по следующим формулам:

$$q_{пр} = kq_{max}, \tag{111а}$$

$$q_{пр} = k_1 q_{max}, \tag{111б}$$

где k и k_1 зависят от допустимой продолжительности затопления культур T в сутках:

$$k = \frac{1,63}{T^{0,34}} - 0,4, \tag{112а}$$

$$k_1 = \frac{3,63}{T^{0,2}} - 1,64. \tag{112б}$$

Для первых двух групп областей, перечисленных выше, принимается k, а для последних — k_1.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные типы озер (в зависимости от их связи с Мировым океаном и от условия питания)?
2. Каковы морфологические элементы озер и как они определяются?
3. От чего зависит уровенный режим озер?
4. Какой вид имеет формула водного баланса озера и водохранилища?
5. Чем вызваны волны, нагоны, сгоны и сейши?
6. От чего зависят длина и высота волны?
7. Как формируется тепловой режим озера?
8. Что такое болото и заболоченные земли?
9. Для какой цели и как рассчитывают модули стока предпосевного и вегетационного периодов?

Раздел III. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

ТЕМА 12. ПОНЯТИЕ О ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТАХ

47. Некоторые сведения о регулировании стока

Режим реки не всегда соответствует запросам народного хозяйства. На большинстве рек СССР основная часть стока (иногда до 100%) проходит в период весеннего половодья, когда потребление воды обычно невелико, а в межень воды недостаточно. При бытовом и промышленном водоснабжении потребление воды больше днем, чем ночью, больше в рабочие дни, чем в нерабочие, и т. д. Неодинакова обеспеченность водой и в разные годы. В связи с этим, например, ограничиваются возможности орошения в маловодные по стоку годы.

Неравномерно распределены водные запасы и по территории. Они значительно превышают потребление на севере и совершенно недостаточны в степной зоне СССР. Осуществление грандиозных планов по мелиорации земель, в особенности по орошению, и промышленному строительству вызывает необходимость привести в соответствие приток воды с потреблением в отдельных бассейнах рек, в отдельных природных зонах и даже по Советскому Союзу в целом. Это перераспределение неравномерного во времени и пространстве стока рек в соответствии с режимом водопотребления и водопользования называется *регулированием*.

Регулирование стока служит также для борьбы с водной эрозией почв на водосборах, для предупреждения наводнений и селей. Для регулирования стока устраивают пруды и водохранилища, в которых накапливают воду в период, когда ее поступление больше потребления. Затем эти запасы расходуют в периоды малого притока и большого потребления.

В зависимости от того, на какой отрезок времени рассчитано регулирование стока водохранилищем, различают следующие его виды: суточное, недельное, сезонно-годичное и многолетнее.

Во всех случаях регулирования стока необходимы *водохо-*

зяйственные расчеты. Они служат обоснованием проектируемых емкостей водохранилищ.

Основные элементы водохозяйственных расчетов. Элементами водохозяйственного расчета являются приток или сток с водосбора и потребление воды. В суммарное потребление включается расход на испарение с поверхности водоема и фильтрацию в грунт через ложе водохранилища и земляную плотину. Если приток к водохранилищу больше его емкости, лишнюю воду отводят через сбросные сооружения. Этот объем воды составляет так называемый сброс.

Соотношение между притоком и потреблением можно изобразить графически в виде совмещенного графика.

При суточном регулировании цикл накопления и опорожнения завершается в течение суток. Вода накапливается в водохранилище в часы пониженного потребления (например, при водоснабжении — в ночные часы) и расходуется во время повышенного водопотребления (рис. 75). Пусть $Q_{ср.\,сут}$ — средний суточный расход источника в м³/ч. За 24 ч приток составит $Q_{ср.\,сут} \cdot 24$ м³. Если Q_0 — пониженное потребление за n часов, то всего за эти n часов из источника будет израсходовано $Q_0 n$ м³. Остаток воды $Q_{ср.\,сут} \times 24 - Q_0 n$ будет расходоваться с повышенным расходом Q_0' в течение $24 - n$ часов.

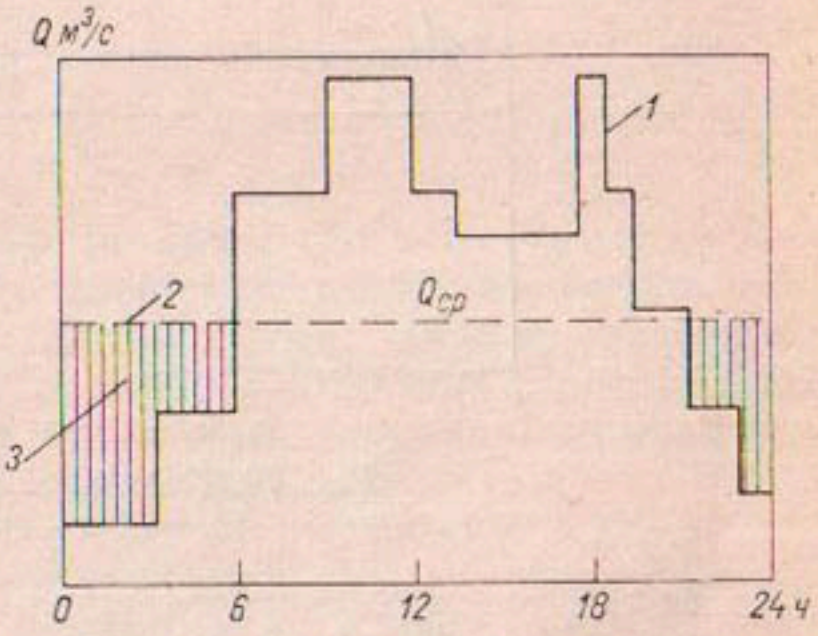


Рис. 75. Суточное регулирование стока. *1* — водопотребление; *2* — расходы реки (приток), *3* — накопление.

Следовательно,

$$Q_0'(24 - n) = Q_{ср.\,сут} \cdot 24 - Q_0 n. \qquad (113)$$

Отсюда

$$Q_0' = \frac{Q_{ср.\,сут} \cdot 24 - Q_0 n}{24 - n}. \qquad (114)$$

При недельном регулировании излишний, не используемый сток в выходные дни накапливается в водохранилище и расходуется в рабочие дни недели (рис. 76).

При сезонно-годичном регулировании вода накапливается в водохранилище в многоводный сезон, например весной во время снеготаяния, и расходуется в маловодные сезоны года. В многоводные годы излишек воды сбрасывается из водохранилища, а в исключительно маловодные годы возможен дефицит стока.

На рис. 77 показан такой график для случая сезонного регулирования. На оси абсцисс отложены даты (числа и месяцы), а на оси ординат — расходы воды. Линия *1* изображает график

колебания расходов, или график притока; линия *2* соответствует ходу потребления воды из водохранилища. Очевидно, на участке *ад* потребление превышает приток. Недостающее потребление возмещается за счет запасов воды, накопленных в водохранилище. На участке *дбв* приток больше потребления. Водохранилище пополняется за счет имеющихся излишков воды и т. д.

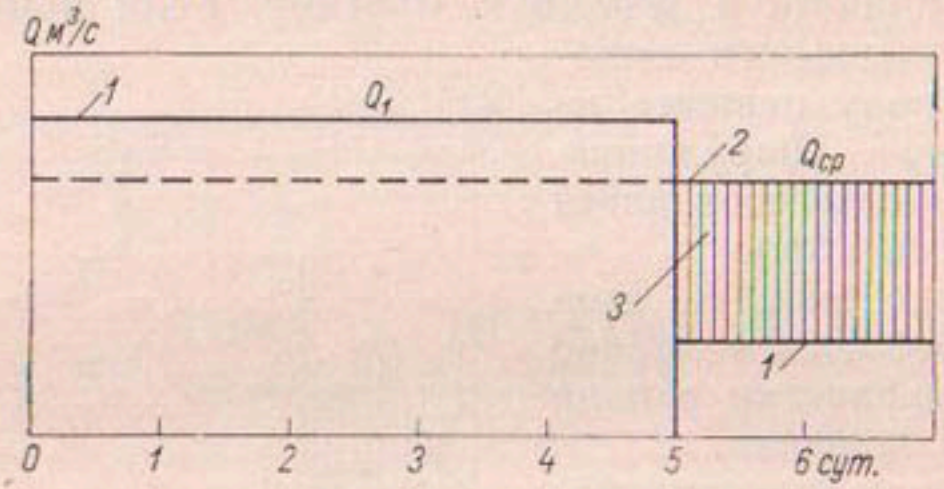


Рис. 76. Недельное регулирование.
1 — водопотребление; *2* — приток; *3* — накопление.

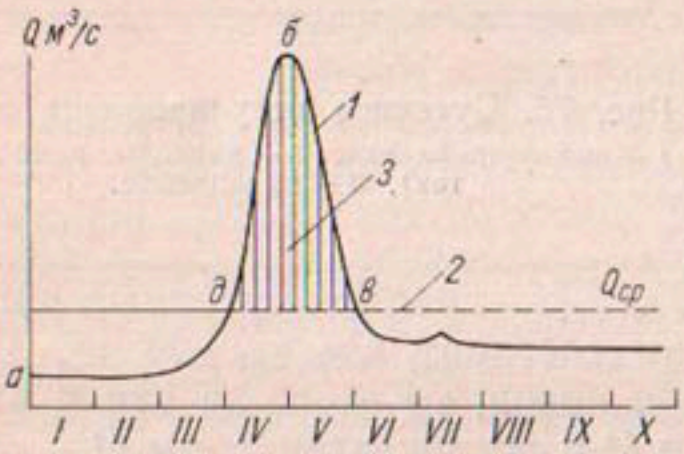


Рис. 77. Сезонно-годичное регулирование стока.
1 — приток; *2* — потребление; *3* — накопление.

При многолетнем регулировании расчет ведут с учетом ежегодного стока за многолетний период, в том числе и за наиболее продолжительный период засушливых маловодных лет. В этом случае дополнительные запасы создаются в водохранилище в многоводные годы.

48. Водохозяйственные расчеты при проектировании водохранилищ (прудов) сезонно-годичного регулирования

Кривые площадей и объемов. Для расчета емкости водохранилища при регулировании стока необходимо определить площади зеркал и объемов при разной глубине наполнения. Для этого строят кривые зависимости между площадями, объемами и уровнями воды. На рис. 78 изображен план водохранилища с сечением рельефа через 1 м. По этому плану определяют площади, ограниченные осью плотины и каждой из горизонталей. Результаты планиметрирования заносят в ведомость (табл. 47). Площадь зеркала $\omega = 0$ при отметке дна тальвега 93,7 м.

Таблица 47

Расчет площадей и объемов водохранилища при разных уровнях воды

Отметки горизонтали H м	Площадь зеркала ω тыс. м²	Средняя площадь $\omega_{ср}$ тыс. м²	Разность отметок между горизонталями h м	Приращение объема ΔV тыс. м³	Объем V тыс. м³
93,7	0				0
		20	0,3	6	6
94,0	40				
		60	0,5	30	36
94,5	80				

По данным первых двух граф таблицы (по отметкам горизонталей H и соответствующим им площадям ω) вычерчивают кривую площадей $\omega = f(H)$ (рис. 79). На оси абсцисс отложены площади в гектарах, на оси ординат — отметки горизонталей. Пользуясь этой кривой, можно установить площадь зеркала водохранилища при любой высоте уровня воды.

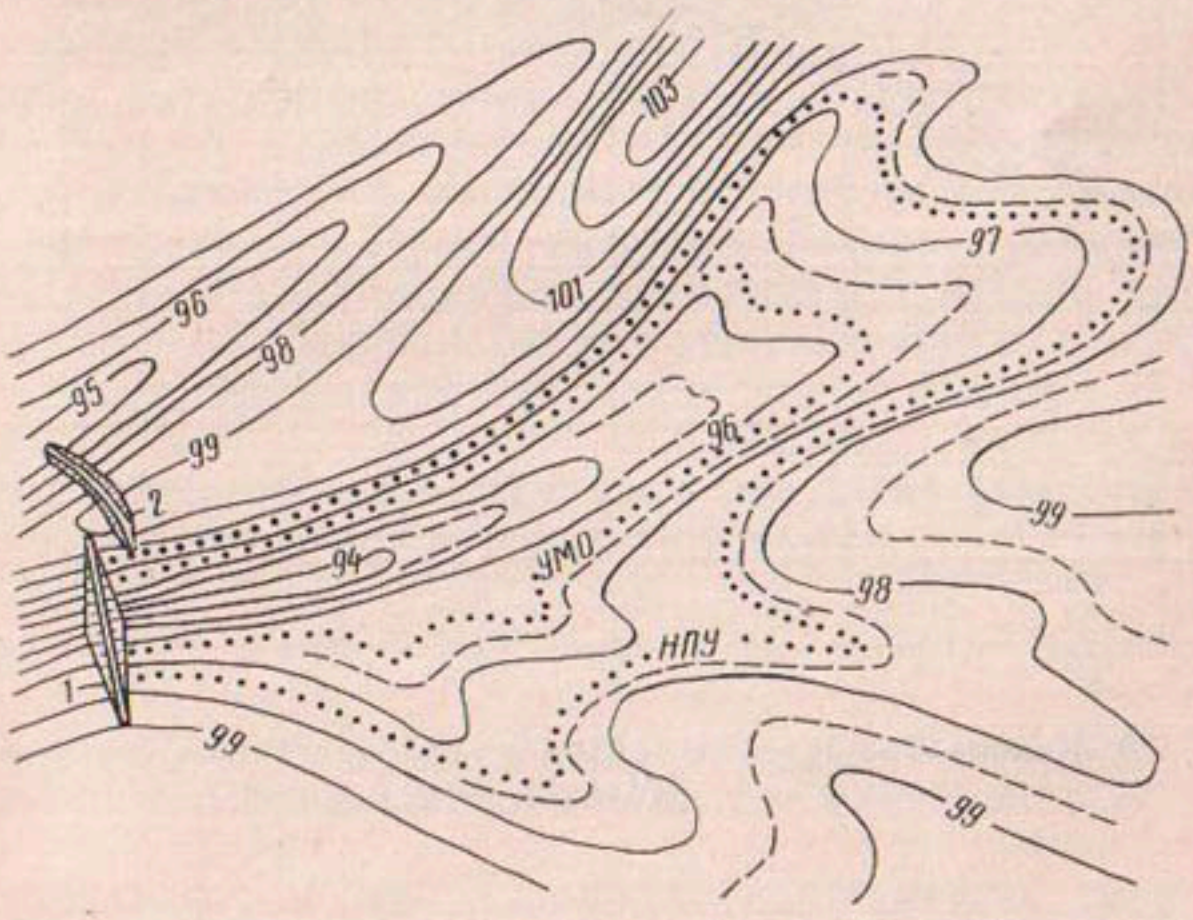


Рис. 78. План водохранилища в горизонталях.

Объем водохранилища при наполнении до отметки 94,0 м приближенно вычисляют по формуле

$$V_1 = \frac{2}{3}\omega_1 h_1, \qquad (115)$$

где V_1 — объем в тыс. м³; ω_1 — площадь, очерченная горизонталью 94,0 м, в тыс. м²; h_1 — разность отметок горизонтали 94,0 и наинизшей отметки дна 93,7.

Объем ΔV_1, слоя между горизонталями 94,0 и 94,5 м

$$\Delta V_1 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} h_2, \qquad (116)$$

где ω_1 и ω_2 — площади, очерченные горизонталями 94,0 и 94,5 м; h_2 — разность отметок.

Полный же объем от дна до горизонтали 94,5 м составляет $V_1 + \Delta V_1$.

Затем определяют приращение объема ΔV_2 между горизонталями 94,5 и 95,0 м и т. д.

На основании данных первой и последней граф табл. 47 строят кривую объемов $V = f(H)$ (см. рис. 79).

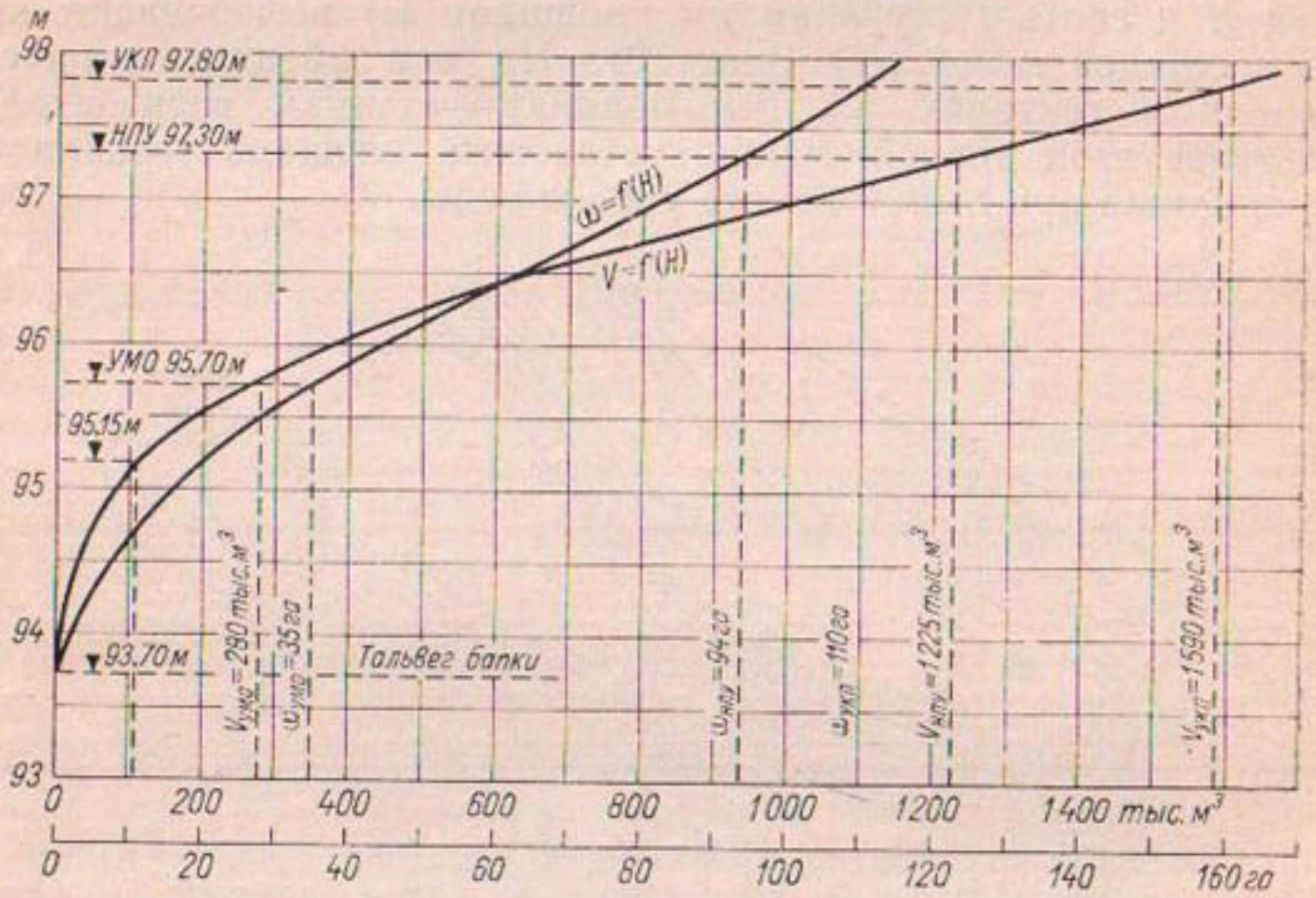


Рис. 79. Кривые площадей и объемов водохранилища на р. Сухая Маячка.

К характерным расчетным уровням водохранилища относятся: уровень мертвого объема (УМО), нормальный подпорный уровень (НПУ), уровень катастрофического паводка (УКП). Каждый из них назначается из эксплуатационных, технических и экономических соображений.

Уровень мертвого объема (УМО) — это наинизший уровень в водохранилище. Объем воды, заключенный между УМО и ложем водохранилища, называется мертвым объемом. Глубина мертвого объема по санитарным условиям должна быть не меньше 1—2 м; при такой глубине исключаются сильное прогревание воды и зарастание водохранилища. Кроме того, мертвый объем должен превышать объем возможного заиления за проектируемый срок

службы водохранилища. В некоторых случаях УМО определяется еще условиями судоходства и необходимым напором на ГЭС.

В водохранилище с самотечной подачей воды на орошение уровень мертвого объема зависит от необходимого превышения (командования) над орошаемой площадью.

Нормальный (или рабочий) подпорный уровень (НПУ) соответствует уровню наполненного водохранилища. Емкость водохранилища (при отметке НПУ) составляет сумму мертвого и полезного объемов и потерь воды на испарение и фильтрацию. Полезный объем воды расходуется на орошение, водоснабжение и т. п.

Отметку порога водослива паводкового водосброса назначают на уровне НПУ, если водосброс действует автоматически; или ниже НПУ, если применяются затворы. Отметка верха затворов совпадает с отметкой НПУ.

Уровень катастрофического паводка (УКП) устанавливается в водохранилище только в период пропуска максимального паводка. Объем воды, заключенный между УКП и НПУ, называется объемом форсировки. Этот объем к концу паводка сбрасывается до уровня НПУ.

Уровень катастрофического паводка определяется экономическими расчетами. С повышением УКП увеличивается высота плотины и ее стоимость, а размеры и стоимость паводкового водосброса уменьшаются. После расчетов находят наивыгоднейшее решение. При этом учитывают возможную площадь затопления в период пропуска паводка и затраты, связанные с устройством оградительных сооружений или переселением жителей из зоны затопления и т. д

При сезонно-годичном регулировании стока емкость водохранилища может быть определена по формуле

$$V = V_{м.о} + V_{п} + E + f - O_{с}, \qquad (117)$$

где $V_{м.о}$ — мертвый объем; $V_{п}$ — объем полезного потребления; E — испарение с водной поверхности; f — фильтрация из водохранилища; $O_{с}$ — осадки.

На небольших прудах (суходолах и небольших реках) испарение рассчитывается обычными методами (см. п. 5). На больших водохранилищах при наличии значительной водной поверхности до строительства рассчитывается дополнительное испарение (разность величин после и до строительства).

Средний слой испарения до затопления

$$E_{ср} = \frac{E_{в}\omega_{в} + E_{с}\omega_{с} + E_{п}\omega_{п}}{\omega_{в} + \omega_{с} + \omega_{п}}, \qquad (118)$$

где ω и E с соответствующими индексами представляют площадь зеркала и высоту слоя испарения с водной поверхности (в), с суши (с) и с поверхности поймы (п).

В расчетах принимают в районах недостаточного увлажнения $E_п = \frac{2}{3} E_в$, а в районах избыточного увлажнения $E_п = E_в$. Потери на фильтрацию зависят от геологического строения ложа водохранилища. При проектировании небольших водохранилищ этот вид потерь принимается по табл. 48.

Таблица 48

Норма потерь на фильтрацию из водохранилищ

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

Гидрогеологические условия считаются хорошими, если ложе водохранилища образовано водонепроницаемыми грунтами; уровень грунтовых вод расположен ниже подпорных уровней.

Гидрогеологические условия относятся к категории средних, если ложе сложено суглинками. Грунтовые воды залегают выше мертвого объема.

При плохих гидрогеологических условиях ложе сложено мощным слоем водопроницаемых грунтов. Возможен отток и значительные фильтрационные потери воды из водохранилища.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается хозяйственное значение регулирования стока?
2. Какие известны виды регулирования стока и в каких случаях применяют каждый из них?
3. Для чего служат кривые площадей и объемов водохранилища и как их составить?
4. Каковы элементы водохозяйственного расчета?
5. Какие характерные уровни в водохранилище? Как определяется емкость водохранилища сезонно-годичного регулирования.
6. Как рассчитываются потери на испарение и фильтрацию из водохранилища?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 25. Выполнить водохозяйственный расчет водохранилища, проектируемого на балке Сухая Маячка (бассейн Нижнего Днепра) для орошения и рыбоводства. Водохранилище расположено в степной зоне Европейской территории СССР (Полтавская область).

Дано: координаты створа плотины $\varphi = 49°12'$ с. ш. и $\lambda = 34°26'$ в. д.; площадь водосбора $F = 117$ км^2; координаты центра водосбора $\varphi = 49°30'$ с. ш. и $\lambda = 38°26'$ в. д. Уклон балки $I =$

= 1,4‰; длина $L = 23{,}3$ км. Болот, озер и водохранилищ в бассейне балки Сухой Маячки нет. Геологические условия (условия фильтрации) русла — средние. Кривые объемов и площадей водохранилища даны на рис. 79. Объемы потребления воды для орошения участка площадью 340 га составляют: в апреле — 100 тыс. м³, мае — 100, июне — 200, июле — 200, августе — 100, а всего 700 тыс. м³.

Для орошения объем воды в водохранилище срабатывают до уровня мертвого объема (УМО). Для вылова рыбы в октябре водохранилище полностью опорожняют (через донный водовыпуск). Часть мертвого объема за период эксплуатации (20 лет) заполняется наносами. Регулирование стока — одногодичное.

Балка питается поверхностным стоком и родниками, которые не пересыхают и не перемерзают. Распределение стока по месяцам в процентах от годового для года 85%-ной обеспеченности дано в табл. 49.

Таблица 49

Распределение стока по месяцам

Сток	I	II	III	IV	V	VI
В % от годового . .	2,21	2,06	4,47	60,00	7,41	4,47
В тыс. м³	45	42	91	1221	151	91

Сток	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
В % от годового . .	2,95	2,95	3,73	4,47	3,08	2,21	100
В тыс. м³	60	60	76	91	63	45	2036

Решение. Задачей водохозяйственного расчета водохранилища является:

1) определение расчетного притока воды к водохранилищу за год и распределение его по месяцам;

2) определение необходимости и возможности одногодичного регулирования стока;

3) расчет потерь воды из водохранилища на испарение и на фильтрацию;

4) расчет емкости водохранилища;

5) проверка возможности наполнения водохранилища стоком расчетной обеспеченности;

6) расчет трансформированных водохранилищем максимальных расходов снеговых и дождевых вод для определения размеров водосброса.

Расчет выполняем в такой последовательности.

1. Определяем объем годового стока и приток воды в водохранилище. За расчетный принимаем сток маловодного года 85%-ной обеспеченности (см. § 30). Ввиду отсутствия фактических наблю-

дений норму годового стока определяем по карте изолиний $\overline{y} = 48{,}6$ мм (см. рис. 49). Для водосбора площадью 117 км² (по табл. 18) к норме стока вводится поправочный коэффициент $k = 0{,}95$. Тогда $\overline{y} = 0{,}95 \cdot 48{,}6 = 46$ мм $= 0{,}0317 \cdot 46 = 1{,}46$ л/(с·км²). Коэффициент изменчивости годового стока по карте изолиний (см. рис. 50) $C_v = 0{,}65$.

По приложению 2 $k_{85\%} = 0{,}38$. Тогда $y_{85\%} = 0{,}38 \cdot 46 = 17{,}4$ мм. Объем годового стока $W = 17{,}4 \cdot 117 \cdot 10^3 = 2036 \cdot 10^3$ м³.

Объем стока по месяцам рассчитываем в соответствии с заданным процентным распределением стока от годового (см. табл. 49).

2. При сравнении объемов потребления и притока видно, что в июне и июле потребление намного больше притока. Следовательно, необходимость регулирования стока очевидна. Проверим возможность применения одногодичного регулирования из условия, что приток не меньше расхода.

Расход воды из водохранилища равен потреблению или полезному объему (700 тыс. м³) плюс потери воды на испарение и фильтрацию. Если с заведомым преувеличением принять потери равными полезному объему, то общий расход воды составит $700 \cdot 2 = 1400$ тыс. м³, что значительно меньше годового притока 2036 тыс. м³. Следовательно, одногодичное регулирование положительно решает задачу обеспечения потребителей водой.

3. Определяем потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию. Среднюю многолетнюю величину испарения с водной поверхности находим по карте изолиний (см. рис. 11), а именно $\overline{E} = 77{,}0$ см. За расчетный год принимаем среднезасушливый, или 25%-ной обеспеченности.

Для перехода от нормы испарения к расчетной величине 25%-ной обеспеченности вводится переходный коэффициент. Значение его на территории Советского Союза колеблется в небольших пределах (от 1,07 до 1,10). Принимаем $k = 1{,}08$. Тогда $E = 77{,}0 \cdot 1{,}08 = 83$ см. Этой высоте слоя испарения соответствует потеря воды $0{,}83 \cdot 10\,000 = 8{,}3$ тыс. м³ с 1 га зеркала водохранилища.

Рассматриваемое водохранилище по месячному распределению испарения находится в XIII районе. Принимаем расчетную величину испарения в долях от годового согласно табл. 1. Тогда объем испарения с 1 га водной поверхности составит: в марте $0{,}04 \cdot 8{,}3 = 0{,}33$, в апреле $0{,}09 \cdot 8{,}3 = 0{,}75$ тыс. м³ и т. д.

Потери воды на фильтрацию принимаем (по гидрогеологическому заключению) равным 24% в год от общего объема воды, а в среднем 2% в месяц (см. гр. 6 табл. 50).

4. Определение емкости водохранилища начинаем с определения отметки уровня мертвого объема и соответствующего ему объема. За время эксплуатации в мертвом объеме будут отлагаться наносы. Они заполняют водохранилище до определенной отметки. Оставшийся объем воды должен обеспечить нормальные условия рыборазведения. Глубину воды при УМО к концу расчетного периода эксплуатации принимаем не менее 1 м.

Расчетный срок заиления — 20 лет. Вычислим объем наносов, которые поступят в водохранилище за этот период. Водохранилище находится в соседних второй и четвертой зонах со средней мутностью приблизительно равной 325 г/м³. Для малых водотоков при $F = 117$ км² в найденную величину вводится поправочный коэффициент $k = 4$ (см. табл. 44). Отсюда $\rho = 325 \cdot 4 = 1300$ г/м³ $= 1{,}3$ кг/м³. Влекомые наносы принимаем в размере 5% взвешенных, т. е. $0{,}05 \cdot 1{,}3 = 0{,}06$ кг/м³, а в сумме $1{,}30 + 0{,}06 = 1{,}36$ кг/м³. Средний многолетний расход балки

$$Q = \frac{1{,}46 \cdot 117}{1000} = 0{,}17 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Средний многолетний расход наносов вычисляем по формуле (90)

$$\overline{r} = 1{,}36 \cdot 0{,}17 = 0{,}23 \text{ кг/с}.$$

Твердый сток за год определяем по формуле (95)

$$R = 0{,}23 \cdot 31{,}5 \cdot 10^3 = 7245 \text{ т}.$$

Приняв объемный вес донных отложений равным 0,9 т/м³, получим годовой объем наносов

$$R_0 = 7245 : 0{,}9 = 8050 \text{ м}^3.$$

Не все наносы откладываются в водохранилище. Частично они сбрасываются в нижний бьеф. Принимая долю наносов, проходящих транзитом через водохранилище и сбрасываемых в нижний бьеф, $\beta = 0{,}35$ общего их количества, вычисляем объем наносов, оседающих в водохранилище за один год:

$$S_0 = 8050(1 - 0{,}35) = 5230 \text{ м}^3.$$

За 20 лет эксплуатации в водохранилище накопится $W_н = 5230 \cdot 20 = 104\,600$ м³, или округленно 105 тыс. м³ наносов. Этому объему (см. рис. 79) соответствует отметка 95,15 м. Запас глубины воды для рыборазведения принимаем 0,55 м. Следовательно, отметка уровня мертвого объема 95,70 м. Этой отметке по кривой объемов соответствует мертвый объем $V_{м.о} = 280$ тыс. м³.

Отметка УМО 95,70 не является окончательной. Ее следует считать минимальной и уточнить дальнейшими расчетами.

Полный объем водохранилища определяем по формуле (117). Потери воды из водохранилища на испарение E и на фильтрацию f принимаем ориентировочно в размере 30—40% полезного потребления, т. е. $E + f = (0{,}3 \div 0{,}4)V$ (в дальнейших расчетах эти потери будут уточнены). Осадки O_c, выпадающие на поверхность водохранилища за безледовый период, в расчет не принимаем. Они будут создавать некоторый резерв объема. Подставляя в формулу (117) $V_{м.о} = 280$ тыс. м³, $V = 700$ тыс. м³ и $E + f = 0{,}35V =$

$= 0{,}35 \cdot 700 = 245$ тыс. м³, вычисляем приблизительный полный объем водохранилища

$$V = 280 + 700 + 245 = 1225 \text{ тыс. м}^3.$$

Этому объему по кривой объемов соответствует отметка нормального подпорного уровня 97,3; площадь зеркала водохранилища $\omega = 94$ га.

5. Проверка возможности наполнения водохранилища принятой емкости $V = 1225$ тыс. м³ выполнена в табл. 50.

Таблица 50

Водохозяйственный расчет водохранилища одногодичного регулирования

Месяц	Приток, тыс. м³	Полезное потребление, тыс. м³	Остаточный объем + приток − потребление, тыс. м³	Площадь, га	Норма потерь		Объем потерь, тыс. м³			Сброс, тыс. м³	Полный объем к концу месяца, тыс. м³
					фильтрация, %	испарение, тыс. м³ с 1 га	фильтрация	испарение	сумма		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	45	0	147	21,5	2	0	3,0	0	3,0		146
II	42	0	188	26,5	2	0	3,7	0	3,7		184
III	91	0	275	35,5	2	0,33	5,5	11,7	17,2		258
IV	1221	100	1379	100,0	2	0,75	27,6	75	103	51	1225
V	151	100	1276	95,0	2	1,24	25,5	118	143		1133
VI	91	200	1024	85,0	2	1,25	20,5	106	127		897
VII	60	200	757	70,0	2	1,49	15,1	104	119		638
VIII	60	100	598	58,5	2	1,41	11,9	82,5	94,4		504
IX	76	0	580	58,0	2	1,00	11,6	58,0	69,6		510
X	91	0	601	60,0	2	0,58	12,0	34,8	46,8	554	0
XI	63	0	63	11,0	2	0,25	1,3	2,8	4,1		59
XII	45	0	104	16,0	2	0	2,1	0	2,1		102
Год	2036	700			24	8,3	140	593	733	605	

Расчеты начинаем с октября, на конец которого водохранилище полностью опорожняется для отлова рыбы. Емкость водохранилища (см. графу 12) в октябре равняется нулю. В ноябре в водохранилище поступает 63 тыс. м³, полезное потребление отсутствует. В графу 4 записываем остаточный объем от предыдущего месяца плюс приток и минус потребление данного месяца, т. е. $0 + 63 - 0 = 63$ тыс. м³. Этому объему соответствует площадь зеркала водохранилища 11,0 га. Площадь зеркала записываем в графу 5. В соответствии с нормами потерь и данными граф 4 и 5 вычисляем объем потерь. Например, потери на фильтрацию составляют 2% объема $63 \cdot 10^3$ или $63 \cdot \frac{2}{100} = 1{,}3$ тыс. м³ (графа 8). Испарение в ноябре равно 0,25 тыс. м³ с 1 га, а со всей площади $0{,}25 \cdot 11 = 2{,}8$ тыс. м³ (графа 9). Сумма потерь $1{,}3 + 2{,}8 = 4{,}1$ тыс. м³. Объем водохранилища к концу ноября: $63 - 4{,}1 = 58{,}9 \approx 59$ тыс. м³ (графа 12). В такой последовательности про-

должаем расчет до апреля, полный объем к концу которого 1379 — — 103 = 1276 тыс. м³ больше принятого объема водохранилища V = 1225 тыс. м³. Поэтому в графу 12 записываем объем 1225 тыс. м³, а излишек воды 1276—1225 = 51 тыс. м³ заносим в графу 11. Этот объем сбрасывается. Водохранилище к концу апреля наполняется водой до отметки НПУ. Возможность наполнения водохранилища стоком расчетной обеспеченности доказана. Принимая полный объем в конце апреля 1225 тыс. м³, продолжаем расчет до октября включительно. В конце октября объем водохранилища 554 тыс. м³. Но в это время водохранилище опорожняется (в графе 12 стоит нуль, т. е. этот объем сбрасывается), поэтому 554 тыс. м³ записываем в графу 11.

Правильность расчетов проверяем итогами за год. Годовой приток (2036 тыс. м³) расходуется: на полезное потребление (700 тыс. м³), суммарные потери (733 тыс. м³) и сброс (605 тыс. м³), т. е. 2036 — (700,0 + 733,0 + 605,0) = 2. Разница 2000 м³ получена в результате округления отдельных слагаемых.

В приведенных расчетах потери на испарение с водной поверхности несколько завышены, так как площадь зеркала принималась на начало месяца. В конце месяца площадь зеркала меньше, и испарение соответственно должно быть уменьшено. Более точно потери вычисляют по средней площади зеркала, но здесь эти расчеты не приведены, так как они не вносят значительных изменений в вычисленные величины. Таким образом, водохозяйственный расчет малых водохранилищ закончен.

Минимальный объем воды 504 тыс. м³ устанавливается после прекращения забора из водохранилища (в августе). Отметка уровня при этом равна 96,25 м. Вычисленная отметка превышает на 55 см ранее установленную. Окончательно отметку уровня мертвого объема принимаем 95,70 м, чему соответствует мертвый объем 280 тыс. м³ и площадь зеркала водохранилища 35 га. Наибольшая глубина воды до заиления 95,70 — 93,70 = 2,0 м.

Объем водохранилища колеблется от 504 тыс. м³ в августе до 1225 тыс. м³ после весеннего половодья (в апреле).

Объем, заключенный между НПУ и УМО, равен 1225 — 280 = = 945 тыс. м³.

6. Трансформированный максимальный расход весеннего половодья рассчитываем по формуле (87) в следующем порядке.

а. Для определения объема форсировки $W_ф$ устанавливаем отметку УКП — уровня катастрофического паводка (определяемую экономическими расчетами). В нашем упражнении принимаем превышение УКП над НПУ условно 0,5 м. Следовательно, отметка УКП составит 97,3 + 0,5 = 97,8 м.

При этой отметке емкость водохранилища равна 1590 тыс. м³, площадь зеркала 110 га. Объем призмы, заключенной между УКП и НПУ $W_ф$ = 1590 — 1225 = 365 тыс. м³.

б. Проектируемое сооружение по капитальности относится к IV классу. Принимаем расчетную обеспеченность стока и максимальных расходов для этого класса p = 1%.

в. Для расчета объема весеннего стока 1%-ной обеспеченности принимаем определенный выше средний многолетний слой весеннего стока $\overline{y} = 40$ мм и $C_v = 0{,}65$ (см. упражнение 17). По приложению 2 при $C_s = 2C_v$ определяем модульный коэффициент 1%-ной обеспеченности $k_{1\%} = 3{,}09$. Отсюда

$$y_{1\%} = 3{,}09 \cdot 40 = 124 \text{ мм}.$$

Объем стока весеннего половодья 1%-ной обеспеченности

$$W_{1\%} = 124 \cdot 117 \cdot 10^3 = 14\,400 \cdot 10^3 \text{ м}^3.$$

г. Максимальный расход талых вод вычислен в упражнении 17 $Q_{max1\%} = 61{,}3$ м^3/с.

Подставив в формулу (87) значения $Q_{max1\%}$, $W_ф$ и $W_{1\%}$, получаем трансформированный водохранилищем максимальный расход весеннего половодья

$$Q_{сб\,1\%} = \left(1 - \frac{365 \cdot 10^3}{14\,400 \cdot 10^3}\right) \cdot 61{,}3 \approx 46 \text{ м}^3/\text{с}.$$

В упражнении 20 максимальный расход 1%-ной обеспеченности ливневого паводка определен $Q_{max1\%} = 45{,}2$ м^3/с, а объем стока $4914 \cdot 10^3$ м^3. Трансформированный расход

$$Q'_{сб} = \left(1 - \frac{365 \cdot 10^3}{4914 \cdot 10^3}\right) \cdot 45{,}2 = 41{,}8 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Водосбросное сооружение рассчитывается на больший трансформированный расход. В данном случае сооружение должно быть рассчитано на пропуск максимального расхода весеннего половодья 46 м^3/с.

ТЕМА 13. ВОДОМЕРНЫЕ ПОСТЫ И ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ СТВОРЫ

49. Основные виды гидрологических наблюдательных пунктов

Государственная гидрометеорологическая сеть состоит из основных и специальных станций и постов.

Основные станции изучают гидрологический режим рек, озер, водохранилищ и болот. Они ведут многолетние наблюдения.

Специальные станции (посты) исследуют специальные вопросы, не изучаемые основными станциями. Например, открыт ряд озерных станций на крупных водохранилищах. Срок действия специальных станций устанавливается в зависимости от поставленных перед ними задач.

Гидрологические станции бывают двух разрядов. Станции I разряда изучают гидрологический режим водных объектов и руководят работами станций II разряда и гидрологических постов, обобщают материалы наблюдений и подготавливают их к опубликованию. Станции II разряда ведут наблюдения и гидрометрические работы, обрабатывают материалы полевых измерений и выдают необходимые сведения заинтересованным организациям и учреждениям самостоятельно или через станции I разряда.

Речные посты бывают I, II и III разрядов. Посты I разряда ведут наблюдения за уровнем и температурой воды, ледяным покровом, измеряют расходы воды. Отдельные посты измеряют расходы взвешенных и донных наносов. Посты II разряда делают ту же работу, за исключением измерений расходов воды, взвешенных и донных наносов. Посты III разряда ведут наблюдения за уровнем, температурой воды и ледяным покровом. Кроме речных, есть специальные посты: озерные, морские, стоковые, устьевые, снего-лавинные и болотные.

Для глубокого изучения крупных гидрологических проблем и разработки методики гидрометрических работ организованы лаборатории. Например, Валдайская гидрологическая лаборатория занимается изучением процессов водного баланса. Обсерватории, организованные на крупных водохранилищах (Куйбышевском, Волгоградском и др.), изучают явления, связанные с режимом водохранилищ (водный баланс, волнение, переработка берегов и т. д.).

50. Водомерные посты

Типы водомерных постов. По способу устройства водомерные посты бывают простые, передаточные и саморегистрирующие. Простые посты в свою очередь подразделяются на реечные, свайные и смешанные.

Реечные водомерные посты состоят из одной или нескольких надежно закрепленных реек. Обычно рейки крепят к забитым в грунт сваям, к стенкам набережных, устоям и быкам мостов (рис. 80) в защищенном от ледохода и судов месте. Для получения точного отсчета уровня, например во время волнения, рейку устанавливают в ковше берега, соединенном с руслом канавкой (рис. 81).

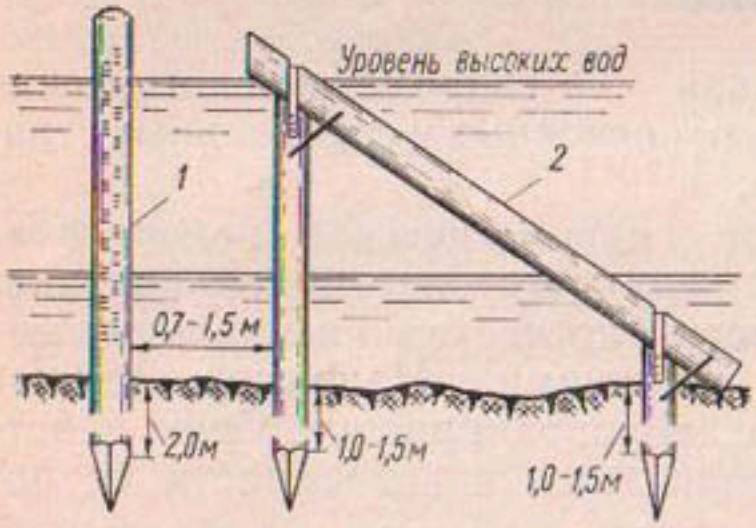


Рис. 80. Реечный водомерный пост.
1 — рейка укреплена на свае; *2* — ледорез для защиты рейки от плавающих предметов.

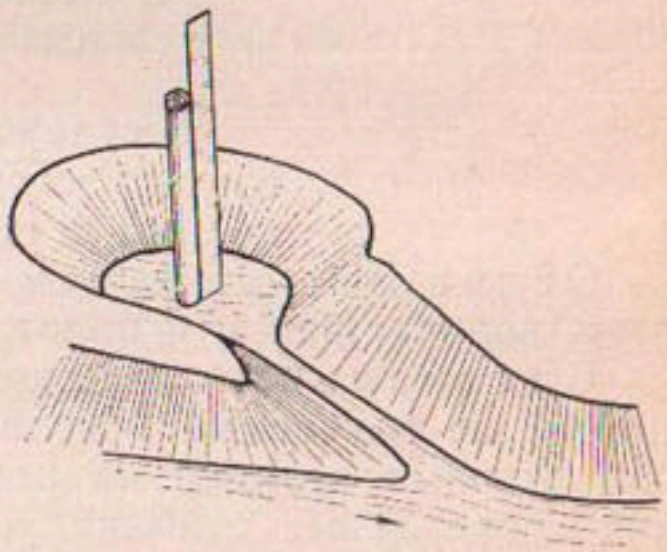


Рис. 81. Рейка в ковше.

На деревянных рейках деления через 1—2 см закрашены масляной или эмалевой краской. Применяют и металлические рейки — чугунные и набивные из тонкого листового или оцинкованного железа с прорезанными делениями.

Часто пользуются наклонными рейками, у которых деревянный брус сечением 12×20 см укреплен на сваях по откосу берега (рис. 82 *а*). Каждое деление наклонной рейки $a = \frac{1}{\sin\alpha}$ (рис. 82 *б*). Эти рейки лучше вертикальных защищены от ледохода; они не создают подпора; отсчет по ним более точен.

Высоту уровня воды на водомерном посту измеряют от нуля стационарной рейки. Плоскость, от которой отсчитывают уровень, называют нулем наблюдений. Помимо нуля наблюдений, назначают нуль графика поста.

Возвышение нуля рейки над нулем графика называется приводкой к нулю графика поста.

Свайные водомерные посты состоят из ряда свай, забитых в дно и берег перпендикулярно к среднему направлению течения воды (рис. 83). Сваи нумеруют в направлении от репера

водомерного поста, устанавливаемого в незатопляемой зоне берега.

Превышение между головками соседних свай должно быть не больше 0,7 м, а на очень пологих берегах 0,2—0,4 м (для удобного подхода). Сваи делают диаметром 15—25 см из дуба, лиственницы, сосны. Забивают их на глубину 1,5 м. Применяют и металлические (из труб, железнодорожных рельсов, чугунные, с винтовыми лопастями) и бетонные сваи. В щебенчатых грунтах сваи с крестовиной закапывают на глубину 1—1,5 м. Головки свай спи-

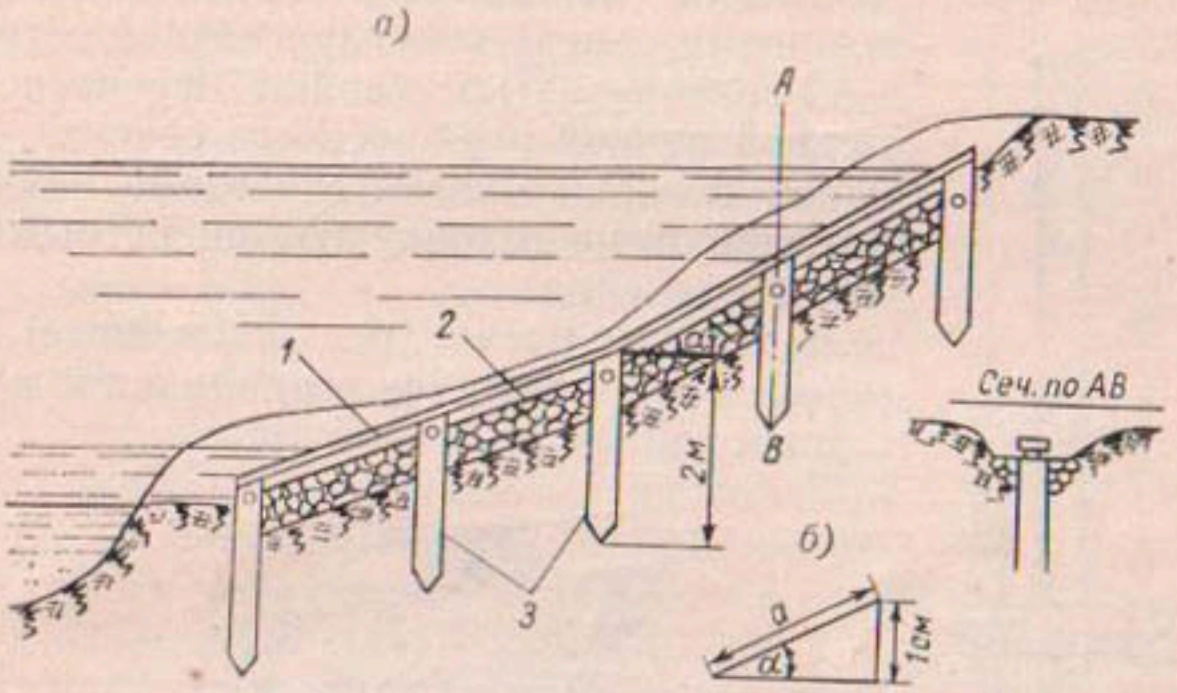


Рис. 82. *а* — схема установки наклонной рейки.
1 — наклонная рейка, *2* — щебенчатая подготовка, *3* — сваи.
б — расчет делений наклонной рейки.

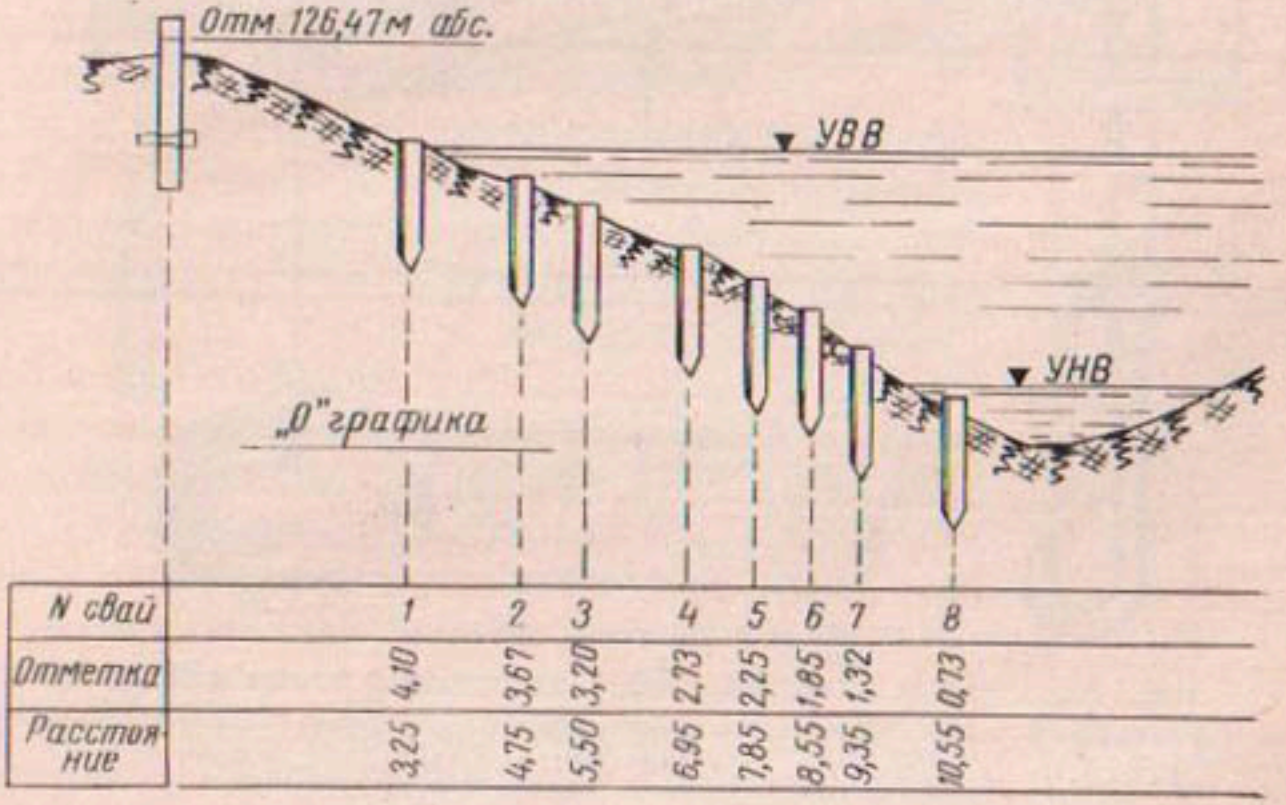


Рис. 83. Свайный водомерный пост (расстояния даны от репера водомерного поста).
Отметки — над нулем графика.

ливают горизонтально. В центре головки сваи забивают корабельный гвоздь. Номера свай наносят черной или красной краской на торце.

После установки свай измеряют расстояние между ними; сваи нивелируют и «привязывают» к отметке репера водомерного поста, который в свою очередь «привязывают» к ближайшему реперу государственной сети.

Уровень воды измеряют переносной водомерной рейкой ромбического сечения, нижний конец которой окован железом. Рейку устанавливают на головку гвоздя острым ребром против течения.

Смешанные (реечно-свайные) водомерные посты устанавливают на реках с широкой затопляемой поймой.

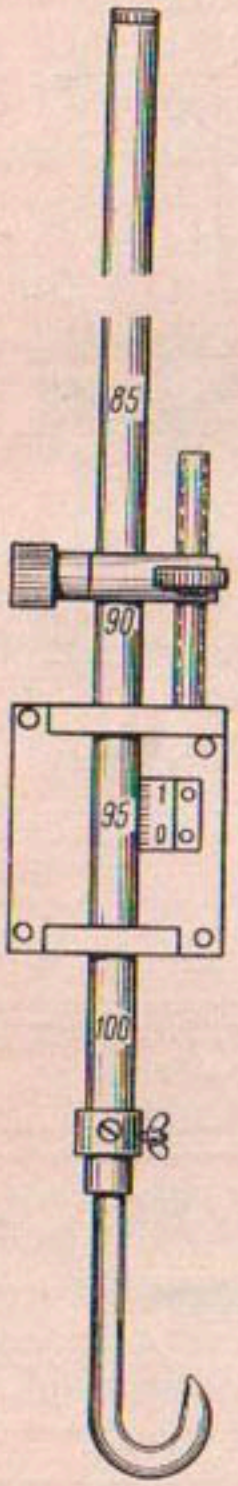


Рис. 84. Крючковая рейка.

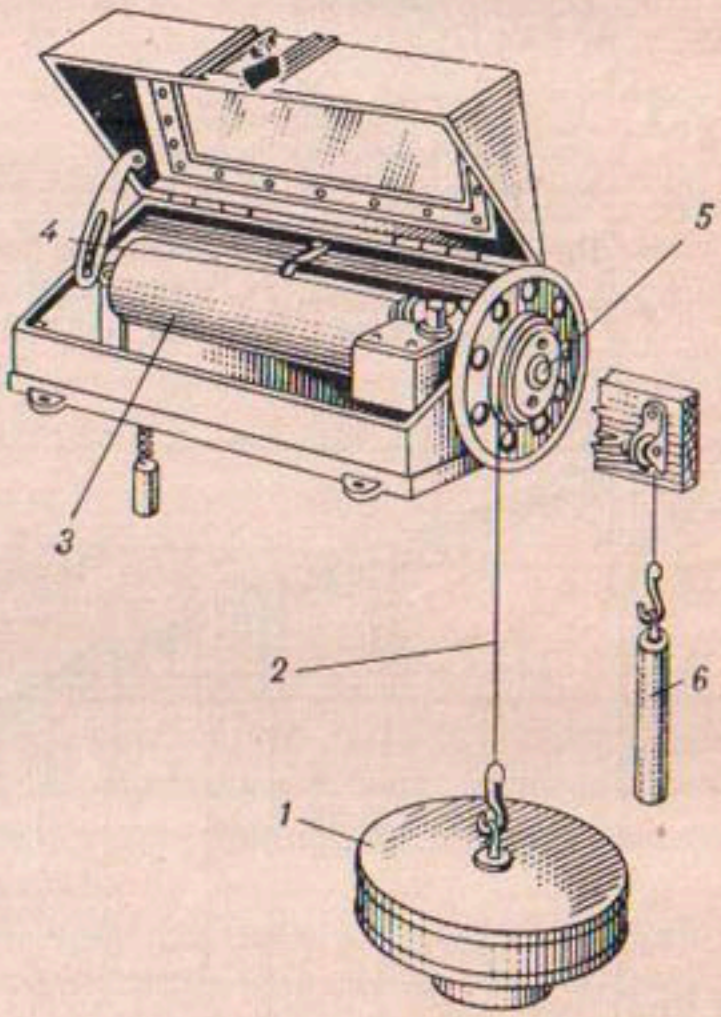


Рис. 85. Самописец уровня «Валдай».
1 — пустотелый поплавок; *2* — провод; *3* — барабан; *4* — каретка с пером; *5* — колесо; *6* — противовес.

Приборы для точного отсчета уровня. К таким приборам относятся крючковые и игольчатые рейки ГГИ. Они дают точный отсчет при установке острия крючка или иглы на поверхность воды (рис. 84). В трубку с делениями через 1 см входит выдвижной стержень с крючком. Уровень отсчитывают по рейке в сантиметрах, а по планке в миллиметрах. На игольчатой рейке есть дополнительный нониус, позволяющий сделать отсчет в 0,1 мм.

Игольчатые рейки применяют в лабораториях и на испарительных станциях.

Самописцы уровней — лимниграфы автоматически записывают колебания уровня. Их устанавливают на реках, озерах и водохранилищах.

В СССР широко применяется лимниграф «Валдай» (рис. 85). Прибор состоит из пустотелого поплавка *1*, подвешенного к мягкому проводу *2*, переброшенному через колесо *5*. К противоположному концу подвешен противовес *6*. Во время измерения уровня при подъеме или опускании поплавка шарики, впрессованные в трос, попадают в лунки поплавкового колеса, начинает вращаться барабан *3*, на который надета бумажная лента.

Часовой механизм работает от гиревого прибора. Гиря по мере вращения барабана опускается. При этом перемещается каретка с пером *4*. Поплавковое колесо состоит из двух дисков диаметром 300 и 600 мм. Изменение уровня воды записывается в масштабах 1 : 1; 1 : 2; 1 : 5 и 1 : 10. Самописец устанавливают на берегу в специальной будке над колодцем. Вода к колодцу подводится по трубе, заложенной ниже самого низкого уровня воды. Отметки уровней контролируются по водомерному посту.

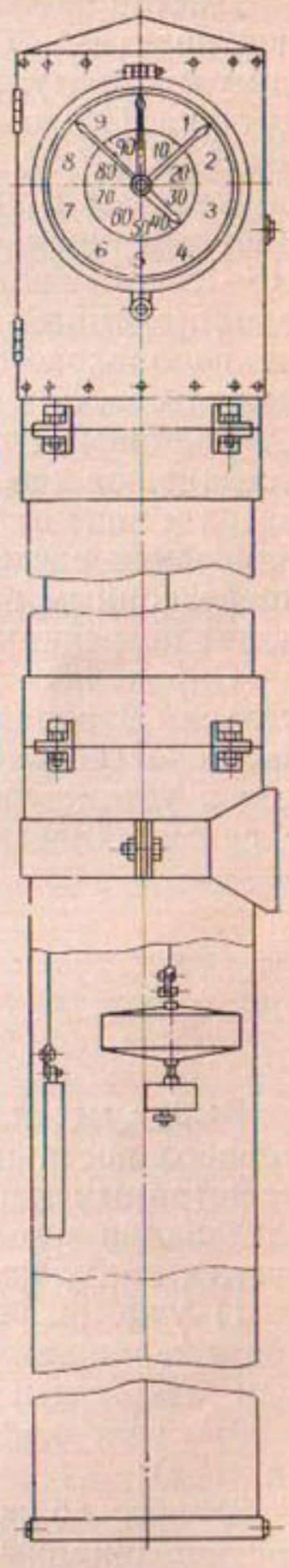


Рис. 86. Указатель уровня У-52.

Рейки для регистрации максимальных и минимальных уровней. В малонаселенных районах, а также на постоянных водомерных постах с резким колебанием уровней устанавливают автоматические максимальные и минимальные рейки различных конструкций.

Наиболее совершенной конструкцией является стрелочный указатель уровня У-52 (рис. 86). В нем есть поплавок, соединенный с противовесом при помощи троса, перекинутого через поплавковое колесо. Последнее надето на выходную ось редуктора, имеющего две стрелки для отсчета метров и сантиметров, показанных на циферблате. Максимальные и минимальные уровни между наблюдениями отмечаются двумя особыми стрелками, которые перемещаются при помощи штифта, укрепленного на стрелке, указывающей метры.

Применение радиоактивных изотопов для измерения уровней. Прибор, называемый гамма-уровнемером, состоит из источника излучения (датчик уровня), приемника (детектор) и счетного механизма. Источником является радиоактивный изотоп, помещенный на по-

плавке. Интенсивность воздействия излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и приемником. При опускании уровня расстояние увеличивается, воздействие гамма-лучей ослабляется.

Дистанционные уровнемеры широко применяют в ирригационной практике. Такие приборы передают показания уровня к счетному аппарату, который находится на значительном расстоянии от датчика. Поэтому их и называют дистанционными.

В СССР используются конструкции, разработанные Д. П. Колодкевичем и Ленинградским институтом телемеханики. Дистанционные приборы передают показания уровня на расстояние до 10—15 км. Уровнемер Колодкевича, который может передать на один приемный аппарат измерения из нескольких пунктов, состоит из поплавкового механизма, механизма передачи электрических импульсов, линии передачи и приемника.

Уклонные посты. Для определения уклонов поверхности воды устраивают два уклонных водомерных поста на равном расстоянии вверх и вниз от гидрометрического створа, в котором производится измерение расходов воды. Сваи водомерных постов нивелируются прецезионным нивелиром. Отсчеты уровней по этим сваям производят по рейкам.

Определить уклон можно с помощью временных урезных кольев. В заранее намеченных местах по сигналу одновременно забивают колья вровень с уровнем воды. Во избежание волнения колья устанавливают на берегу в ямках, соединенных канавками с рекой. Нивелировкой определяют превышения между кольями.

51. Устройство водомерных постов и гидрометрических створов

Выбор места и типа водомерного поста. Место устройства водомерного поста предварительно намечают по имеющимся крупномасштабным картам. Положение и тип поста уточняют путем обследования реки на протяжении 5—10 км. При этом руководствуются следующими техническими условиями:

1) участок реки в месте расположения водомерного поста на протяжении трехкратной ширины русла должен быть прямолинейным, открытым, доступным для наблюдений;

2) русло должно быть устойчивым (не размываться и не заиляться);

3) пост должен располагаться на расстоянии не меньше пятикратной ширины реки от устья ближайших притоков и вне сферы влияния подпоров от заторов льда и гидротехнических сооружений (за исключением тех случаев, когда пост устанавливают специально для изучения режима подпорных бьефов);

4) пост нужно устраивать вблизи от населенных пунктов, в месте, защищенном от ледохода;

5) угол наклона береговой линии к горизонту должен быть в пределах 20—40°. Очень крутые и очень пологие берега неудобны как для устройства поста, так и для его эксплуатации.

При выборе типа поста необходимо учитывать его назначение, срок службы, особенности режима водного объекта и требуемую точность наблюдений. Как было указано выше, конструкция поста определяется характером русла, поймы и состоянием берегов.

Выбор места гидрометрического створа. На гидрометрических створах измеряют расходы воды и наносов. Поэтому здесь должна быть высокая точность измерения площадей живых сечений, скоростей течения воды и т. д. Из этих соображений при выборе створа руководствуются следующим:

1) течение воды должно быть параллельноструйным, без заводей, косых и обратных течений и порогов;

2) дно реки не должно иметь значительные выступы, мешающие измерению глубин и скоростей (камыши, водоросли, деревья и т. д.). В противном случае камни удаляют, лес вырубают, а траву выкашивают;

3) на реках с быстрым течением воды створы устраивают на широких участках русла с замедленными скоростями, и наоборот, при очень медленном течении створы разбивают на узких участках, где скорости более заметны;

4) продольный уклон, ширина и глубина реки должны быть по возможности однообразными, а поперечные профили — правильной, корытообразной формы.

Топографические и промерные работы. При устройстве постов производят буссольно-глазомерную съемку, а при оборудовании гидрометрических створов — теодолитно-нивелирную.

Границы съемки определяются шириной реки и отметкой наивысшего уровня воды. Ширину участка съемки принимают с расчетом превышения границ съемки над наивысшей отметкой воды на 1 м. Длину участка L принимают в зависимости от ширины русла. При ширине b, меньшей 100 м, $L = 5b$, но не меньше 100 м; при $b > 100$ м, $L = (2 \div 3)b$, но не меньше ширины поймы.

Съемку выполняют следующим образом (рис. 87). Вдоль беспойменного берега прокладывают магистральный ход (базис). Измерение длины магистрали и нивелирование производят дважды. От магистрали разбивают поперечные профили: один по створу водомерного поста и три—пять поперечников выше и ниже него.

Все поперечные профили нивелируют через долину от границ съемки урезов воды; глубины промеряют; дополнительные плановые и высотные подробности снимают мензулой. Если промеры выполняют при разных уровнях, то для приведения их к постоянному уровню ведут водомерные наблюдения. Во все промеры вносят положительные или отрицательные поправки, равные величине отклонения наблюденного уровня от принятого за основной при съемке.

Для нивелирования мгновенного продольного уклона воды во

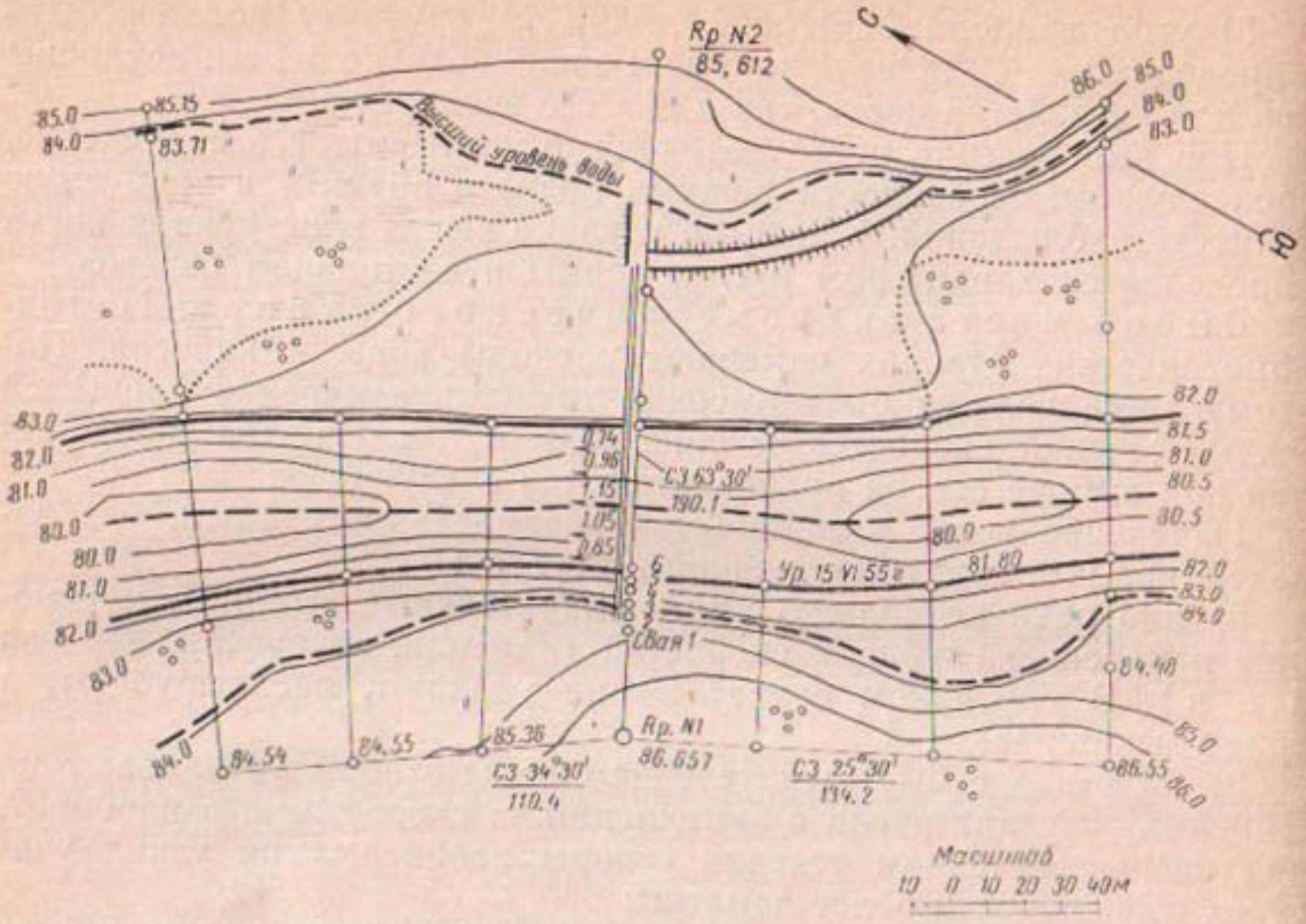


Рис. 87. План участка реки.

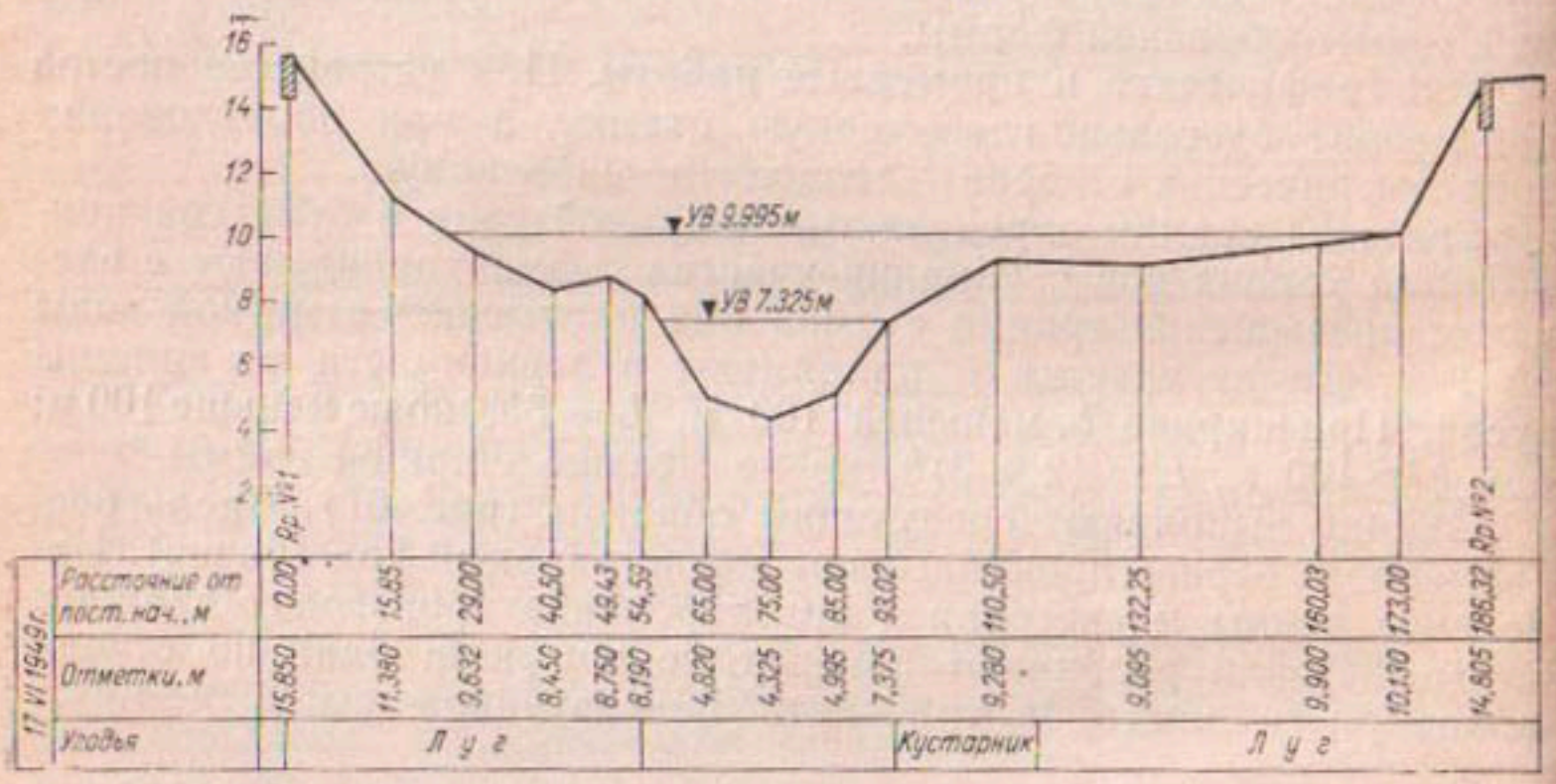


Рис. 88. Поперечный профиль по линии гидрометрического створа.

всех поперечных профилях одновременно по сигналу забивают колья на уровне воды.

На основании материалов съемки составляют план в горизонталях (рис. 87), профили реки по водомерному посту и гидрометрическому створу (рис. 88).

Устройство и оборудование постов. На поперечном профиле проектируют расположение реперов, свай, реек и других установок водомерного поста, после чего их переносят в натуру. На одном берегу устанавливают репер, а на противоположном — столб; по ним определяют направление створа водомерного поста. На этой линии колышками размечают места установок свай, реек и других устройств.

Все установленные репера и сваи дважды нивелируют. Проводят привязку к ближайшим реперам и маркам государственной сети, устанавливают отметку нуля графика.

Водомерный пост обеспечивается наставлением для производства наблюдений, бланками, часами, фонарем, рейками переносными — снегомерной, ледомерной и шугомерной.

Устройство створов. Работа по оборудованию гидрометрических створов состоит из следующих операций: 1) выбора направления створа; 2) закрепления створа; 3) съемки участка; 4) оборудования створа плавучими средствами.

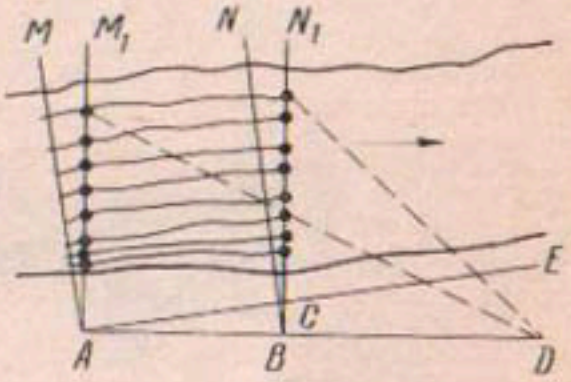


Рис. 89. Определение направления гидрометрического створа.

Направление створа должно быть перпендикулярным к направлению течения воды в русле. С этой целью на берегу реки (рис. 89) разбивают базис ABD параллельно берегу. Из точек A и B восстанавливают перпендикуляры AM_1 и BN_1. Линии AM_1 и BN_1 закрепляют тремя вехами каждую. На базисе в точке D устанавливают угломерный инструмент (теодолит или мензулу). Нуль лимба совмещают с направлением базиса. Из лодки пускают последовательно ряд поплавков, которые проходят через створы AM_1 и BN_1 в разных точках. Поплавки в этих точках засекают инструментом. О моменте прохождения поплавков через створы сигнализируют наблюдатели, находящиеся в точках A и B. Поплавки должны быть пущены так, чтобы они равномерно распределялись по всей ширине реки. Направления хода поплавков переносят на план, после чего уточняют направление базиса ACE, параллельное среднему направлению хода поплавков. Створ BN разбивают перпендикулярно базису AE.

Створ закрепляют двумя реперами на правом и левом берегах. На широких реках, кроме этого, устанавливают по два створных знака (вехи) на каждом берегу.[1]

Для производства гидрометрических работ в створе устанавливают перекидные или подвесные мостики, используют лодки, паромы и подвесные люльки.

Мостики не должны создавать подпора, а промежуточные опоры не должны искажать направление и скорость течения. На

[1] При работе на очень широких реках перпендикуляры не разбивают. Для съемки направления течения на базисе устанавливают два инструмента, а иногда и третий на противоположном берегу. Место прохождения поплавка определяют одновременно всеми инструментами.

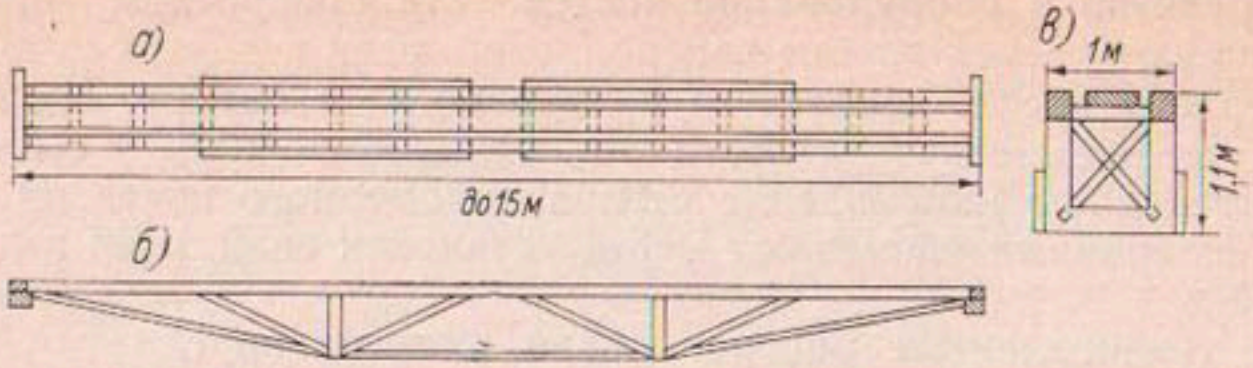


Рис. 90. Перекидной мостик.
а — план; *б* — фасад; *в* — поперечный разрез.

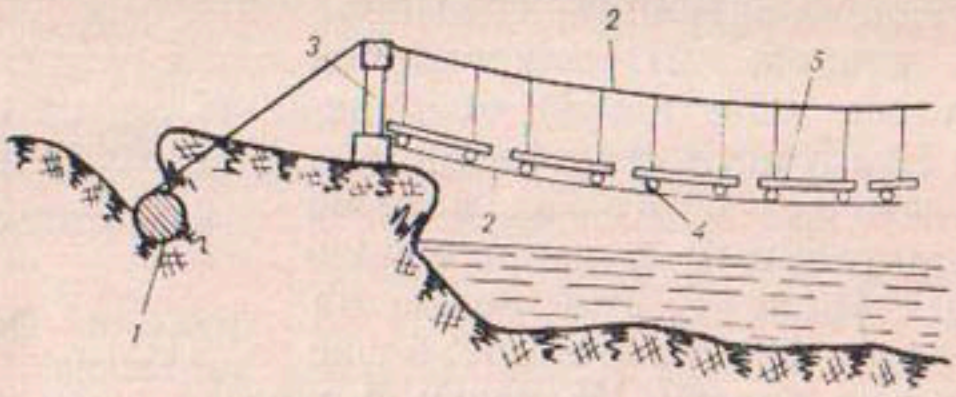


Рис. 91. Подвесной мостик.
1 — мертвый якорь; *2* — тросы; *3* — подпорная рама; *4* — бруски; *5* — настил.

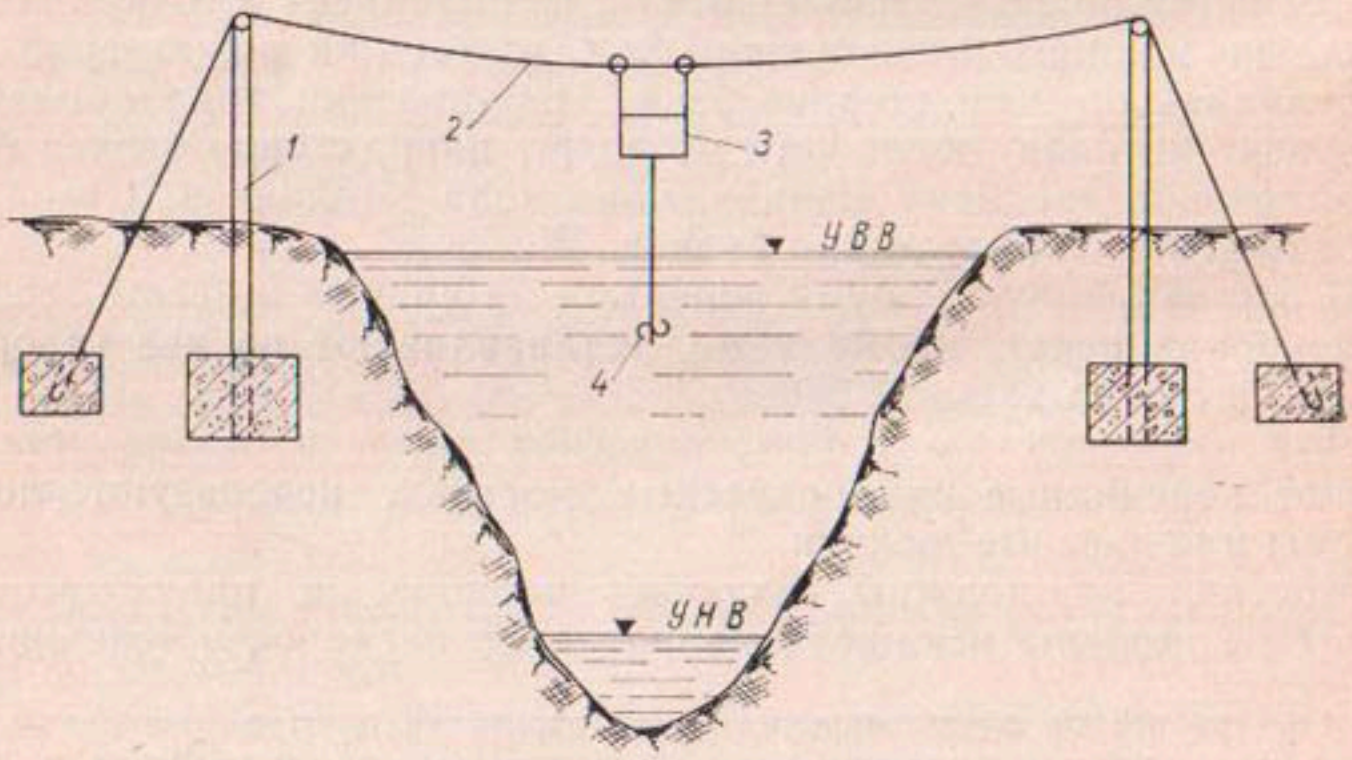


Рис. 92. Подвесная люлька.
1 — стойка; *2* — перекидной трос; *3* — люлька; *4* — вертушка.

узких реках и каналах шириной до 15 м устраивают перекидные мостики (рис. 90).

При ширине русла, превышающей 15 м, используют подвесные мостики (рис. 91).

На реках с быстрым течением, резкими колебаниями уровней и высокими берегами применяют подвесные люльки (рис. 92). В люльке обычно помещаются один-два человека с необходимыми гидрометрическими приборами.

Дистанционные измерения на створах (глубин, скоростей течения и взятие проб воды) производятся с помощью гидрометрической установки ГР-64 (рис. 93).

На широких (до 120—150 м) и глубоких реках устраивают паромы из двух лодок, соединенных рамой и помостом (рис. 94). Через реку перебрасывают разметочный ($d = 4$ мм) и ездовой ($d = 18 \div 20$ мм) тросы. На одном берегу ездовой трос закрепляют наглухо (на мертвый якорь). Другой конец троса перекидывают через барабан, при помощи которого натягивают трос. На ездовой трос надевают бегучий блок с петлей, к которой прикрепляют канат от парома. От второй лодки канат перекинут к кольцу, передвигающемуся по ездовому тросу. Натягивая оба каната, паром устанавливают в нужной точке створа. Отпустив один из канатов и действуя рулем, паром передвигают вдоль троса по принципу самолета.

На реках шириной более 150—200 м паромы закрепляют якорями. Якорь, к которому паром прикрепляется на длин-

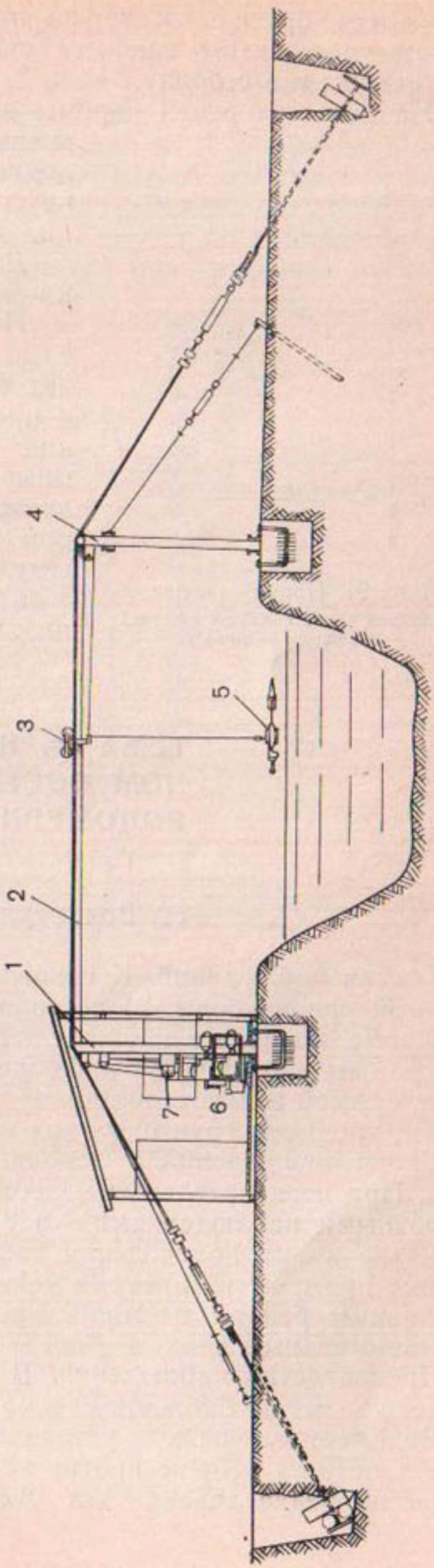


Рис. 93. Дистанционная гидрометрическая установка.
1 и *4* — стойки; *2* — трос; *3* — каретка; *5* — вертушка; *6* — лебедка; *7* — электродвигатель.

ном тросе, бросают выше по течению. От боковых перемещений паром удерживают еще два якоря, которые забрасывают вниз по течению и в сторону.

На больших реках паромы и понтоны перемещаются при помощи моторных судов. На паромах и лодках должны быть спасательные круги, багры, сирены, шесты и флажки.

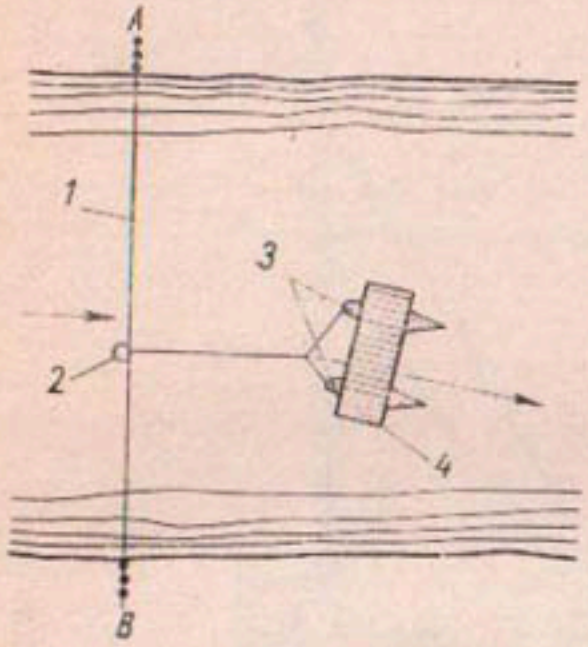


Рис. 94. Паром-самолет.
1 — ездовой трос; *2* — блок с петлей; *3* — лодка; *4* — помост.

Для зимних работ используют будки-теплушки.

Паспорт водомерного поста. При открытии поста составляют акт в присутствии наблюдателя поста и представителя местной администрации (сельсовета, райисполкома). Помимо этого, заполняют паспорт. Он является основным документом, в котором фиксируются все сведения относительно характера реки и водосбора, о приборах и установках поста, сроках наблюдений и т. д.

ТЕМА 14. НАБЛЮДЕНИЯ НА ВОДОМЕРНОМ ПОСТУ. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ВОДОМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

52. Водомерные наблюдения

Состав наблюдений. К основным относятся наблюдения: 1) за высотой уровня воды, 2) состоянием погоды и реки (визуально).

Кроме основных наблюдений, на постах (в зависимости от программы работ) ведут наблюдения за температурой воды и воздуха, суммой осадков, толщиной льда, шуги и снега, промерзанием почвы, уровнями грунтовых вод и т. д.

Сроки наблюдений. Основные наблюдения проводят в 8 и 20 ч. При незначительных колебаниях уровня ограничиваются однократными наблюдениями — в 8 ч утра. Дополнительные наблюдения во время половодья и дождевых паводков проводят через равные промежутки времени между сроками наблюдений. По максимальным рейкам на горных реках отсчеты делают ежедневно; по минимальным рейкам — после низкой межени.

Производство наблюдений. В установленный срок производят отсчет уровня по ближайшей к урезу воды свае.

Водомерную рейку устанавливают отвесно над шляпкой гвоздя острым ребром против течения или волны. В случае волнения по рейке делают два отсчета — по гребню и основанию

волны. Из обоих отсчетов берут средний. Если уровень опускается ниже головки сваи (свая обсыхает), то перед тем, как перейти на ближайшую затопленную, не менее двух раз производят одновременно наблюдения по двум соседним сваям.

При наличии самописцев уровня записи на ленте периодически сверяют с данными водомерного поста. Данные наблюдений водомерного поста заносят в книжку и одновременно делают засечку на ленте лимниграфа, куда записывают дату, срок и наблюденную высоту уровня. Такие же записи делают при установке и снятии ленты.

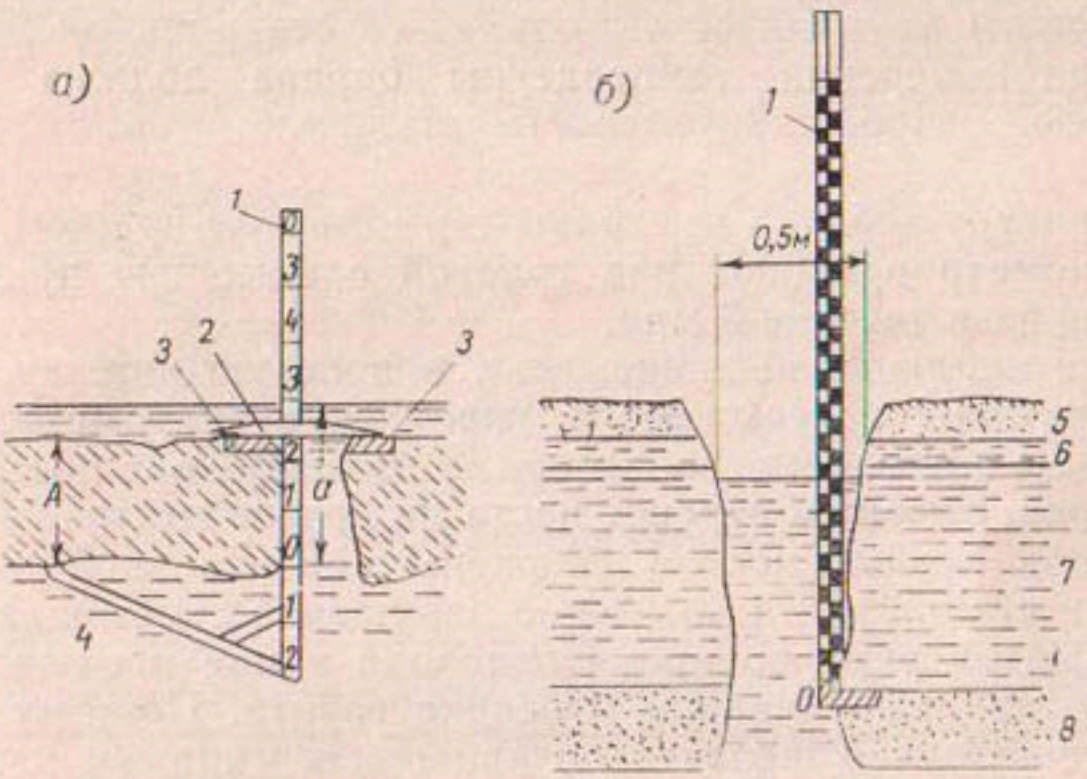


Рис. 95. Ледомерные рейки.

а — для измерений при намерзании льда снизу; *б* — при отсутствии наростов льда; *1* — рейка, *2* — движок, *3* — вмороженные дощечки, *4* — подкос, *5* — рыхлый снег, *6* — снеговой лед, *7* — плотный прозрачный лед, *8* — шуга.

Из визуальных наблюдений записывают следующие: состояние погоды (ясно, пасмурно, ветер слабый, умеренный, сильный, очень сильный, по течению, против течения), состояние реки выше и ниже поста, открытие плотин, мутность воды. Зимой и весной ведут наблюдения за состоянием реки: появились ли шуга, забереги, подвижки льда, сало. Фиксируют начало и конец ледохода, ледостава, наличие полыней, заторов и зажоров.

Для измерения толщины льда вырубают лунки размером 40 × × 70 см на расстоянии 2 м от последней сваи и посредине реки. В лед заподлицо вмораживают две дощечки (рис. 95 *а*). Так как лед намерзает снизу, то его толщину измеряют специальной ледомерной рейкой, у которой есть выступ на уровне нуля. Рейку (*1* на рис. 95 *а*) опускают в прорубь так, что конец подкоса *4* касается нижней не намерзшей поверхности льда. После отвесной установки рейки движок *2* опускают на дощечки *3* проруби и закрепляют в таком положении. Затем рейку вынимают и снимают отсчет по нижней грани движка. В журнал запи-

сывают толщину льда и его строение (плотный, кристаллический, снеговой).

В свежевырубленных лунках, где наростов льда нет, можно пользоваться рейкой, показанной на рис. 95 *б*.

Одновременно с толщиной льда отсчитывают уровень воды по ледомерной рейке. Отсчет положительный, если уровень воды стоит в лунке или поднимается выше нее, и отрицательный (красные деления), когда уровень воды ниже кромки льда.

Помимо толщины льда и уровня воды, измеряют толщину шуги, если она есть. Температуру воды определяют водным термометром, имеющим металлическую оправу со стаканчиком на нижнем конце. При измерении температуры оправа должна быть покрыта водой. Продолжительность выдержки термометра в воде 3 мин.

Температуру воздуха измеряют термометром-пращом. Для этой цели термометр вращают над головой с помощью привязанного к нему шнура в течение 3 мин.

Данные наблюдений записывают в полевую книжку, один экземпляр которой пересылают в управление гидрометеорологической службы или ведомство, которому принадлежит пост.

Проверка, ремонт и перенос поста на другое место. Указания по уходу за водомерным постом изложены в специальной инструкции. При эксплуатации поста возможно нарушение отметок свай и реек после вскрытия реки, во время ледохода и при прохождении высоких вод, при выпучивании и осадке грунта. Поэтому проверку отметок сооружений желательно проводить минимум два раза до паводка и после него. При проверке нивелируют постоянные сваи, рейки, репера, временные сваи, установленные наблюдателем, и створ до уровня высоких вод. Контролируют регулярность и правильность наблюдений. Результаты выполненных при проверке работ заносят в журнал и в паспорт водомерного поста.

При ремонте водпоста нумерацию свай не меняют. При замене на сваи ставят прежний номер, добавляя букву «*а*».

Водпост переносят на новое место, если производство наблюдений за уровнями становится нерациональным. Это делают в следующих случаях: а) существует угроза разрушения постовых устройств (вследствие подмыва берега); б) основное русло заиляется и превращается во второстепенный поток; в) русло блуждает; г) дно изменяется в результате землечерпания; д) строят гидросооружения, из-за которых невозможно учитывать сток в существующем створе.

При переносе поста следует произвести привязку реперов старого и нового постов, определить падение уровня между ними. Отметку нуля графика нового поста назначают, как и для старого поста, с поправкой на падение уровня.

Если падение уровня на участке между постами превышает 5—10 см, то в течение полугода на обоих постах ведут одновременные наблюдения, охватывающие полностью фазы паводка и межени.

53. Обработка водомерных наблюдений

Первичная обработка водомерных наблюдений. Данные наблюдений за уровнями должны ежедневно обрабатываться наблюдателем поста. Все отсчеты приводят к нулю графика. Для этого к отсчету по той или иной рейке или свае прибавляют разность высот между головкой сваи и нулем графика. Например, на свае сделан отсчет 34 см. Превышение сваи над нулем, т. е. приводка, составляет 2,36 м. Следовательно, наблюденный уровень над нулем графика равен $34 + 236 = 270$ см.

Превышение свай над нулем графика не является постоянной величиной. Высотное положение свай может меняться вследствие повреждения их ледоходом, сплавом леса и т. д. Контрольные же

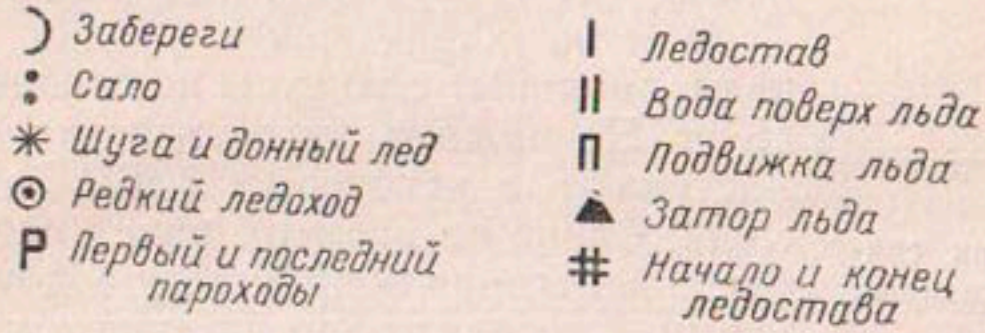


Рис. 96. Условные обозначения.

нивелировки проводят до и после происшедших изменений. Поэтому при обработке наблюдений необходимо по записям в журналах установить дату изменения приводок, а новые приводки относят к этим датам.

Если наблюдения производятся один раз в сутки, то эти данные переносятся и в сводную ведомость. Если же наблюдения ведутся несколько раз, то вычисляются среднеарифметические их значения. По средним суточным данным вычисляются средние месячные и средние годовые уровни.

В сводных годовых таблицах (см. табл. 51) фазы зимнего режима выражают условными обозначениями (рис. 96).

В примечаниях к ведомости записывают особые явления — случаи пересыхания, промерзания реки выше и ниже поста, заторы, забор воды на орошение и т. д.

По приведенным данным строят график колебаний уровней (см. рис. 98). Кроме уровней, на график наносят температуру воды, нарастание толщины ледяного покрова и другие наблюденные данные. Если на реке два или больше постов, можно на одном чертеже поместить совмещенные графики уровней на всех постах. На одном листе можно вычертить графики за несколько лет.

Обработку наблюдений самописцев уровней выполняют следующим образом. Ленту разбивают на отрезки, число которых зависит от характера изменения уровней. При частых колебаниях уровня учитывают впадины, места изменения интенсивности нарастания и спада. По ближайшим засечкам на ленте, сделанным во время наблюдений, устанавливают фактическую продолжитель-

ность между ними (по данным записи наблюдателя) в часах и минутах и отсчитанный промежуток времени по масштабу ленты.

Обнаруженную погрешность распределяют между этими засечками. Таким же путем вносят поправки и в уровни воды, зарегистрированные самописцем. На основании этих данных составляют ведомость уровней.

Восстановление недостающих уровней воды. Очертания совмещенных графиков уровней для водомерных постов одной и той же реки очень схожи между собой, особенно если эти посты находятся на близком расстоянии. Ход графика нарушается, если в промежутке между постами вода расходуется на орошение или другие цели или если на участке впадают значительные притоки, имеются подпорные сооружения (плотины) и т. д.

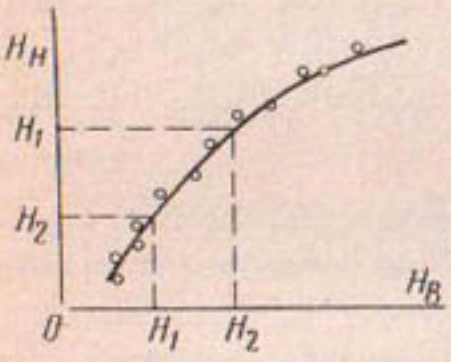


Рис. 97. **График связи соответственных уровней.**

Обычно характерные уровни (отдельные пики, впадины) сдвинуты по отношению друг к другу. На нижнем посту характерные уровни наступают с некоторым опозданием во времени. Сдвиг по времени равен продолжительности добегания воды между водомерными постами. Следовательно, по переломным точкам можно определить скорость добегания воды, разделив расстояние между постами на продолжительность добегания, или, что то же, на сдвиг этих точек по времени. Уровни одинаковых фаз режима реки на соседних водомерных постах называются соответственными.

Пользуясь соответственными уровнями, можно составить график связи между ними (рис. 97). По этому графику по уровням одного поста можно восстановить недостающие уровни другого поста.

Графики служат и для прогноза уровней нижерасположенного поста по наблюденным уровням верхнего поста.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите виды гидрологических станций и постов. Каковы их задачи?
2. Как устроены различные виды водомерных постов? Чем обусловливается то или иное устройство водомерного поста?
3. Что такое нуль наблюдений и нуль графика?
4. Как вычислить размер одного деления (1 см, 1 м) на наклонной рейке при угле наклона $\alpha = 20°$?
5. Как сделать приводку наблюденных уровней на свайном водомерном посту к уровням над нулем графика?
6. Какие вы знаете водомерные устройства и приборы для обычных и точных наблюдений?
7. Какова схема работы самописца уровней?
8. Как определяют уклон поверхности воды?
9. Какие основные требования предъявляют к участку реки при устройстве водомерного поста и рабочего створа?
10. Как проводят съемку участка реки для устройства водомерного поста?
11. Как оборудовать створ для измерения расходов воды?
12. Как производят водомерные наблюдения?

13. Как измеряют толщину льда на водомерном посту?
14. В чем заключается обработка водомерных наблюдений?
15. Какие уровни называются соответственными и как они используются при восстановлении недостающих наблюдений?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 26. Обработать материалы наблюдений за уровнем воды.

Требуется: 1) построить график колебаний уровней; 2) составить таблицы и 3) построить графики повторяемости (частоты) и продолжительности стояния (обеспеченности) уровней воды.

Дано: ежедневные уровни воды над нулем графика р. Псел у с. Запселья за 1955 г. (табл. 51).

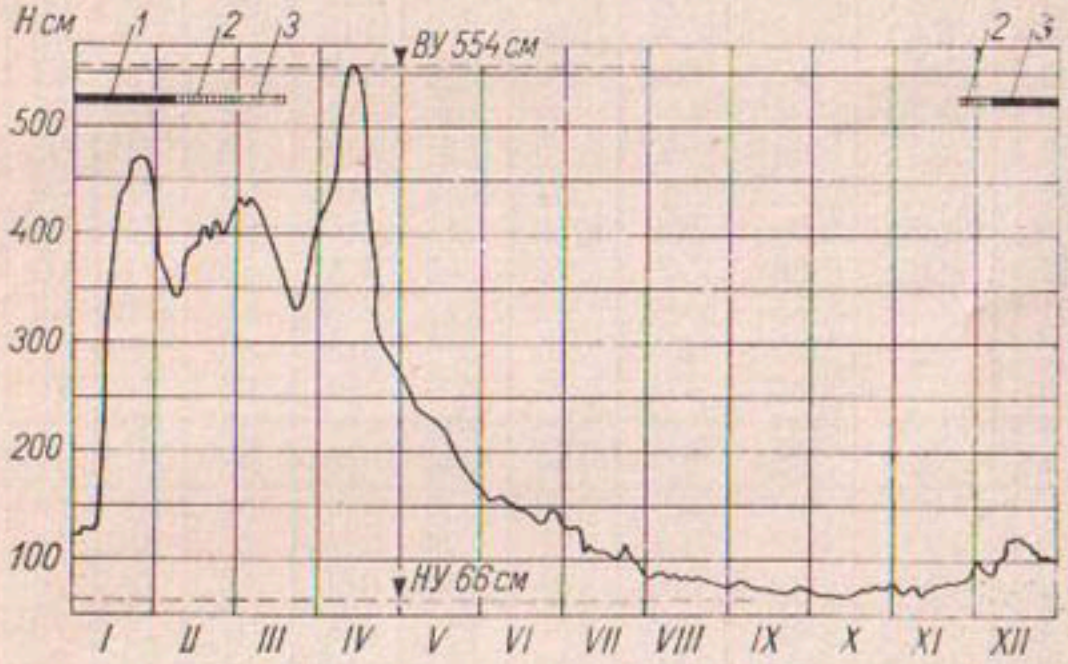


Рис. 98. График колебания средних суточных уровней воды р. Псел у с. Запселья за 1955 г.
1 — ледостав; *2* — сало при заберегах; *3* — ледоход.

Решение. 1. График колебания уровней (рис. 98) строят следующим образом: по горизонтальной оси откладывают время (дни), по вертикальной оси — соответствующие им значения уровней над нулем графика в сантиметрах. Масштаб для оси уровней принимают в зависимости от годовой амплитуды, руководствуясь данными табл. 52.

Годовая амплитуда колебания уровня воды составляет 554 — — 66 = 488 см. На чертеже показаны фазы зимнего периода (условными обозначениями по рис. 96), высший и низший годовые уровни и отметка нуля графика водомерного поста.

2. Для составления таблиц и построения графиков повторяемости (частоты) и продолжительности стояния (обеспеченности) уровней воды всю амплитуду колебания средних суточных уровней 488 см разбиваем по высоте на интервалы через 20 см, начиная с наивысшего 554 см и кончая наинизшим уровнем 66 см, как показано в графе 1 табл. 53. По табл. 51 для каждого месяца

Таблица 51

Уровни воды р. Псел у с. Запсельи за 1955 г.
Отметка нуля графика водомерного поста 62,63 м

Число	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	126 I	404 I	420 *	406	276	164	130	86	77	73	77	95 :
2	125 I	388 I	428 *	412	264	162	129	84	77	74	80	98 :
3	124 I	373 I	433 *	420	258	160	128	82	78	74	74	94 :
4	126 I	358 I	434 *	427	258	158	129	86	79	72	76	95 :
5	129 I	352 I	429 *	435	257	156	134	86	78	67	78	93 :
6	128 I	345 I	434 *	443	252	158	128	87	76	66	76	90 I
7	128 I	344 I	434 *	455	246	160	114	88	72	76	68	86 I
8	126 I	342 I	430 *	470	241	160	108	88	73	68	74	88 I
9	130 I	348 :	424 *	488	238	156	111	86	74	68	76	91 I
10	138 I	363 :	419 *	505	238	153	112	83	74	68	77	96 I
11	156 I	374 :	412 *	521	240	152	110	84	74	69	72	98 I
12	189 I	378 :	407 *	538	238	152	109	86	73	67	66	98 I
13	250 I	282 :	403 *	554	236	150	108	86	73	66	72	109 I
14	308 I	384 :	404 *	554	235	144	108	84	71	66	76	122 I
15	348 I	386 :	400 *	542	232	144	108	84	71	66	76	118 I
16	385 I	402 :	399 :	530	230	144	107	84	71	68	75	118 I
17	410 I	408 :	386	506	225	144	106	82	71	69	78	124 I
18	431 I	402 :	375	480	222	142	105	81	70	68	79	120 I
19	442 I	398 :	366 °	448	215	140	102	82	70	67	78	116 I
20	446 I	395 :	355	416	204	138	99	84	71	70	79	114 I
21	444 I	396 :	342	386	195	136	98	84	69	73	83	111 I
22	454 I	404 :	334	356	192	136	98	82	70	74	83	107 I
23	467 I	412 :	330	332	190	136	103	82	70	74	80 :	107 I
24	470 I	406 :	333	316	190	138	114	80	70	76	77 :	106 I
25	472 I	404 :	340	302	189	144	106	80	72	76	80 :	103 I
26	474 I	412 :	349	295	185	144	100	82	74	73	84 :	102 I
27	473 I	416 :	360	291	181	140	96	81	74	72	84 :	102 I
28	464 I	418 :	369	290	176	136	95	81	72	73	87 :	104 I
29	452 I		378	288	174	134	96	80	72	73	87 :	104 I
30	437 I		388	281	172	134	93	80	73	74	88 :	102 I
31	422 I		396		168		87	78		74		104 I
Средний	312	386	391	423	220	147	109	83	73	70	78	104
Высший	475	421	438	554	279	166	135	89	79	76	90	127
Низший	124	339	330	280	167	134	86	77	68	66	66	85

Средний годовой уровень 200 см; высший годовой — 554 см (13, 14/IV); низший годовой — 66 см (6, 13, 14, 15/X; 12/XI)

Таблица 52

Масштабы уровней при вычерчивании графиков

Годовая амплитуда колебания уровней, м	До 1	1—2	2—5	5—10	>10
Масштаб для оси уровней . .	1 : 10	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 200

подсчитываем дни стояния уровней принятых интервалов. Результаты записываем в графу 2.

Просуммировав число дней стояния уровней какого-либо интервала за все месяцы, получим число дней стояния за год. Общее

Таблица 53

Повторяемость (частота) и продолжительность (обеспеченность) стояния уровней

Интервалы уровней над нулем графика, см	Число дней по месяцам								Повторяемость за год		Продолжительность	
	кол-во	месяц	кол-во	месяц	кол-во	месяц	кол-во	месяц	дней	%	дней	%
554—540	3	IV							3	0,82	3	0,82
539—520	3	IV							3	0,82	6	1,46
519—500	2	IV							2	0,55	8	2,19
499—480	2	IV							2	0,55	10	2,74
479—460	6	I	1	IV					7	1,92	17	4,66
459—440	5	I	3	IV					8	2,19	25	6,85
439—420	3	I	9	III	3	IV			15	4,11	40	10,96
419—400	1	I	11	II	6	III	3	IV	21	5,75	61	16,71
399—380	1	I	7	II	4	III	1	IV	13	3,56	74	20,27
379—360	4	II	5	III					9	2,47	83	22,74
359—340	1	I	6	II	4	III	1	IV	12	3,29	95	26,03
339—320	3	III	1	IV					4	1,10	99	27,13
319—300	1	I	2	IV					3	0,82	102	27,95
299—280	5	IV							5	1,37	107	29,32
279—260	2	V							2	0,55	109	29,87
259—240	1	I	7	V					8	2,19	117	32,06
239—220	9	V							9	2,47	126	34,53
219—200	2	V							2	0,55	128	35,08
199—180	1	I	7	V					8	2,19	136	37,27
179—160	4	V	5	VI					9	2,47	145	39,74
159—140	1	I	17	VI					18	4,93	163	44,67
139—120	10	I	8	VI	6	VII	3	XII	27	7,40	190	52,07
119—100	17	VII	16	XII					33	9,04	223	61,11
99—80	8	VII	30	VIII	10	XI	12	XII	60	16,93	283	77,54
79—66	1	VIII	30	IX	31	X	20	XI	82	22,46	365	100,00
Итого	96	—	165	—	64	—	40	—	365	100,00	—	—

число дней стояния уровней по всем интервалам за год должно равняться числу дней в году, т. е. 365. Полученные значения повторяемости уровней по каждому интервалу в днях выражаем в процентах.

Сумма повторяемости должна равняться 100%. По данным повторяемости (частоты) уровней вычисляем продолжительность их стояния (обеспеченность). Для этого последовательно суммируем все повторяемости стояния уровней в днях или в процентах, начиная с наивысшего. Например, продолжительность стояния (обеспеченность) уровня 460 см равна 17 дням, или 4,7%. Другими словами, уровни воды от 460 см над нулем графика и выше наблюдались в году 17 дней, или 4,7%. В остальные 348 дней (или в 95,3%) уровни были ниже 460 см.

Очевидно, для самого низшего уровня (в нашем примере 66 см) обеспеченность равна 365 дням, или 100%.

3. На основании табл. 53 строим графики повторяемости и продолжительности стояния уровней воды (рис. 99). По вертикальной оси отложены уровни воды в сантиметрах над нулем графика, а по горизонтальной оси — соответствующие им значения повторяемости и продолжительности стояния в днях или в процентах. Шкалу процентов строим под шкалой дней. При этом точки 0 и 100 шкалы процентов соответствуют точкам 0 и 365 шкалы дней. Промежуточные точки шкалы процентов определяем прямолинейной интерполяцией.

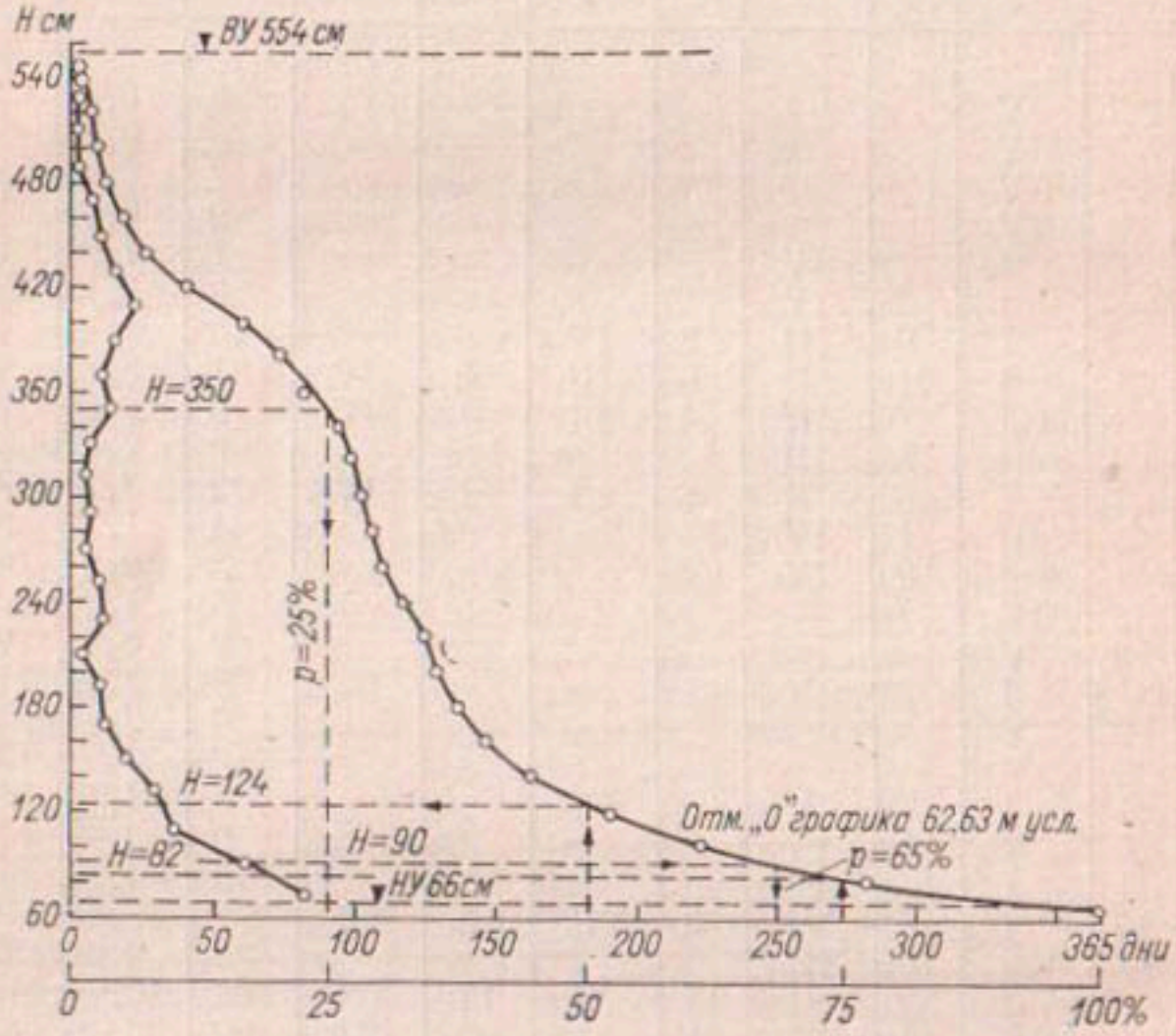


Рис. 99. Графики повторяемости (слева) и продолжительности стояния (справа) уровней воды р. Псел у с. Запселья за 1955 г.

При построении графиков значения повторяемостей откладываются против середин интервалов уровней, а значения продолжительности — против нижних границ их. Нанесенные таким образом точки соединяют между собой прямыми линиями.

ТЕМА 15. ПРОМЕРНЫЕ РАБОТЫ ПРИ СЪЕМКЕ РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ

54. Производство промерных работ

Промеры дают возможность выявить глубины, препятствующие судоходству, рельеф дна — наличие плесов и перекатов, бродов и т. д. При повторных промерах выявляют изменения рельефа дна:

произошли ли размывы и намывы. Рельеф дна учитывают при проектировании водозаборов для орошения и водоснабжения, водоприемников при осушении. При измерении расходов воды промеры производят для определения площади водного сечения.

Приспособления и устройства для промеров. При производстве промеров в зависимости от глубин и скоростей течения воды применяются различные приборы. Небольшие глубины замеряют водомерной рейкой. Для измерения глубин до 7—8 м при относительно небольших скоростях служит наметка (рис. 100). Наметка — это окованный снизу башмаком шест длиной до 10 м и диаметром

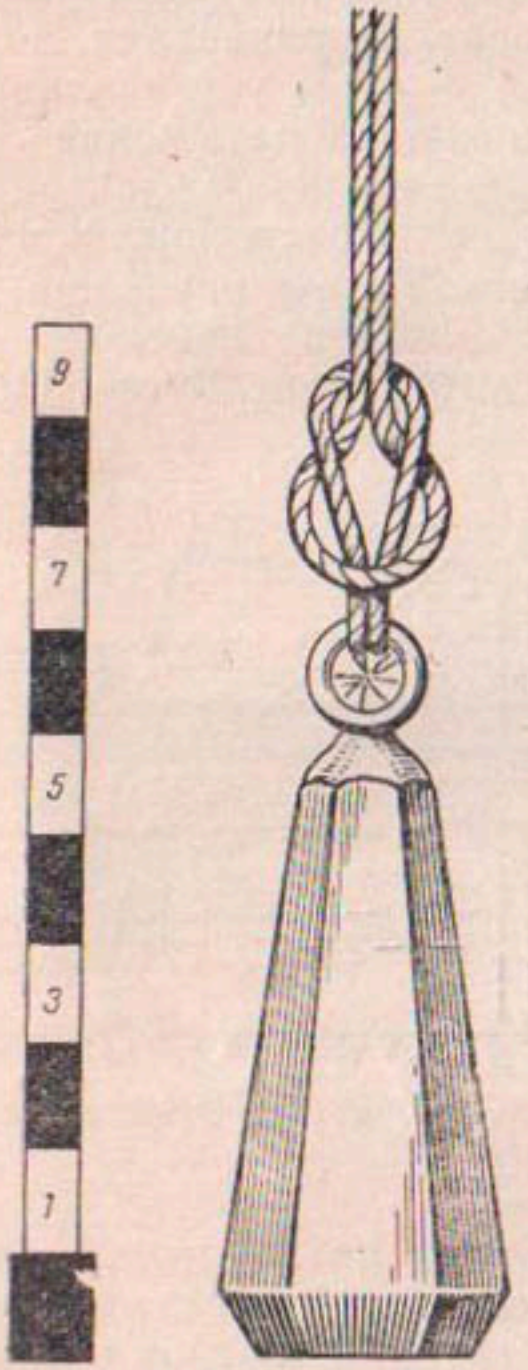


Рис. 100. Наметка. Рис. 101. Лот.

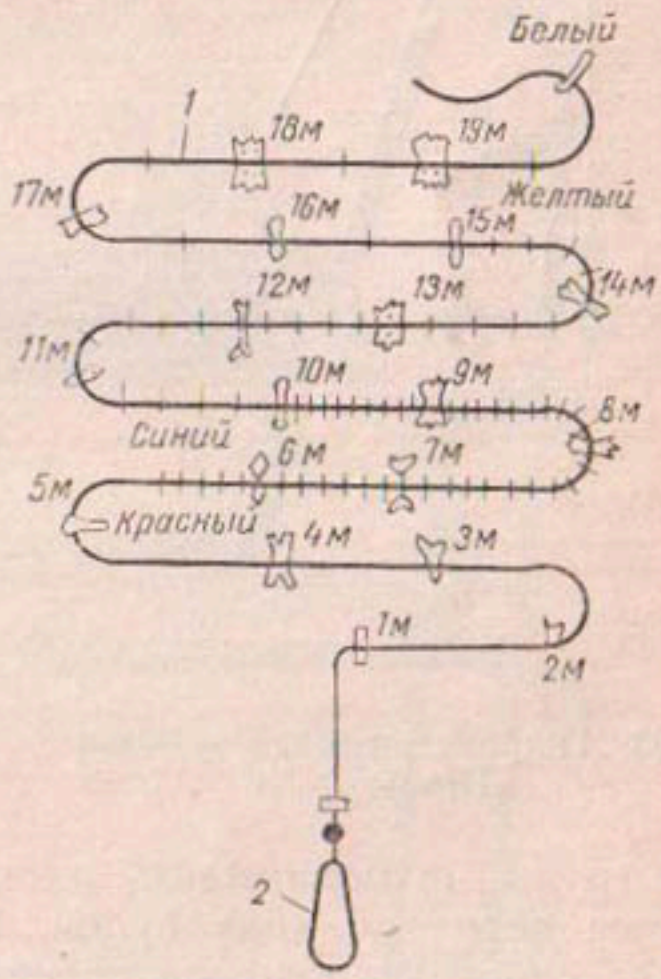


Рис. 102. Размеченный лотлинь.
1 — лотлинь; *2* — лот.

4—6 см; 10-сантиметровые деления наметки окрашены поперемонно красной и белой краской. Если дно илистое, наметку снабжают диском (диаметром 20—25 см) — поддоном, который предупреждает погружение наметки в илистое дно.

Лот представляет собой чугунный или свинцовый груз, подвешенный к размеченному шнуру или лотлиню. Лоты имеют различную массу и форму в зависимости от скорости течения воды. На озерах и водохранилищах применяют лот на 0,5 кг (рис. 101), а

при больших глубинах и скоростях течения — лоты с грузом до 80—100 кг. Для ручного лота используют лотлинь из пеньковой или хлопчатобумажной бечевы или трос (диаметром 3 мм). Пеньковый лотлинь во избежание деформации перед промерами вымачивают в воде 3—4 ч, затем натягивают, а после просушки размечают через 10 см.

Для производства промеров лот забрасывают против течения так, чтобы лотлинь занял вертикальное положение при отсчете глубины. Лотлинь размечен так, как показано на рис. 102.

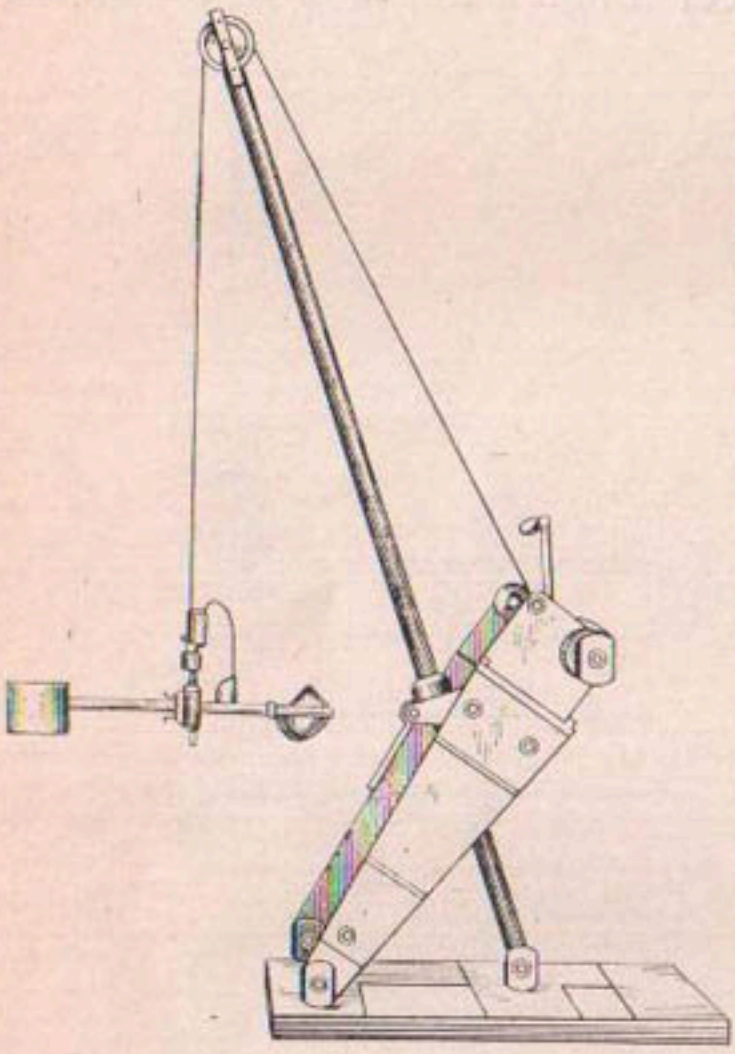


Рис. 103. Гидрометрическая лебедка «Нева».

Грузы, применяемые для промеров, имеют обтекаемую форму. Момент соприкасания лота или груза с дном устанавливают по уменьшению натяжения лотлиня или по сигналу от электрического поддона, расположенного под грузом. Грузы опускают в воду при помощи лебедок «Нева» (рис. 103) или «Луга». При про-

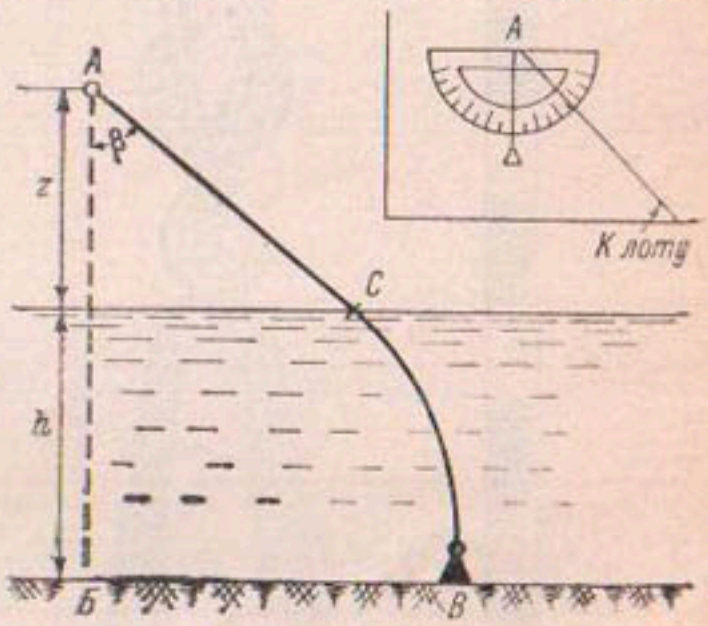


Рис. 104. Относ лота.

мерах грузы не поднимают, а оставляют на некоторой глубине. Промеры ведут по ходу судна. Вследствие относа лотлиня при больших скоростях течения истинная глубина меньше измеренной (рис. 104). На рисунке буква z — высота от лебедки до уровня воды, h — истинная глубина, β — угол наклона троса к вертикали.

Если высота подвеса троса над водой $z \leqslant 1$ м, то значение поправки определяют по таблицам, имеющимся в наставлениях гидрометрическим станциям и постам (в сокращенном виде она дана в приложении 4). Если же эта высота больше 1 м, то поступают следующим образом. Опускают груз до поверхности воды и отсчитывают по счетчику глубин значение z (см. рис. 104); при этом положении груза устанавливают счетчик глубин на нуль; опускают груз до дна; отсчитывают по счетчику фиктивную глубину CB; измеряют угол отклонения троса от вертикали β. Длина надвод-

ной части троса AC в предположении прямолинейности ее составляет $AC = \frac{z}{\cos\beta}$.

Поправка к длине надводной части ΔH_1 равна $AC - z$.

$$\Delta H_1 = \frac{z}{\cos\beta} - z = z\left(\frac{1}{\cos\beta} - 1\right). \qquad (119)$$

Для получения истинной глубины h вычитают из AC поправку ΔH_1 и получают длину надводной части. В измеренную длину подводной части вносят поправку ΔH_2 из приложения 1. Тогда истинная глубина

$$h = ACB - z - \Delta H_1 - \Delta H_2.$$

Приборы для автоматической записи профиля называются профилографами. По принципу действия они делятся на гидростатические и акустические. Акустические профилографы применяют при небольшой мутности воды и отсутствии растительности. Производительность прибора 15—17 км в час.

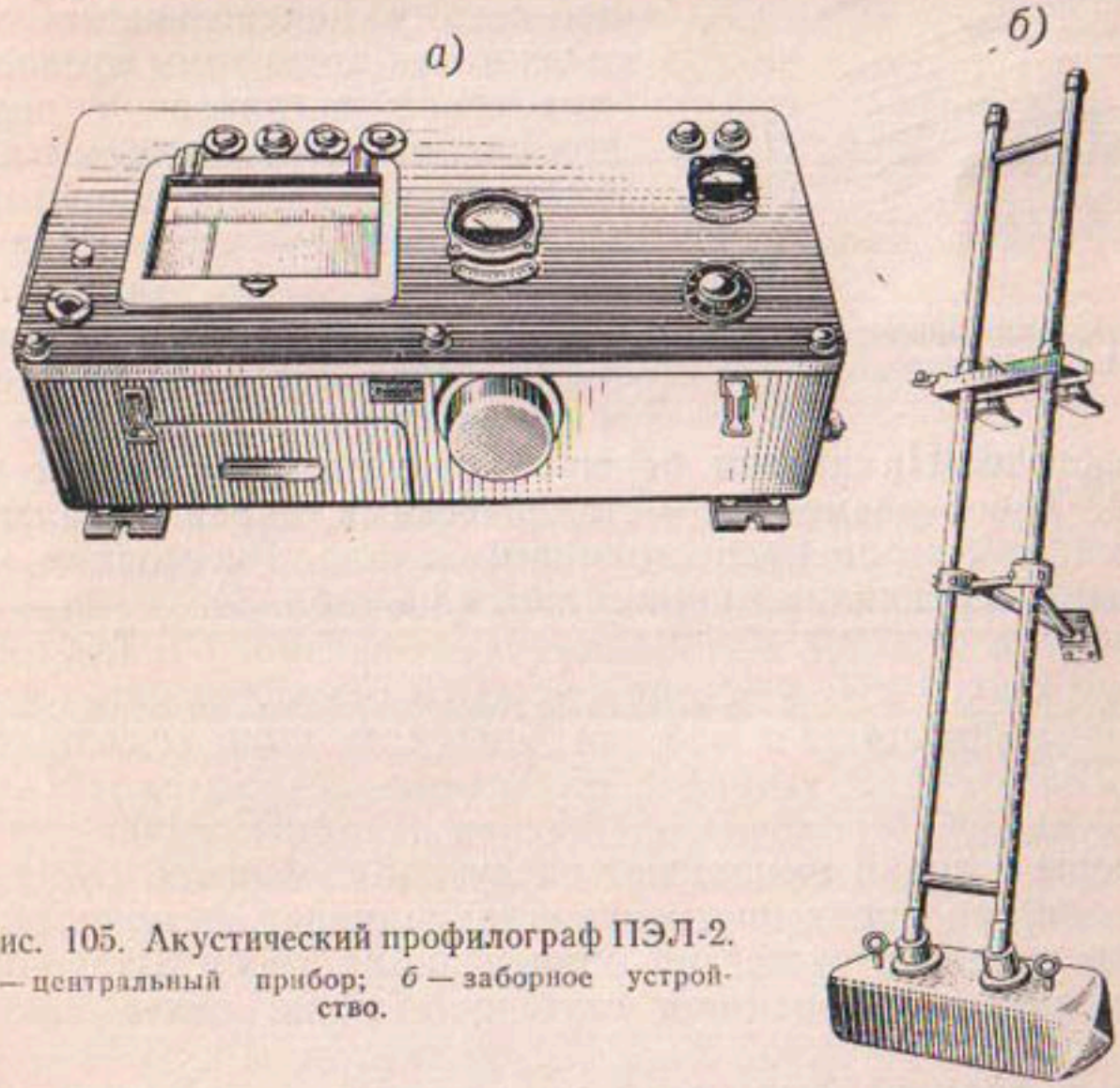


Рис. 105. Акустический профилограф ПЭЛ-2.
а — центральный прибор; *б* — заборное устройство.

К числу акустических профилографов относятся малогабаритный эхолот ТОР-5 и промерный эхолот ПЭЛ-2. При промерах эхолотами определяют глубины по продолжительности прохождения отраженных от дна звуковых волн.

Профилограф ПЭЛ-2 (рис. 105) состоит из центрального прибора и заборного устройства. Внутри деревянного корпуса заборного устройства размещены два вибратора. Заборное устройство

крепится к борту судна. Центральный прибор служит для автоматической записи профиля, для управления посылкой и приемом ультразвуковых импульсов. Линия профиля записывается на электротермической бумаге. Профиль дна получается в виде черной линии на белом фоне. Вертикальный масштаб записи 1 : 100, горизонтальный непостоянен и зависит от скорости движения судна.

Гидростатические профилографы применяют главным образом при выполнении научно-исследовательских работ.

Способы производства промеров. При производстве промеров выполняют: 1) наблюдения за уровнем воды по ближайшему водомерному посту, 2) измерения положения промеряемой вертикали, 3) измерение глубины.

На реках применяют следующие способы промеров: а) по поперечникам, б) по продольникам и в) по косым галсам.

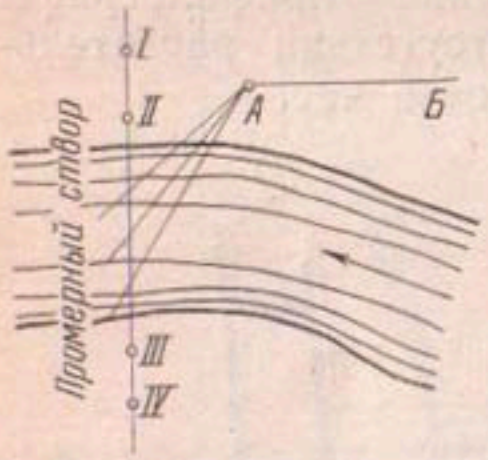


Рис. 106. Схема промеров по поперечникам.

Промеры по поперечникам (рис. 106) производят с мостиков, люлек, а при значительной ширине реки (до 300 м) с лодки. Расстояния между поперечниками назначают в зависимости от ширины русла, рельефа и требуемой детализации рельефа. Обычно при ширине реки до 100 м поперечники разбивают через $^1/_2$—$^1/_3$ ширины реки, а при большей ширине — через $^1/_4$ ширины реки.

При ширине реки до 300 м по направлению створа натягивают трос диаметром 3—8 мм. На одном берегу петлю троса надевают на столб. На другом берегу трос натягивают воротом или лебедкой. Трост размечают металлическими марками, на которых выбито число метров от постоянного начала. Расстояния между промерными вертикалями принимаются по табл. 54.

Таблица 54

Ширина реки, м	< 20	20—30	30—40	40—60	60—80	80—100	100—200	200—300	300—500	500—800	>800
Расстояния между промерными вертикалями, м	От 0,5 до 2,0	2	3	4	6	8	10	20	30	40	50

Промеры с лодки выполняют следующим образом. Один рабочий передвигает лодку по тросу, устанавливает ее на промерной вертикали и делает отсчет по размеченному тросу. Второй рабочий промеряет и отсчитывает глубину. Техник ведет записи в журнале.

Точность промеров повышается при производстве их по поперечникам со льда. В точках промеров пробивают лунки, местоположения которых устанавливают измерениями стальной мерной лентой. Глубину воды в лунке отсчитывают от уровня воды. Помимо этого, в каждой лунке определяют толщину льда и глубину его погружения в воду.

На реках шириной более 300 м (когда трос протянуть невозможно) и при небольших скоростях течения положение промерных

вертикалей на поперечнике определяют засечкой мензулой или теодолитом с берега или секстантом с лодки. Промеряемые створы закрепляют на берегах вехами. На высоком открытом берегу разбивают базис (рис. 89). Место стоянки инструмента выбирают так, чтобы угол между базисом и линией визирования на лотлинь был не меньше 30° и чтобы со стоянки хорошо было видно большинство поперечников вверх и вниз по течению. На мензульную доску наносят план реки, направление поперечников и положение урезов. Лодка движется по направлению створа. Техник у угломерного инструмента следит за передвижением лотлиня. По сигналу с лодки делают засечку. Сигналы подаются красными и белыми флажками через равные интервалы времени.

При значительных скоростях течения глубину промеряют по продольникам и по косым галсам. При промерах по продольникам на берегу устанавливают две мензулы (рис. 107). Лодка движется свободно по течению. Лот опускают в воду примерно на глубину 1 м от дна. По сигналу с лодки через равные промежутки времени делают промеры и одновременно засечки обеими мензулами. При засечке по косым галсам лодка движется не вдоль реки, а под некоторым углом к поперечнику вниз по течению. Траектория движения принимает вид кривой линии (рис. 108). Засечки делают двумя мензулами.

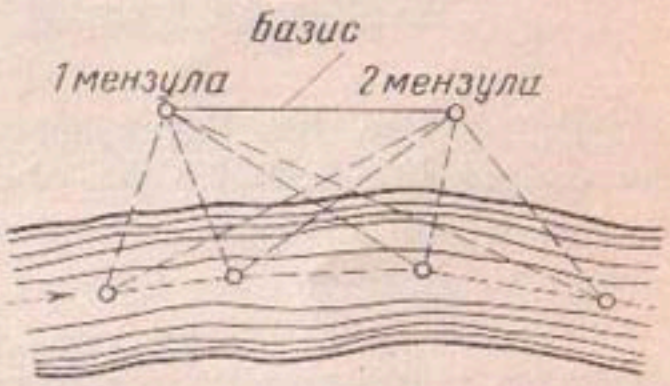


Рис. 107. Схема промеров по продольникам.

Особенности промеров глубин на озерах и водохранилищах. На небольших и узких водоемах глубину промеряют обычным методом — по поперечникам, разбиваемым перпендикулярно к оси. В прибрежной мелкой полосе число поперечников увеличивают. Чаще всего водоемы промеряются по квадратам. Квадраты намечают на карте, а затем переносят в натуру (рис. 109). Инструментально разбивают только один из квадратов *abгe*, а остальные разбивают по нему. Углы квадратов закрепляют буйками. Длина стороны квадрата 200—500 м. Промеры выполняют через 50 м. Положение углов определяют засечками двумя мензулами, расположенными на берегу, или бусолью с лодки, движущейся по створу. Для направления лодки при промерах внутри квадратов устанавливают вспомогательные вехи. При глубине до 5 м их забивают в грунт, а при глубине более 5 м устанавливают на якорях.

Водомерные наблюдения при промерах. Во время изысканий — при съемке рек и водоемов, при промерах русел — уровень меняется. Необходимо привести все промеры к постоянному уровню. Использовать для этой цели редко расположенные, постоянно действующие посты невозможно. Поэтому устраивают передвижные посты для работ на том или ином участке. Передвижной пост состоит из двух сваек, забиваемых на глубину 1,0—1,25 м. Одна расположена в русле ниже уровня воды, другая — на берегу. По первой

ведут отсчеты. Вторая служит временным репером. Ему передается отметка от ближайшего репера, установленного во время изысканий. Для контроля ежедневно повторяют нивелировку обеих свайек. При передвижении экспедиции на новую стоянку заблаговременно открывают новый пост. Через 2—3 дня одновременных наблюдений по обоим передвижным постам старый пост закрывают, а наблюдения продолжают на новом посту.

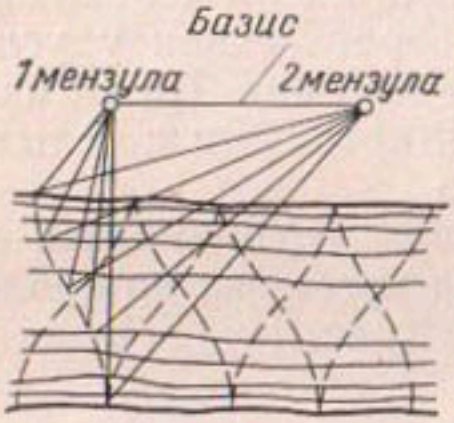


Рис. 108. Схема промеров по косым галсам.

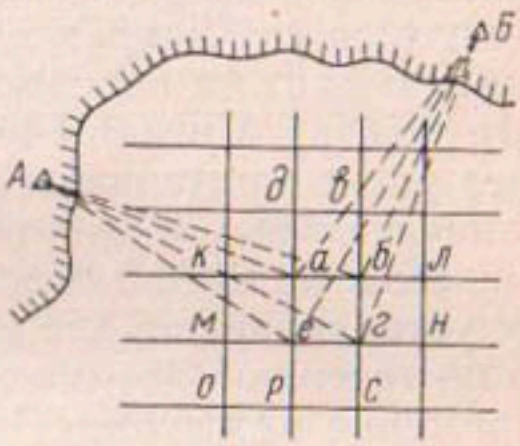


Рис. 109. Промеры по квадратам.

55. Обработка материалов промеров

По материалам съемок выполняют камеральные работы: построение профилей поперечных сечений, составление продольного профиля реки и плана русла.

Приведение промеров к мгновенному уровню. Уровень воды во время промеров глубин называется рабочим. За время работы он меняется. Поэтому все промеры приводятся к условному срезочному уровню. Разность между рабочим уровнем H_1 и срезочным уровнем H_2 называется срезкой. Мгновенный уровень может быть установлен нивелированием урезных кольев, забитых одновременно на участке промеров. В этом случае срезка $\Delta H = H_1 - H_2$. Измеренную глубину исправляют на величину срезки. Если промеры ведут на большом протяжении реки, то русло разбивают на отдельные участки (по 50—70 км) и на каждом из них оборудуют водомерный пост. Рабочие уровни на каждом участке нивелируются в продолжение 2—3 дней. Так как отметки уровней за это время меняются, то их нельзя еще считать срезочными. Приведение этих уровней к условному срезочному выполняют для определенного часа наблюдений по водомерному посту.

Профиль поперечного сечения. По отметкам дна и расстояния между промерными вертикалями строят поперечный профиль русла (см. рис. 88). Поперечный профиль вычерчивают в искаженном масштабе: вертикальный масштаб принимают в 10 или 100 раз больше горизонтального. Для профилей водомерных постов и гидрометрических створов применяются масштабы, приведенные в табл. 55.

Таблица 55

Масштабы для построения поперечных профилей

Масштаб	Ширина реки, м						
	< 5	5—10	10—30	30—60	60—150	150—300	> 300
Горизонтальный	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 200	1 : 500	1 : 1000	1 : 10 000— 1 : 20 000
	Глубина воды, м						
	1	1—2	2—5	5—10	> 10		
Вертикальный . .	1 : 10	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 1000		

При построении профиля наносят отметки дна или откладывают глубину вниз от рабочего уровня. На профиле показывают рабочий, наивысший и наинизший уровни, репера и их отметки. Отметки берега, не покрытого водой, наносят на профиль по материалам нивелировки.

В поперечном сечении реки возможны небольшие участки мертвого пространства, в котором отсутствует течение. Вся остальная площадь поперечного сечения между дном и поверхностью воды, в которой скорости наблюдаются во всех точках, называется живым сечением, в отличие от водного сечения, занимаемого водой.

При наличии ледяного покрова площадь водного сечения равна площади всего поперечного сечения между дном и поверхностью воды без площади погруженного льда. Площадь водного сечения реки можно определить планиметром или аналитически — суммированием площадей фигур, ограниченных промерными вертикалями (рис. 110). Площадь между урезом левого берега и первой вертикалью определяют по треугольнику $\Delta\omega = \frac{b_1 h_1}{2}$. Площадь $\Delta\omega_2$ представляет трапецию $\Delta\omega_2 = \frac{h_1 + h_2}{2} b_2$ и т. д.

Площадь живого сечения реки

$$\omega = \sum \Delta\omega = \frac{b_1 h_1}{2} + \frac{h_1 + h_2}{2} b_2 + \ldots + \frac{h_{n-1} + h_n}{2} b_n + \frac{h_n}{2} b_{n+1}. \quad (120)$$

Кривая зависимости $\omega = f(H)$. С изменением уровня воды изменяется и площадь водного сечения. Повышение уровня вызывает увеличение, а понижение — уменьшение площади водного сечения. Зависимость площадей от высоты стояния уровня воды

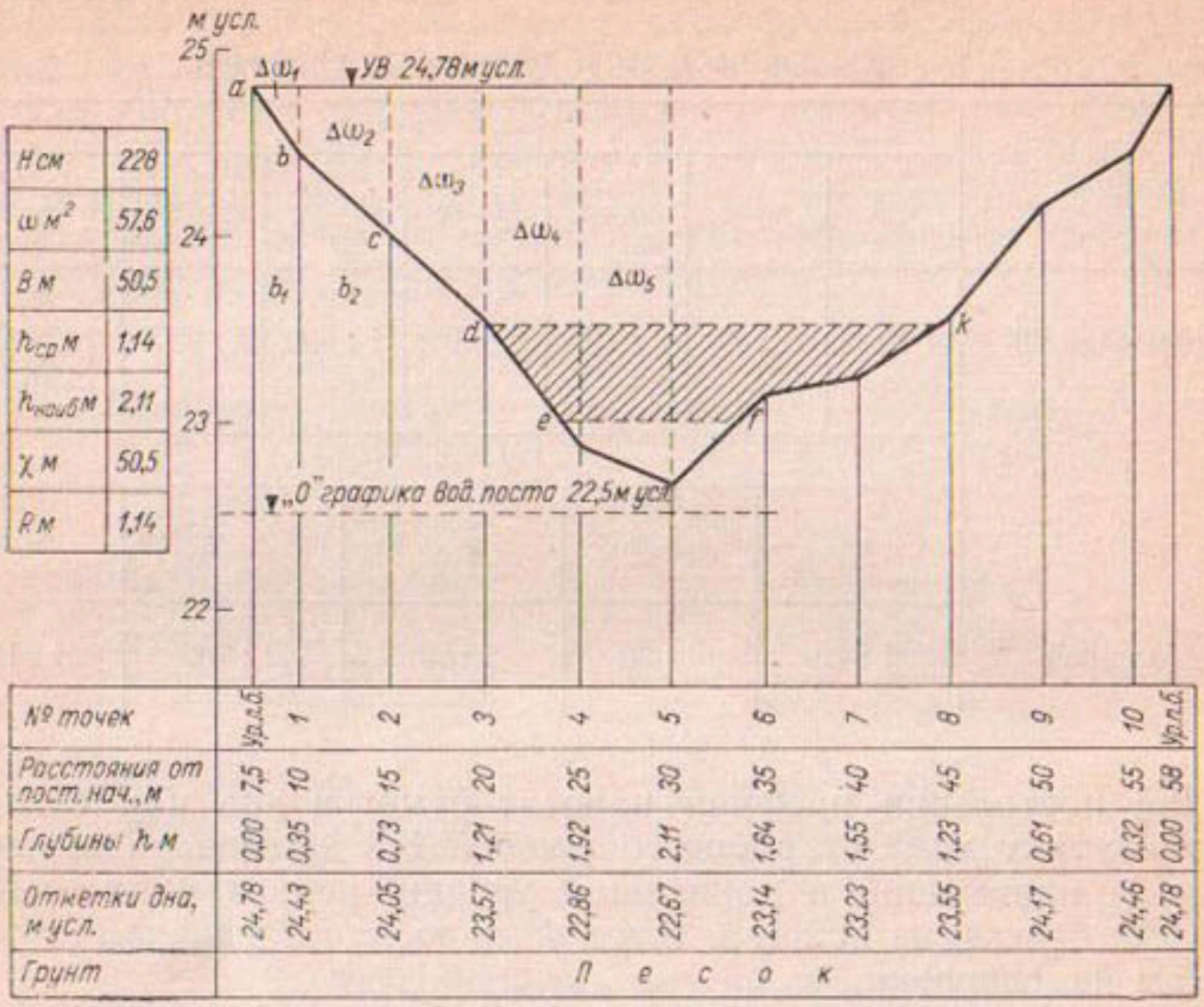


Рис. 110. Профиль водного сечения р. Супой у с. Песчаного.

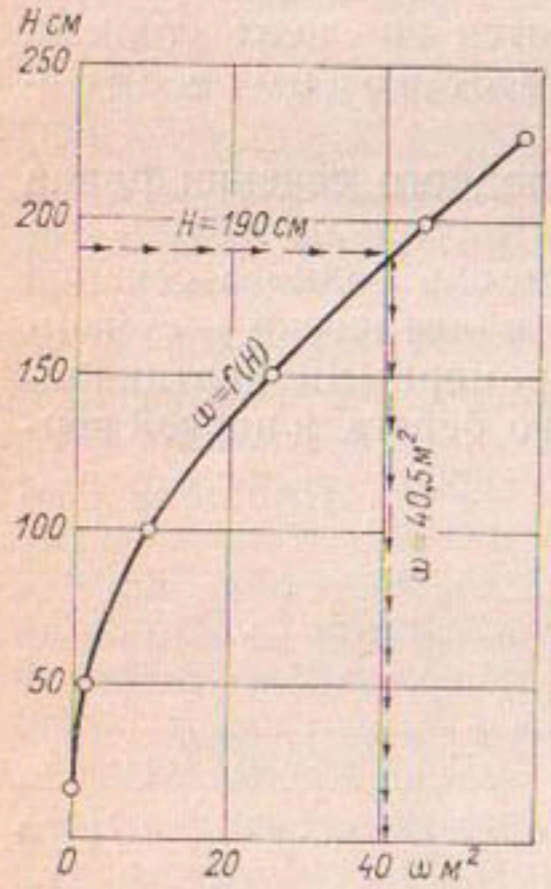


Рис. 111. Кривая зависимости площадей водного сечения от уровней воды р. Супой у с. Песчаного.

можно выразить графически (рис. 111). Здесь по оси абсцисс отложены площади, а по оси ординат — отметки уровней.

Полученные на чертеже точки соединены плавной кривой, называемой кривой площадей $\omega = f(H)$. В упражнении 27 приведены расчеты основных гидравлических характеристик поперечного сечения реки.

Составление плана реки в горизонталях и изобатах. План русла (рис. 96) составляется в горизонталях (линии равных отметок дна) или в изобатах (линии равных глубин). Прежде всего приводят все промеры к срезочному уровню и наносят урезы воды. Линии урезов на плане в горизонталях соответствуют отметкам срезочного уровня. На планах в изобатах линиям урезов соответствуют нулевые глубины, т. е. нулевые изобаты. Изобаты и горизонтали проводят при масштабе съемки 1 : 1000 — 1 : 2000 через 0,25—0,50 м, при масштабе 1 : 5000 через

0,5 м, при 1 : 10 000 через 1 м и при масштабе 1 : 25 000 через 2 м. Точки наибольших глубин соединяют на плане пунктирной линией.

Вопросы для самопроверки

1. Как организуют и производят промерные работы на реках при разной ширине русла?
2. Какие приборы необходимы для выполнения промеров при разной глубине и разной скорости течения воды?
3. В чем сущность приведения промерных данных к срезочному уровню?
4. Что такое срезочный уровень?
5. Как составить поперечный профиль реки?
6. Как вычислить площадь водного сечения реки?
7. Как построить кривую $\omega = f(H)$?
8. Как составить план участка на основании обработанных данных промеров?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 27. Обработать материалы промеров глубин от 22 июля 1959 г., выполненных в гидрометрическом створе открытого русла р. Супой у с. Песчаного.

Дано: выписка из книги для записи промеров глубин (табл. 56 и 57).

Таблица 56

Уровни воды на основном водомерном посту за время промеров глубин

Уровень	№ свай	Отсчет по рейке a см	Приводка d см	Уровень над „0" графика, $H = a + d$	Отметка „0" графика, условная, м
Начальный	3	38	190	228	
Конечный	3	48	190	238	22,50

Требуется: 1) обработать материалы наблюдений водомерного поста и данные промеров; 2) построить профиль водного сечения реки; 3) вычислить гидравлические элементы водного сечения (площадь ω, ширину реки B, среднюю глубину $h_{ср}$, наибольшую глубину $h_{наиб}$, смоченный периметр χ, гидравлический радиус R); 4) построить кривую зависимости площадей водного сечения от уровней воды $\omega = f(H)$.

Промеры начаты у левого берега в 13 ч, окончены в 13 ч 50 мин. За постоянное начало принят деревянный кол на левом берегу реки. Глубины промеряли с лодки штангой с поддоном, имеющей деления через 0,1 м. Расстояния измеряли по размеченному через 1 м стальному тросу. Погода: ясно, ветер — слабый по течению; на реке — чисто.

Решение. 1. Вычисляем расчетный уровень воды на водомерном посту и глубины на промерных вертикалях с учетом из-

Таблица 57

Журнал промеров глубин

№ промерной вертикали	Расстояние от постоянного начала до вертикали, м	Глубина, h м		Отметка дна реки, м	Характеристика дна реки
		измерения	со срезкой		
1	2	3	4	5	6
Урез лев. берега	7,5	0,0	0,0	24,78	
1	10	0,36 1	0,35	24,43	
2	15	0,75 2	0,73	24,05	
3	20	1,24 3	1,21	23,57	
4	25	1,96 4	1,92	22,86	
5	30	2,16 5	2,11	22,67	Песок
6	35	1,70 6	1,64	23,14	
7	40	1,62 7	1,55	23,23	
8	45	1,31 8	1,23	23,55	
9	50	0,70 9	0,61	24,17	
10	55	0,42 10	0,32	24,46	
Урез пр. берега	58	0,0	0,0	24,78	

менения уровня за время промеров. Начальный уровень воды вычисляем как сумму отсчета по рейке и приводки; $H_{нач} = 38 + 190 = 228$ см. Аналогично вычисляем конечный уровень воды

$$H_{кон} = 48 + 190 = 238 \text{ см}.$$

За расчетный уровень принимаем $H = 228$ см.

Так как за время промеров произошло повышение уровня на $238 - 228 = 10$ см, то срезка имеет отрицательный знак. Распределив срезку на 10 промерных вертикалей, вычисляем глубины с учетом срезок (графа 4 табл. 57).

По уровню и приведенным глубинам определяем отметку дна реки на каждой вертикали (графа 5).

2. По данным граф 2, 4 и 5 строим профиль водного сечения реки (рис. 110). Вертикальный и горизонтальный масштабы принимаем в соответствии с табл. 55.

3. Вычисляем основные гидравлические характеристики водного сечения реки.

Площади водного сечения реки приведены в табл. 58. Подсчеты выполнены по формуле (120) суммированием первой и последней треугольных площадей, второй и всех последующих площадей трапеций. Графы 1—3 заимствованы из журнала (табл. 57).

По разности расстояний от постоянного начала до двух смежных вертикалей вычисляют расстояния между ними (графа 5 табл. 58).

Средние глубины $h_{ср}$ для каждой фигуры определяем как среднеарифметическое из двух соседних вертикалей. Частные площади отдельных фигур приведены в графе 6. Площадь водного сечения реки $\omega = 57{,}6$ м^2.

Таблица 58

Вычисление площади водного сечения ω и смоченного периметра χ

№ вертикали	Расстояние от постоянного начала до вертикали l м	Глубина		Расстояние между вертикалями b м	Площадь между вертикалями $\Delta\omega$ м²	Разность глубин соседних вертикалей Δh м	Δh^2 м²	Δh^2+b^2 м²	Длина стороны c м
		на вертикали h м	средняя $h_{ср}$ м						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Урез лев. берега	7,5	0,0	0,18	2,5					
					0,45	0,35	0,12	6,37	2,5
1	10	0,35	0,54	5					
					2,70	0,38	0,14	25,14	5
2	15	0,73	0,97	5					
					4,85	0,48	0,23	25,23	5
3	20	1,21	1,56	5					
					7,80	0,71	0,50	25,50	5
4	25	1,92	2,02	5					
					10,10	0,19	0,04	25,04	5
5	30	2,11	1,87	5					
					9,35	0,47	0,22	25,22	5
6	35	1,64	1,59	5					
					7,95	0,09	0,01	25,01	5
7	40	1,55	1,39	5					
					6,95	0,32	0,10	25,10	5
8	45	1,23	0,92	5					
					4,60	0,62	0,38	25,38	5
9	50	0,61	0,47	5					
					2,35	0,29	0,08	25,08	5
10	55	0,32	0,16	3					
					0,48	0,32	0,10	9,10	3
Урез пр. берега	58	0,0							

$B = 50{,}5$ м $\omega = 57{,}6$ м² $\chi = 50{,}5$

Ширина реки B определена как разность расстояний правого и левого урезов от постоянного начала. Эта величина должна равняться сумме расстояний, приведенных в графе 5.

Средняя глубина $h_{ср} = \omega/B = 57{,}6 : 50{,}5 = 1{,}14$ м.

Наибольшая глубина воды в водном сечении $h_{наиб} = 2{,}11$ м.

Просуммировав все длины сторон, приведенные в графе 10, получим длину смоченного периметра $\chi = 50{,}5$ м. Смоченный периметр получился равным ширине реки в результате округления расчетной длины сторон c в графе 10 до первого десятичного знака. При более точных расчетах $\chi = 50{,}7$ м.

Таблица 59

Площади водного сечения ω при разных уровнях

Уровень воды над „0" графика, см	Отметки уровня воды, м (условно)	Приращение площади водного сечения между уровнями воды, м²	Площадь ω м²
17 (дно)	22,67		0,0
		1,78	
50	23,00		1,78
		8,11	
100	23,50		9,89
		14,4	
150	24,00		24,3
		20,5	
200	24,50		44,8
		12,8	
228	24,78		57,60

Гидравлический радиус $R = \frac{57{,}6}{50{,}5} = 1{,}14$ м.

Следует обратить внимание, что для широких, но неглубоких рек гидравлический радиус и средняя глубина почти совпадают, а смоченный периметр незначительно отличается от ширины реки. Полученные характеристики водного сечения реки заносим в таблицу, помещенную на рис. 110.

4. Для построения кривой $\omega = f(H)$ вычисляем площади водного сечения ω для уровней над нулем графика: 50, 100, 150, 200 и 228 см. Этим уровням соответствуют отметки: 23,0; 23,5; 24,0; 24,5 и 24,78 м.

Площадь водного сечения для разных уровней определяется планиметром. Площадь ω_1 при $H_1 = 50$ см равняется 1,78 м². При уровне $H_2 = 100$ см над нулем графика площадь вычисляем как сумму $\omega_1 = 1{,}78$ м² при $H_1 = 50$ см и $\Delta\omega_2 = 8{,}11$ м² между уровнями 50 и 100 см. Эта площадь $efkd$ заштрихована на рис. 110. Результаты расчетов приведены в табл. 59.

По данным таблицы построена кривая зависимости $\omega = f(H)$ (см. рис. 111). На оси x отложены площади в масштабе 1 деление — 10 м², а на оси y — уровни в масштабе 1 деление — 25 см.

Если русло в створе не размывается и не заиляется, то, пользуясь рис. 111, можно определить площадь водного сечения без промерных работ для любых уровней в пределах 0—228 см над нулем графика. Так, при уровне $H = 190$ см площадь водного сечения $\omega = 40{,}5$ м².

ТЕМА 16. ИЗМЕРЕНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ И РАСХОДОВ ВОДЫ В РЕКАХ И КАНАЛАХ

56. Распределение скоростей в потоке и вычисление средних скоростей течения воды

Мгновенная и средняя скорость. Расход воды представляет собой произведение средней скорости на площадь живого сечения. Поэтому для определения расхода надо измерить каждую из этих величин. Измерение скоростей и их направления — самостоятельная задача при изысканиях для проектирования мостов, мест водозабора при орошении, водоснабжении, а также при регулировании русла и т. д.

Распределение скоростей в потоке разнообразно. В поперечном профиле скорости уменьшаются по направлению от поверхности воды к берегу и ко дну. Они замедляются вдоль потока при уменьшении уклонов водной поверхности, при увеличении шероховатости в связи с зарастанием отдельных участков. В плесах и на перекатах, в основном русле и в пойме скорости различны. Они изменяются по величине и направлению при изменении уровня в реке.

Если измерять скорость воды в одной и той же точке при постоянном уровне, можно заметить, что она непрерывно меняется, несколько отклоняясь от средней величины. Иными словами, скорость пульсирует. Исходя из этого, различают «мгновенную» и «осредненную» скорость. Осредненная за более или менее продол-

жительное время (2—10 мин) скорость в точке устойчива по величине.

Скорости в точках и на вертикалях. Скорости измеряют в разных точках на отдельных скоростных вертикалях. По данным этих измерений вычисляют среднюю скорость на вертикали.

Для наглядности распределение скоростей по вертикали изображают графически построением эпюры скоростей, или годографа (рис.112). На вертикальной линии *OC* отложены глубины в метрах. В местах измерения скоростей по горизонтали отложены измеренные осредненные скорости в м/с. Концы горизонтальных линий соединены плавной кривой. Очертания кривых различны для разных вертикалей в зависимости от характера русла и дна.

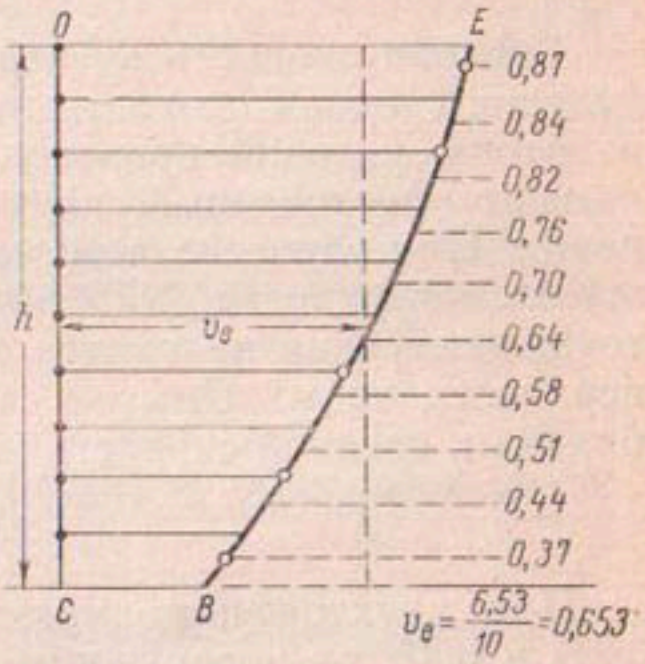


Рис. 112. Эпюра скоростей на вертикали.

На рис. 113 показаны живое сечение реки и скоростные вертикали, на которых измерялись скорости. По вычисленным значениям осредненных скоростей вычерчены линии одинаковых скоростей, или изотахи. На рис. 113 *а* показаны изотахи в поперечном профиле открытого русла, а на рис. 113 *б* при наличии ледяного

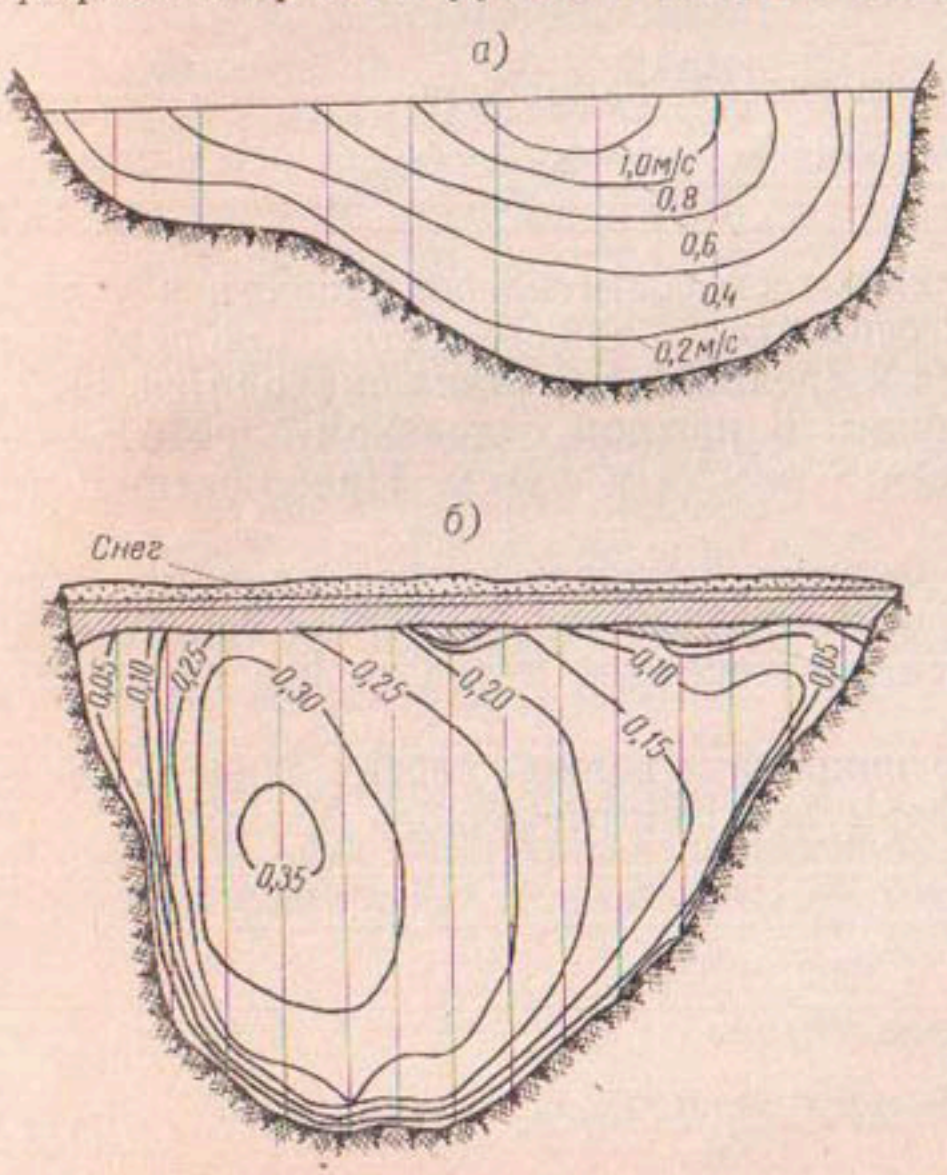


Рис. 113. Изотахи.
а — в открытом русле;
б — подо льдом.

покрова. В открытом русле наибольшие скорости размещаются на поверхности самой глубокой вертикали. Дополнительная шероховатость, создаваемая ледяным покровом, является причиной перемещения наибольшей скорости вглубь от нижней поверхности льда.

Средняя скорость на вертикали и в живом сечении. Для определения средней скорости на вертикали в зависимости от глубины водотока, условий производства работ и характера задания применяют одноточечный, двух-, трех- и пятиточечный методы измерения. При одноточечном методе скорость измеряют на 0,6 глубины от поверхности. Например, при глубине вертикали $H = 2{,}5$ м точка измерения находится на расстоянии $0{,}6 \cdot 2{,}5 = 1{,}5$ м от поверхности воды. Опытом доказано, что скорость в этой точке близка к средней скорости на вертикали или

$$v_в \approx u_{0,6\,H}. \tag{121}$$

При двухточечном методе скорость измеряется на глубинах $0{,}2H$ и $0{,}8H$ от поверхности, а средняя скорость на вертикали

$$v_в = \frac{u_{0,2\,H} + u_{0,8\,H}}{2}. \tag{122}$$

При трехточечном способе измерения

$$v_в = \frac{u_{0,2\,H} + 2u_{0,6\,H} + u_{0,8\,H}}{4} \tag{123}$$

и, наконец, при пятиточечном способе измерения

$$v_в = \frac{u_{0,0} + 3u_{0,2\,H} + 3u_{0,6\,H} + 2u_{0,8\,H} + u_{дон}}{10}, \tag{124}$$

где $u_{0,0}$ и $u_{дон}$ — представляют скорости на поверхности и у дна.

Легче всего измерять скорости на поверхности. Для перехода от поверхностной скорости к средней на вертикали вводится коэффициент k, меньший единицы. В каждом отдельном случае коэффициент k нужно определять опытным путем. Приближенно его принимают равным 0,85.

Из всех приведенных формул наиболее точной является формула (124), т. е. пятиточечный метод измерения. Опыт показывает, что в большинстве случаев двухточечный метод точнее трехточечного.

При наличии ледяного покрова и водной растительности рекомендуется пользоваться формулой шеститочечного метода

$$v_в = \frac{u_{0,0} + 2u_{0,2\,H} + 2u_{0,4\,H} + 2u_{0,6\,H} + 2u_{0,8\,H} + u_{дон}}{10} \tag{125}$$

или формулой трехточечного метода

$$v_в = \frac{u_{0,15\,H} + u_{0,5\,H} + u_{0,8\,H}}{3}. \tag{126}$$

Изложенный метод расчета средней скорости на вертикали является аналитическим. При многоточечном методе измерения среднюю скорость можно определять графическим способом. Вычерчивают эпюру скоростей (рис. 112) и находят площадь эпюры планиметром. Средняя скорость на вертикали представляет частное от деления площади эпюры на глубину H

$$v_в = \frac{\Omega}{H}. \qquad (127)$$

Площадь эпюры можно заменить равновеликой площадью прямоугольника, у которого ширина равна средней скорости, а высота — глубине вертикали.

57. Измерение скоростей поплавками и вычисление расхода воды

Для измерения скоростей служат поплавки, батометры, вертушки и динамометры.

Конструкции поплавков. Поплавки воспринимают скорость движущей их воды. Бывают поверхностные и глубинные поплавки, поплавки-интеграторы и гидрометрические шесты.

Поверхностные поплавки (рис. 114 *а*) — это деревянные кружки диаметром 10—30 см, высотой 2—7 см, с флажком яркого цвета. Для поплавков используют и бутылки, погруженные так, что на поверхности находится лишь горлышко с флажком. На широких реках применяют деревянные поплавки с подвешенным грузом.

Глубинные поплавки состоят из двух: одного крупного, погруженного в воду на определенную глубину (рис. 114 *б*), и поверхностного мелкого, передвигающегося со скоростью глубинного и служащего указателем хода. Глубинные поплавки состоят иногда из двух поплавков одинакового размера. В этом случае средняя скорость

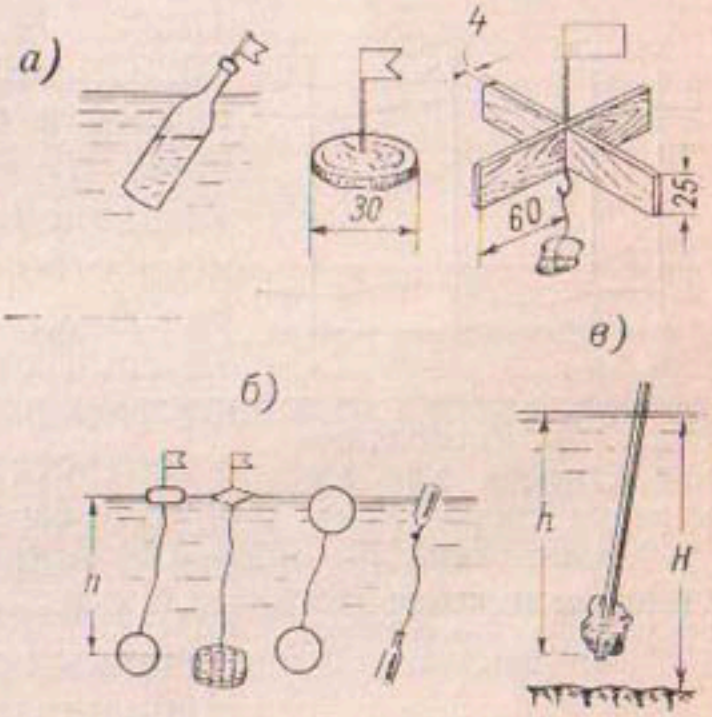


Рис. 114. Поплавки.

а — поверхностные (размеры — в сантиметрах); *б* — глубинные; *в* — гидрометрический шест.

$$v_в = \frac{u_{0,0} + u_{гл}}{2},$$

где $u_{0,0}$ — поверхностная скорость; $u_{гл}$ — скорость на глубине.

Отсюда

$$u_{гл} = 2\,v_в - u_{0,0}. \qquad (128)$$

Гидрометрические шесты (рис. 114 *в*) применяют на участках рек с постоянной глубиной. Они служат для определения средней скорости на вертикали. Их свинчивают из металлических полых труб разной длины. Нижнюю часть трубы заполняют дробью для погружения поплавка на 0,95 глубины вертикали.

Поплавок-интегратор более точно (чем шест) измеряет среднюю скорость на вертикали. Основная деталь его — шарик из парафина, целлулоида, дерева, воска или стеарина, удельный вес которого меньше единицы. Шарик прикрепляют ниткой, пропущенной через кольцо в нижней части штанги. Нитка обрывается, а шарик всплывает через t с наверх на расстоянии l м от штанги. На одной вертикали запускают 4—6 поплавков. Средняя скорость на вертикали

$$v_в = \frac{\sum l}{\sum t}.$$

Измерение скоростей течения поплавками. Для измерения скоростей разбивают три створа на равном расстоянии друг от друга (рис. 115) так, чтобы минимальная продолжительность хода поплавка при наибольшей скорости была 30 с. Выше по течению разбивают пусковой створ на расстоянии 5 — 20 м (в зависимости от скорости течения) от верхнего створа. На этом участке до входа в рабочий створ поплавок приобретает скорость течения струи. Каждый из створов закрепляют тремя вехами. Промеры русла выполняют в соответствии с п. 54.

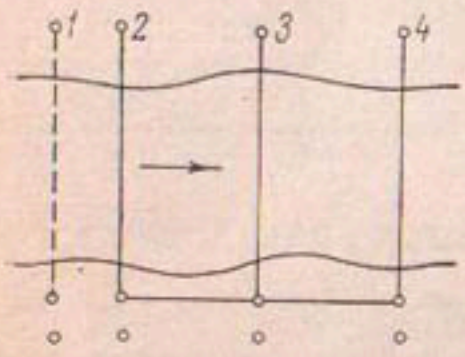


Рис. 115. Расположение створов для измерения скоростей поплавками.

1 — пусковой створ; *2* — верхний; *3* — средний; *4* — нижний.

Объем и характер работ зависят от скорости и ширины русла. При небольшой ширине русла через средний створ протягивают размеченный трос. С лодки запускают поплавок. Наблюдатель передвигается вдоль по берегу, опережая поплавок, и сигнализирует в момент прохождения его через створ. По размеченному тросу определяют место прохождения поплавка в створе.

При ширине русла, превышающей 50 м, время и место прохождения поплавка через створ наблюдатель фиксирует с лодки. При ширине русла, большей 200 м, работу ведут без тросов, а положение поплавков засекают угломерным инструментом или мензулой. Время прохождения поплавка через верхний и нижний створы засекают секундомером. Поплавки пускают с таким расчетом, чтобы распределить их равномерно в среднем створе по 2—4 поплавка в точке. Во время ледохода поплавками служат отдельные небольшие льдины. Скорости измеряют в тихую безветренную

погоду. Перед началом и по окончании измерений проводятся наблюдения за уровнем по водомерному посту.

Вычисление расхода воды. Расход воды вычисляют аналитическим способом. На клетчатку (рис. 116) по оси абсцисс наносят расстояния от постоянного начала, а по оси ординат — продолжительность хода поплавков. По журнальным данным наносят точки поплавков. Через центры тяжести отдельных групп точек на глаз проводят плавную эпюру распределения продолжительности хода поплавков по ширине реки.

В местах выраженных перегибов эпюры, а при отсутствии их через равные расстояния назначают скоростные вертикали, обязательно совмещая их с промерными. Для них определяют поверх-

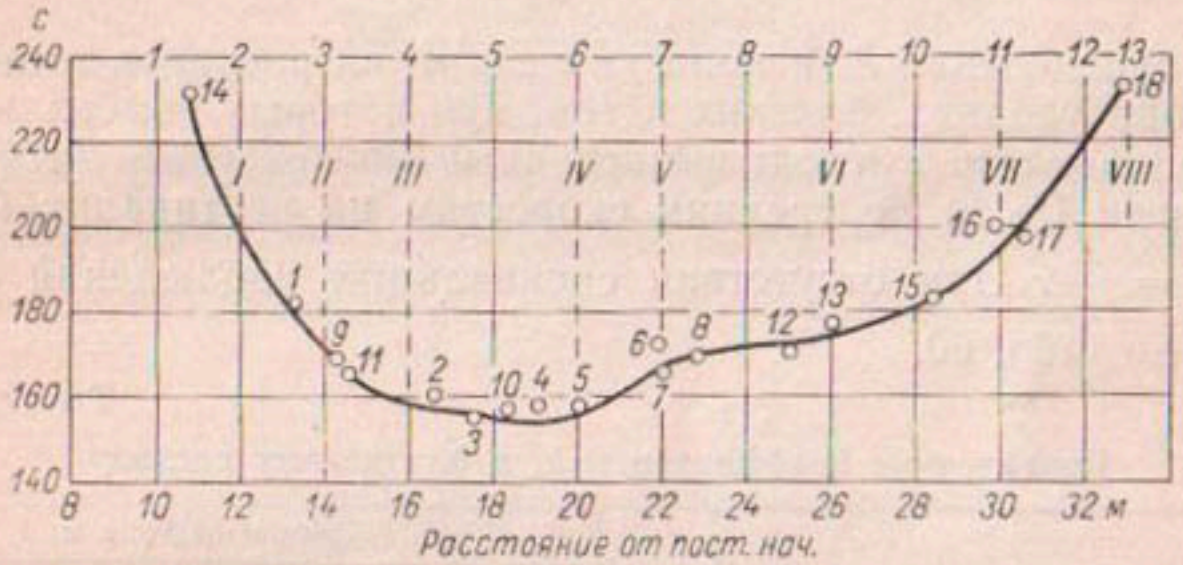


Рис. 116. Эпюра распределения продолжительности хода поплавков по ширине русла.

ностную скорость течения $u_0 = \frac{L}{t}$, где L — расстояние между верхним и нижним створами, а t — продолжительность хода, снятая с эпюры.

Частичный фиктивный расход воды между двумя смежными скоростными вертикалями равен произведению средней скорости на площадь между ними $\Delta Q_{\Phi_i} = v_{\text{ср}_i} \Delta\omega$. Среднюю поверхностную скорость принимаем равной полусумме скоростей на вертикалях $u_{\text{ср}} = u_i + u_{i+1}$.

Отсюда

$$\Delta Q_{\Phi_i} = \frac{u_i + u_{i+1}}{2} \Delta\omega_i. \qquad (129)$$

Расход назван фиктивным потому, что он вычислен не по средней скорости на вертикали, а по средней скорости из поверхностных. Действительный частичный расход несколько меньше фиктивного.

Расходы воды прибрежных участков между левым урезом и первой скоростной вертикалью, а также между последней вертикалью и правым урезом определяют по формулам:

$$\Delta Q_{\Phi_1} = k u_1 \Delta\omega_1 \text{ и } \Delta Q_{\Phi_n} = k u_n \Delta\omega_n. \qquad (130)$$

Величина k зависит от очертаний берега и характера движения воды в прибрежных участках. Если берег пологий, глубина воды у уреза равна нулю, то $k = 0{,}7$, если берег обрывистый, то $k = 0{,}8$; при наличии гладкой стенки $k = 0{,}9$, а при наличии мертвого пространства (скорость в прибрежном участке отсутствует) $k = 0{,}5$.

Расход во всем поперечном сечении получается суммированием частичных расходов

$$Q_ф = \sum \Delta Q_ф. \tag{131}$$

Действительный расход получается умножением $Q_ф$ на поправочный коэффициент k_1, т. е.

$$Q_д = k_1 Q_ф. \tag{132}$$

Для определения k_1 используют значения расходов воды, измеренные при уровнях, близких к тем, при которых измерялись расходы поплавками. Расход, вычисленный по поверхностным скоростям, равен $Q_ф$, а по средним скоростям на вертикалях $Q_д$. Отсюда $k_1 = \frac{Q_д}{Q_ф}$. При отсутствии специальных наблюдений k_1 принимают по табл. 60.

Таблица 60

Поправочные коэффициенты k_1 к фиктивному расходу

Характеристика русла	Средняя глубина, м		
	<1	1–5	>5
Равнинные реки (большие и средние) с благоприятными условиями течения	0,78—0,86	0,87—0,88	0,89—0,90
Реки большие и средние, засоренные, частично заросшие, извилистые, каменистые, с неспокойным течением	0,70—0,77	0,78—0,85	0,86—0,87
Реки с ухудшенными условиями: заросли, кочки, местами стоячая вода или горные реки с бурным течением	—	0,70—0,79	0,80—0,84

58. Гидрометрические вертушки

Гидрометрическая вертушка — наиболее точный прибор для измерения скоростей течения в отдельных точках.

Каждая вертушка состоит из следующих основных частей: корпуса, оси, лопастей, счетно-контрольного механизма и хвоста или руля.

В корпусе вертушки заключен счетный механизм. Корпус имеет приспособление для закрепления вертушки на штанге или для подвешивания на тросе.

Ось вертушки вместе с лопастями вращается на шариковых подшипниках или подшипниках из агата, сапфира или сплава. Вертушки бывают с вертикальной или горизонтальной осью вра-

щения. Наиболее распространены вертушки с горизонтальной осью — Н. Е. Жестовского (Ж-3), модернизированная ВЖТ-3. П. И. Бурцевым разработаны более совершенные конструкции вертушек ВБ-52, ВБ-61 (рис. 117).

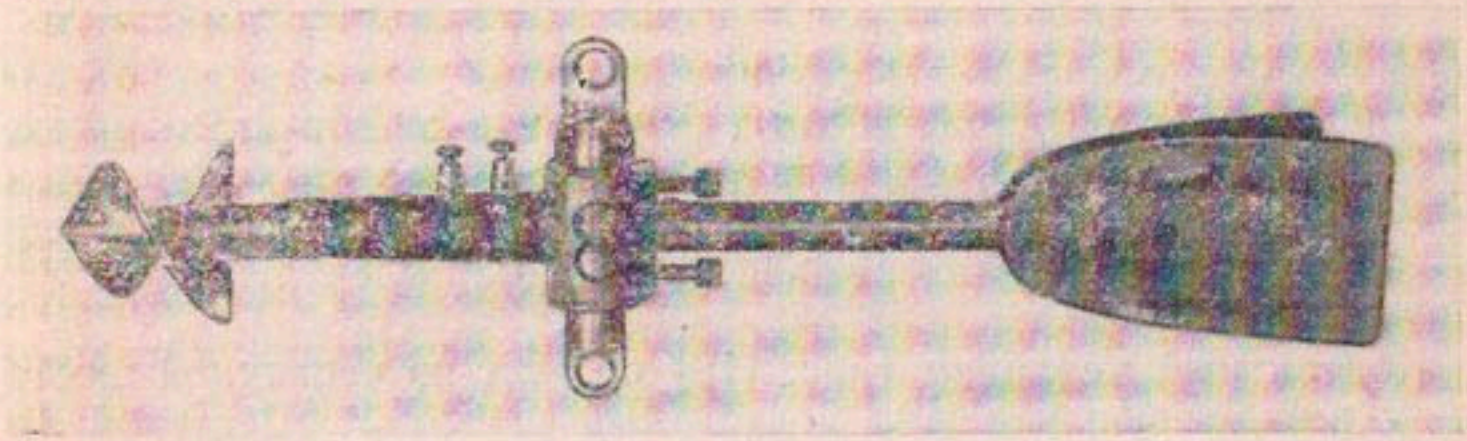


Рис. 117. Вертушка ВБ-61.

Гидрометрические вертушки ИВХ (бывш. Среднеазиатского института водного хозяйства) имеют вертикальную ось (рис. 118).

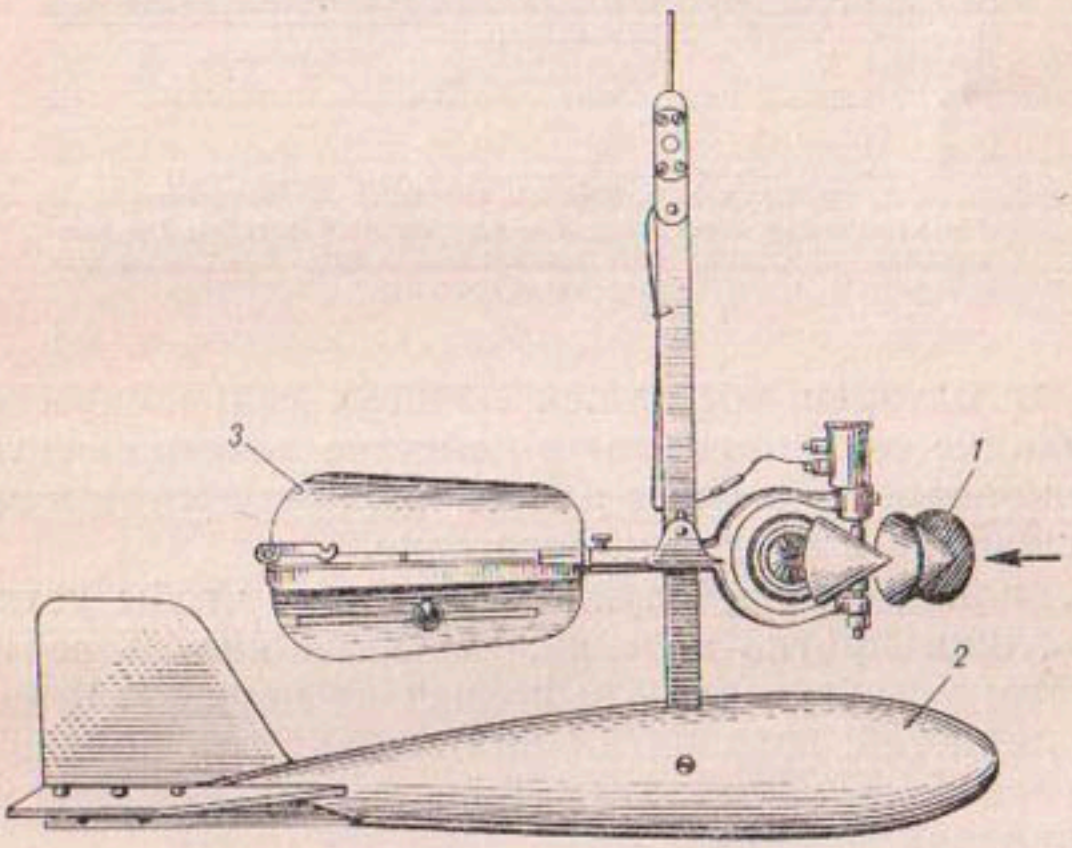


Рис. 118. Вертушка ИВХ.
1 — чашечный ротор; *2* — груз; *3* — хвостовое оперение.

Лопасти насажены на ось и вращаются вместе с ней. Они бывают разнообразной формы: параболические, воронкообразные, плоские; обычно они открытые. В вертушках ИВХ лопасти в виде чашек. Защитное кольцо ограждает лопасти и удерживает ось вертушки.

Счетно-контактный механизм. Скорость течения воды устанавливается по скорости вращения лопастей вертушки.

Если N — число оборотов вертушки за время t секунд, то скорость вращения лопастей

$$n = \frac{N}{t}, \qquad (133)$$

где n — число оборотов в 1 секунду.

Число оборотов лопастей определяют счетно-контактным механизмом. В последнее время преобладает электрическая сигнализация. Сигналы через определенное число оборотов вертушки передаются на электрический звонок, зуммер или электрическую лампочку.

Контактный механизм (рис. 119) состоит из червячной шестерни *1*, на которую насажен контактный штифт *2*. Шестерня вращается от червячной передачи на оси вертушки. Контактная пружина *3*, соприкасаясь со штифтом, замыкает ток, подаваемый к

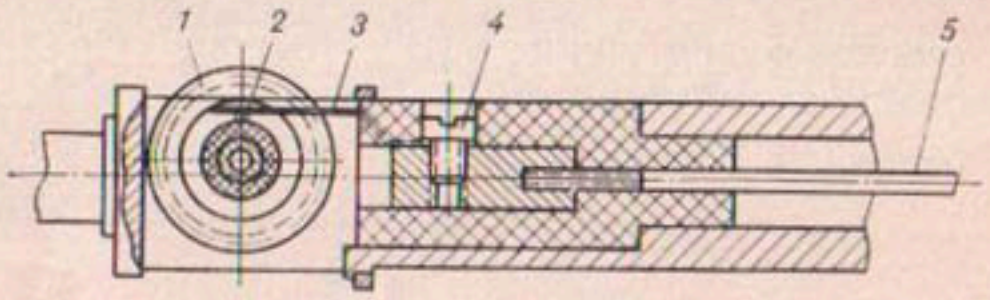


Рис. 119. Счетно-контактный механизм.

1 — червячная шестерня; *2* — контактный штифт; *3* — контактная пружина; *4* — контактный винт; *5* — токопроводящий стержень.

вертушке от батареи, состоящей из двух гальванических элементов. Замыкание тока приводит в действие электрическую сигнализацию. Ток замыкается через равное число оборотов в зависимости от числа штифтов и зубцов на шестерне.

Руль, или хвост, служит для того, чтобы установить лопасти вертушки против течения. У большинства вертушек руль в виде листа; у других руль выполнен из двух взаимно перпендикулярных лопастей; горизонтальная служит для поддержания вертушки в горизонтальном положении, а вертикальная удерживает ее в направлении течения.

Для установки вертушки на нужную глубину служат штанги и тросы. Вертушку крепят при помощи винта на штанге; плоский поддон препятствует погружению штанги в рыхлое дно.

При больших глубинах вертушку опускают при помощи лебедки. В этом случае она помещается на вертлюге, к нижнему концу которого прикрепляется груз, а к верхнему трос, идущий к лебедке (см. рис. 103).

Типы вертушек и их конструктивные особенности. Гидрометрическая вертушка Ж-3 имеет в верхней части корпуса две клеммы. Из них одна изолирована от корпуса. К ней подключен отрицательный полюс батареи. Два зажимных винта в задней части корпуса служат для укрепления вертушки на штанге. Электриче-

ская цепь вертушки сконструирована следующим образом: изолированная клемма проводит ток от батареи к гнезду штепселя, далее по токопроводящему стержню на контактную пружину, с пружины на контактный штифт, на шестерню, ось, корпус вертушки и на вторую клемму и далее по проводу на положительный полюс батареи.

Гидрометрическая вертушка ВБ-61 имеет лопастный винт особой формы: образующая винтовой поверхности прямолинейна. Погрешность измерения не превышает 3%. Вертушка измеряет скорости в большом диапазоне: от 0,05 до 5,0 м/с.

Гидрометрические вертушки с вертикальной осью применяют главным образом в ирригационной практике (вертушка ИВХ). Вертушка состоит из корпуса, ротора и хвоста. Ротор состоит из шести конусообразных чаш, вращающихся вокруг вертикальной оси. Контактная камера, размещенная в передней части корпуса, заполнена маслом и хорошо защищена от воды.

Тарировка вертушки и пользование тарировочными таблицами и кривыми. Для определения скорости течения воды в точке необходимо установить зависимость между скоростью вращения лопастей и скоростью течения воды. Эта зависимость устанавливается опытным путем в лабораторных условиях. Процесс определения зависимости скорости движения воды u от числа оборотов n вертушки в 1 секунду или $u = f(n)$ **называется тарированием.**

Вертушки тарируют в стоячей воде в прямоугольных лотках или круглых бассейнах. При этом вертушку перемещают в воде с определенной скоростью. Одновременно определяют число оборотов вертушки и продолжительность ее передвижения. Обычно над лотком по отшлифованным рельсам с помощью электродвигателя катится тележка. Вертушка укреплена на тележке. Через определенные расстояния устроены контакты, замыкаемые тележкой при ее движении, чем и определяется пройденный путь. Все данные записываются автоматически на ленте хронографа. Изменяя скорость движения тележки, получают значения n при разных скоростях.

Данные, полученные при тарировании, оформляют графически в виде тарировочных кривых $u = f(n)$. Зависимость обычно выражается кривой линией в нижней части, т. е. при малых скоростях, и прямой линией при больших значениях u. Поэтому нижнюю часть тарировочной кривой обычно вычерчивают в крупном масштабе (рис. 120), а прямую линию в более мелком масштабе.

Данные тарировки обрабатывают. Уравнения имеют следующий вид:

для кривой

$$u = an + \sqrt{bn^2 + u_0^2}, \qquad (134)$$

для прямой зависимости

$$u = u_0 + cn. \qquad (135$$

Из этих уравнений видно, что при числе оборотов $n = 0$ скорость $u = u_0$, т. е. когда лопасти не вращаются, все же скорость течения воды равна u_0. Вертушка не в состоянии уловить очень малые скорости, вернее, при малых скоростях течение воды не может преодолеть сопротивление в подшипниках, червячной передаче, контактном механизме и т. д. Скорость u_0 — начальная скорость вертушки. Она тем меньше, чем совершеннее конструкция.

В сертификатах, прилагаемых к вертушке, даны значения a, b, c и u_0 тарировочных уравнений. По приведенным уравнениям составляются таблицы, которыми пользуются для вычисления скоростей, измеряемых вертушкой. Такая таблица, соответствующая кривым на рис. 120, приведена в упражнении 28 (см. табл. 64).

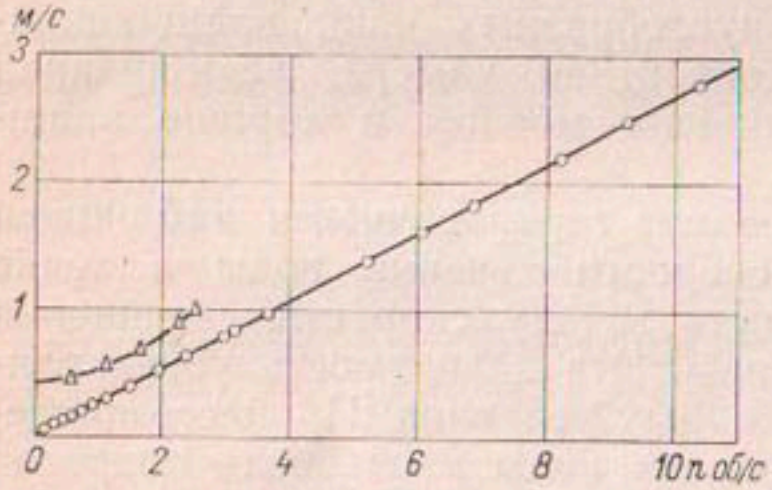


Рис. 120. Тарировочные кривые.

Уход за вертушкой. Гидрометрическая вертушка требует внимательного ухода. Вертушку нужно хранить в сухом помещении, перед началом работы проверять батарею, провода и электрическую сигнализацию путем прямого соединения, а затем включать в цепь и вертушку.

По окончании измерений вертушку и принадлежности к ней протирают сухой тряпкой и укладывают в ящик. В помещении вертушку надо просушить. Ходовую часть, кроме подшипников, разбирают, все части промывают керосином. В случае надобности наружные поверхности очищают зубной щеткой, а внутренние — щетинным ершом. Разбирать контактную пружину категорически запрещается — это приводит к нарушению тарировки.

После очистки в полость лопастного винта заливают трансформаторное масло; ходовую часть собирают и укладывают в ящик. Если погнулись оси и крылья или если на шариках и в обойме подшипников обнаружены раковины, вертушку отправляют в ремонт и тарировку. Время от времени необходимы контрольные тарировки вследствие износа частей прибора.

Зимой после работы вертушку надо опустить в воду, чтобы удалить образовавшийся лед. После работы очищают и все остальные принадлежности: лебедку, штанги, тросы.

59. Измерение скоростей вертушкой

Скорости измеряют в отдельных точках на выбранных *скоростных вертикалях*. Число скоростных вертикалей и их распределение в поперечном профиле зависят от ширины реки (см. табл. 61), конфигурации дна и требуемой точности измерения. При

Таблица 61

Расстояния между вертикалями в зависимости от ширины русла

Ширина русла, м . . .	2—5	5—20	20—30	30—40	40—60	60—80
Расстояние между вертикалями, м	0,5—1	1—2	2	3	4	6
Ширина русла, м . . .	80—100	100—200	200—300	300—500	500—800	>800
Расстояние между вертикалями, м	8	10	20	30	40	50

детальном измерении число вертикалей принимают в зависимости от ширины русла, располагая их на равном друг от друга расстоянии.

Если в поперечном профиле есть резкие переломы, то скоростные вертикали приурочивают к этим переломам. В пойме число скоростных вертикалей может быть уменьшено.

При назначении мест расположения вертикалей необходимо учитывать изменение шероховатости в поперечном профиле.

Число точек измерения скоростей на вертикали зависит от ее глубины. Пятиточечный способ обычно применяют в открытом русле. При глубине вертикали 0,5 м пользуются двухточечным способом, а при глубине до 0,3 м — одноточечным. При наличии ледяного покрова скорости измеряют в шести точках: на расстоянии 15—25 см от нижней поверхности льда на глубине $0{,}2H$, $0{,}4H$, $0{,}6H$, $0{,}8H$ и вблизи дна.

Кроме детального, существуют основной и сокращенный способы измерения расходов. При основном способе сокращается число скоростных вертикалей и число точек измерения на вертикали. В свободном ото льда и водной растительности русле скорости измеряют на глубинах $0{,}2H$ и $0{,}8H$, а при небольших глубинах — в одной точке $0{,}5H$ или $0{,}6H$. При ледяном покрове измерения ведут на 0,15, 0,50 и 0,85 рабочей глубины.

При сокращенном способе скорости измеряют на глубине $0{,}6H$.

Пульсация скоростей у дна и берегов больше, чем на середине реки. Поэтому средняя скорость может быть определена достаточно точно только за продолжительное время (когда положительные и отрицательные отклонения от истинной скорости взаимно компенсируются). Чем ближе к берегу реки и дну, тем продолжительнее должно быть измерение скорости. Практически следует убедиться, что пульсация невелика и не вносит значительных погрешностей в измеряемую скорость. Для этого проверяют продолжительность отдельных приемов. Приемом называется число сигналов и соответствующее ему количество оборотов лопастного винта между записями времени.

Так, между двумя сигналами вертушки ЖМ-3 лопастный винт делает 20 оборотов. Если скорость течения невелика и позволяет проследить время между двумя сигналами, то 20 оборотов, или 1 сигнал, и соответствует одному приему.

При больших скоростях один прием может включать два сигнала и более.

При измерении скоростей в точке придерживаются следующих обязательных положений: 1) общее число приемов должно быть четным, 2) продолжительность измерения не менее 100 с, 3) разница между продолжительностью обеих половин наблюдений не должна превышать 5 с. Для примера даны результаты измерения в одной точке.

№ приема	0	4	8	12	16	20	24	28	32
Отсчет по секундомеру	0	14,5	27	42	57	71	85	100	116

В этом примере общая продолжительность превышает 100 с. Продолжительность первых 16 приемов составляет 57 с, а следующих 16 приемов 116—57 = 59 с. Разница здесь всего 2 с (59—57).

На реках с очень большими скоростями течения продолжительность наблюдений можно сократить при условии, чтобы число оборотов вертушки было не менее 500.

Порядок производства работ следующий: записывают дату и время начала работ, уровень воды по водомерному посту и расстояние от постоянного начала до уреза воды. Установив лодку или паром на ближайшей до уреза скоростной вертикали, дважды промеряют ее глубину. По среднему значению обоих промеров вычисляют среднюю глубину, а по ней глубину расположения скоростных точек. После этого приступают к измерению скоростей, начиная с поверхностной.

Секундомер включают по началу или по окончании сигнала. При быстром течении удобнее отмечать время по концу сигнала, а при медленном — по началу.

После всех измерений снова записывают время (часы и минуты) и уровень воды на водомерном посту. При интенсивных колебаниях уровня наблюдения производят перед началом измерений на каждой вертикали. В этом случае в руслах с устойчивым профилем допускается сокращенный способ измерения расхода воды.

Зимой скорости измеряют подо льдом. Во льду вырубают лунки, над каждой из которых устанавливают будку на полозьях. В лунках измеряют толщину льда и шуги, а также толщину снега подо льдом. Если шуга занимает больше 20% водного сечения, следует выбрать другой створ для измерения расхода воды. Глубину вертикали принимают без толщины погруженного льда. Точки измерения скоростей намечают в зависимости от выбранного способа измерений (шеститочечный, трехточечный и т. д.).

При переходе с одной вертикали на другую вертушку опускают в теплую воду, чтобы она не покрылась льдом.

Урезы воды устанавливаются по нижней поверхности льда в прибрежных лунках.

60. Вычисление расхода воды, измеренного вертушкой

Расход вычисляют аналитическим, графическим и графомеханическим способами или методом изотах. Последний способ из-за трудоемкости редко применяется на практике.

Аналитический способ. Аналитический способ расчета заключается в суммировании частичных расходов между соседними вертикалями. Если обозначить площади между двумя соседними скоростными вертикалями через $\Delta\omega_i$, среднюю скорость воды в этой площадке $v_{ср_i}$, то частичный расход

$$\Delta Q_i = v_{ср_i}\Delta\omega_i, \tag{136}$$

а расход реки

$$Q = \Sigma\,\Delta Q_i = \Sigma\, v_{ср_i}\Delta\omega_i. \tag{137}$$

Отдельные частичные расходы определяют следующим образом. Среднюю скорость на каждой из вертикалей вычисляют по формулам (121) — (124). Площади между вертикалями определяют как площади треугольников или трапеций.

Средняя скорость воды первой площадки $v_{ср_1} = kv_{в_1}$, где $v_{в_1}$ — средняя скорость на вертикали № *1*. Величина k зависит от характера берега (см. стр. 218).

Среднюю скорость течения для второй площадки вычисляют из средних скоростей на вертикалях № *1* и *2*, т. е. $v_{в_1}$ и $v_{в_2}$. Продолжая вычисления в том же порядке, получаем

$$Q = kv_{в_1}\Delta\omega_1 + \frac{v_{в_1} + v_{в_2}}{2}\Delta\omega_2 + \ldots + \frac{v_{в_{n-1}} + v_{в_n}}{2}\Delta\omega_n + \\ + kv_{в_n}\Delta\omega_{n+1}. \tag{138}$$

При наличии ледяного покрова средние скорости на вертикали рассчитывают по формулам (125) и (126). Все расчеты выполняют в табличной форме (см. упражнение 28, табл. 65).

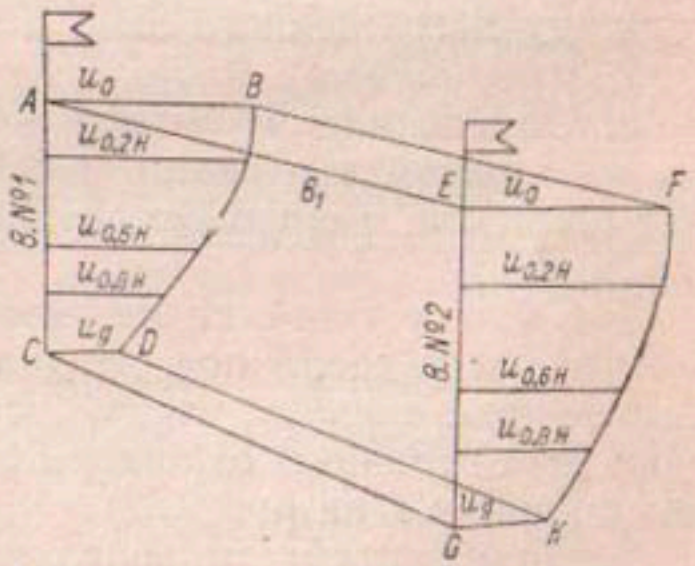


Рис. 121. Модель частичного расхода воды.

Графический способ. По этому способу расчеты выполняют с применением планиметра или палетки. В основу приняты следующие соображения. Частичный расход между двумя соседними вертикалями № *1* и *2* (рис. 121) представляет собой объем воды, протекающей за 1 с через площадку, ограниченную этими вертикалями, а сверху и снизу — линией уровня воды и линией дна. Для определения этого объема перпендикулярно к вертикалям № *1* и *2* откладывают измеренные скорости (м/с). В результате построения получают эпюры распределения скоростей на вертикалях, или го-

дографы. Искомый частичный расход (рис. 121) равен полупроизведению площадей $ABCD$ и $EFGH$ на расстояние b_1 между ними. Обозначив эти площади через q_1 и q_2, получим

$$\Delta Q = \frac{q_1 + q_2}{2} b_1. \qquad (139)$$

Площадь эпюры можно представить в виде площади равновеликого прямоугольника, у которого основание равно глубине вертикали, а высота средней скорости, т. е.

$$q = hv_в. \qquad (140)$$

Эта величина называется элементарным расходом и выражается в м²/с. Элементарные расходы вычисляются графически путем планиметрирования годографов.

Таким образом, частичный расход равен полупроизведению элементарных расходов на расстояние между вертикалями. Суммируя все частичные расходы, получают расход реки

$$Q = \Sigma \Delta Q. \qquad (141)$$

Суммирование тоже можно выполнить графически. Для этого выше уровня воды откладывают элементарные расходы над соответствующими вертикалями и соединяют полученные точки плавной кривой (см. рис. 122). Она называется эпюрой распределения элементарных расходов по ширине реки. Площадь этой фигуры и выражает величину расхода реки.

Итак, графический расчет выполняют следующим образом:

1. Вычерчивают поперечный профиль створа, на котором показывают положение промерных и скоростных вертикалей, расстояния от постоянного начала, глубины, отметку расчетного уровня и толщину погруженного льда и шуги (для зимы).

2. Вычерчивают эпюры скоростей (годографы) на вертикалях.

3. Определяют элементарный расход $q = hv_в$ как площадь эпюры на каждой вертикали. Эту площадь определяют планиметром или палеткой, а среднюю скорость получают делением площади на глубину.

4. Средние скорости на скоростных вертикалях заносят в соответствующую графу под профилем (см. рис. 122 к упражнению 29). Вычерчивают эпюру распределения средних скоростей по ширине реки. Эти величины отложены от уровня над скоростными вертикалями (линия *1* на рис. 122).

5. По масштабу определяют средние скорости на промерных вертикалях снимая в соответствующих местах с кривой $v_в$.

6. Дополнительно вычисляют элементарные расходы на всех промерных вертикалях. Для этого снятые с чертежа значения $v_в$ умножают на соответствующие глубины. Все значения q, рассчитанные для скоростных и промерных вертикалей, заносят в соответствующую графу и откладывают в заданном масштабе над профилем. Полученные точки соединяют плавной кривой (линия *2* на

рис. 122). При построении кривой q масштаб выбирают так, чтобы наибольшее значение ординаты не превышало 7—10 см.

7. Вычисляют расход воды. Для этого планиметром или палеткой определяют площадь фигуры, заключенной между расчетными уровнем и кривой q.

Вопросы для самопроверки

1. Есть ли разница в понятиях «средняя» и «мгновенная» скорость в точке? Чем она обусловлена?
2. Как распределяются скорости в поперечных сечениях открытого русла и при наличии ледяного покрова?
3. Какие применяют методы измерения скоростей на вертикалях (в зависимости от числа точек измерений) и как рассчитывают средние скорости для каждого из них в открытом русле при наличии ледяного покрова?
4. Как построить график распределения скоростей на вертикали и как рассчитать среднюю скорость на ней, пользуясь эпюрой?
5. Как измеряют скорость движения воды поплавками?
6. Какова величина поправочного коэффициента к фиктивному расходу для определения действительной его величины?
7. Какие известны конструкции гидрометрических вертушек, наиболее распространенных в нашей стране?
8. Каковы основные детали вертушки с электрической сигнализацией?
9. В чем заключается уход за вертушками?
10. Для чего служит тарировка вертушки и как ее выполняют?
11. Чем руководствуются при определении числа точек измерения скоростей на вертикали?
12. В чем особенности измерения скоростей воды подо льдом?
13. Как вычисляют расход воды аналитическим и графическим способами с измерением скорости движения воды вертушкой?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 28. Вычислить аналитическим способом расход воды, измеренный вертушкой на р. Сакмаре у ст. Сакмарской 20 мая 1963 г.

Дано: выписки из книжки для записи измерения расхода воды (табл. 62 и 63) и тарировочной таблицы вертушки (табл. 64).

Вертушка типа Ж-3, контакт через 20 оборотов; тарировка № 12 от 20 августа 1962 г.

За постоянное начало принят репер № 1 на левом берегу.

Решение. Упражнение выполняем в соответствии с пунктами 56, 58—60.

1. Убедившись в правильности производства промеров и записей в журнале (табл. 62), вычисляем средние из обоих промеров.

2. Проверяем правильность измерения и записей скоростей (табл. 63). Анализ этих материалов показал: а) вертушка в точке устанавливалась правильно; б) разность обеих половин продолжительности выдержки в точке нигде не превышает 5 с; г) применялся одно-, двух- и пятиточечный способ измерений.

3. Скорости вычисляем в такой последовательности:

Таблица 62

Промеры глубины

№ вертикали		Расстояние от постоянного начала l м	Глубина h м			Площадь между вертикалями $\Delta\omega$ м²	
промерной	скоростной		I	II	средняя	промерными	скоростными
Урез лев. берега . . .		10,2	0,00	0,00	0,00		
1		18	0,78	0,77	0,78	3,0	10,3
2	1	26	1,06	1,05	1,05	7,3	
3		35	1,12	1,08	1,10	9,7	27,7
4		46	1,26	1,24	1,25	12,9	
5	2	50	1,32	1,28	1,30	5,1	
6		55	1,21	1,20	1,20	6,2	31,2
7		65	1,26	1,24	1,25	12,2	
8	3	75	1,33	1,32	1,32	12,8	
9		80	1,41	1,39	1,40	6,8	21,9
10	4	90	1,61	1,63	1,62	15,1	
11		100	2,00	1,96	1,98	18,0	38,4
12		105	2,01	1,99	2,00	9,9	
13	5	110	2,21	2,19	2,20	10,5	
14		120	2,11	2,10	2,10	21,5	42,2
15	6	130	2,05	2,06	2,05	20,7	
16		140	2,01	1,99	2,00	20,2	32,2
17		144	1,61	1,60	1,60	7,2	
18		146	1,31	1,30	1,30	2,9	
Урез пр. берега		149	0,00	0,00	0,00	1,9	
Итого с округлением $B = 139$ м						204	204

а) общее число оборотов лопастного винта. Например, на вертикали № 1 измерения проводили в четыре приема (графы 7—10 табл. 63). Общее число оборотов $N = 4 \cdot 60 = 240$ (графа 13);

б) число оборотов n за 1 с (графа 14).

$$n = \frac{240}{133} = 1{,}80 \text{ об/с};$$

Таблица 63

Журнал измерения и вычисления скоростей

Начало 10 ч 40 мин; конец 14 ч 15 мин

№ скоростной вертикали	Расстояние от постоянного начала l м	Глубина h м	Глубина опускания вертушки		Число оборотов за прием	Отсчеты по секундомеру t с						Сумма оборотов N	Число оборотов в секунду n	Скорость в точке u м/с	Средняя скорость на вертикали $v_в$ м/с
			в долях от h	в метрах		приемы									
						1	2	3	4	5	6				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	26	1,05	0,6	0,63	60	32	65	97	133			240	1,80	0,45	0,46
2	50,0	1,30	0,2	0,26		33	65	99	134	168	202	360	1,78	0,44	0,42
			0,8	1,04		36	74	110	148			240	1,62	0,40	
3	75,0	1,32	Поверхность	0,10		29	58	88	118	145	174	360	2,07	0,32	0,45
			0,2	0,26		30	62	91	120	149	177	360	2,03	0,51	
			0,6	0,79	60	32	65	97	133			240	1,80	0,45	
			0,8	1,06		35	74	111	149			240	1,61	0,40	
			Дно	1,22		43	86	129	172			240	1,39	0,34	
4	90,0	1,62	Поверхность	0,10		22	45	63	87	109	129	360	2,79	0,72	0,62
			0,2	0,32		23	46	65	88	111	132	360	2,73	0,70	
			0,6	0,97	60	25	50	76	99	123	148	360	2,44	0,62	
			0,8	1,30		28	57	84	111	143	172	360	2,10	0,53	
			Дно	1,52		31	63	92	122	155	187	360	1,92	0,48	
5	110,0	2,20	Поверхность	0,10		19	39	57	78	98	117	360	3,03	0,80	0,65
			0,2	0,44		21	42	63	82	104	124	360	2,90	0,74	
			0,6	1,32	60	23	46	70	94	118	142	360	2,53	0,65	
			0,8	1,76		29	58	87	115	143	172	360	2,10	0,53	
			Дно	2,10		31	62	93	123	155	186	360	1,73	0,43	
6	130,0	2,05	0,6	1,23	60	30	56	84	111	139	167	360	2,16	0,54	0,54

Таблица 64

Выписка из тарировочной таблицы вертушки Ж-3 № 61700

Число оборотов в секунду	0	2	4	6	8	Число оборотов в секунду	0	2	4	6	8
1,3	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	2,2	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57
1,4	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	2,3	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60
1,5	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	2,4	0,61	0,61	0,62	0,63	0,63
1,6	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	2,5	0,64	0,64	0,65	0,66	0,66
1,7	0,42	0,43	0,43	0,44	0,44	2,6	0,67	0,67	0,68	0,68	0,68
1,8	0,46	0,45	0,46	0,46	0,47	2,7	0,69	0,70	0,70	0,71	0,71
1,9	0,48	0,48	0,48	0,49	0,50	2,8	0,72	0,72	0,73	0,73	0,74
2,0	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	2,9	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77
2,1	0,53	0,53	0,54	0,54	0,55	3,0	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80

Уровень воды на водомерном посту за время измерений

Уровень	№ сван	Отсчет a см	Приводка d см	Уровень над „0" графика, см
Начальный	3	57	150	207
Конечный	3	55	150	205
Расчетный				206

в) скорость в точке (графа 15) из тарировочной табл. 64. При $n = 1{,}80$ об/с $u = 0{,}45$ м/с;

г) при одноточечном способе измерения $v_в = u_{0,6} = 0{,}45$ м/с (графа 16). Средние скорости на вертикали при пятиточечном методе измерения в открытом русле вычисляем по формуле (124).

4. Расчеты по вычислению площади водного сечения реки (графа 7 табл. 62) выполнены по аналогии с упражнением 27.

5. Площади между скоростными вертикалями (графа 8) получены суммированием соответствующих площадей, вычисленных в графе 7, между промерными вертикалями.

6. Расходы воды между скоростными вертикалями (графа 6, табл. 65) вычислены по формуле (136), т. е. перемножением данных граф 4 и 5.

Средние скорости и расходы воды в крайних площадях водного сечения определяем по формуле $\Delta Q_1 = k v_{в1} \Delta\omega_1$ и $\Delta Q_n = k v_{вn} \Delta\omega_{n+1}$ (см. формулу (138). Коэффициент k_1 принят 0,7 (берег пологий, глубины у уреза равны нулю — стр. 218).

7. Расход воды в реке получаем суммированием расходов воды между скоростными вертикалями (графа 6).

Сводные данные расчетов:

расход воды $Q = 103$ м^3/с;
площадь водного сечения $\omega = 204$ м^2;
ширина $B = 139$ м;
средняя глубина $h_{ср} = 204 : 139 = 1{,}47$ м;
наибольшая глубина $h_{наиб} = 2{,}20$ м;

Таблица 65

Вычисление расхода воды детальным способом

№ скоростной вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Средняя скорость, м/с		Площадь между вертикалями $\Delta\omega$ м²	Расход между вертикалями ΔQ м³/с
		на вертикали, $v_в$	между вертикалями $v_{ср}$ м²		
1	2	3	4	5	6
Урез лев. берега	10,2	0,00			
			0,32	10,3	3,3
1	26,0	0,45			
			0,44	27,7	12,2
2	50,0	0,42			
			0,44	31,2	13,7
3	75,0	0,45			
			0,54	21,9	11,8
4	90,0	0,62			
			0,64	38,4	24,6
5	110,0	0,65			
			0,60	42,2	25,3
6	130,0	0,54			
			0,38	32,2	12,2
Урез пр. берега	149,0	0,00			
Итого				204,0	103,1

средняя скорость $v = \frac{103,1}{204} = 0,505$ м/с;

наибольшая скорость на вертикали $v_{наиб} = 0,80$ м/с.

Упражнение 29. Для условий упражнения 28 с дополнительно измеренными скоростями на вертикалях № 1, 2, 6 (см. эпюры рис. 122) вычислить расход воды графическим способом. Расчеты выполнены на рис. 122 в соответствии с п. 59. По данным журнала промеров (табл. 62) вычерчен профиль водного сечения, на котором показаны все промерные и скоростные вертикали (см. первые четыре строки под профилем). По данным журнала измерения скоростей (табл. 63) вычерчены эпюры скоростей на всех скоростных вертикалях (с правой стороны чертежа). Способ построения эпюр изложен в п. 56 (см. рис. 112). При построении эпюр приняты масштабы: для глубин 1 : 50, для скоростей в 1 см — 0,2 м/с.

Таблица 66

Определение элементарных расходов (площадей эпюр) и средних скоростей на вертикалях

№ вертикали	Элементарный расход q м²/с	Глубина вертикали h м	Средняя скорость на вертикали $v_в$ м/с
1	0,48	1,05	0,46
2	0,54	1,30	0,42
3	0,59	1,32	0,45
4	1,02	1,62	0,63
5	1,43	2,20	0,65
6	1,11	2,05	0,54

Площади эпюр скоростей на вертикалях определены плани-

метром. Результаты планиметрирования и значения средних скоростей $v_в$ на вертикалях приведены в табл. 66.

При сравнении средних скоростей, вычисленных графически и аналитически (табл. 63), видим, что они полностью совпадают. Максимальная разница (на вертикали № 4) составляет 0,01 м/с, или $\frac{0{,}01 \cdot 100}{0{,}63} = 1{,}6\%$.

Полученные значения $v_в$ отложены вверх от уровня воды на профиле водного сечения. Соединив концы ординат плавной кривой (линия *1* на рис. 122), получим эпюру распределения средних скоростей по ширине реки. С этой эпюры сняты значения средних скоростей для всех промерных вертикалей (пятая строка под профилем). Умножив скорости $v_в$ на глубины h промерных вертикалей, вычисляем элементарные расходы q. Эти величины записаны в шестую строку профиля и по ним построена эпюра элементарных расходов (линия *2* на рис. 122).

В результате планиметрирования площади эпюры q получен расход $Q = 104$ м³/с.

Площадь водного (живого) сечения также определена планиметрированием и равна 204 м². Результаты подсчетов приведены в таблице с левой стороны рис. 122.

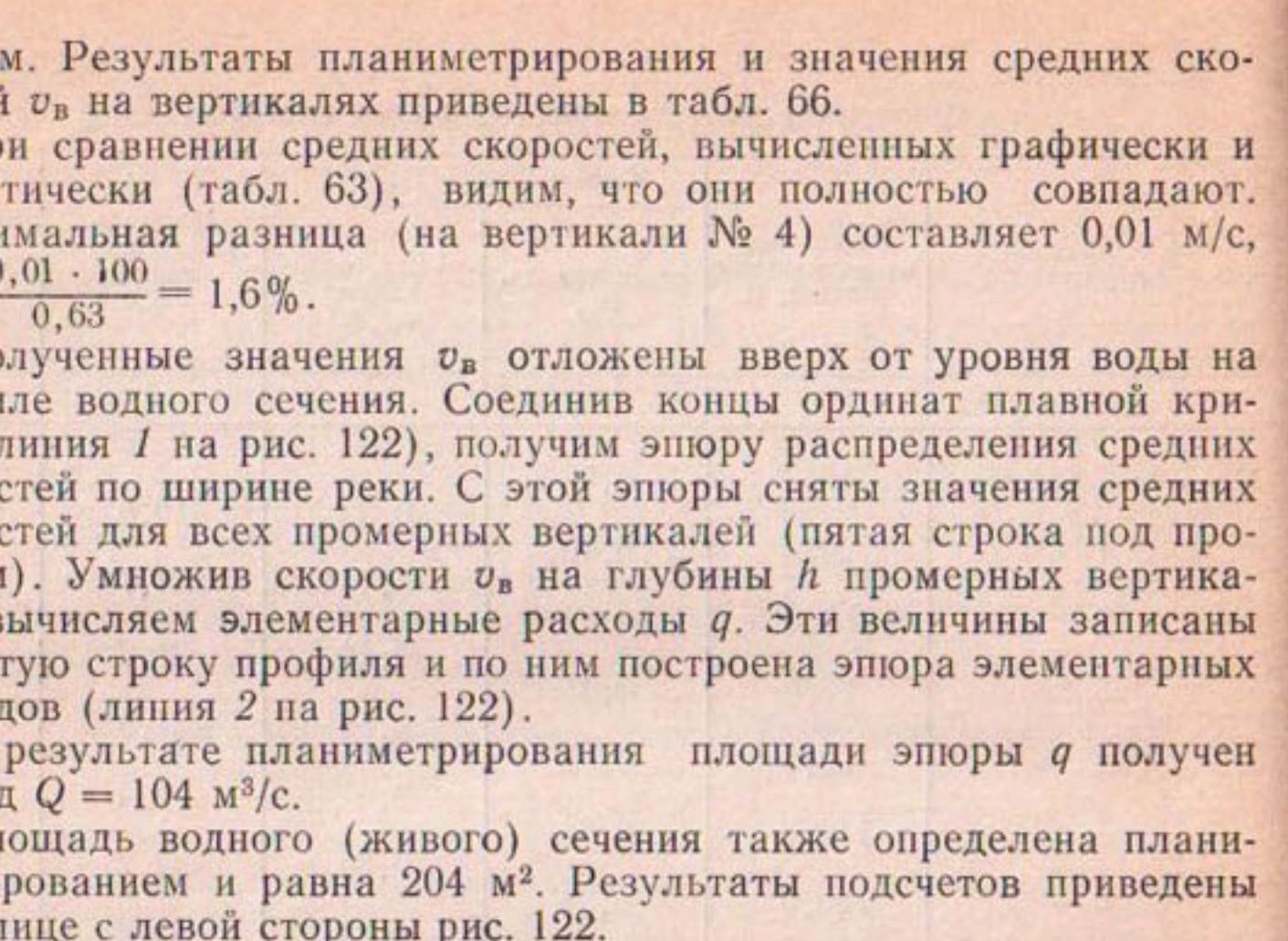


Рис. 122. Вычисление расхода

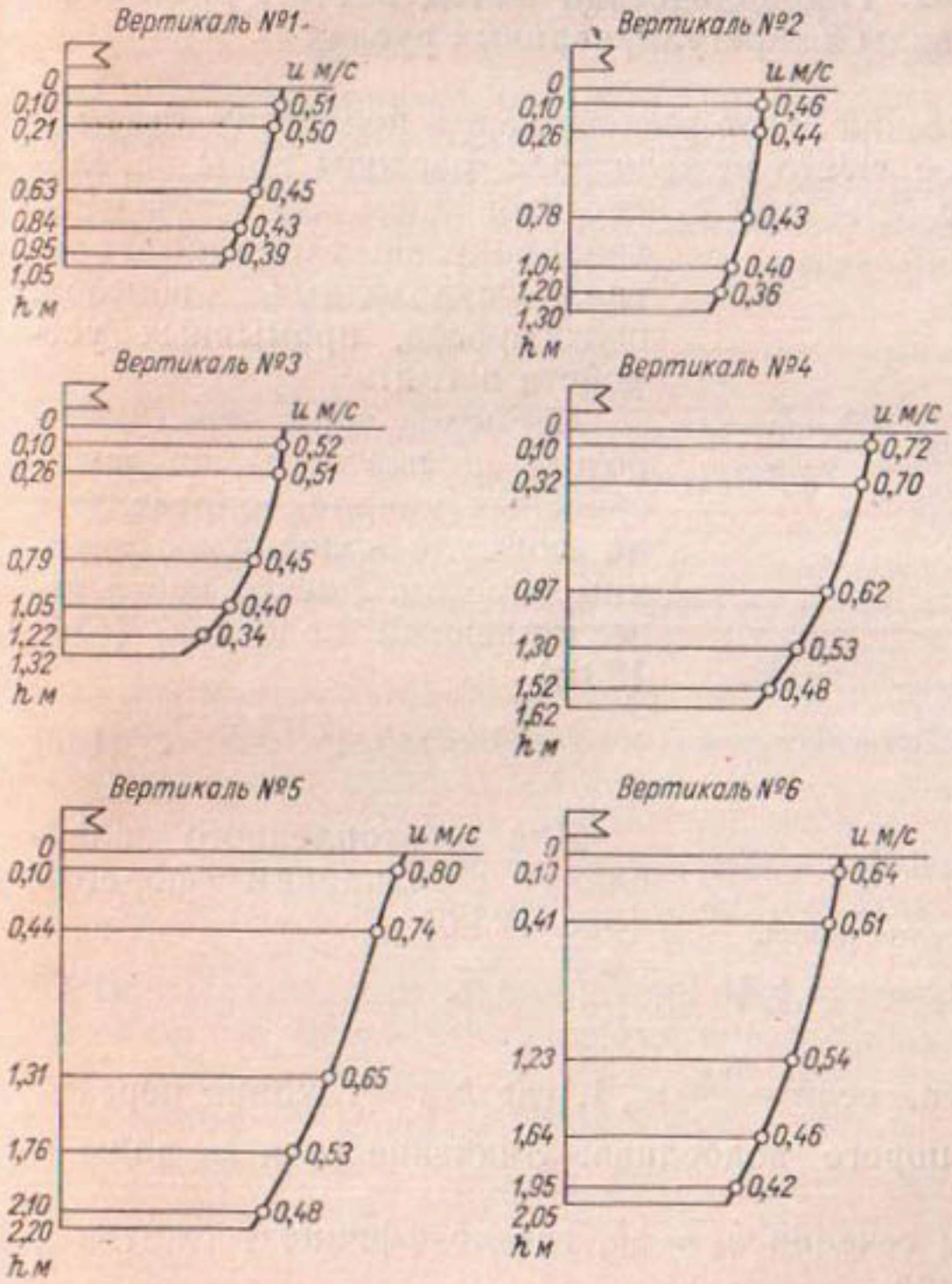
На стр. 232 — вычисление расхода; на стр. 233 — эпюры скоростей (годографы) на русла; 2 — эпюра распределения элементарных

ТЕМА 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ БЕЗ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

В зависимости от местных условий применяют следующие методы определения расходов воды без измерения скоростей: гидравлический, смешения и объемный.

61. Гидравлический метод определения расходов воды в свободном русле

Расходы воды в свободном открытом русле вычисляют по формуле $Q = \omega v$, где скорость v рассчитывают по формуле Шези (без измерений). Этот метод применим для определения максимальных расходов воды, если по уровням, устанавливаемым по следам паводка на берегу или опросу старожилов, можно определить отмет-



воды графическим способом.

скоростных вертикалях; *1* — эпюра распределения средних скоростей по ширине расходов воды; *3* — линия дна.

ку уровня высоких вод. При этом нивелируется водное сечение и уклон водотока. На больших расстояниях уклоны (в особенности при больших падениях уровня) устанавливают по меткам УВВ. Если метки УВВ сохранились лишь на коротком участке русла, то уклон нивелируют по дну, так как при высоких уровнях уклоны свободной поверхности воды и дна русла близки между собой. Коэффициент шероховатости подбирают по таблице М. Ф. Срибного, а затем рассчитывают скорость потока $v = C\sqrt{RI}$.

Этот метод чаще всего применяется в необжитых, малонаселенных и не изученных в гидрологическом отношении районах. Надо очень тщательно выполнять все работы. Следы паводка определяют в нескольких местах и там же нивелируют несколько профилей, по каждому из которых рассчитывают расход воды. Проверяют и данные опроса старожилов.

62. Гидравлический метод расчета расходов воды в зарегулированных руслах

Если гидрометрический створ расположен в подпертом бьефе и перенос его в другое место нежелателен, расходы воды определяют гидравлическим методом с использованием для этой цели водопропускных отверстий плотин, судоходных шлюзов, шугосбросов, промывных устройств и т. д.

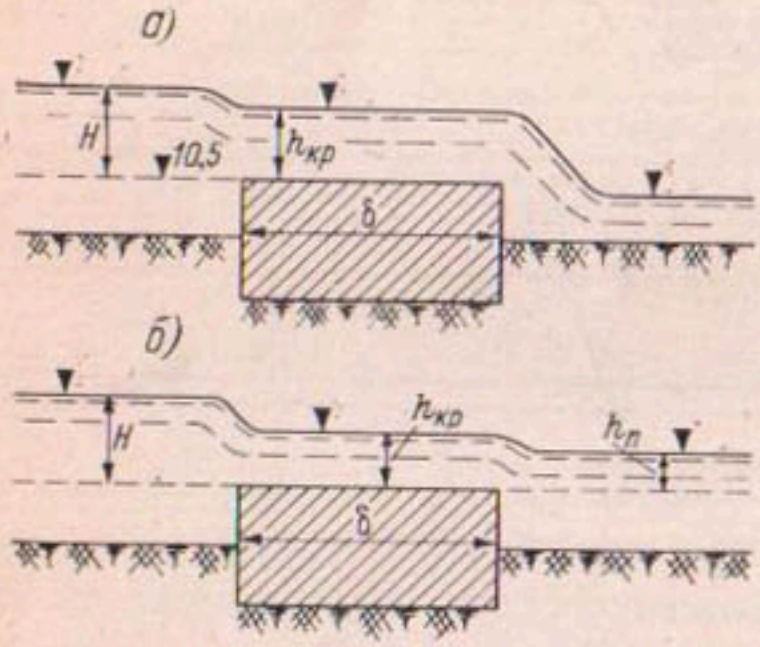


Рис. 123. Водосливы с широким порогом.
а — неподтопленный; *б* — подтопленный.

1. Расход воды через быстротоки и перепады на водосбросных каналах определяют по формуле водослива с широким порогом. Расход через неподтопленный водослив (рис. 123 *а*)

$$Q = mb_c\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}. \quad (142)$$

Для подтопленного водослива с широким порогом (рис. 123 *б*)

$$Q = \varphi_п b_c h_п \sqrt{2g\,(H_0 - h_п)}. \quad (143)$$

Водослив затоплен, если $\frac{h_{кр}}{h_п} \leqslant 1$, где $h_{кр}$ — глубина переливающегося слоя на пороге водослива. Значения m и φ даны в табл. 67.

Ширина в сжатом сечении $b_c = \xi b$, где коэффициент сжатия ξ определяют по формуле

$$\xi = 1 - a\frac{H}{b+H}. \quad (144)$$

Таблица 67

Значения m и φ для водосливов с широким порогом

Тип порога	m	φ
С острым входным ребром	0,32	0,85
С закругленным входным ребром	0,35	0,92
Со срезанной верховой гранью	0,37	0,97

Коэффициент a принимают в зависимости от формы передней грани быка: 0,2 — для прямоугольной грани; 0,11 — для полуцир-кульной и заостренной грани, 0,06 — для криволинейно заостренной.

2. Расход воды через щитовые отверстия определяют по формуле

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}, \qquad (145)$$

где μ — коэффициент расхода (по гидравлическим справочникам в зависимости от размеров отверстия и степени сжатия струй); ω — площадь отверстия; H_0 — напор над центром отверстия при свободном истечении, исправленный на скорость подхода. В случае затопленного отверстия напор равен разности отметок верхнего и нижнего бьефов.

63. Измерение расхода воды методом смешения

Измерение расходов воды методом смешения заключается в следующем. Разбивают два створа: пусковой и ниже по течению измерительный. В пусковом створе вводят раствор вещества или индикатора: в каждую секунду в реку поступает расход раствора $Q_р$ л/с. Допустим, концентрация раствора, т. е. количество вещества или индикатора в единице объема — $C_р$. Всего в реку поступает $C_рQ_р$ индикатора (соли, изотопов и т. д.) за 1 с. Расход потока равен Q. До пуска измерительного вещества концентрация его в реке была C (расход индикатора был CQ), а после пуска $CQ + C_рQ_р$. В измерительном створе расход воды будет $Q + Q_р$. После хорошего перемешивания вновь измеряется концентрация раствора в реке. Пусть средняя концентрация воды в измерительном створе оказалась C_0. Следовательно, расход индикатора здесь составляет $C_0(Q + Q_р)$. Естественно, что

$$C_рQ_р + CQ = C_0(Q + Q_р).$$

Отсюда

$$Q = \frac{C_р - C_0}{C_0 - C}Q_р. \qquad (146)$$

Если поток в естественном состоянии не содержит индикатора или его ничтожно мало, тогда $C=0$. Если расход раствора составляет малую величину по сравнению с расходом потока (меньше 2%), то и величиной $Q_р$ в правой части формулы (146) можно пренебречь и $C_р Q_р = C_0 Q$. Отсюда

$$Q = \frac{C_р}{C_0} Q_р, \qquad (147)$$

т. е. для измерения расхода воды в водотоке достаточно измерить концентрацию раствора $C_р$ и среднюю концентрацию его C_0 в измерительном створе.

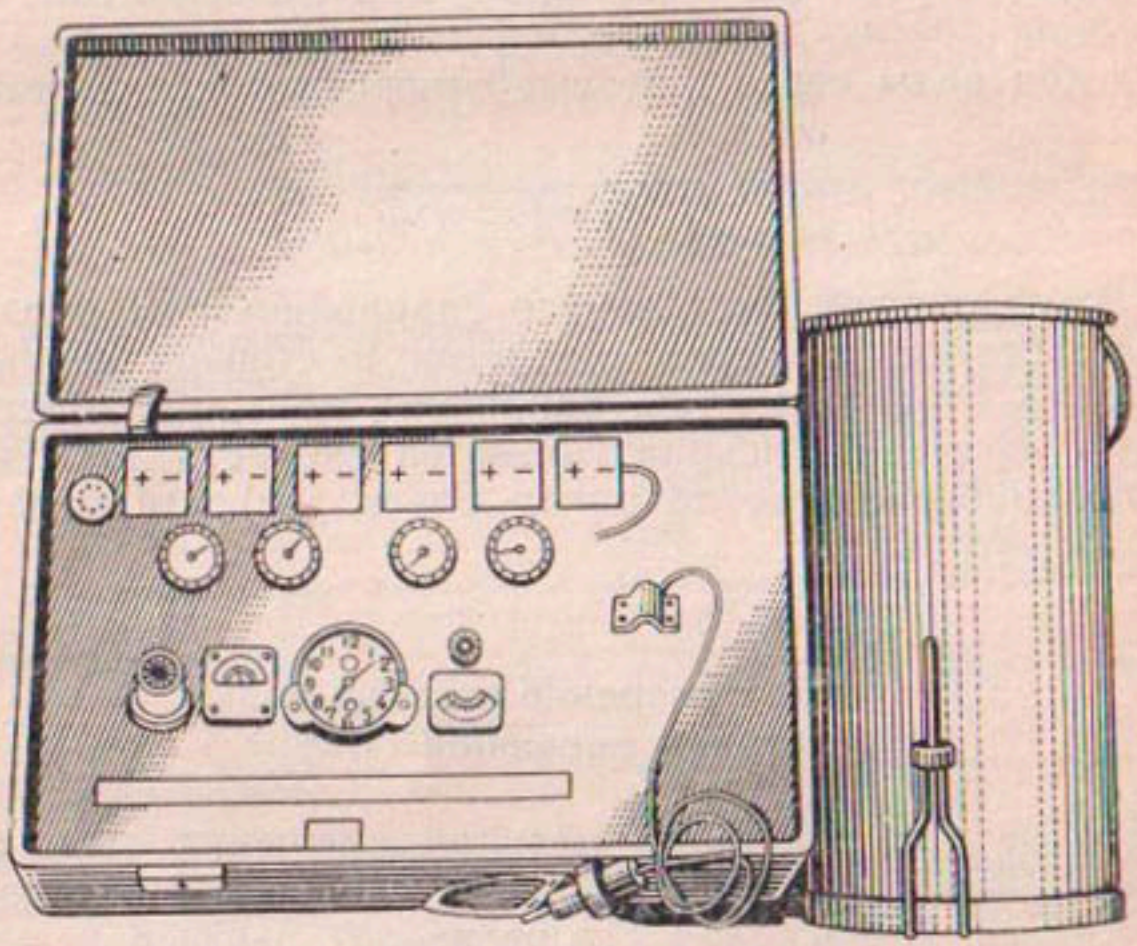


Рис. 124. Измеритель расхода воды ИРВ-52.

Применяют следующие способы смешения: химический, колориметрический, тепловой и радиоактивный. При химическом способе в поток вводится раствор соли, при колориметрическом — красящее вещество, при тепловом — вода с высокой температурой, при радиоактивном — радиоактивные изотопы.

В практике для измерения расходов воды до 5 м³/с чаще всего применяется химический способ, сущность которого состоит в том, что с повышением концентрации раствора увеличивается электропроводность. Для измерения концентрации раствора и воды служит прибор ИРВ-52 (рис. 124). Он состоит из электроизмерительного мостика, двух 20-литровых баков и пипетки. Мерные баки служат для измерения объема выливаемого в поток раствора. Они снабжены мерными иглами для отсчета уровня. На 1 м³/с расхода потока в пусковом створе должен быть вылит раствор, содержа-

щий 1—2 кг соли с концентрацией 0,2—0,3 кг на 1 л воды. Из отобранной пробы определяют электропроводность раствора, а в измерительном створе на берегу устанавливают электроизмерительный мостик. Отсчет проводят через каждые 15 с.

Этот способ применим на горных реках с большими скоростями течения или на порожистых участках равнинных рек. Он незаменим при малых глубинах, когда работа с вертушкой вообще невозможна.

64. Объемный метод измерения расхода воды

Объемным методом пользуются для измерения малых расходов воды (ключей, родников) не свыше 10 л/с. Для измерения служат сосуды емкостью $V = 40\,Q$ (ведра, бочки или специально приготовленные для этой цели ящики и резервуары). Мерный сосуд перехватывает весь расход потока. По объему воды V, поступающей в сосуд, и продолжительности наполнения t определяется расход в л/с.

$$Q = \frac{V}{t}. \qquad (148)$$

Для установки сосуда в месте измерения расхода воды поток должен иметь перепад или крутое падение с водоупорным грунтом. Для этого поток перегораживают вертикальной стенкой, в которой устанавливают желоб или трубу, откуда вода поступает в мерный сосуд. Уровень воды в сосуде измеряют крючковой рейкой с точностью $\pm$ 1 мм.

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют методы измерения расхода воды без измерения скоростей течения, в каких случаях они применяются?
2. Как вычислить максимальный расход путем обследования УВВ?
3. Как определить расход воды через водослив с широким порогом?
4. Как измерить расход воды способом химического смешения?
5. Как измерить расход воды объемным методом?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 30. Вычислить расход воды, протекающей через полностью открытое отверстие деревянной однопролетной плотины $b = 6$ м.

Дано: отметки порога водослива 10,5 м, уровень верхнего УВБ = 14,0 м и нижнего бьефа УНБ = 12,0 м, рис. 123 *а*. Длина порога $\delta \approx 15$ м, уровень над порогом 13,3 м. Скоростью подхода воды к отверстию плотины можно пренебречь.

Решение. Выясним сначала тип водослива и характер истечения воды через него. Напор на пороге водослива со стороны верхнего бьефа $H = 14{,}0 - 10{,}5 = 3{,}5$ м.

$\frac{\delta}{H} = \frac{15}{3,5} = 4,3$. Так как $\frac{\delta}{H} = 4,3 > (2 \div 3)$, имеем водослив с широким порогом.

Для выяснения характера истечения вычисляем: 1) критическую глубину на пороге водослива: $h_{кр} = 13,3 - 10,5 = 2,8$ и 2) глубину подтопления порога $h_п = 12,0 - 10,5 = 1,5$ м. Так как $h_{кр} > h_п$ $(2,8 > 1,5)$, то истечение через водослив незатопленное.

Расход воды вычисляем по формуле (142). Коэффициент расхода, согласно табл. 67, $m = 0,37$. Ширину отверстия в сжатом сечении определяем по формуле $b_c = \xi b$. Коэффициент бокового

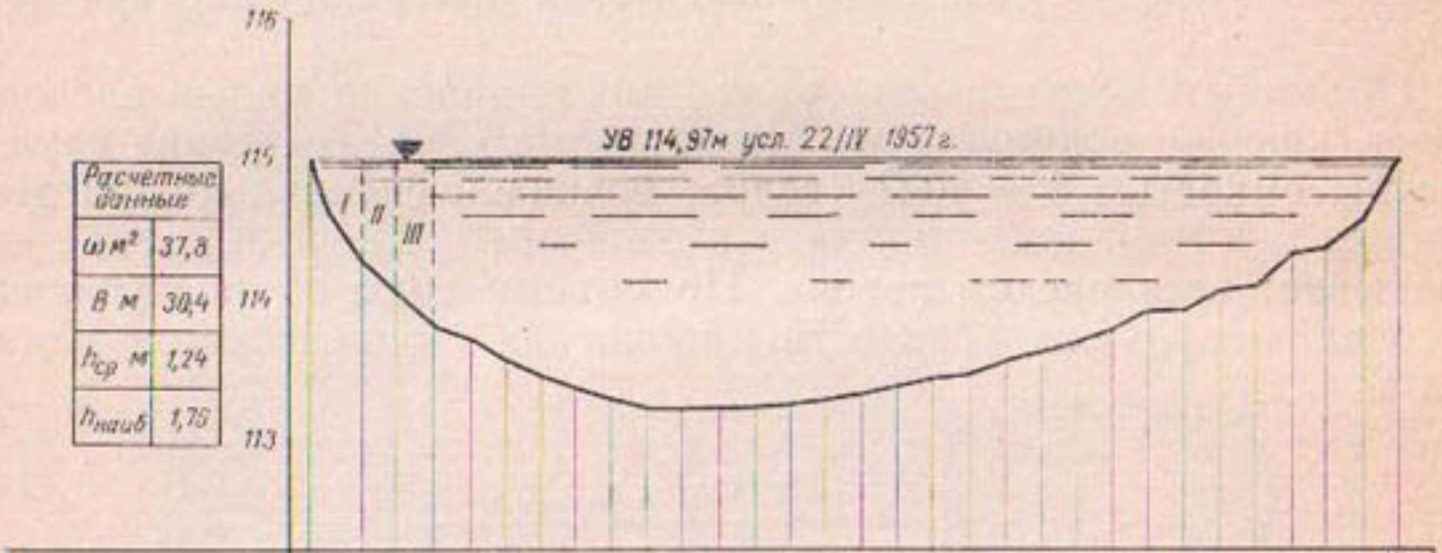


Рис. 125. Поперечный профиль оврага.

сжатия определяем по формуле (144), подставив в нее $a = 0,20$, $H = 3,5$ м, $b = 6,0$ м, т. е. $\xi = 1 - 0,2 \frac{3,5}{6 + 3,5} = 0,93$. Отсюда $b_c = 0,93 \cdot 6 = 5,58$ м $\approx 5,6$ м.

После подстановки в формулу (142) значений m и H_0 вычисляем расход

$$Q = 0,37 \cdot 5,6 \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 3,5^{3/2} = 60 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 31. Для условий предыдущего упражнения вычислить расход воды, если отметка уровня нижнего бьефа УНБ = = 13,5 м (рис. 123 *б*).

Решение. Глубина подтопления порога водослива $h_п = 13,5 - 10,5 = 3,0$ м больше критической глубины, $h_{кр} = 2,8$ м, значит, водослив затопленный. Расход воды вычисляем по формуле (143). Входящий в эту формулу коэффициент скорости, определяемый по табл. 67, $\varphi = 0,97$; ширина водослива в сжатом сечении $b_c = 5,6$ м.

Подставляя в формулу (143) значения расчетных величин, находим расход воды

$$Q = 0{,}97 \cdot 5{,}6 \cdot 3{,}0\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot (3{,}5 - 3{,}0)} = 51{,}0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 32. Рассчитать максимальный расход суходола.

Дано: поперечный профиль оврага (рис. 125), полученный путем нивелирования при полевом обследовании, и отметка уровня высоких вод 114,97 м, установленная путем опроса старожилов. Продольный уклон дна, занивелированный на 500 м вверх и 500 м вниз от створа, составляет 0,0036. Дно и берега русла — устойчивы, заросли мелкой травой.

Решение. Площадь живого сечения $\omega = 37{,}8$ м². Ширина оврага $b = 37{,}9 - 7{,}5 = 30{,}4$ м.

Скорость v вычисляем по формуле (28). Для широкого и неглубокого русла $R = h_{ср} = \frac{37{,}8}{30{,}4} = 1{,}24$ м. Коэффициент скорости C определяем по формуле Павловского.

При $1 < R < 3{,}0$, $y = 1{,}3\sqrt{n}$. Коэффициент шероховатости $n = 0{,}040$ (см. табл. 10).

Отсюда $y = 1{,}3\sqrt{0{,}040} = 0{,}26$; $C = \frac{1}{0{,}040} \cdot 1{,}24^{0{,}26} = 26{,}5$ м$^{1/2}$/с.

По формуле (28) $v = 26{,}5\sqrt{1{,}24 \cdot 0{,}0036} = 1{,}77$ м/с.

Максимальный расход $Q_{max} = 1{,}77 \cdot 37{,}8 = 66{,}9$ м³/с.

ТЕМА 18. СВЯЗЬ МЕЖДУ РАСХОДАМИ И УРОВНЯМИ ВОДЫ

65. Кривые зависимости между расходами и уровнями воды

Кривая расходов. Наблюдения на водомерных постах за уровнями ведутся ежедневно, а при значительных колебаниях уровня — несколько раз в сутки. Измерение же расхода воды очень сложно, поэтому его выполняют более редко, через определенные интервалы колебаний уровней (на подъеме и спаде). Расходы и уровни тесно связаны. Обычно при увеличении расхода уровень повышается, и наоборот, при уменьшении расхода уровень понижается. Поэтому на основании выполненных измерений можно построить кривую зависимости между расходами и уровнями, которая сокращенно называется кривой расходов. Аналитически кривая выражается уравнением $Q = f(H)$.

Построение кривой $Q = f(H)$ для открытого русла. Измеренные расходы воды и гидравлические элементы водотока (площади живых сечений, средние скорости, уклоны) заносят в ведомость «Измеренные расходы воды» (см. упражнение 33). Перед тем как

приступить к построению кривой расходов, необходимо проанализировать исходные материалы. Опорными являются расходы, измеренные вертушкой пятиточечным способом. Менее достоверны расходы, измеренные сокращенным способом и поплавками. При анализе расходов необходимо установить, зарастает ли русло, есть ли течение воды в протоках поймы, какие деформации (размывы и наносы) в рабочем створе, какая была погода при измерении каждого расхода (сила ветра и его направление). Все это может отразиться на величине измеренного расхода воды.

Кривую расходов строят следующим образом. На листе миллиметровой бумаги формата 203 × 288; 288 × 407 или 407 × 576 по оси ординат откладывают вычисленные отметки рабочих уровней

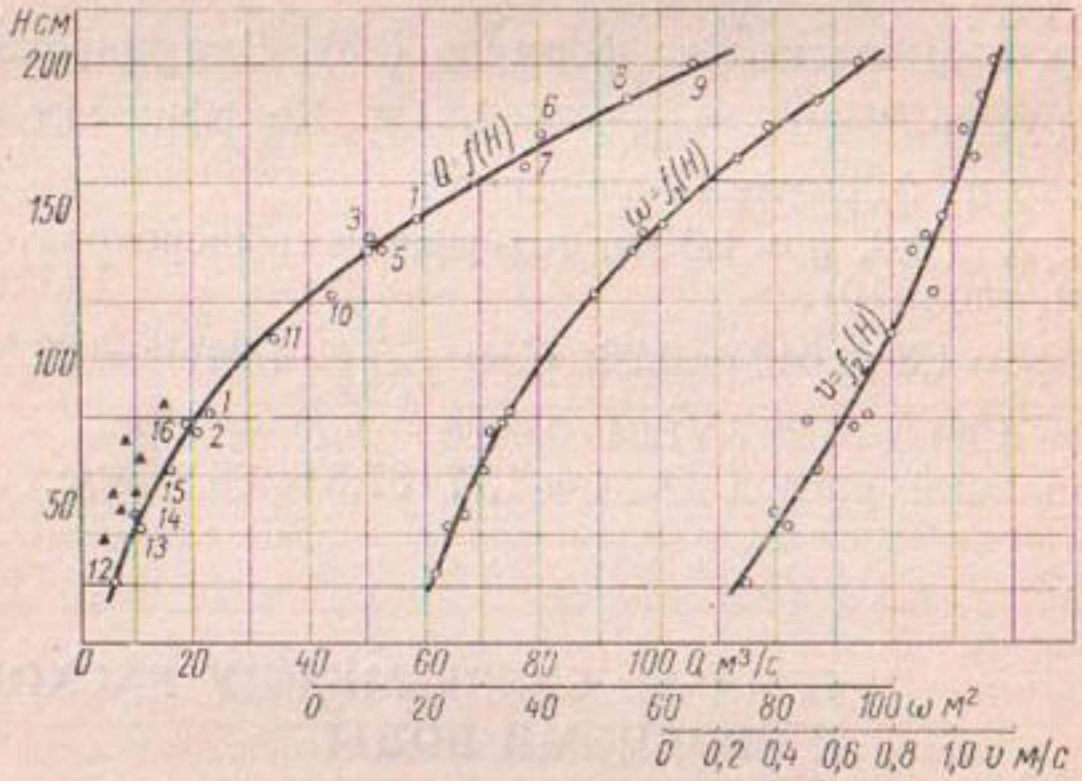


Рис. 126. Кривые расходов, площадей живого сечения и скоростей в зависимости от уровней.

○ — расходы, измеренные в открытом русле; ▲ — расходы, измеренные под ледяным покровом.

за время измерения каждого расхода. Уровни принимают обычно над нулем графика. По оси абсцисс откладывают измеренные при соответствующих уровнях расходы воды. Масштабы уровней и расходов выбирают так, чтобы угол наклона кривой к осям координат не был слишком острым (около 40 — 45°). В точке пересечения координат вычерчивают кружок, возле которого выписывают номер расхода. Обычно точки расходов образуют неширокую полосу (рис. 126). Ширина полосы определяет рассеяние или разброс точек из-за допущенных ошибок измерения (2 — 5% величины расхода) или из-за колебания гидравлических элементов водотока (уклонов, шероховатости русла и т. д.). Все нанесенные точки разбивают по отдельным интервалам на группы. В каждой группе точек по среднеарифметическому из уровней и расходов определяют центр тяжести. Центры тяжести всех групп соединяют плавной кривой.

На этот же лист бумаги наносят и кривые площадей живых сечений $\omega = f_1(H)$ и средних скоростей $v = f_2(H)$. Кривые вычерчивают с некоторым смещением нуля по оси абцисс. Так как $Q = \omega v$, то для проверки вычерченных кривых надо снять с чертежа соответствующие значения Q, ω и v и сопоставить Q с произведением ωv. Однако уклоны на подъеме паводка обычно бывают больше, чем на спаде. Поэтому скорости течения и расходы воды при одних и тех же уровнях больше на подъеме. Каждая из кривых $Q = f_1(H)$ и $v = f_2(H)$ (см. рис. 132) имеет две самостоятельные ветви на подъеме и спаде.

Обычно выпуклость кривой $\omega = f_1(H)$ направлена вверх, а $v = f_2(H)$ — вниз. На отметке уровня, при которой вода выходит на пойму, площади возрастают, а средние скорости уменьшаются. Поэтому в этой точке кривая $\omega = f_1(H)$ становится более пологой, а кривая $v = f_2(H)$ круче поднимается кверху.

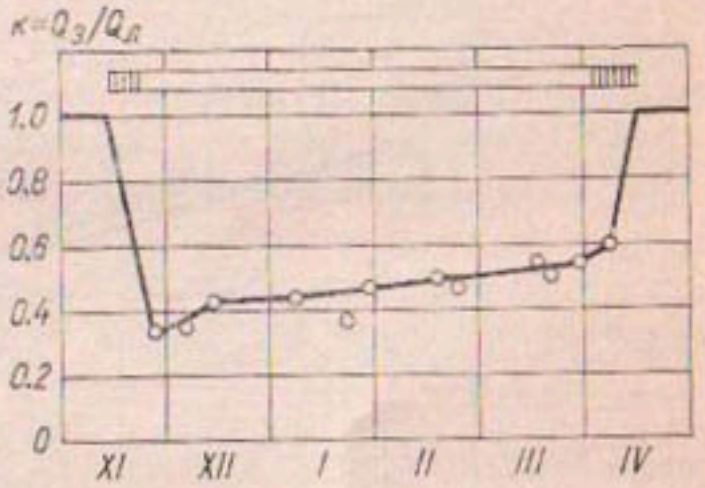


Рис. 127. График колебания коэффициента $k = \frac{Q_з}{Q_л}$.

Вычисление зимних расходов воды. При одинаковом уровне расход воды под ледяным покровом меньше, чем в открытом русле. Расходы уменьшаются вследствие увеличения шероховатости, сокращения площади живого сечения, занятого частично льдом. Зимние расходы определяют обычно по кривой для открытого русла $Q = f(H)$. В полученные значения вводят поправочные коэффициенты k, которые представляют отношение зимнего расхода к летнему $k = \frac{Q_з}{Q_л}$. Для этого необходимо построить хронологический график изменения k за зимний период. С этой целью учащают измерения зимних расходов и для каждого из них вычисляют значение k. Значение k изменяется от единицы при открытом русле до нуля, когда река промерзает до дна. Полученные значения k наносят на график (рис. 127), где ось абсцисс соответствует времени с начала появления заберегов до полного очищения реки ото льда, а ось ординат — значениям k.

Вычисление расходов для зарастающего русла. Методика вычисления очень сходна с изложенной для зимнего периода. Зарастание начинается после спада весеннего половодья, усиливается во время вегетации, а с понижением температур и появлением льда прекращается. Растительность уменьшает площадь живого сечения и увеличивает шероховатость русла, вследствие чего уменьшаются расходы по сравнению с измеренными в чистом русле.

Для определения расходов воды в зарастающем русле вычерчивают хронологический график изменения переходных коэффициентов $k = \frac{Q_{зар}}{Q_{св}}$, где индексами «зар» и «св» обозначено зарос-

шее и свободное русло. Хронологический график подобен графику, показанному на рис. 127 для зимнего периода.

Построение кривой расходов при переменных уклонах. Уклоны в реке могут сильно меняться во время ледохода. Заторы льда вызывают подъем уровня, сопровождающийся уменьшением уклонов. При прорыве заторов уклоны возрастают. В устье при повышении уровня воды в главной реке возможен подпор на притоке и уменьшение уклонов. Переменные подпоры возникают от гидротехнических сооружений, расположенных ниже по реке.

На рис. 128 показана кривая расходов в устье р. Большого Иргиза у с. Малая Быковка в условиях переменного подпора от

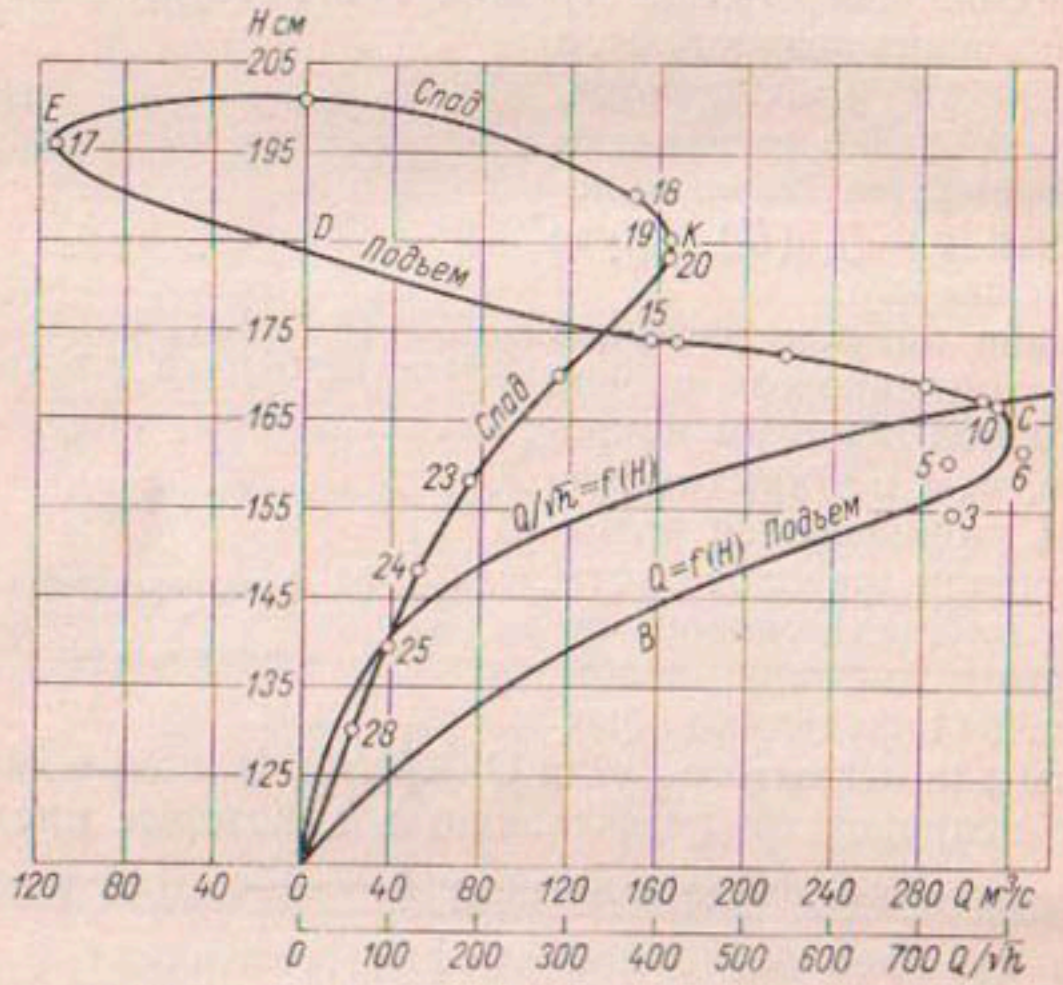


Рис. 128. Кривая расходов в условиях переменного подпора на р. Большой Иргиз у с. Малая Быковка.

Волги. На участке *OBC* проходило нормальное половодье в условиях свободного русла. От точки *C* начиналось повышение уровня Волги, а вместе с тем и подъем уровня на Большом Иргизе при одновременном уменьшении расходов воды. В точке *D* уровни Волги и Большого Иргиза были одинаковыми. Уклон равен нулю. При дальнейшем повышении уровня р. Волги вода потекла от Волги к Большому Иргизу. Поэтому расход на участке *DE* — отрицательный. По мере освобождения Большого Иргиза от подпора Волги происходило увеличение уклонов и возрастание расходов. От точки *K* спад уровней Большого Иргиза был нормальным.

Для исключения влияния уклонов, по предложению Н. А. Ржаницына, строят кривую

$$\frac{Q}{\sqrt{h}} = f(H), \qquad (149)$$

где h — падение, или разность, уровней в створах Большого Иргиза и Волги. Кривая $\frac{Q}{\sqrt{h}} = f(H)$ показана на рис. 128.

В формуле (149) $\sqrt{h}$ можно заменить $\sqrt{I}$, тогда она примет вид

$$\frac{Q}{\sqrt{I}} = f(H).$$

Кривые расходов при неустойчивом русле. На рис. 129 *а* в поперечном профиле реки линией *1* показано дно размытого русла, а линией *2* — дно намытого русла. В русле измерен расход Q при уровне AB. В случае размыва русла этот расход будет при более низком уровне $СД$, а в случае намыва — при уровне EF. Таким образом, если русло неустойчивое, то нельзя по данным H и Q построить кривую расходов. В этом случае необходимо внести поправки к наблюденному уровню на высоту размыва или намыва. Метод построения кривой $Q = f(H)$ с учетом этих поправок носит название метода приведения к основному сечению.

Для построения требуются частые промеры створа в промежутках между измерениями расходов воды. Из всех измеренных

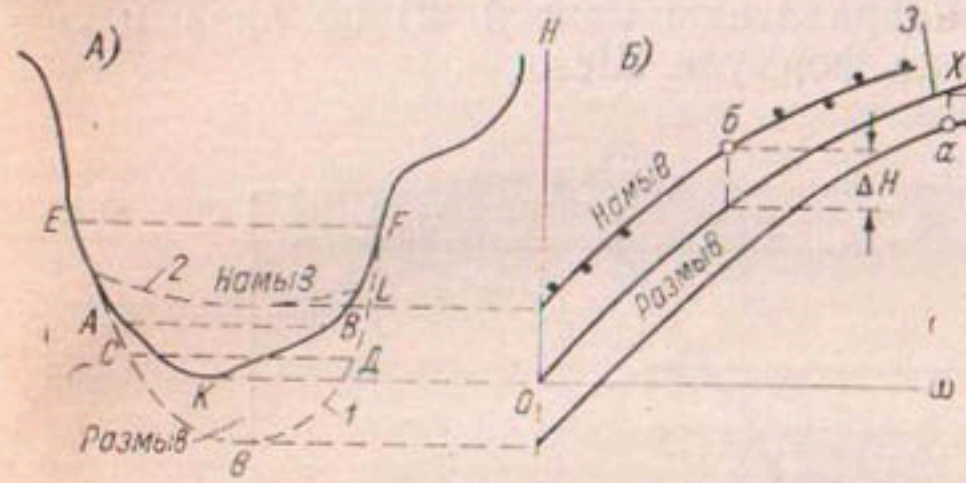


Рис. 129. Приведение промеров к основному сечению.
А — поперечный профиль неустойчивого русла; *Б* — определение поправок к наблюденным уровням; *1* — дно размытого русла; *2* — дно намытого русла; *3* — основная кривая $\omega = f_1(H)$.

на глаз выбирают средний профиль $EAKF$, который принимают за основной. Для него строят основную кривую $\omega = f_1(H)$ (линия *3* на рис. 129 *б*). На этот же чертеж наносят точки на основании промеров, выполненных одновременно с измерением расходов, а также и специальных промеров между расходами. Так как русло меняется, точки измерений будут отклоняться от основной кривой *3*. Например, точка *а* легла ниже основной кривой. Уровень понизился, по-видимому, вследствие размыва русла. Поэтому для приведения этой точки к нормальной основной кривой нужно в наблюденный уровень внести положительную поправку $+\Delta H$. Точно так же для точки *б* нужно внести отрицательную поправку к уровню $-\Delta H$. Определив знаки и значения поправок для всех измеренных точек, строят хронологический график поправок (рис. 130).

Кривую расходов строят по измеренным расходам и исправленным уровням $H_и$ (рис. 130 *б*). Зная поправки по хронологическому графику и наблюденный фактический уровень, определяют $H_и$ и соответствующий ему расход по кривой $Q = f(H_и)$.

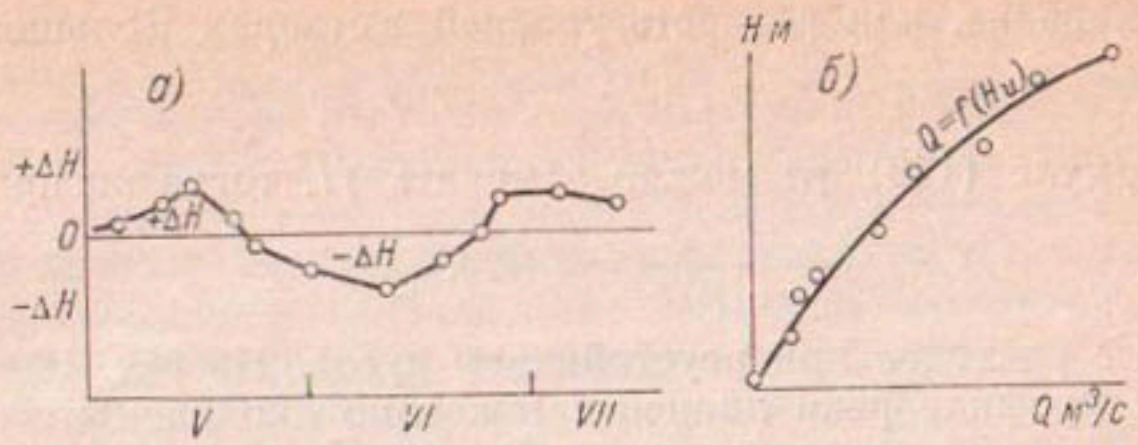


Рис. 130. Внесение поправок к уровням воды в случае неустойчивого русла.

а — хронологический график поправок; *б* — кривая расходов.

66. Экстраполяция кривых

Иногда на кривой расходов недостаточно измеренных величин. Чаще всего отсутствуют данные расходов в верхней ее части (рис. 131). Продолжение кривой до наивысших уровней, или экстраполяцию, выполняют следующими способами: 1) по касательной к основному направлению кривой, 2) по кривым $\omega = f_1(H)$ и $v = f_2(H)$, 3) по формуле Шези.

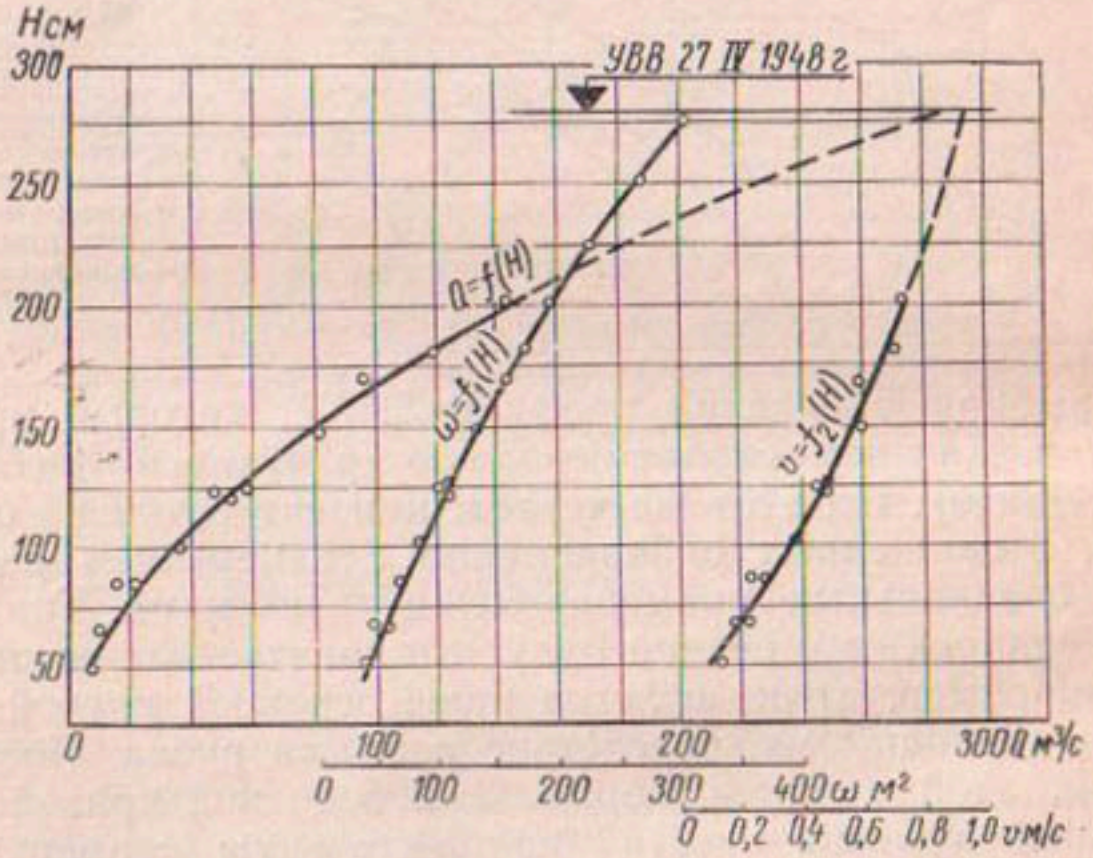


Рис. 131. Экстраполяция кривой $Q = f(H)$.

Первый способ применяют, если не освещенный фактическими измерениями участок кривой не превышает 10% всей амплитуды уровней воды. В этом случае кривую продолжают на глаз, по касательной к ее основному направлению в верхней части.

Во втором случае кривую $\omega = f_1(H)$ строят по данным промеров

и нивелировки створа до наивысшего уровня (см. рис. 131). Кривую же $v_2 = f_2(H)$ продолжают на глаз. Перемножая ω на v, получают расходы воды для верхнего участка кривой.

Третий способ — по формуле Шези — применим для рек с глубиной, превышающей 3,5 — 4,0 м. При разных уровнях уклоны определяют по уклонным постам. Величины ω и R определяют, как и во втором случае, по данным промеров до наивысшего уровня. Коэффициенты C находят для всех измеренных расходов по формуле

$$C = \frac{Q}{\omega \sqrt{RI}}.$$

Для участка, где измерены расходы воды, строим кривую $C = f(H)$, которую экстраполируют на глаз до наивысшего уровня.

67. Подсчет стока

Пользуясь кривыми расходов, можно подсчитать сток воды за сутки, месяц, год или другие отрезки времени. Для этого по ведомости средних суточных уровней и кривой $Q = f(H)$ определяют средние суточные расходы воды, на основании этого составляют ведомость средних суточных расходов по форме табл. 68 (см. упражнение 33). Допустим, что средний суточный расход в январе равен 3,2 м³/с. Объем стока за январь $W = 3{,}2 \cdot 31 \cdot 86\,400 = 8{,}57$ млн. м³. Точно так же может быть подсчитан сток других месяцев и за весь год.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего служит кривая $Q = f(H)$?
2. В чем заключается анализ данных, помещенных в ведомости измеренных расходов воды?
3. Какие кривые дополнительно вычерчивают совместно с кривой $Q = f(H)$ и для чего их используют?
4. Как построить кривую $Q = f(H)$ при наличии переменного подпора в гидрометрическом створе?
5. Как вычислить сток воды в открытом, свободном от подпора русле?
6. Как вычислить сток при наличии ледяного покрова или при зарастании русла?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 33. 1. Построить кривую зависимости между расходами и уровнями $Q = f(H)$ р. Псел у с. Запселья за 1955 г. для свободного ото льда периода. 2. Составить расчетную таблицу координат кривой $Q = f(H)$; 3. Определить средние суточные расходы воды и вычислить суммарный сток за май 1955 г.

Дано: 1. Ведомость измеренных расходов воды (табл. 68).

Таблица 68

Измеренные расходы воды р. Псел у с. Запселья за 1955 г.

№ расхода	Дата измерения	№ створа	Уровень воды над нулем графика по основному водпосту H, см	Расход воды Q м³/с	Площадь водного сечения ω м²	Средняя скорость течения $v=\frac{Q}{\omega}$ м/с	Ширина реки B м	Средняя глубина воды, $h_{ср}$ м	Способ измерения расхода*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1/II	2	404	130	238	0,55	72,3	3,29	ЖЗ 7/35
2	11/II	1	378	126	201	0,63	63,2	3,18	ЖЗ 9/41
3	23/III	1	331	118	170	0,69	59,7	2,85	ЖЗ 10/46
4	2/IV	1	412	173	221	0,78	65,2	3,39	ЖЗ 9/46
5	10/IV	2	506	258	320	0,81	87,3	3,86	ЖЗ 8/40
6	14/IV	2	552	284	370	0,77	94,4	3,92	ЖЗ 8/38
7	20/IV	1	414	128	228	0,56	65,0	3,51	ЖЗ 10/46
8	24/IV	1	315	92,1	165	0,56	58,8	2,81	ЖЗ 9/43
9	2/V	1	262	60,0	137	0,44	55,5	2,47	ЖЗ 9/41
10	15/V	1	232	40,3	123	0,33	54,0	2,28	ЖЗ 8/36
11	1/VI	1	164	26,2	83,8	0,31	51,4	1,63	ЖЗ 7/31
12	19/VI	1	139	23,9	70,1	0,34	50,4	1,39	ЖЗ 7/25
13	1/VII	1	130	23,5	64,7	0,36	49,8	1,30	ЖЗ 7/25
14	15/VII	1	108	16,5	54,5	0,30	48,8	1,12	ЖЗ 7/23
15	1/VIII	1	85	11,6	43,4	0,27	47,4	0,92	ЖЗ 7/19
16	15/VIII	1	84	10,5	43,4	0,24	46,5	0,93	ЖЗ 7/19
17	4/IX	1	79	10,5	39,9	0,26	45,8	0,87	ЖЗ 7/19
18	15/IX	1	71	8,64	36,8	0,23	44,7	0,82	ЖЗ 7/18
19	1/X	1	73	8,71	37,8	0,23	44,8	0,84	ЖЗ 7/18
20	14/X	1	66	7,51	34,5	0,22	43,8	0,79	ЖЗ 7/17
21	2/XI	1	82	12,1	41,0	0,30	46,0	0,89	ЖЗ 7/18
22	15/XI	1	76	10,0	38,8	0,26	45,3	0,86	ЖЗ 6/19

* Числитель дроби, стоящий после обозначения вертушки, указывает количество скоростных вертикалей, а знаменатель — общее количество точек в сечении, в которых измерялась скорость течения.

2. Ведомость средних суточных уровней и расходов (табл. 70).

Решение. 1. В соответствии с п. 65 (построение кривой $Q=f(H)$) производим анализ данных измерений, приведенных в ведомости расходов воды. При высоких уровнях расходы измерены пятиточечным способом: русло устойчивое, не зарастает. Амплитуда колебаний уровней воды на гидростворе (см. упражнение 26, табл. 51) составляет 554—66=488 см. Измеренными же расходами (табл. 68) освещена амплитуда уровней 552—66= =486 см, т. е. почти полностью. Формально эта кривая вполне належна. Однако при более пристальном изучении материалов можно заметить, что в отдельные фазы режима реки кривая освещена недостаточно равномерно. Так, на подъеме половодья с 23 марта до 10 апреля измерено всего три расхода при интервалах уровней: 412 — 331 = 81 см и 506 — 412 = 94 см. На спаде же от 14 до 20 апреля измерены два расхода при понижении уровня воды на 552 — 414 = 138 см. Поэтому этот отрезок кривой $Q=$ $=f(H)$ нельзя считать надежным. Лучше освещен измерениями

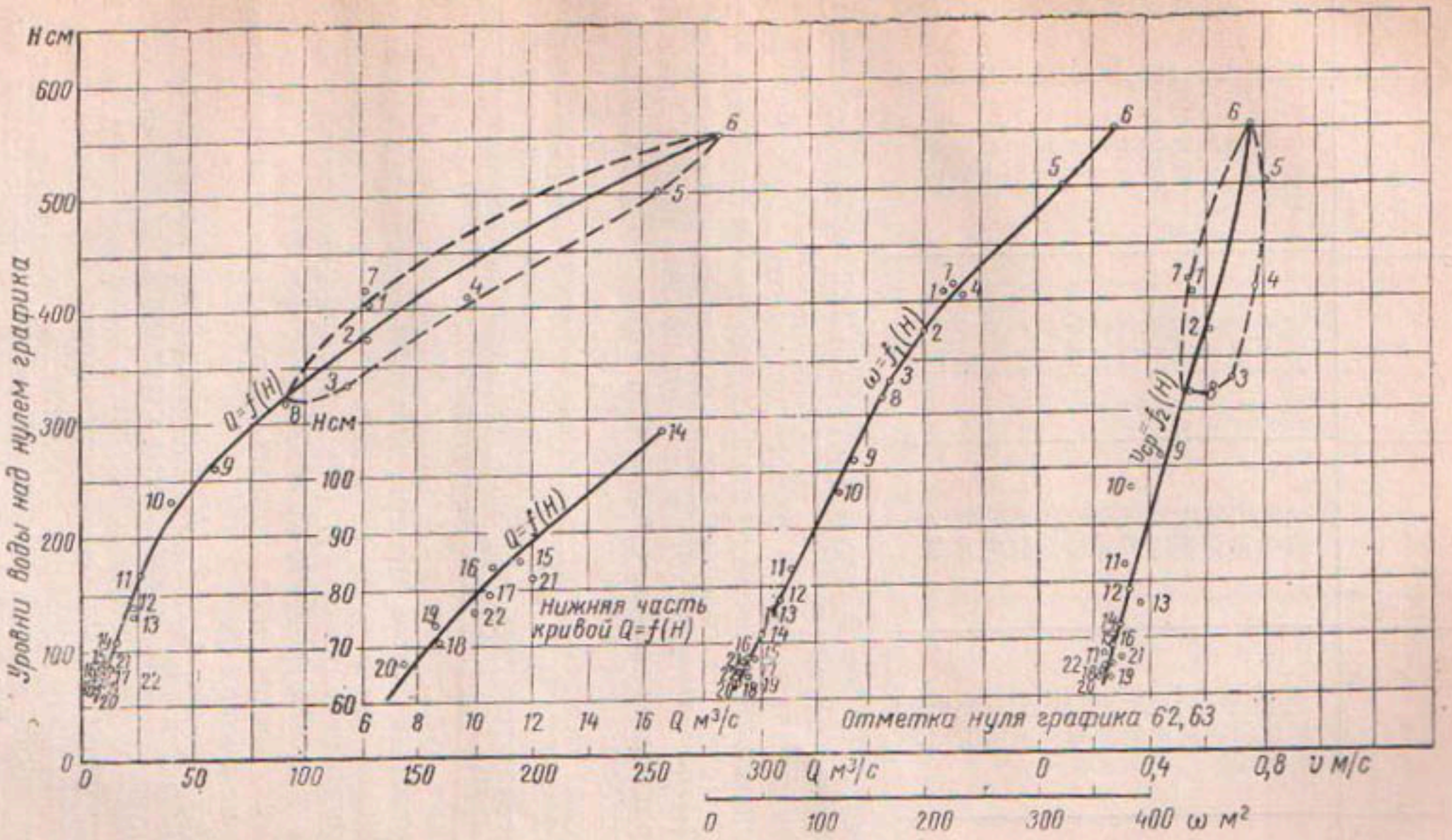


Рис. 132. Кривые зависимости расходов от уровней р. Псел у с. Запселья.

Таблица 69

Координаты кривой $Q = f(H)$

Уровень над нулем графика дц/см	0	2	4	6	8
16	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0
17	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5
18	30,0	30,5	31,0	31,5	32,0
19	32,5	33,0	33,5	34,0	34,5
20	35,0	35,5	36,0	36,5	37,0
21	37,5	37,7	38,0	38,2	38,5
22	38,7	39,5	40,2	41,0	41,7
23	42,5	43,2	44,0	44,7	45,5
24	46,2	47,5	48,7	50,0	51,2
25	52,5	53,2	54,0	54,7	55,5
26	56,2	57,0	57,7	58,5	59,2
27	60,0	61,0	62,0	63,0	64,0
28	65,0	66,5	68,0	69,5	71,0
29	72,5	73,7	75,0	76,2	77,5
30	78,7				

нижний участок кривой спада уровней и вся летняя межень. После такой оговорки перейдем к построению кривой.

На лист миллиметровой бумаги форматом 203 × 288 мм (рис. 132) по вертикали наносим уровни H над нулем графика водомерного поста (см), по горизонтали — соответствующие им расходы воды Q (м³/с). Чтобы хорда, соединяющая концы кривой $Q = f(H)$, располагалась примерно под углом 45° к горизонтальной оси, принимаем: масштаб уровней 1 : 50, расходов в 1 делении — 25 м³/с. Возле каждой точки указываем номер измеренного расхода.

Точки *3*, *4*, *5*, *6* на подъеме легли правее точек спада (*6*, *7*, *1*, *2*). Намечаются схематически две самостоятельные ветви кривой $Q = f(H)$: на подъеме и на спаде весеннего половодья, как это показано пунктиром на чертеже. Плавная кривая (сплошная линия) проведена через центры тяжести отдельных групп точек.

По данным граф 4, 6 и 7 табл. 68 вычерчиваем кривые площадей водного сечения $\omega = f_1(H)$ и средних скоростей $v = f_2(H)$. Масштабы для построения принимаем с расчетом, чтобы хорды, соединяющие концы этих кривых, составляли с горизонтальной осью углы не более 60°.

Проверку кривой $Q = f(H)$ проводим через каждые 50 см уровня. Кривая $Q = f(H)$ считается построенной правильно, если расхождения между расходами, снятыми с кривой $Q = f(H)$ и вычисленными по формуле $Q = \omega v$, не превышают 1%. Рекомендуем учащимся провести эту проверку самостоятельно.

Нижняя часть кривой $Q = f(H)$ вычерчена в более крупном масштабе (вертикальный 1 : 10, горизонтальный в 1 делении — 2 м³/с).

2. Для облегчения дальнейшего пользования кривой $Q = f(H)$ к ней составляют таблицу координат H и Q через 2 см высоты

Таблица 70

Средние суточные уровни и расходы воды за май 1955 г.

Число	H см	$Q_{ср.\ сут}$ м³/с	Число	H см	$Q_{ср.\ сут}$ м³/с	Число	H см	$Q_{ср.\ сут}$ м³/с
1	276	63,0	11	240	46,2	21	195	33,8
2	264	57,7	12	238	45,5	22	192	33,0
3	258	55,5	13	236	44,7	23	190	32,5
4	258	55,5	14	235	44,4	24	190	32,5
5	257	55,1	15	232	43,2	25	189	32,3
6	252	53,2	16	230	42,5	26	185	31,3
7	246	50,0	17	225	40,6	27	181	30,3
8	241	46,8	18	222	39,5	28	176	29,0
9	238	45,5	19	215	38,1	29	174	28,5
10	238	45,5	20	204	36,0	30	172	28,0
						31	168	27,0
								1286,7

уровня. Для этой цели снимают значения Q с кривой $Q=f\ (H)$, например при уровнях 160 и 170 см над нулем графика. Уровню 160 см соответствует расход воды 25 м³/с, а уровню 170 см — 27,5 м³/с. Разности уровней 170—160=10 см соответствует разность расходов 27,5 — 25,0 = 2,5 м³/с. На 1 см высоты уровня приходится $\Delta Q = \frac{2,5}{10} = 0,25$ м³/с. Прибавляя на 2 см высоты уровня $\Delta Q = 0,50$ м³/с, получим координаты H и Q на этом участке (табл. 69).

Таблица 69 координат кривой $Q=f(H)$ составлена для уровней воды от 160 до 300 см.

3. Зная средние суточные уровни воды H за май 1955 г. и пользуясь таблицей координат, определяем средние суточные расходы воды Q. Эти величины приведены в табл. 70.

4. Суммарный месячный сток воды

$$W = 1286,7 \cdot 86\,400 = 11,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

ТЕМА 19. ТВЕРДЫЙ СТОК

68. Приборы для отбора проб воды

Пробы воды отбирают приборами, которые называются батометрами. Они представляют собой бутылки, которые в зависимости от глубины потока опускают на штанге (рис. 133) или с грузом. Бутылку наполняют через водозаборную трубку, а воздух из нее удаляют через воздухоотводящую трубку. Диаметры насадок на каждой из этих трубок зависят от скорости течения воды.

Технически более совершенным является вакуумный батометр (рис. 134). Он состоит из заборного наконечника *1*, прикрепленного к грузу. Наконечник вынесен вперед и забирает пробу

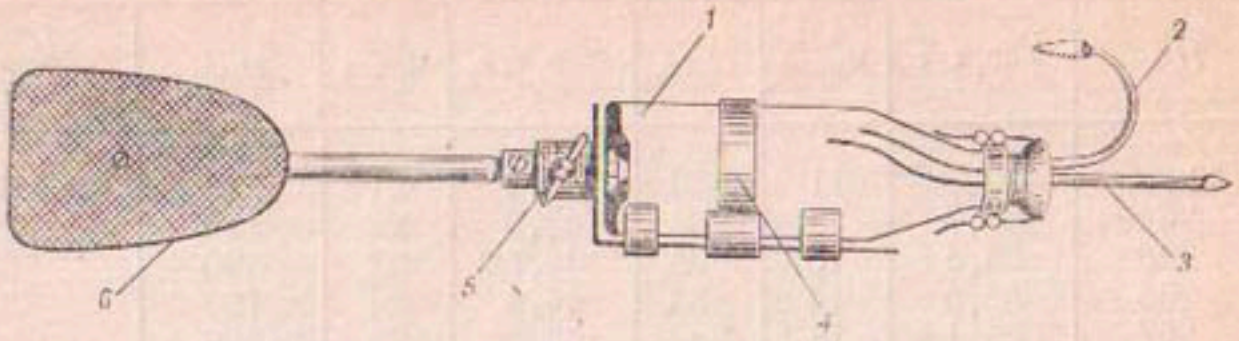


Рис. 133. Батометр-бутылка на штанге.

1 — бутылка; *2* — воздухоотводящая трубка; *3* — водозаборная трубка; *4* — обойма; *5* — зажимной винт; *6* — хвост.

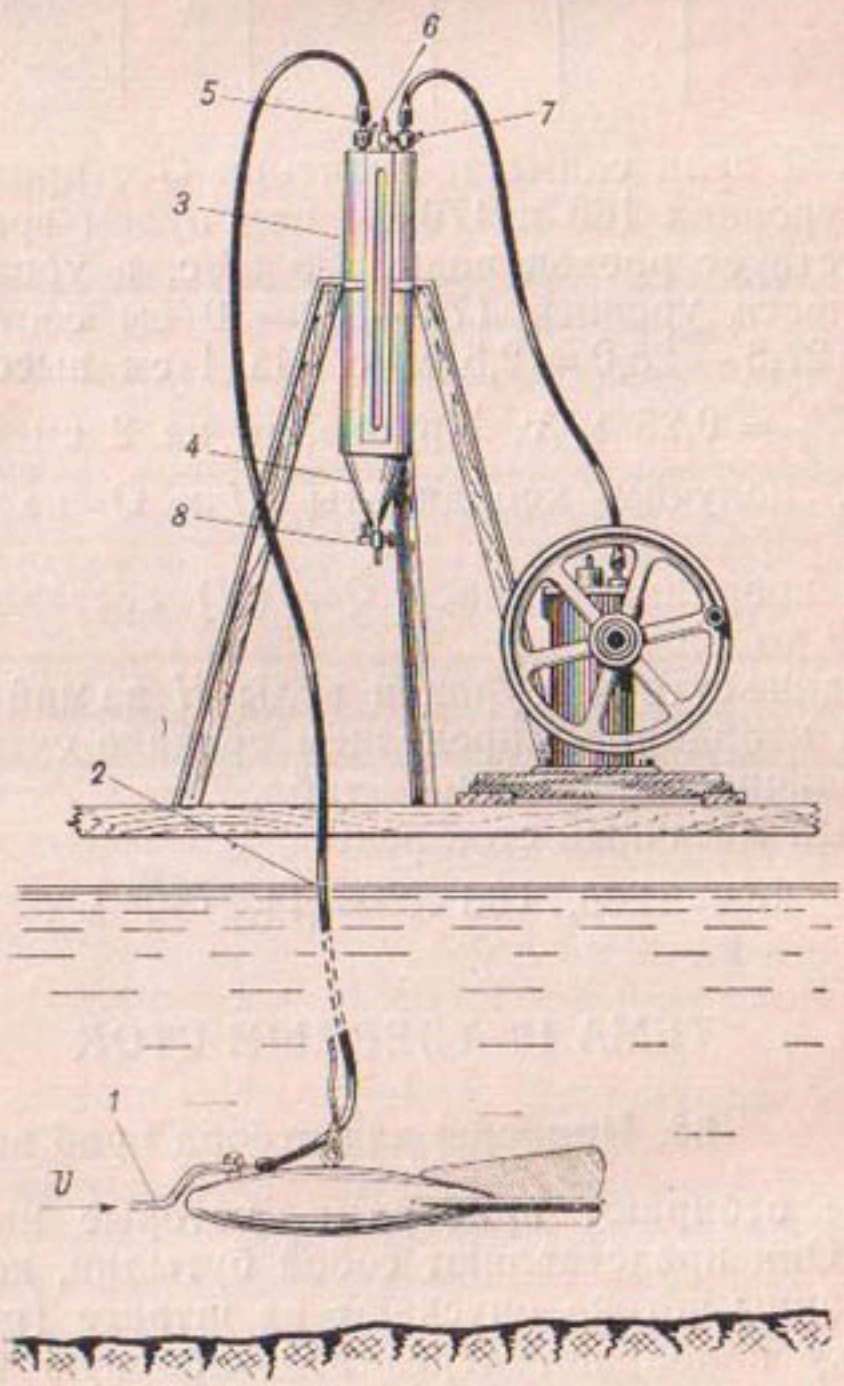


Рис. 134. Вакуумный батометр.

1 — наконечник; *2* — гибкий шланг; *3* — камера; *4* — конус; *5*, *6*, *7* — краны; *8* — нижний кран.

из струи, не нарушенной близостью груза. При помощи гибкого шланга *2* наконечник соединен с камерой *3*, представляющей собой сосуд цилиндрической формы, внизу переходящий в конус *4*. Объем сосудов бывает 3 и 6 л. В верхней части вакуумной камеры находятся три крана для соединения со шлангом, идущим от наконечника, с насосом и для поступления атмосферного воздуха. Насос откачивает воздух, создавая вакуум в камере и в шланге наконечника. Вода устремляется в вакуумную камеру. Для слива воды из камеры служит нижний кран *8*.

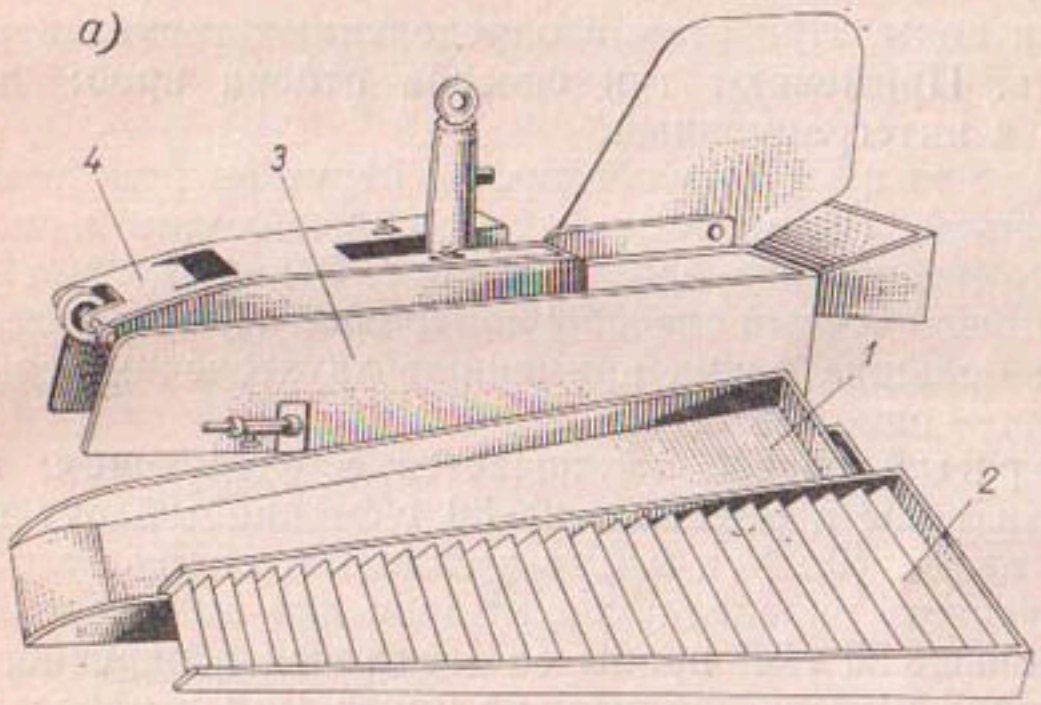


Рис. 135. Батометр «Дон» (*а*) и батометр-сетка ГГИ (*б*).
1 — лоток; *2* — рама; *3* — кожух; *4* — дверца.

Приборы для проб донных наносов. Для улавливания песчаных, влекомых по дну наносов пользуются батометром «Дон», а для более крупных — гравелистых и галечных — батометром Г. И. Шамова и батометром-сеткой конструкции ГГИ.

Батометр «Дон» применяют для глубин до 20 м и при скорости течения до 1,5 м/с.

Батометр (рис. 135 *а*) состоит из ловушки и кожуха, а ловушка — из лотка *1*, в который вкладывается рамка *2* с перегородками.

Кожух *3* представляет собой коробку с дверцей *4*. Дверца закрывает входное отверстие, когда батометр поднимают, а когда он находится на дне, пружина открывает дверцу.

Батометр ГГИ (рис. 135 *б*) представляет собой сетку с ячейками диаметром, соответствующим наименьшему размеру улавливаемых наносов. Входное отверстие имеет ширину 0,2—0,4 м.

69. Измерение и вычисление расходов взвешенных наносов

Расходы взвешенных наносов измеряют обычно одновременно с расходами воды. При этом в определенных точках берут пробы на мутность. Применяют три способа отбора проб: детальный, суммарный и интеграционный.

При детальном способе пробы берут во всех точках измерения скоростей. Пятиточечный способ необходим в первые 2—3 года гидрометрических работ в створе. В дальнейшем переходят на двух- и одноточечный способы измерения. При мутности меньше 100 г/м³ на больших реках применяют двухточечный способ, а на малых реках — одноточечный.

Суммарный способ заключается в следующем: при средней мутности воды в реке меньше 50 г/см³ пробы берут в двух точках на вертикали ($0{,}2\,H$ и $0{,}8\,H$) и сливают в одну бутыль. Таким образом, мутность определяют суммарно для всей вертикали. При мутности меньше 20 г/м³ пробы со всех точек поперечного сечения сливают в одну бутыль объемом не менее 10 л и определяют суммарную мутность для всего створа.

Интеграционный способ применяют при резких колебаниях уровня воды в реке, когда нужно очень быстро сделать измерения. Пробы берут батометром длительного наполнения суммарно, опуская его по вертикали — от поверхности ко дну и обратно. Объем пробы зависит от мутности воды в реке и составляет:

Мутность воды, г/м³ . .	>100	50—100	20—50	<20
Объем пробы, *л* . . .	1	2	5	10

Каждую пробу снабжают этикеткой со следующими надписями: дата, название реки, створ, номер расхода, вертикаль, глубина на вертикали, объем пробы.

При суммарном методе приблизительно через две недели после заполнения бутыли сливают осветленную воду и, записав объем слитой воды, переливают остаток пробы в меньшую бутыль, взболтав заранее и хорошо перемешав с водой осевшие наносы.

На гидростворах дополнительно к расходам берут ежедневно контрольную пробу в одной постоянной точке поперечного сечения. В ней берут пробу и при измерении расхода взвешенных наносов. Во время паводка в этой точке ежедневно берут две пробы. При малых расходах воды и небольшой мутности ежедневные пробы за каждую пятидневку сливают в одну бутыль.

Фильтрование проб и определение мутности. Для фильтрования применяют беззольные фильтры. Фильтр предварительно высуши-

вают и взвешивают на аналитических весах. Затем его вставляют в воронку с углом раструба в 60°. Перед фильтрованием фильтр ополаскивают чистой водой. Бутыль с пробой устанавливают в станочке так, чтобы горлышко было погружено в воду, заполняющую воронку с фильтром. Фильтр с осевшими в нем наносами высушивается при температуре 105 °С, после чего его взвешивают на аналитических весах. Полученная величина за вычетом веса фильтра дает вес наносов. Разделив вес наносов на объем пробы, получают относительную мутность.

Вычисление расходов взвешенных наносов проводят графическим или аналитическим методами.

Графический метод применяют при детальном способе измерения расхода взвешенных наносов. Прежде всего необходимо анализировать данные определения мутности. Для этого вычерчивают эпюры распределения мутности ρ по глубине. Точки, не согласующиеся с общим характером распределения мутности на вертикали, выбраковываются. Значение ρ в этих точках снимают с эпюры. На рис. 138 пунктиром показано распределение мутности на вертикалях.

Расход наносов представляет собой произведение расхода воды на мутность. Поэтому элементарный расход наносов на вертикали

$$r_{эл} = \rho q, \tag{150}$$

где $q = v_в h$. Следовательно,

$$r_{эл} = \rho v_в h. \tag{151}$$

Если ρ выражена в г/м^3, $u_{ср}$ — в м/с и h в метрах, то $r_{эл}$ выражается в г/(м·с).

Обозначим ρu в каждой точке вертикали буквой α, т. е.

$$\alpha = \rho u. \tag{152}$$

Величина α представляет собой единичный расход наносов и выражается в г/(м^2·с). Очевидно, средняя мутность на вертикали

$$\rho_{ср} = \frac{r_{эл}}{q}. \tag{153}$$

$\alpha_{ср}$ можно получить путем деления площади эпюр распределения α по вертикали на значение h. Расход же взвешенных наносов r кг/с, так же как и расход воды, может быть вычислен как площадь эпюры $r_{эл}$ по ширине русла. Средняя мутность реки (в г/м^3)

$$\rho_{ср} = \frac{r \cdot 10^3}{Q}. \tag{154}$$

Последовательность этих расчетов изложена в упражнении 34.

Аналитический метод применяют для вычисления расходов взвешенных наносов, измеренных двухточечным, одноточечным, суммарным и интеграционным способами.

При двухточечном способе средние единичные расходы взвешенных наносов определяют по формуле

$$\alpha_{ср} = \frac{\alpha_{0,2\,H} + \alpha_{0,8\,H}}{2}, \qquad (155)$$

а при одноточечном способе $\alpha_{ср} = \alpha_{0,6H}$ г/(м²·с). Если пробы берут под ледяным покровом на глубинах $0{,}15H$ и $0{,}85H$ от поверхности, то в формулу (155) вносят соответствующие обозначения при значениях α.

Расход взвешенных наносов (в кг/с) во всем живом сечении определяют по формуле

$$r = 0{,}001\left[k\alpha_1\Delta\omega_1 + \left(\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}\right)\Delta\omega_2 + \ldots + \left(\frac{\alpha_{n-1}+\alpha_n}{2}\right)\Delta\omega_{n-1} + k\alpha_n\Delta\omega_n\right], \qquad (156)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$ — средние единичные расходы взвешенных наносов на скоростных вертикалях в г/(м²·с); k — коэффициент, зависящий от распределения скоростей в прибрежных полосах (см. стр. 218); $\Delta\omega_1$ — площадь между урезом и скоростной вертикалью № *1*; $\Delta\omega_2$ — площадь между скоростными вертикалями № *1* и *2* и т. д.

Если пробы брали на вертикалях суммарным способом, то

$$r = 0{,}001\left(\rho_1\Delta Q_1 + \frac{\rho_1+\rho_2}{2}\Delta Q_2 + \ldots + \rho_n\Delta Q_n\right), \qquad (157)$$

где $\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_n$ — средние мутности воды на вертикалях № *1*, *2*, ..., *n*; ΔQ_1 — частичный расход воды между урезом и первой скоростной вертикалью; ΔQ_2 — то же между вертикалями № *1*, *2* и т. д.

Если суммарную пробу берут во всем живом сечении реки, то мутность этой пробы принимают как среднюю для всего створа. При средней мутности ρ г/м³ и расходе воды Q м³/с расход наносов (в кг/с) составляет

$$r = \frac{\rho Q}{1000}.$$

70. Вычисление стока взвешенных наносов

Построение кривой $r = f(Q)$. Если во все фазы режима реки (подъем и спад весеннего половодья, летние паводки, летняя и зимняя межень) расходы взвешенных наносов измеряют достаточно часто, то строят кривую связи расходов наносов и расходов воды $r = f(Q)$. Для этого на оси ординат откладывают расходы воды, а на оси абсцисс расходы наносов. Обычно кривая имеет довольно сложные очертания — петлеобразное или в виде двух кривых (рис. 136). По ведомости средних суточных расходов воды,

пользуясь кривой $r=f(Q)$, определяют средние суточные расходы взвешенных наносов. Дальше подсчет стока наносов выполняют так же, как и стока воды. Сток наносов исчисляют в тоннах.

Вычисление стока взвешенных наносов с использованием ежедневных единичных проб. Прежде всего необходимо установить соответствие между единичными пробами и истинными расходами взвешенных наносов. Для этого строят график связи между контрольной и средней мутностью, полученной при измерении расхода взвешенных наносов. На оси ординат откладывают мутность контрольной единичной пробы $\rho_{ед}$, а на оси абсцисс — среднюю мутность измеренного расхода $\rho_{ср}$. Обычно этот график изображается прямой линией, проходящей через начало координат, реже с небольшой кривизной в нижней части. Уравнение прямой, проходящей через начало координат, имеет вид

$$\rho_{ед} = a\rho_{ср}. \qquad (158)$$

Для одной из точек, лежащей на прямой линии, определяют значения $\rho_{ед}$ и $\rho_{ср}$. Отсюда вычисляют значение $a = \frac{\rho_{ед}}{\rho_{ср}}$. После этого приступают к составлению ведомости средних суточных расходов взвешенных наносов. Расход наносов

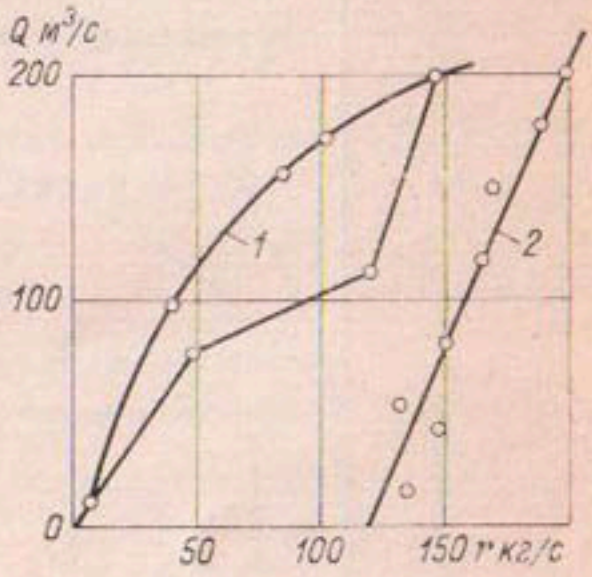


Рис. 136. Кривые зависимости расходов наносов от расходов воды.
1 — горная; *2* — равнинная река.

$$r = 0{,}001\,\rho_{ср}Q = 0{,}001\,\frac{\rho_{ед}}{a}\,Q \text{ кг/с}, \qquad (159)$$

где ρ — мутность единичной пробы в г/м³; a — коэффициент пропорциональности, определенный по формуле (158); Q — среднесуточный расход воды в м³/с.

Сток наносов в тоннах за определенный промежуток времени (за декаду, месяц и год)

$$R = \sum r \cdot 86{,}4, \qquad (160)$$

где $\sum r$ — сумма средних суточных секундных расходов за расчетный период в кг/с.

71. Измерение и вычисление расходов и стока донных наносов

Измерение расходов донных наносов проводят одновременно с измерением расходов воды и взвешенных наносов. Батометр устанавливают на каждой скоростной вертикали. Так как донные наносы передвигаются скачкообразно, а количество передвигающихся наносов непрерывно меняется, то для получения устойчивой

средней величины измерения повторяют по 3—5 раз на вертикали. Продолжительность выдержки батометра в точке зависит от интенсивности движения наносов. Поэтому при каждом приеме меняется продолжительность выдержки батометра, начиная с 10—20 с. Если движение донных наносов на вертикали не обнаружено (батометр остался пустым), то для установления границ движения наносов в створе назначают дополнительные вертикали.

После извлечения батометра наносы вытряхивают в ванночку, а оттуда в мерный цилиндр, в котором определяют их объем ($см^3$).

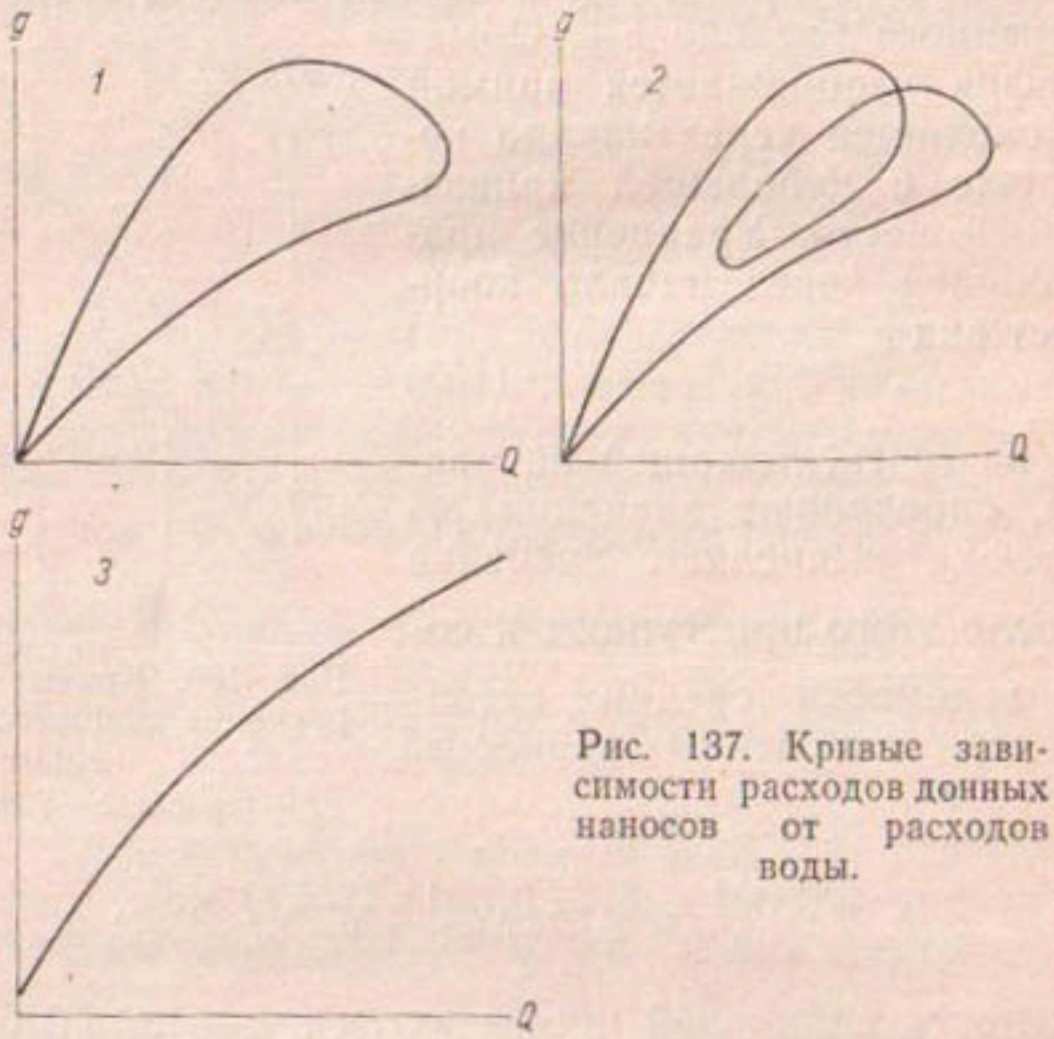


Рис. 137. Кривые зависимости расходов донных наносов от расходов воды.

Затем пробы просушивают, упаковывают и отправляют в лабораторию для определения веса и механического состава. По весу и объему наносов вычисляют их объемный вес.

Вычисление расхода донных наносов. Для каждой вертикали определяют расход наносов в 1 с на 1 м ширины русла, или элементарный расход. Если вес наносов, взятых в течение t (секунды) на вертикали, составляет $P_д$ (граммы) при ширине батометра C (метры), то элементарный расход донных наносов в г/(м·с) составляет

$$\Delta g = \frac{P_д}{Ct}. \qquad (161)$$

Полный расход наносов в кг/с вычисляют по формуле

$$g = 0{,}001 \sum \Delta g_{ср} b, \qquad (162)$$

где $\Delta g_{ср}$ — средние элементарные расходы между соседними вертикалями; b — расстояния между ними в метрах.

Вычисление стока донных наносов. Сток донных наносов определяют с помощью кривой связи между g и Q (рис. 137). На оси абсцисс наносят расходы воды Q, на оси ординат — расходы донных наносов g. По полученным точкам, ложащимся на чертеже обычно неширокой полосой, строят осредненную кривую (рис. 137, кривая *3*), чаще всего отдельно для разных фаз режима реки. Пользуясь кривыми $g = f(Q)$ (рис. 137, кривые *1, 2*), по средним суточным расходам воды определяют средние суточные расходы донных наносов, по которым подсчитывают сток наносов.

72. Механический состав наносов

В зависимости от механического состава, или диаметра частиц, принята классификация грунтов, приведенная в табл. 71.

Таблица 71

Название грунтов в зависимости от диаметра частиц

Диаметр частиц, мм	0,0001—0,005	0,005—0,01	0,01—0,05	0,05—0,1	0,1—0,25	0,25—0,5	0,5—1,0	> 1,0
Грунт	Глина	Тонкая пыль	Пыль	Очень тонкий песок	Тонкий песок	Средний песок	Крупный песок	Гравий

Вопросы для самопроверки

1. Какие вы знаете приборы для отбора проб взвешенных и донных наносов?
2. Какие бывают способы отбора проб на мутность при измерении расхода взвешенных наносов?
3. Как вычисляют расход взвешенных наносов?
4. Для какой цели служат единичные пробы на мутность?
5. Как измеряют и вычисляют расход донных наносов?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 34. Вычислить расход взвешенных наносов, измеренный детальным способом.

Дано: материалы полевых измерений расхода воды и лабораторных определений мутности в пробах (графы 1—10 табл. 72).

Решение. Применяем графический метод вычисления расхода в последовательности, изложенной в § 69.

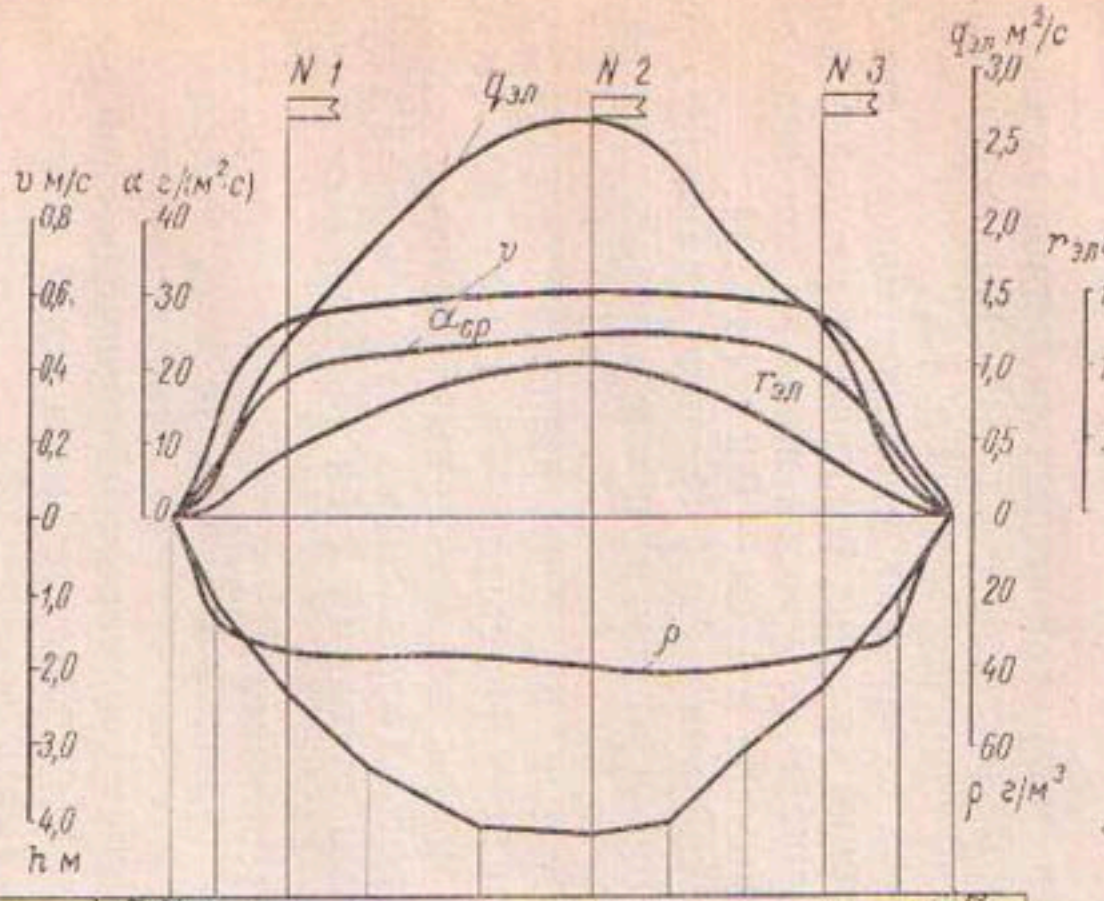
1. По данным 1—3 граф табл. 72 строим профиль водного сечения (см. рис. 138), а по данным граф 3—6 эпюры скоростей. Определим в отдельных точках скоростных вертикалей мутность ρ

Таблица 72

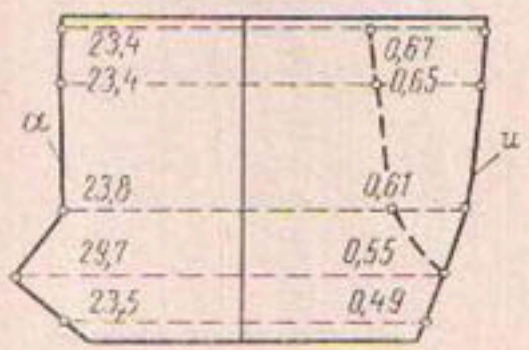
Материалы полевых измерений расхода воды гидрометрической вертушкой и лабораторных определений мутности

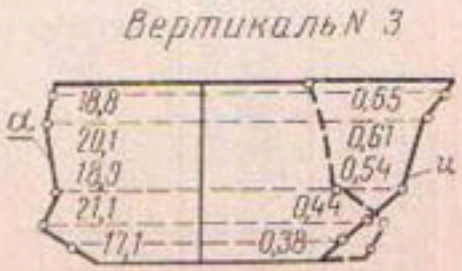
Промеры			Скорость			Взвешенные наносы					
№ промерной вертикали	расстояние от постоянного начала	глубина h м	№ скоростной вертикали	глубина погружения вертушки	скорость в точке u м/с	№ пробы/№ бутыли	№ фильтра	вес наносов, P г	объем проб, V л	мутность ρ г/м³	единичный расход наносов $q = \rho u$ г (м²·с)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Урез				Пов.	0,62	1/8	35	0,0828	2,76	30	18,6
лев.	6,8	0		0,2 H	0,57	2/10	36	0,0955	2,81	34	19,4
берега				0,6 H	0,52	3/11	37	0,1087	2,86	38	19,7
1	8,0	1,10		0,8 H	0,43	4/13	38	0,1160	2,90	40	17,2
2	10,0	2,40	1	Дно	0,39	5/20	39	0,1019	2,83	36	14,0
3	12,0	3,30									
4	15,0	4,10		Пов.	0,67	6/14	40	0,0962	2,75	35	23,4
5	18,0	4,20	2	0,2 H	0,65	7/18	41	0,1022	2,84	36	23,4
6	20,0	4,00		0,6 H	0,61	8/24	42	0,1137	2,92	39	23,8
7	22,0	3,10		0,8 H	0,55	9/26	43	0,1501	2,78	54	29,7
				Дно	0,49	10/30	44	0,1392	2,90	48	23,5
8	24,0	2,30	3	Пов.	0,65	11/7	45	0,0792	2,73	29	18,8
9	26,0	1,08		0,2 H	0,61	12/9	46	0,0924	2,80	33	20,1
Урез	27,5	0		0,6 H	0,54	13/12	47	0,1032	2,95	35	18,9
пр.				0,8 H	0,44	14/15	48	0,1426	2,97	48	21,1
берега				Дно	0,38	15/23	49	0,1170	2,60	45	17,1

Принятые данные	
Q м³/с	31,5
ω м²	59,0
$v_{ср}$ м/с	0,53
$v_{наиб}$ м/с	0,67
B м	20,7
$h_{ср}$ м	2,85
r кг/с	1,21
ρ г/м³	38,4









N вертикали	Ур. воды	0 Берег	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ур. воды	0 Берег
Расст. от пост. начала, м		6,8	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	27,5	
Глубина h м		0	1,10	2,40	3,30	4,10	4,20	4,00	3,80	2,30	0	0	
Средняя скорость $v_{ср}$ м/с		0	0,27	0,53	0,59	0,57	0,57	0,59	0,57	0,53	0,23	0	
Элементарный расход воды $q_{эл}=hv$ м²/с		0	0,24	1,20	1,81	2,42	2,56	2,36	1,77	1,22	0,25	0	
Единичный расход наносов $\alpha_{ср}$ г/(м²·с)		0	6	18,4	21	23	24,8	24	23	19,5	8	0	
Элементарный расход наносов $r_{эл}=\alpha h$ г/(м·с)		0	6,6	44,2	69,3	94,3	104,2	96,0	71,3	44,8	8,6	0	
Мутность ρ г/м³		0	27,5	37,3	38,1	39,0	40,7	40,7	40,3	36,7	34,4	0	

Рис. 138. Вычисление расходов воды и взвешенных наносов графическим способом.

в г/м³ и единичные расходы наносов по формуле (152) (например, у поверхности первой скоростной вертикали) $\rho = \frac{0{,}0828 \cdot 10^3}{2{,}76} = 30$ г/м³, а $\alpha = 30 \cdot 0{,}62 = 18{,}6$ г/(м²·с). Строим эпюры ρ и α на вертикалях.

Таблица 73

Определение средних единичных расходов взвешенных наносов на вертикалях ц. д. = 1 г/(м² · с)

№ вертикали	Средняя разность отсчетов из 3 обводок планиметром	Площадь эпюры, г (м²·с)	Глубина h м	Средний единичный расход наносов $\alpha_{ср}$ г/(м²·с)
1	44	44	2,40	18,4
2	104	104	4,20	24,8
3	45	45	2,30	19,5

2. Определяем площади эпюр единичных расходов наносов и вычисляем средние единичные расходы $\alpha_{ср}$ г/(м²·с) на вертикалях. Результаты этих вычислений приведены в табл. 73.

3. Строим эпюру средних единичных расходов наносов по ширине реки. Для этого значения средних единичных расходов наносов на вертикалях откладываем от уровня воды на профиле водного сечения [в данном примере в 1 см — 0,2 г/(м²·с)].

4. Снимаем с построенной эпюры $\alpha_{ср}$ средние единичные расходы наносов для каждой промерной вертикали и результаты записываем под профилем (строка 6).

5. Вычисляем элементарные расходы наносов (строка 7) и строим эпюру $r_{эл}$ по ширине реки [масштаб — в 1 см — 50 г/(м·с)].

6. Вычислив площадь эпюры элементарных расходов наносов по ширине реки, получаем расход взвешенных наносов $r = 1{,}21$ кг/с.

7. Вычисляем суммарный суточный сток взвешенных наносов

$$R = \frac{1{,}21 \cdot 86\,400}{1000} = 104 \text{ т.}$$

8. Вычисляем расход воды Q, измеренный одновременно с расходом взвешенных наносов. В результате вычислений получен расход $Q = 31{,}5$ м³/с (см. рис. 138).

9. Вычисляем среднюю мутность воды в реке по формуле (154)

$$\rho_{ср} = \frac{1{,}21 \cdot 10^3}{31{,}5} = 38 \text{ г/м}^3.$$

Сводные данные всех расчетов приведены на рис. 138.

Упражнение 35. Вычислить расход взвешенных наносов р. Сакмары у ст. Сакмарской.

Дано: мутность проб, взятых суммарно на скоростных вертикалях:

№ вертикали	1	2	3	4	5	6
Мутность, г/м³	374	486	684	720	750	560

Расход воды принять согласно упражнению 28 (табл. 63).

Решение. Вычисления проводим по формуле (156) аналитическим способом. В табл. 74 в графе 3 приведены средние мутности между двумя соседними вертикалями. В графе 4 приведены частичные расходы воды между соседними вертикалями, заимствованные из упражнения 28 (см. табл. 65).

Таблица 74

№ скоростных вертикалей	Мутность суммарной пробы на вертикали ρ г/м³	Средняя мутность между соседними вертикалями $\rho_{ср}$ г/м³	Частичный расход	
			воды ΔQ м³/с	взвешенных наносов Δr кг/с
1	2	3	4	5
Урез лев. берега	—	374	3,3	1,2
1	374	430	12,2	5,3
2	486	585	13,7	8,0
3	684	702	11,8	8,3
4	720	735	24,6	18,1
5	750	655	25,3	16,6
6	560	560	12,2	6,8
Урез пр. берега				
Сумма			103	64,3

Помножив среднюю мутность вертикали № 1 (374 г/м³ = = 0,374 кг/м³) на частичный расход воды между урезом и вертикалью (3,3 м³/с), получаем частичный расход взвешенных наносов на этом участке $\Delta r = 0{,}374 \cdot 3{,}3 = 1{,}2$ кг/с. На участке между вертикалями № 1 и 2 $\Delta r = \rho_{ср}\Delta Q = 0{,}43 \cdot 12{,}20 = 5{,}3$ кг/с.

Расход взвешенных наносов получен суммированием частичных расходов $r = 64{,}3$ кг/с. Средняя мутность

$$\rho = \frac{64.3 \cdot 10^3}{103} = 624 \text{ г/м}^3.$$

ТЕМА 20. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ГИДРОМЕТРИЯ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ И ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

73. Задачи эксплуатационной гидрометрии

Задачи эксплуатационной гидрометрии — выполнение гидрометрических работ на гидромелиоративных системах с целью изучения режима источника и водоприемника, учета и распределения

воды между потребителями, исследования режима грунтовых вод и т. д.

Потребители на оросительных системах обеспечиваются водой по заранее разработанному и утвержденному плану. Комплекс мероприятий по осуществлению этого плана называется плановым водопользованием. Объем подаваемой воды должен строго соответствовать объему потребления.

Эксплуатационная гидрометрия призвана реализовать планы водопользования.

Гидрометрические посты на гидромелиоративных системах. Учет воды на гидромелиоративных системах производится на гидрометрических постах. Местоположение их выбирают в створах, обеспечивающих контроль водозабора или сброса, регулирование подачи воды к различным точкам системы. Створы должны отвечать основным техническим требованиям, предъявляемым к производству гидрометрических работ. Гидрометрические посты оросительных систем делятся на следующие группы (рис. 139).

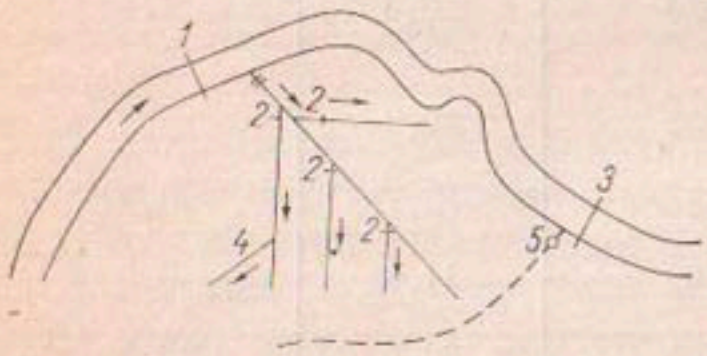


Рис. 139. Гидрометрические посты на оросительных системах.

1 — опорный; *2* — головные; *3* — балансовый; *4* — в точке выдела воды водопользователю; *5* — на водосбросном канале.

1. Опорные посты служат для изучения водоносности источника орошения в разные периоды года. Располагают их на водоисточнике выше водозаборного узла.

2. Головные посты служат для учета воды, поступающей в старшие каналы (магистральный и распределители старшего порядка); их устанавливают в голове каналов.

3. Балансовые посты строят на водоисточнике ниже впадения в него сбросных каналов. Такие же посты иногда устанавливают на главных каналах. Для учета объема сбрасываемых вод по отдельным участкам балансовые посты устраивают и на сбросной и водосборной сети системы.

4. Учет воды, подаваемой в хозяйство, производится водомерными устройствами в точках водовыдела. На внутрихозяйственной оросительной сети вода учитывается в точках подачи воды из старших каналов в младшие.

Учет воды на гидромелиоративных системах производится следующими методами: 1) русловым, 2) существующими гидротехническими сооружениями с предварительной их тарировкой и 3) специальными водомерными устройствами.

74. Русловой метод учета стока воды

При русловом методе вода учитывается гидрометрическими приборами в руслах рек и крупных каналов, где глубины и скорости течения достаточны для производства гидрометрических ра-

бот. Створы для установки постов и производства измерений должны отвечать всем требованиям, изложенным выше в теме 9.

Водомерные посты на каналах бывают преимущественно реечного типа, а на реках и водохранилищах — свайного типа. Для ведения наблюдений посты оборудуют гидрометрическими мостиками или люльками.

Для тарирования створа при разных уровнях измеряются расходы воды. По данным измерений Q и H вычерчивают кривую $Q = f(H)$. В дальнейшем ведут только водомерные наблюдения. По уровню и кривой $Q = f(H)$ определяют расход воды в данном створе.

Зависимость расхода от уровня периодически проверяют, чтобы обнаружить отклонения, которые происходят как вследствие деформации, так и вследствие изменения шероховатости русла. На неустойчивых участках русел рек, являющихся источниками орошения, а также при малых скоростях течения воды, где измерение вертушкой невозможно, устраивают искусственные «контрольные» русла. К ним относятся:

донный контроль, или бетонированный участок с повышенным уклоном дна;

сужение русла путем устройства стенок, отходящих от берегов. Его применяют при больших глубинах и малых скоростях течения.

На неустойчивых створах оросительных каналов контрольные русла устраивают в виде облицованного участка с сохранением размеров профиля канала. Гидрометрические работы здесь ведут обычными способами с целью получения устойчивой кривой $Q = f(H)$.

Объем забираемой воды из водохранилища определяют по кривым объемов и площадей $V = f_1(H)$ и $\omega = f_2(H)$. Сначала проводят наблюдения за уровнем воды, затем по кривой $V = f_1(H)$ определяют объем воды в водохранилище при данном уровне. При отсутствии притока разность объемов между двумя наблюдениями составляет объем водозабора вместе с потерями на испарение и фильтрацию.

75. Учет воды гидротехническими сооружениями с предварительной их тарировкой

Учет воды существующими гидротехническими сооружениями производится по формулам гидравлики. Для этого измеряют все величины, входящие в состав этих формул, кроме коэффициентов расхода m и μ и коэффициента скорости φ. Например, для незатопленного водослива с широким порогом $Q = mbH^{3/2}\sqrt{2g}$. Непосредственными измерениями определяют Q, b и H. Использование рекомендуемых справочниками значений m может привести к значительным ошибкам при определении расходов воды. Поэтому гид-

ротехнические сооружения тарируют, т. е. коэффициенты расхода определяют опытным путем. Из расчетных формул определяют неизвестные коэффициенты. Зная Q, b и H, находят m, а именно $m = \frac{Q}{bH^{3/2}\sqrt{2g}}$. Для удобства работ составляют таблицы расходов каждого сооружения.

Гидротехническое сооружение, предназначенное для учета воды, должно быть технически исправным, иметь правильные формы и плавный подход воды к отверстию. Истечение воды через сооружение (свободное или затопленное) должно быть всегда постоянным.

Точки для наблюдений на сооружении закрепляются до тарировки. Они должны быть постоянными и неизменными в высотном отношении. В верхнем бьефе точки наблюдений располагают на расстоянии 3—4 максимальные глубины воды от порога водослива. В нижнем бьефе наблюдения ведут в створе с установившимися скоростями течения воды.

76. Учет воды специальными водомерными устройствами. Их классификация

Водомерные устройства по своему назначению разделяют на три основные группы:

1) сооружения только для учета воды,
2) водомеры-водовыпуски для учета воды и ее регулирования,
3) водомеры-автоматы, пропускающие определенный, заранее заданный расход воды.

Различны водомеры и в конструктивном отношении — водосливы, насадки, лотки и т. д.

Большое распространение получили водосливы в тонкой стенке (водосливы с острыми ребрами). По форме выреза отверстий водосливы бывают: трапецеидальные, треугольные и прямоугольные.

Трапецеидальный водослив (Чиполетти) имеет вырез, суживающийся книзу, с наклоном боковых сторон 1: $^1/_4$ (рис. 140). Расход воды через водослив с шириной порога, равной (3—4) H, при напоре $H = 0{,}05 \div 1{,}0$ м и при отсутствии скорости подхода, определяют по формуле

$$Q = 1{,}86\, bH^{3/2}, \tag{163}$$

где Q — расход в м^3/с; b — длина порога в метрах; H — высота переливающегося слоя (напор), измеряемая перед водосливом вне кривой спада струи в метрах.

При $b = 1{,}0$ м

$$Q = 1{,}86\, H^{3/2}. \tag{164}$$

Трапецеидальный водослив можно использовать как точный прибор, если соблюдены следующие условия:

а) расстояние p от порога до дна и боковых граней (до откосов канала) должно быть не менее максимального возможного переливающегося слоя воды;

б) порог водослива не должен быть подтоплен снизу, т. е. порог должен располагаться выше уровня в нижнем бьефе;

в) высота слоя переливающейся воды должна быть в пределах от $^1/_{10}$ до $^1/_3$ длины порога;

г) длина порога должна быть в пределах 0,2—1,5 м. При большей длине водослив нужно тарировать.

Трапецеидальный водослив делают из металлического листа с ребрами жесткости из уголка или швеллера. Можно его устроить и из деревянного щита. В последнем случае кромку выреза заостряют односторонним срезом со стороны нижнего бьефа. Кромку

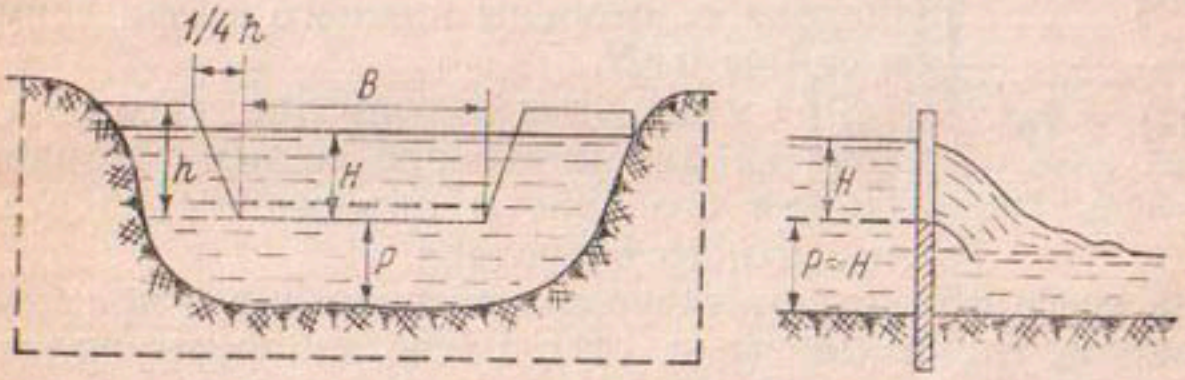


Рис. 140. Трапецеидальный водослив.

отверстия деревянного щита обшивают листовым железом со стороны верхнего бьефа.

Порог водослива устанавливают горизонтально с помощью уровня или нивелира. Рейку (для отсчета напора) прикрепляют со стороны верхнего бьефа на колышке, специально для этого забитом в грунт, или непосредственно на щите. Нуль рейки должен быть на одном уровне с порогом водослива.

Водослив располагают нормально к потоку и строго отвесно. Ось выреза водослива должна совпадать с осью потока.

Описанный водомер обладает высокой точностью. Вероятная ошибка измерения расхода $\pm 2\%$. Водослив применяют для измерения расходов не свыше 650 л/с.

Менее точны трапецеидальные водосливы в условиях затопленного истечения. Расход воды в этом случае определяется формулой

$$Q_з = Q - 0{,}725\, h^{1{,}55} b, \qquad (165)$$

где Q — расход незатопленного водослива; h — превышение горизонта нижнего бьефа над порогом водослива.

Трапецеидальный водослив с вырезом, суживающимся книзу, и наклоном боковых сторон 1 : 1 (конструкции А. И. Иванова) может работать при свободном и затопленном истечении при расходах от 5,2 до 7,35 м³/с. Напор воды над порогом водослива не должен превышать $0{,}33\, b$, где b — длина порога водослива.

Расходы воды (л/с) определяют по формулам для водослива:
а) незатопленного

$$Q = 1000\,\mu b H^{3/2}, \tag{166}$$

причем

$$\mu = 1{,}86\,\frac{b + H}{b + 0{,}25\,H}, \tag{167}$$

б) затопленного

$$Q_з = Q - 0{,}67\,bh^{1{,}585}. \tag{168}$$

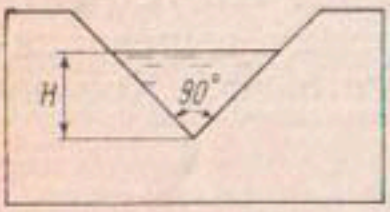


Рис. 141. Треугольный водослив.

Ошибка измерения составляет ± 3%.

Затопление водосливов Чиполетти и А. И. Иванова со стороны нижнего бьефа допускается не свыше $0{,}8H$.

Треугольный водослив (Томсона) предназначен для измерения малых расходов воды. Условия его работы аналогичны работе трапецеидального водослива.

Чаще всего применяют треугольный водослив с прямым углом при вершине, т. е. $\alpha = 90°$ (рис. 141). Расчетная формула имеет вид

$$Q = 1{,}4\,H^{5/2}. \tag{169}$$

Величина напора H должна быть не меньше 0,05 м. Вероятная ошибка измерения расхода воды треугольным водосливом с прямым углом при вершине 1—2%.

Прямоугольный водослив без бокового сжатия имеет порог во всю ширину канала. Порог водослива возвышается над дном канала не менее наибольшей величины напора, а при малых напорах — не менее 0,2 м.

Расход воды определяют по общей формуле

$$Q = m_0 b \sqrt{2g}\,H^{3/2}, \tag{170}$$

где m_0 — коэффициент расхода водослива с учетом скорости подхода. Значения m_0 без учета скорости подхода даны в приложении 3.

Водомерные насадки обладают меньшей точностью измерения воды (ошибка ±5%) по сравнению с водосливами. Но зато они создают меньший подпор воды. Это водомерное устройство состоит из перегораживающей русло канала стенки и сходящегося в ней насадка, закрепленного у отверстия. Поперечное сечение насадка может быть круглым, квадратным или прямоугольным (рис. 142).

Насадки работают как водомеры при соблюдении следующих условий:

1) расположение щита — перпендикулярно к оси потока;

2) истечение — затопленное, выходное отверстие должно быть под уровнем воды не менее 5 см;

3) разность уровней верхнего и нижнего бьефов z — не свыше 0,3 м.

Расходы воды, пропускаемые различными типами насадков, определяются по формулам:

круглого

$$Q = 3{,}2\, d^2 \sqrt{z}, \qquad (171а)$$

прямоугольного

$$Q = 4{,}1\, ab \sqrt{z}, \qquad (171б)$$

квадратного

$$Q = 4{,}1\, a^2 \sqrt{z}, \qquad (171в)$$

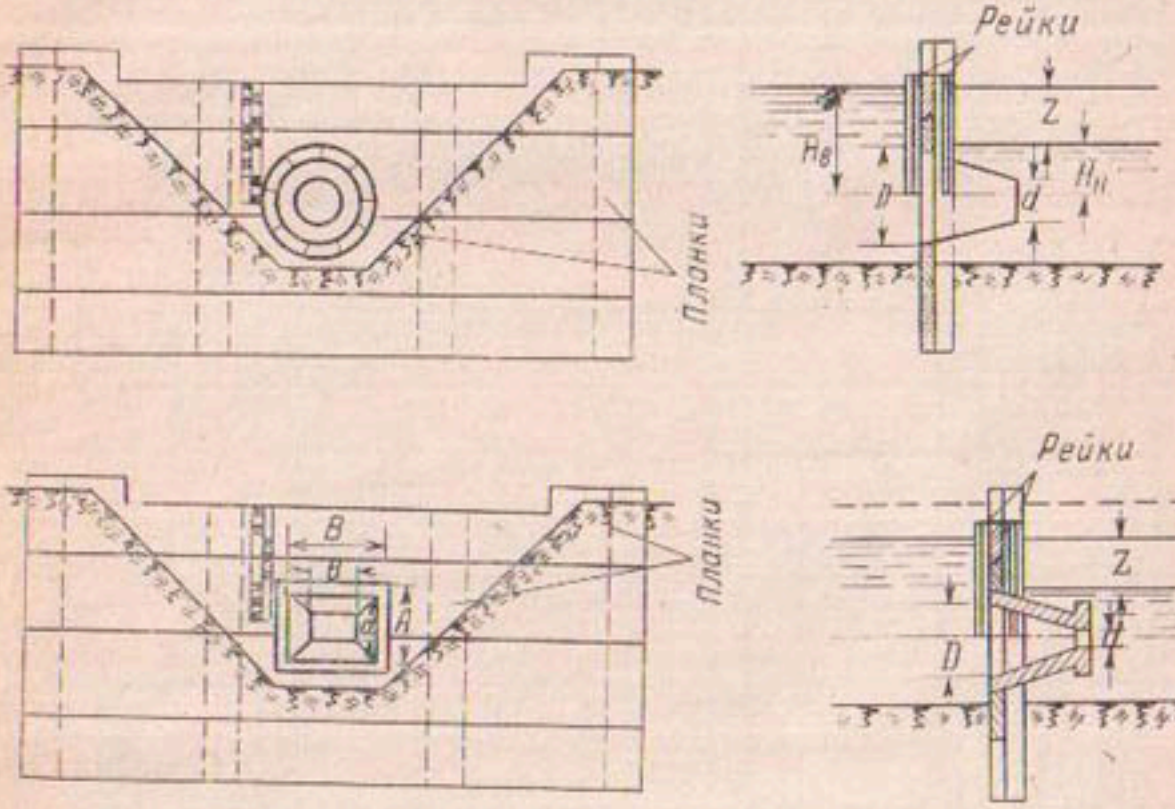


Рис. 142. Насадки-водомеры

где d — диаметр; a и b — высота и ширина выходного отверстия насадка (см. рис. 142).

Наблюдения проводят по двум рейкам, установленным со стороны верхнего и нижнего бьефов. Нуль обеих реек устанавливается на уровне оси насадка.

Водомерный порог САНИИРИ (рис. 143) может работать в условиях переменного режима (подпор или спад воды со стороны нижнего бьефа) и на участках с неустойчивым руслом (размыв, заиление и зарастание). Режим нижнего бьефа не влияет на истечение через порог, если $\frac{H_н}{H_в} \leqslant 0{,}8$. При этом расход воды определяется формулой

$$Q = \left(0{,}37 + 0{,}04 \frac{H_в}{p}\right)(b_п + mH_в)\sqrt{2gH_в^3}, \qquad (172)$$

где $H_в$ — напор воды над порогом со стороны верхнего бьефа; $H_н$ — то же со стороны нижнего бьефа; p — высота порога над

дном канала; m — коэффициент заложения откоса; $b_п$ — длина порога ($b_п = b_к + 2mp$, здесь $b_к$ — ширина канала по дну).

Погрешность измерения расхода воды составляет ±6%. Водомер служит для измерения расходов от 2 до 20—30 м³/с. Рейка

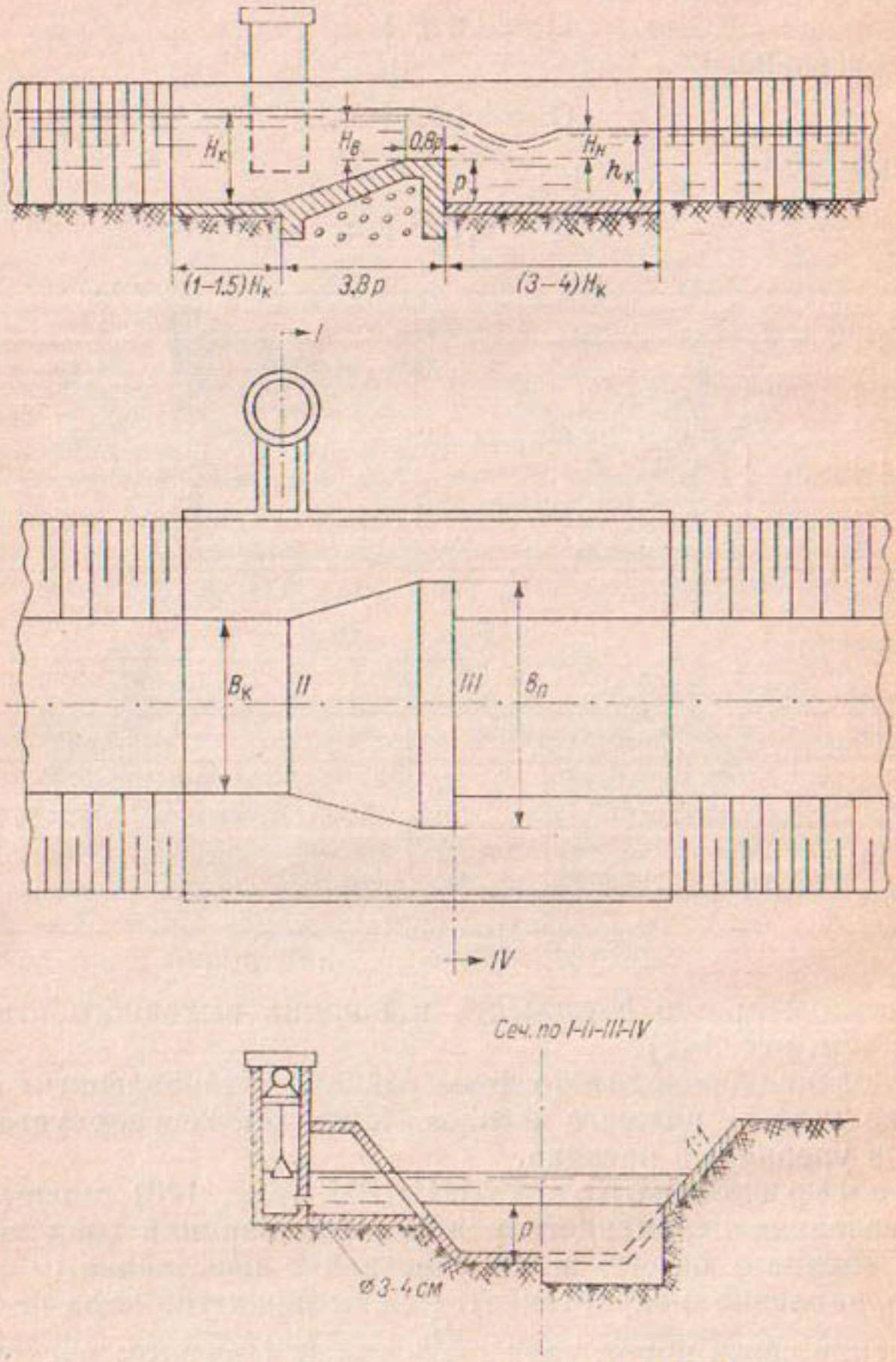


Рис. 143. Водомерный порог САНИИРИ.

устанавливается в колодце, который сообщается с верхним бьефом. Нуль рейки совмещается со средней отметкой порога. Со стороны нижнего бьефа рекомендуется устанавливать рейку. Она необходима для контроля относительного затопления.

Водомерные щитовидные водовыпуски относятся к регулирующим сооружениям, обеспечивающим одновременно и учет воды. Примером может служить водовыпуск СБ-47, предложенный М. Б. Бутыриным (рис. 144). Его устанавливают в головах распределительной сети и на хозяйственных водовыделах при расходах 1,5—2 м³/с и рекомендуют к работе только при истечении из-под щита. Коэффициент расхода близок к единице. Поэтому в расчетных формулах расхода указанный коэффициент отсутствует.

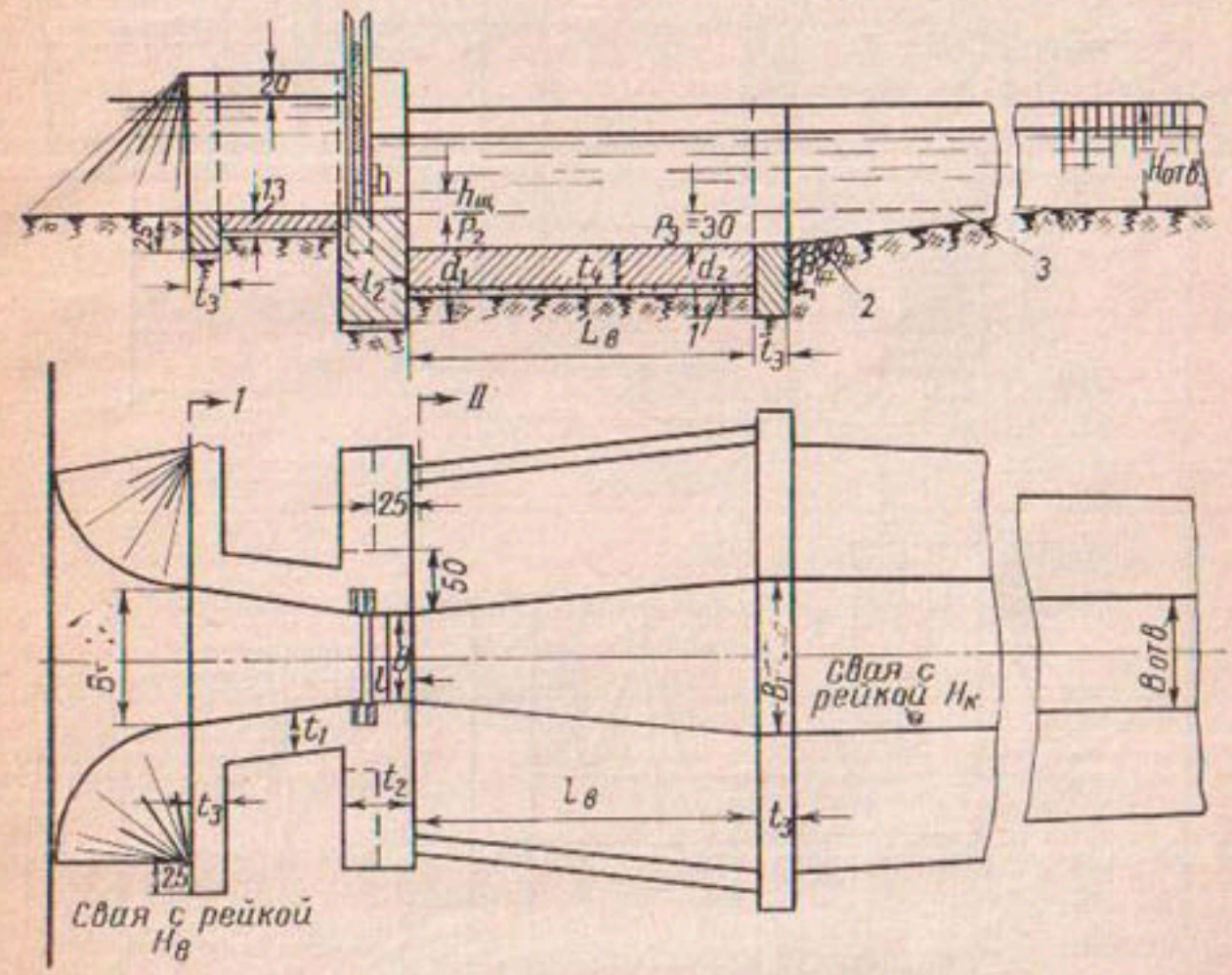


Рис. 144. Водовыпуск СБ-47.
$B = 1{,}70\ b$; $B_1 = 2\ b$.

Расходные формулы имеют следующий вид:
а) при свободном истечении

$$Q = bh_{щ}\sqrt{2g(H_в - h_{щ})}, \qquad (173)$$

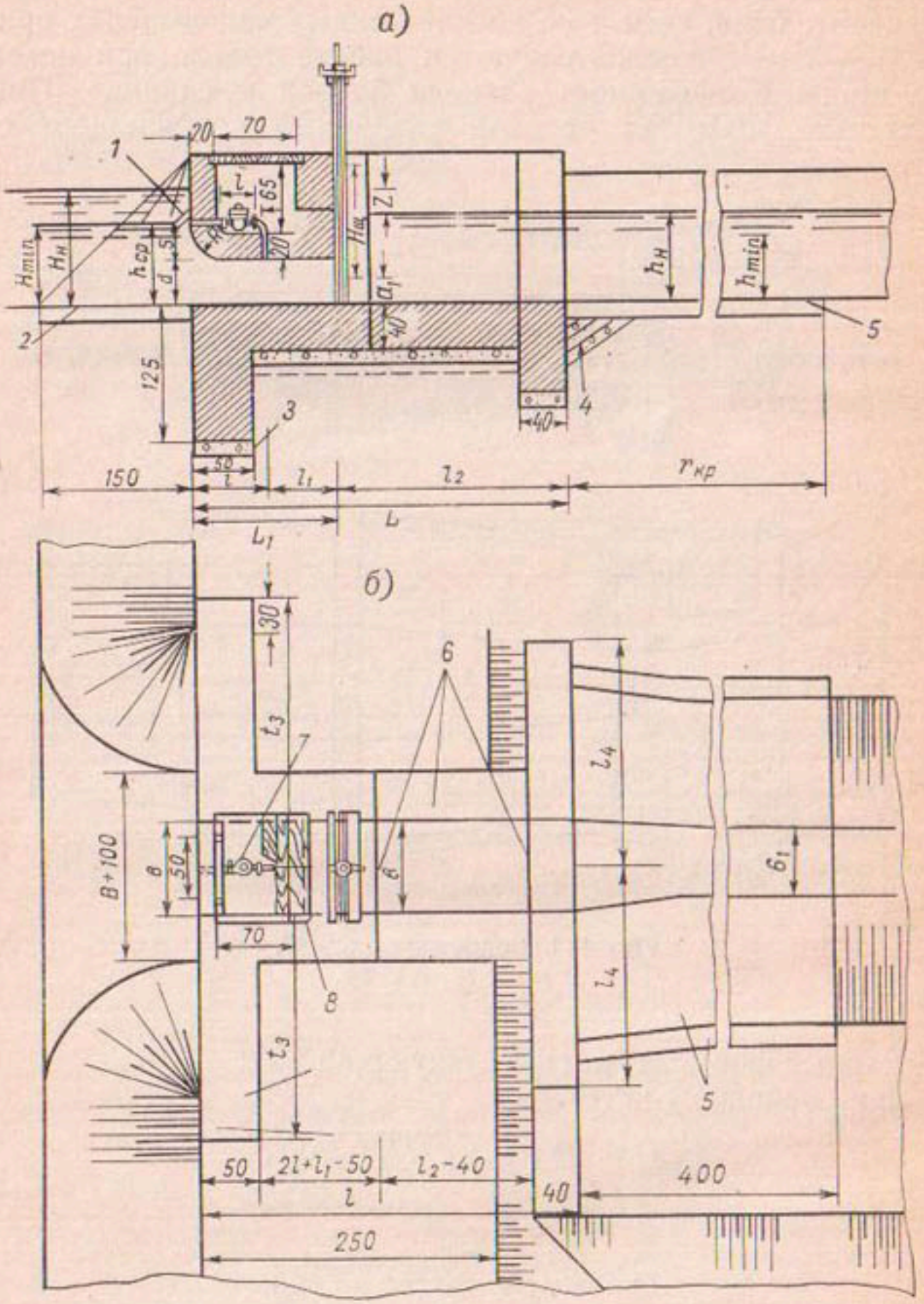
б) в условиях затопления

$$Q = bh_{щ}\sqrt{2g(H_в - H_н)}, \qquad (174)$$

где Q — расход в м³/с; b — ширина щитового отверстия в метрах; $h_{щ}$ — высота открытия щита в метрах; $H_в$ — отсчет по верхней рейке в метрах; $H_н$ — отсчет по нижней рейке в метрах.

Нули реек устанавливают на уровне порога водослива. Здесь ведутся наблюдения за уровнями верхнего и нижнего бьефов и высотой поднятия щита.

Парциальные водомеры работают по принципу учета


а)
20
70
1
l
65
Z
Hш
Hmin
Hн
hср
d
5
20
a1
hн
hmin
2
40
125
3
4
40
5
150
50
l
l1
l2
Lкр
L
L1
б)
30
l3
6
l4
7
B+100
B
50
6
6
6

частичного (от всего потока) расхода воды в параллельном отводе. Расход всего потока выражается следующей зависимостью:

$$Q = kq, \tag{175}$$

где q — расход в отводе; k — постоянный коэффициент, равный отношению общего расхода потока к парциальному (частичному).

Измерение расхода воды в трубах парциальным методом было предложено в 1910 г. Ю. В. Ланге.

Парциальный водомер-регулятор Ф. И. Пикалова и В. Я. Поповой представляет собой водовыпуск закрытого типа (трубчатый). В колодце над трубой помещена отводная трубка, одним концом соединенная с верхним бьефом, а другим — с нижним бьефом основного потока. На отводной трубке смонтирован

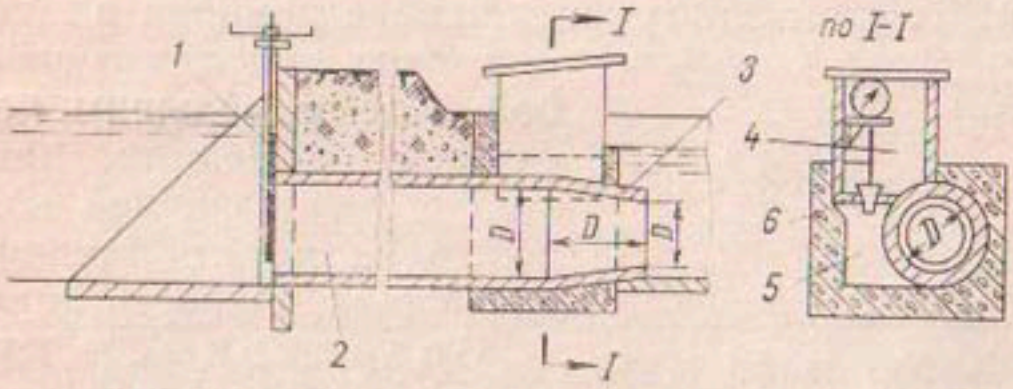


Рис. 146. Трубчатый водомер-регулятор со сходящимся насадком.

1 — щитовое устройство; *2* — труба; *3* — насадок; *4, 5* — колодец; *6* — стенка.

счетчик «Космос». Конструкция водомера показана на рисунке 145. Вода, проходящая через счетчик, вращает целлулоидную крыльчатку, помещенную в бронзовый корпус. По числу оборотов крыльчатки отсчитывается суммарный сток, который передается через систему передач на циферблат.

Водомер-регулятор оборудован щитовым устройством и относится к регулируемым водомерным сооружениям.

Существует несколько конструкций парциальных водомеров. Различаются они конструктивными особенностями сооружения и счетчика.

Трубчатыми водомерами-регуляторами со сходящимися насадками часто оборудуют хозяйственные водовыделы на оросительных системах. Они рассчитаны на расход до 1,1 м³/с, а двухочковых — на 2,2 м³/с. Водомер-регулятор (рис. 146) состоит из выходного оголовка, щитового устройства; трубы и водомерного конически сходящегося насадка.

Конический насадок имеет длину $l_н$, равную диаметру входного отверстия D, а диаметр выходного сечения $d = 0{,}74D$. Длина прямого участка трубы от щитового устройства до сужения должна быть не менее $6D$, а истечение — затопленное. Эти водомеры применяются при перепадах уровней от 2 до 60 см; погрешность в измерении расходов 3—4%. Трубы, как и насадок, могут быть круглого или прямоугольного сечения.

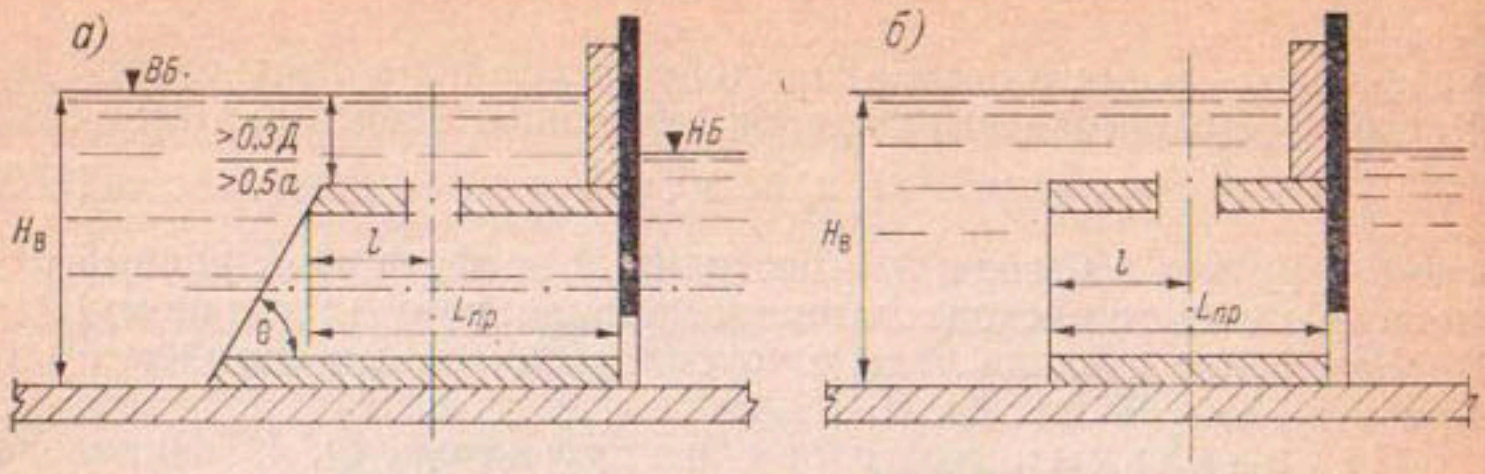


Рис. 147. Водомерная приставка.
а — наклонный вход в приставку, *б* — прямой вход.

Водомер обычно оборудован расходоуказателем или счетчиком стока. На рис. 146 показано расположение прибора в колодце. Верхняя часть колодца соединена с трубой, т. е. с бóльшим давлением, а нижняя — с нижним давлением. В стенке, разделяющей колодец, расположена деталь прибора, воспринимающая разность давлений.

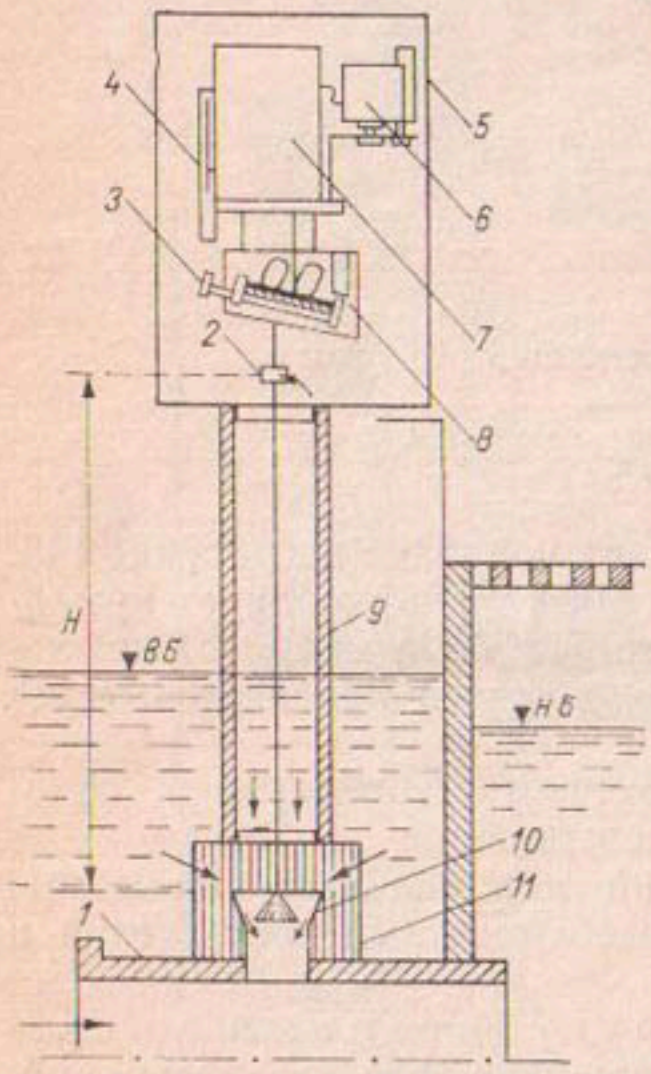


Рис. 148. Многопредельный расходоуказатель ДРС-66.
1 — приставка; *2* — поршень; *3* — регулирующий винт; *4* — циферблат; *5* — корпус; *6* — барабан; *7* — механизм; *8* — регулятор; *9* — труба, *10* — патрубок; *11* — щелевая коробка.

Водомерные приставки устраиваются в виде короткой трубы круглого или прямоугольного сечения, устанавливаемой перед затвором сооружения (рис. 147). Погрешность измерения расхода не превышает ± 4%. Типовые гидротехнические сооружения с водомерными приставками разработаны для измерения расходов воды от 50 л/с до 20 м³/с.

Расход воды определяется следующей формулой:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gz_{пр}}, \qquad (176)$$

где μ — коэффициент расхода приставки; ω — площадь сечения приставки; $z_{пр}$ — перепад давления на входе в приставку и в водомерном сечении.

Коэффициент расхода μ для каждого типа приставки является величиной постоянной, зависящей от расстояния *l*, на которое удалено водомерное сечение от входа приставки. Значение коэффициента расхода определяется по эмпирическим зависимостям, приведенным в табл. 75.

Непрерывно действующие автоматические приборы устанавливают на водомерных устройствах, когда нужно

Таблица 75

Эмпирические зависимости для определения коэффициента расхода водомерных приставок

(по данным В. Е. Краснова)

Вход в приставку	Сечение трубы приставки	Расстояние до водомерного сечения $\frac{l}{D}$ или $\frac{l}{a}$	Зависимость для определения μ
Наклонный ($\theta < 90°$)	Круглое	0,5—1,5	$\mu = 0{,}57 + 0{,}08\,\frac{l}{D}$
	Прямоугольное ($b : a = 1{,}5$)[1]	0,5—1,5	$\mu = 0{,}51 + 0{,}08\,\frac{l}{a}$
Прямой ($\theta \approx 90°$)	Круглое	0,3—0,5	$\mu = 0{,}47 + 0{,}38\,\frac{l}{D}$
	Прямоугольное ($b : a = 1{,}5$)	0,3—0,5	$\mu = 0{,}52 + 0{,}38\,\frac{l}{a}$

[1] a — высота прямоугольной приставки; b — ширина.

автоматически регистрировать необходимые величины для определения расхода воды или непосредственно расхода воды, а иногда и суммарный сток. К первой группе относятся самописцы уровней, описанные в § 50. Показания суммарного стока дают счетчики стока. К ним относится счетчик «Космос», применяемый в парциальных водомерах.

Многопредельный расходоуказатель ДРС-66 применяется для измерения и записи расхода воды на гидросооружениях с пропускной способностью от 0,1 до 50 м³/с и более. ДРС-66 работает по принципу переменного перепада давлений. На рис. 148 показана установка прибора на водомерной части сооружения — типа приставки *1*. Прибор устанавливается в корпусе *5*. В патрубке *10*, заделанном в водомерном сечении, имеется поршень, который воспринимает перепад давлений на входе приставки и передает его через гибкую нить и регулятор *8* на механизм *7*. Этот механизм преобразует перепад давлений в показания расхода воды на циферблате *4*. Изменения расходов воды во времени записываются на ленту барабана *6*. Труба *9* защищает гибкую нить от механических повреждений. Длина подвеса поршня *2* регулируется в узле. Радиус подвеса устанавливается с помощью винта *3*. Щелевая коробка *11* предохраняет патрубок с поршнем от засорения мусором.

77. Наблюдения за дренажным стоком

Наблюдения на осушительных системах сводятся к определению расходов воды, сбрасываемой с осушаемой площади. Модуль дренажного стока находят делением расхода воды на площадь, осушаемую дренажной системой.

Учет воды на осушительных системах производится теми же водомерными устройствами, что и на оросительных системах. Малые расходы воды измеряются объемным способом.

Объем воды, отводимый с 1 га осушаемой площади за определенный промежуток времени, составляет

$$W = 86{,}4\,qT, \tag{177}$$

где W — объем воды в м^3; q — модуль дренажного стока в л/(с·га); T — продолжительность периода в сутках.

78. Организация работ эксплуатационной гидрометрии

Гидрометрические работы, тарирование сооружений, обработку материалов наблюдений, водобалансовые расчеты и надзор за состоянием постов и гидрометрических створов выполняет гидрометрический персонал Управления эксплуатации системы. Все гидрометрические установки и водомеры наносят на схему (см. рис. 139).

На хозяйственных оросительных системах учет воды осуществляется руководителем водопользования и водными регулировщиками. Получив от управления системой в соответствии с внутрихозяйственным планом водопользования определенные расходы воды в пунктах выдела, они распределяют воду между бригадами, звеньями и поливальщиками.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы цели и задачи эксплуатационной гидрометрии?
2. Какие основные группы гидрометрических постов на мелиоративной системе?
3. Какие методы учета воды применяются на оросительной системе?
4. Какие вы знаете способы учета воды при русловом методе на реках, ручьях, водохранилищах и каналах?
5. В чем заключается задача тарирования гидротехнических сооружений?
6. Как классифицируются водомерные устройства на мелиоративных системах?
7. Какие вам известны конструкции водомерных насадков?
8. Начертите схемы водомерных насадков и покажите размерные величины из формул, служащих для определения расходов.
9. Начертите схему трубчатого водомера-регулятора. Покажите перепад давления.
10. Каков основной принцип работы водомерного приставка? Начертите схему и покажите расчетную зависимость.
11. Назовите основные непрерывно действующие автоматические приборы для учета воды.
12. Как рассчитать расход при свободном истечении и в условиях затопления через водомерные щитовые водовыпуски?
13. Каков принцип работы парциального водомера?

Лабораторно-практические занятия

Упражнение 36. Вычислить расход воды, измеренный в оросительном канале треугольным водосливом.

Дано: угол при вершине $\alpha=90°$; напор на пороге водослива $H=0{,}36$ м (см. рис. 141).

Решение. Подставляя в формулу (170) $H=0{,}36$ м, получаем

$$Q=1{,}40\cdot 0{,}36^{5/2}=0{,}108 \text{ м}^3/\text{с}=108 \text{ л/с}.$$

Упражнение 37. Вычислить расход воды, измеренный трапецеидальным суживающимся книзу с наклоном боковых стенок $1:{}^1/_4$ водосливом в тонкой стенке.

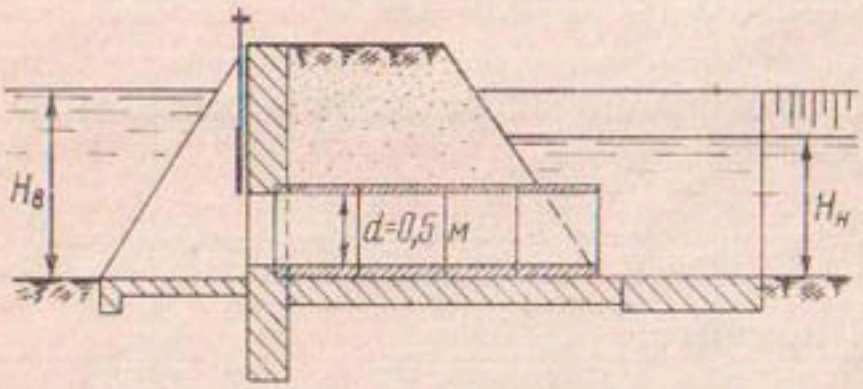


Рис. 149. Трубчатый водовыпуск.

Дано: длина порога $b=1{,}25$ м, напор на пороге водослива $H=0{,}35$ м (см. рис. 140).

Решение. Подставляя в формулу (163) ширину водослива и значение напора, вычисляем расход воды

$$Q=1{,}86\cdot 1{,}25\cdot 0{,}35^{3/2}=0{,}480 \text{ м}^3/\text{с}=480 \text{ л/с}.$$

Упражнение 38. Определить расход воды Q, измеренный конически сходящимся насадком круглого сечения.

Дано: диаметр выходного отверстия насадка $d=20$ см, показания водомерных реек, прикрепленных к верховой и низовой сторонам щита, $H_в=52$ см, $H_н=26$ см (см. рис. 142).

Решение. Расход воды в насадке-водомере круглого сечения определяем по формуле (171а). Разность уровней $z=H_в-H_н=52-26=26$ см $=0{,}26$ м. Отсюда

$$Q=3{,}2\cdot 0{,}2^2\cdot\sqrt{0{,}26}=0{,}065 \text{ м}^3/\text{с}=65 \text{ л/с}.$$

Упражнение 39. Вычислить коэффициент расхода трубчатого водовыпуска на оросительном канале, работающего в условиях затопленного истечения (рис. 149).

Дано: значения расходов Q и уровней верхнего $H_в$ и нижнего $H_н$ бьефов, измеренных в полевых условиях при тарировке, приведены в табл. 76.

Таблица 76

Вычисление коэффициента расхода

№ тарировки	Q м³/с	$H_в$ м	$H_н$ м	$H_в - H_н$ м	$\sqrt{H_в - H_н}$	$\omega\sqrt{2g(H_в - H_н)}$	μ
1	0,510	1,44	0,84	0,60	0,77	0,668	0,764
2	0,607	1,75	0,90	0,85	0,92	0,798	0,761
3	0,635	1,82	0,92	0,90	0,95	0,825	0,770
4	0,366	1,05	0,75	0,30	0,55	0,477	0,768
5	0,526	1,49	0,85	0,64	0,80	0,694	0,758
6	0,298	0,86	0,66	0,20	0,45	0,391	0,763
						Сумма	4,584

Среднее значение $\mu_{ср} = \frac{4,584}{6} = 0,764.$

Решение. Коэффициент расхода μ вычисляем в этой же таблице по формуле

$$\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2g(H_в - H_н)}}.$$

В расчетах принято:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ м}^2; \quad \sqrt{2g} = 4,43.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА m_0 ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОДОСЛИВА

H, м	При p_1, м								
	0,2	0.3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,05	0,476	0,470	0,468	0,467	0,467	0,466	0,466	0,466	0,465
0,10	0,462	0,450	0,445	0,441	0,440	0,438	0,437	0,437	0,437
0,15	0,468	0,452	0,443	0,437	0,435	0,432	0,431	0,430	0,429
0,20	0,478	0,457	0,446	0,438	0,435	0,431	0,430	0,428	0,427
0,25	0,489	0,465	0,451	0,443	0,438	0,433	0,431	0,427	0,427
0,30	0,497	0,472	0,457	0,450	0,441	0,435	0,432	0,430	0,427
0,35	—	0,480	0,464	0,453	0,445	0,439	0,435	0,432	0,429
0,40	—	0,488	0,470	0,457	0,449	0,443	0,438	0,435	0,431
0,45	—	—	0,476	0,463	0,454	0,447	0,441	0,438	0,434
0,50	—	—	0,482	0,467	0,458	0,451	0,445	0,440	0,436
0,55	—	—	—	0,472	0,462	0,453	0,448	0,443	0,438
0,60	—	—	—	0,477	0,467	0,457	0,451	0,446	0,441
0,65	—	—	—	0,482	0,471	0,462	0,455	0,450	0,444
0,70	—	—	—	—	0,475	0,466	0,458	0,453	0,447
0,75	—	—	—	—	0,479	0,469	0,462	0,456	0,450
0,80	—	—	—	—	—	0,473	0,465	0,459	0,453
0,85	—	—	—	—	—	0,477	0,468	0,462	0,456
0,90	—	—	—	—	—	0,480	0,461	0,464	0,459
0,95	—	—	—	—	—	—	0,474	0,467	0,462
0,00	—	—	—	—	—	—	0,477	0,470	0,464

ОТКЛОНЕНИЯ ОРДИНАТ КРИВОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ОТ СЕРЕДИНЫ ПРИ $Cv = 1{,}0$ ДЛЯ C_s ОТ 0 до 1,8

Коэффициент асимметрии C_s	Обеспеченность p %																	Коэффициент асимметрии C_s
	0,01	0,1	1	3	5	10	20	30	50	70	80	90	95	97	99	99,5	99,9	
0,0	3,72	3,09	2,33	1,88	1,64	1,28	0,84	0,52	—0,00	—0,52	—0,84	—1,28	—1,64	—1,88	—2,33	—2,58	—3,09	0,0
0,1	3,94	3,23	2,40	1,92	1,67	1,29	0,84	0,51	—0,02	—0,53	—0,85	—1,27	—1,61	—1,84	—2,25	—2,48	—2,95	0,1
0,3	4,38	3,52	2,54	2,00	1,72	1,31	0,82	0,48	—0,05	—0,56	—0,85	—1,24	—1,55	—1,75	—2,10	—2,29	—2,67	0,3
0,5	4,83	3,81	2,68	2,08	1,77	1,32	0,81	0,46	—0,08	—0,58	—0,85	—1,22	—1,49	—1,66	—1,96	—2,11	—2,40	0,5
0,7	5,28	4,10	2,82	2,15	1,82	1,33	0,79	0,43	—0,12	—0,60	—0,85	—1,18	—1,42	—1,57	—1,81	—1,93	—2,14	0,7
0,9	5,73	4,38	2,96	2,22	1,86	1,34	0,77	0,40	—0,15	—0,61	—0,85	—1,15	—1,35	—1,47	—1,66	—1,75	—1,90	0,9
1,0	5,96	4,53	3,02	2,25	1,88	1,34	0,76	0,38	—0,16	—0,62	—0,85	—1,13	—1,32	—1,42	—1,59	—1,66	—1,79	1,0
1,2	6,41	4,81	3,15	2,31	1,91	1,34	0,73	0,35	—0,19	—0,63	—0,84	—1,08	—1,24	—1,33	—1,45	—1,50	—1,58	1,2
1,4	6,87	5,09	3,27	2,37	1,94	1,34	0,71	0,31	—0,22	—0,64	—0,83	—1,04	—1,17	—1,23	—1,32	—1,35	—1,39	1,4
1,6	7,31	5,37	3,39	2,42	1,96	1,33	0,68	0,28	—0,25	—0,64	—0,81	—0,99	—1,10	—1,14	—1,20	—1,22	—1,24	1,6
1,8	7,76	5,64	3,50	2,46	1,98	1,32	0,64	0,24	—0,28	—0,64	—0,80	—0,94	—1,02	—1,06	—1,09	—1,10	—1,11	1,8

ОРДИНАТЫ БИНОМИАЛЬНОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ КРИВОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПРИ $C_s = 2Cv$

C_v	Обеспеченность p %															C_v
	0,1	1	3	5	10	20	40	50	70	80	90	95	97	99	99,9	
0,05	1,16	1,12	1,10	1,08	1,06	1,04	1,01	1,00	0,97	0,96	0,94	0,92	0,91	0,89	0,85	0,05
0,10	1,34	1,25	1,20	1,17	1,13	1,08	1,02	1,00	0,94	0,92	0,87	0,84	0,82	0,78	0,72	0,10
0,15	1,53	1,38	1,30	1,26	1,20	1,12	1,03	0,99	0,92	0,87	0,81	0,77	0,74	0,64	0,61	0,15
0,20	1,73	1,52	1,41	1,35	1,25	1,16	1,04	0,99	0,89	0,83	0,75	0,70	0,66	0,59	0,49	0,20
0,25	1,96	1,67	1,52	1,44	1,33	1,20	1,04	0,98	0,85	0,79	0,70	0,63	0,59	0,52	0,41	0,25
0,30	2,19	1,83	1,64	1,54	1,40	1,24	1,05	0,97	0,82	0,75	0,64	0,57	0,52	0,44	0,32	0,30
0,35	2,44	1,99	1,75	1,64	1,47	1,28	1,05	0,96	0,79	0,70	0,59	0,51	0,45	0,37	0,26	0,35
0,40	2,70	2,16	1,87	1,74	1,54	1,31	1,05	0,95	0,76	0,66	0,53	0,45	0,39	0,30	0,19	0,40
0,45	2,98	2,33	2,00	1,84	1,60	1,35	1,05	0,93	0,73	0,61	0,48	0,39	0,34	0,25	0,15	0,45
0,50	3,27	2,51	2,13	1,94	1,67	1,38	1,04	0,92	0,69	0,57	0,44	0,34	0,29	0,21	0,11	0,50
0,55	3,58	2,70	2,26	2,04	1,74	1,41	1,04	0,90	0,66	0,53	0,39	0,30	0,25	0,17	0,08	0,55
0,60	3,89	2,89	2,39	2,15	1,80	1,44	1,03	0,89	0,62	0,50	0,35	0,26	0,20	0,13	0,05	0,60
0,65	4,22	3,09	2,52	2,25	1,87	1,47	1,02	0,87	0,59	0,46	0,31	0,22	0,17	0,10	0,04	0,65
0,70	4,56	3,29	2,66	2,36	1,94	1,50	1,01	0,85	0,55	0,42	0,27	0,18	0,14	0,08	0,03	0,70
0,75	4,93	3,50	2,80	2,46	2,00	1,52	1,00	0,82	0,52	0,39	0,24	0,15	0,11	0,06	0,02	0,75
0,80	5,30	3,71	2,94	2,57	2,06	1,54	0,98	0,80	0,49	0,35	0,21	0,12	0,09	0,04	0,01	0,80
0,85	5,67	3,92	3,07	2,67	2,12	1,56	0,97	0,77	0,46	0,31	0,18	0,10	0,07	0,03	0,01	0,85
0,90	6,08	4,15	3,21	2,78	2,19	1,58	0,95	0,75	0,42	0,28	0,15	0,08	0,05	0,02	0,00	0,90
0,95	6,49	4,38	3,36	2,89	2,25	1,59	0,94	0,72	0,39	0,25	0,13	0,07	0,04	0,01	0,00	0,95
1,00	6,91	4,61	3,51	3,00	2,30	1,61	0,92	0,69	0,36	0,22	0,11	0,05	0,03	0,01	0,00	1,00
1,05	7,39	4,83	3,65	3,11	2,35	1,62	0,89	0,67	0,33	0,20	0,09	0,04	0,02	0,01	0,00	1,05
1,10	7,75	5,05	3,80	3,22	2,40	1,63	0,87	0,64	0,30	0,17	0,07	0,03	0,02	0,00	0,00	1,10
1,20	8,65	5,53	4,12	3,40	2,50	1,63	0,83	0,58	0,25	0,13	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	1,20
1,30	9,60	6,02	4,42	3,60	2,57	1,62	0,78	0,52	0,20	0,09	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	1,30
1,40	10,60	6,55	4,71	3,80	2,64	1,61	0,73	0,43	0,14	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40
1,50	11,65	7,08	4,98	3,96	2,70	1,59	0,67	0,40	0,12	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50

ПОПРАВКИ НА ДЛИНУ ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ ТРОСА

Измеренная глубина, м	Угол отклонения троса, град.				
	10	15	20	25	30
1	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09
5	0,04	0,08	0,14	0,22	0,31
10	0,05	0,15	0,25	0,40	0,60
15	0,10	0,20	0,40	0,55	0,80

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

Раздел I. Метеорология (7)

Тема 1. Атмосфера и ее строение (7). *Тема 2.* Метеорологические элементы, их характеристика и измерение (8). 1. Солнечная радиация (8). 2. Температура почвы (8). 3. Температура воздуха (11). 4. Влажность воздуха (13). 5. Испарение с поверхности воды и почвы (17). 6. Испарение с поверхности речных бассейнов (24). 7. Сгущение водяного пара (27). 8. Осадки (28). 9. Вода в почве (37). 10. Давление воздуха (39). 11. Ветер (41). *Тема 3.* Климат, погода и ее прогнозы (43). 12. Понятие о погоде и климате (43). 13. Типы воздушных масс (44). 14. Общие сведения о прогнозах погоды (45). Вопросы для самопроверки (46). Лабораторно-практические занятия (47). *Тема 4.* Круговорот воды в природе и водный баланс на земном шаре (55).

Раздел II. Речная гидрология 57

Тема 5. Реки, их питание и режим (57). 15. Образование рек (57). 16. Движение воды в реках (60). 17. Бассейн реки (62). 18. Классификация и виды питания рек (65). 19. Уровенный режим рек (65). 20. Режим расходов воды в реке (68). 21. Фазы режима рек (69). Вопросы для самопроверки (72). Лабораторно-практические занятия (73). *Тема 6.* Речной сток (79). 22. Единицы измерения стока (79). 23. Водный баланс речных бассейнов (81). 24. Факторы, влияющие на речной сток (82). 25. Карты изолиний норм стока (88). 26. Изменчивость величин стока (89). 27. Кривые распределения (93). 28. Обеспеченность стока и построение кривой обеспеченности (95). 29. Расчеты годового стока (99). *Тема 7.* Внутригодовое распределение стока (102). 30. Расчет внутригодового распределения стока при наличии данных гидрометрических наблюдений (102). 31. Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии и недостатке данных наблюдений (105). 32. Кривые обеспеченности суточных расходов (105). Вопросы для самопроверки (107). Лабораторно-практические занятия (108). *Тема 8.* Характерные расходы воды (121). 33. Максимальные расходы талых и дождевых вод (121). 34. Обеспеченность максимальных расходов (121). 35. Расчет максимальных расходов воды при наличии данных наблюдений (124). 36. Расчет максимального расхода талых вод при недостаточности или отсутствии гидротермических наблюдений (125). 37. Определение максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии наблюдений (131). 38. Трансформация максимального расхода водохранилищем (138). 39. Минимальный сток (140). Вопросы для самопроверки (141). Лабораторно-практические занятия (141). *Тема 9.* Работа рек и наносы (146). 40. Формирование речного русла (146). 41. Речные наносы (150). 42. Энергия рек (156). Вопросы для самопроверки (157). Лабораторно-практические занятия (157). *Тема 10.* Гидрологические информации и прогнозы (160). 43. Служба информации и прогноза (160). *Тема 11.* Озера, водохранилища (пруды) и болота (161). 44. Классификация озер и их морфометрические элементы (161). 45. Режим озер и водохранилищ (162). 46. Болота и их гидрологические особенности (165). Вопросы для самопроверки (167).

Раздел III. Водохозяйственные расчеты 168

Тема 12. Понятие о водохозяйственных расчетах (168). 47. Некоторые сведения о регулировании стока (168). 48. Водохозяйственные расчеты при проектировании водохранилищ (прудов) сезонно-годичного регулирования (170). Вопросы для самопроверки (174). Лабораторно-практические занятия (174).

Раздел IV. Гидрометрия 181

Тема 13. Водомерные посты и гидрометрические створы (181). 49. Основные виды гидрологических наблюдательных пунктов (181). 50. Водомерные посты (150). 51. Устройство водомерных постов и гидрометрических створов (186). *Тема 14.* Наблюдения на водомерном посту. Первичная обработка водомерных наблюдений (192). 52. Водомерные наблюдения (192). 53. Обработка водомерных наблюдений (195). Вопросы для самопроверки (196). Лабораторно-практические занятия (197). *Тема 15.* Промерные работы при съемке рек и водохранилищ (200). 54. Производство промерных работ (200). 55. Обработка материалов промеров (206). Вопросы для самопроверки (209). Лабораторно-практические занятия (209). *Тема 16.* Измерение и вычисление скоростей течения и расходов воды в реках и каналах (212). 56. Распределение скоростей в потоке и вычисление средних скоростей течения воды (212). 57. Измерение скоростей поплавками и вычисление расхода воды (215). 58. Гидрометрические вертушки (218). 59. Измерение скоростей вертушкой (222). 60. Вычисление расхода воды, измеренного вертушкой (225). Вопросы для самопроверки (227). Лабораторно-практические занятия (227). *Тема 17.* Определение расходов воды без измерения скоростей (233). 61. Гидравлический метод определения расходов воды в свободном русле (233). 62. Гидравлический метод расчета расходов воды в зарегулированных руслах (234). 63. Измерение расхода воды методом смешения (235). 64. Объемный метод измерения расхода воды (237). Вопросы для самопроверки (237). Лабораторно-практические занятия (237). *Тема 18.* Связь между расходами и уровнями воды (239). 65. Кривые зависимости между расходами и уровнями воды (239). 66 Экстраполяция кривых (241). 67. Подсчет стока (245). Вопросы для самопроверки (245). Лабораторно-практические занятия (245). *Тема 19.* Твердый сток (249). 68. Приборы для отбора пробы воды (249). 69. Измерение и вычисление расходов взвешенных наносов (252). 70. Вычисление стока взвешенных наносов (254). 71. Измерение и вычисление расходов и стока донных наносов (255). 72. Механический состав наносов (257). Вопросы для самопроверки (257). Лабораторно-практические занятия (257). *Тема 20.* Эксплуатационная гидрометрия на оросительных и осушительных системах (251). 73. Задачи эксплуатационной гидрометрии (261). 74. Русловой метод учета стока воды (262). 75. Учет воды гидротехническими сооружениями с предварительной их тарировкой (263). 76. Учет воды специальными водомерными устройствами. Их классификация (264). 77. Наблюдения за дренажным стоком (273). 78. Организация работ (274). Вопросы для самопроверки (275). Лабораторно-практические занятия (275). *Приложения:* 1. Отклонения кривой обеспеченности от середины при $C_v = 1{,}0$ для C_s от 0 до 1,8. (277). 2. Ординаты биномиальной асимметричной кривой обеспеченности при C_s 2 C_v (278). 3. Значение коэффициента расхода m для прямоугольного водослива (276). 4. Поправки на длину подводной части троса (279).

Илья Абрамович Кузник
Евстафий Иванович Луконин
Василий Яковлевич Пилипенко

ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОМЕТРИЯ

Редактор Л. А. Чепелкина
Техн. редактор Л. М. Шишкова
Художник Б. А. Осенчаков
Корректор Т. В. Алексеева, Н. А. Балкина

Сдано в набор 16/V 1974 г. Подписано к печати 2/XII 1974 г. М-06605. Формат 60×90¹/₁₆. бум. тип. № 1. Печ. л. 18,25 с 2 вкл. Уч. изд. л. 19,46. Тираж 14 000 экз. Индекс ГЛ-41. Заказ № 586. Цена 88 коп. Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы» Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191023, Ленинград, Д-23, Садовая, 21.