



П.И. Назмиев
А.В. Григорьева

ГИДРОМЕТРИЯ

Екатеринбург
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»**

Кафедра лесных культур и биофизики

П.И. Назмиев
А.В. Григорьева

ГИДРОМЕТРИЯ

Методические указания
к практическим занятиям обучающихся
по направлению подготовки 20.03.02
«Природообустройство и водопользование»,
дисциплина «Гидрометрия»
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург
2019

Печатается по рекомендации методической комиссии ИЛП.
Протокол № 2 от 05.10.2018 г.

Рецензент – И.Е. Онучин, канд. с.-х. наук

Редактор Ленская А.Л.

Оператор компьютерной верстки Дунаева Е.Н.

Подписано в печать 31.10.2019		Поз. № 27
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 3,02	Цена

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Сектор оперативной полиграфии РИО

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Общие положения	5
Предмет и задачи гидрометрии	5
Термины и определения.....	5
Общие сведения о реке	7
Измерение уровней воды	10
Наблюдения за уровнями воды, водомерные посты	11
Определение продольного уклона водной поверхности.....	13
Измерение глубин в реках	15
Общие сведения о глубинах	15
Приборы, методика и обработка результатов при измерении глубин	15
Измерение скоростей течения	19
Распределение скоростей в речном потоке.....	19
Приборы для измерения скоростей.....	20
Измерение расходов воды	24
Методы определения расходов.....	24
Метод «скорость-площадь»	25
Метод «уклон-площадь».....	26
Метод смещения.....	28
Объемный метод	28
Гидравлические методы.....	28
Изучение твердого стока и донных отложений. Методы наблюдений за наносами, приборы и оборудование	32
Общие сведения о твердом стоке	32
Изучение стока взвешенных наносов, приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами	34
Фотометрический метод определения мутности.....	36
Измерение расхода взвешенных наносов	36
Изучение стока донных наносов, приборы для взятия проб донных наносов	38
Изучение донных отложений	40
Общие сведения	40
Приборы для взятия проб донных отложений.....	40
Общие сведения о озерах и водохранилищах, регулирование стока ...	42
Характеристики озер.....	42
Характеристики водохранилищ.....	45
Список использованной литературы	50

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время среди проблем, стоящих перед человечеством, все чаще на первое место выдвигается проблема состояния водных ресурсов, поскольку в тесной зависимости от него находятся состояние и развитие как биосферы, так и человеческого общества.

Рациональное использование и защита от загрязнения поверхностных и подземных вод являются одной из основных задач не только государственных, но и общественных организаций. Необходимость количественного и качественного учета состояния водных ресурсов, постоянное совершенствование методов и средств гидрологических наблюдений, составляющих предмет гидрометрии как научной дисциплины, находятся в центре внимания специалистов, работающих в области водного хозяйства [1].

Дисциплина «Гидрометрия» имеет большое значение в подготовке обучающихся по направлению подготовки 20.03.02 «Природообустройство и водопользование». Гидрометрия является частью более обширной науки – гидрологии. Гидрология – наука, изучающая гидросферу, её свойства, протекающие в ней процессы и явления во взаимосвязи с атмосферой, литосферой и биосферой. Гидрология изучает природные воды, их распространение по земной поверхности и в толще почвогрунтов и выявляет закономерности, по которым эти процессы и явления развиваются.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Предмет и задачи гидрометрии

Гидрометрия – раздел гидрологии, рассматривающий методы наблюдения за режимом водных объектов, применяемые при этом устройства и приборы, а также способы обработки результатов наблюдений. Гидрометрия – это наука о методах и средствах измерения параметров водотоков и водоёмов. В задачи гидрометрии входят измерения:

- геометрических параметров потока (уровней, глубин и направлений течения);
- кинематических параметров (скоростей течения);
- расходов воды и наносов;
- параметров ледового и термического режимов потоков.

Эти данные необходимы для рационального проектирования, строительства и эксплуатации мелиоративных систем, гидротехнических сооружений и ГЭС, мостов, автомобильных и железных дорог. Систематические наблюдения за водными объектами (реками, ручьями, озёрами, болотами, ледниками, водохранилищами) проводятся опорной сетью постоянно действующих метеорологических станций и гидрологических (водомерных) постов, находящихся в ведении Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), которая является подведомственной структурой Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Кроме того, имеются станции и посты, организуемые разными ведомственными учреждениями (научными, проектными и др.), например, у мостов, на шлюзах и перекатах [2].

Предварительные характеристики водотоков для проектирования могут быть взяты в гидрометеостанциях, расположенных вблизи проектируемого сооружения. Расширенный объём данных получают только путём непосредственных натуральных измерений в ходе проведения гидрометрических работ на месте проектируемого сооружения. Наиболее полно эта работа ведётся для строительства мостовых переходов.

Термины и определения

Все термины, понятия, определения, графическое отображение основных морфометрических показателей реки приведены здесь в соответствии с учебным пособием [3].

Батиграфические кривые – график, отражающий взаимосвязи уровня, объема и площади водохранилища.

Водораздел – орографическая граница бассейна реки.

Водосбор реки – площадь поверхности земли и толщи почвы, где формируются источники питания реки водой.

Гидрологические расчеты – раздел инженерной гидрологии, в задачи которого входит разработка методов, позволяющих рассчитать значения различных характеристик гидрологического режима.

Гидрологические характеристики – количественные оценки элементов гидрологического режима.

Глубина (h , см) – расстояние по вертикали от поверхности воды до дна.

Изобаты – линии на географической карте или плане, соединяющие точки одинаковых глубин водоёма (озера, моря).

Межень – период года, в течение которого наблюдается низкая водность.

Методы гидрологических расчетов – технические приемы, позволяющие рассчитать, обычно с оценкой вероятности их появления, значения характеристик гидрологического режима.

Объем стока (W , м³) – количество воды, стекающей с данного участка суши (водосбора) за продолжительное время (сутки, месяц, год). Речной сток имеет четыре источника питания: дождевое, снеговое, ледниковое и подземное.

Паводок – сравнительно кратковременный подъем уровня воды, возникающий нерегулярно при ливневых дождях.

Площадь водного сечения – плоскость, перпендикулярная движению воды в реке.

Пойма – площадь, заливаемая водой во время половодья.

Половодье – фаза водного режима реки, которая характеризуется высоким и длительным подъемом уровня с выходом воды из русла на пойму. Ежегодно повторяется в одно и то же время при снеготаянии.

Расход (Q , м³/с) – объем воды, протекающей через живое сечение потока в единицу времени (обычно в секунду).

Регулирование речного стока – перераспределение количества воды во времени объема речного стока в замыкающем створе, выражающееся в его увеличении или уменьшении в отдельные периоды по сравнению с ходом поступления воды на поверхность водосбора.

Смоченный периметр – длина подводного контура.

Твердый сток – масса взвешенных частиц различной фракции, влекомых (перекатываемых) по дну, и растворенных химических и биогенных веществ, которые сносятся течением реки.

Урез воды – граница воды у берега водоема.

Уровень воды (H , см) – высота поверхности воды, отсчитываемая от некоторой плоскости сравнения.

Фарватер – линия наибольшей глубины водного объекта для безопасного прохода судов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕКЕ

Река – это водный поток (водоток) в разработанном им русле в углублениях земной поверхности. Она имеет исток – начало и устье – место впадения реки в море, озеро, водохранилище, другую реку. Река, которая впадает в море, называется главной. Реки, непосредственно впадающие в главную реку, являются притоками *I* порядка. В них впадают притоки *II*, *III* и др. порядков (рис. 1).

Главная река и все её притоки образуют речную систему, а территория, с которой поверхностные и подземные воды стекают в речную систему, именуется водосбором, или бассейном реки. Граница между бассейнами проходит по наиболее возвышенным участкам местности и называется водоразделом.

Река протекает по пониженной части бассейна – долине, выработанной в ходе многовековой деятельности самой рекой. Долина имеет склоны и дно (рис. 2) и обычно заполнена слоем продуктов разрушения земной коры (ил, песок, гравий, валуны). Они перемещаются потоком и называются аллювием, или наносами. Слой наносов прорезан руслом, в котором сосредоточен речной поток в маловодные периоды (в межень). Поймой называется часть долины, затапливаемая только в многоводные периоды (во время паводков и половодий). Поймы обычно имеют плоскую поверхность и покрыты травяной и кустарниковой растительностью. В плане речное русло имеет прямолинейные участки и изгибы, называемые излучинами (меандрами). На крутых излучинах поверхностные струи воды ударяются в вогнутый берег, отражаются от него и направляются вниз, а затем около дна – к противоположному выпуклому берегу, вызывая поперечную циркуляцию в водотоке (рис. 3). Винтовой характер течения вызывает следующие процессы: размыв вогнутого берега и дна русла и, как следствие, формирование крутых берегов и глубоких участков около них, называемых плесами; перенос продуктов размыва (наносов) и скопление их перпендикулярно течению реки (это перекааты) и к противоположному берегу в виде гряд, называемых побочнями. При спаде уровня скопление донных наносов на выпуклом берегу речной излучины обнажается и в этом случае называется пляжем, или косой.

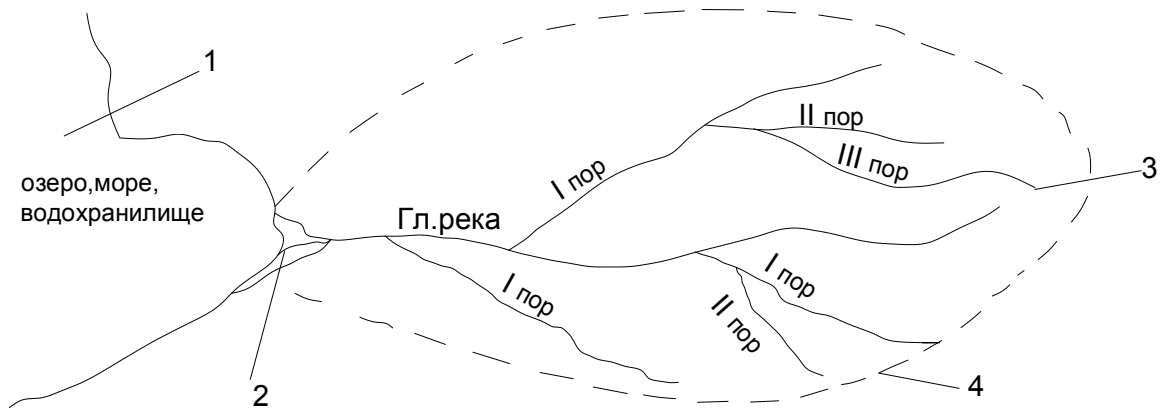


Рис. 1. Речная система:
1 - море, озеро, океан; 2 - устье; 3 - главная река; 4 – водораздел; I, II, III - притоки главной реки соответственно первого, второго, третьего порядков

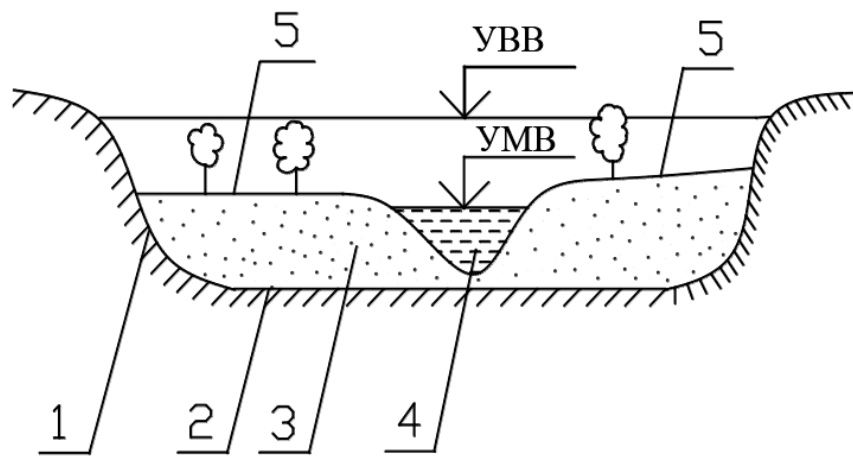


Рис. 2. Долина реки:
1, 2 - склон и дно долины; 3 - наносы; 4 - русло; 5 – пойма;
УВВ – уровень высоких вод, УМВ – уровень малых (низких) вод

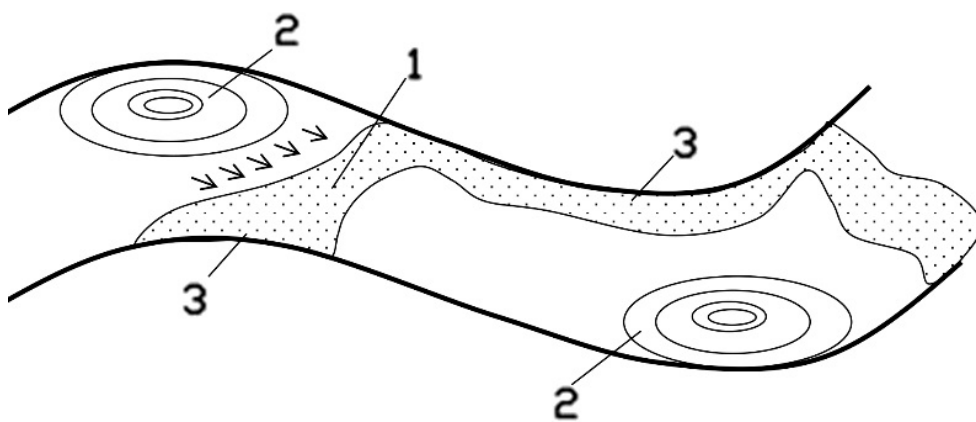


Рис. 3. Русло реки в плане:
1 - перекат; 2 - плес; 3 - побочень

На участках перехода реки из излучины одного в излучину другого направления образуется перекат – форма донного рельефа в виде гряды наносов, пересекающей русло. Линия наибольших глубин вдоль реки называется фарватером. Продольный профиль (разрез) по фарватеру (рис. 4) характеризует изменение отметок дна и свободной поверхности по длине реки. Разность высотных отметок ΔH воды в двух точках, расположенных на некотором расстоянии L вдоль реки, называется падением реки. Продольный уклон свободной поверхности представляет собой падение, приходящееся на единицу длины потока: $i = \Delta H/L$.

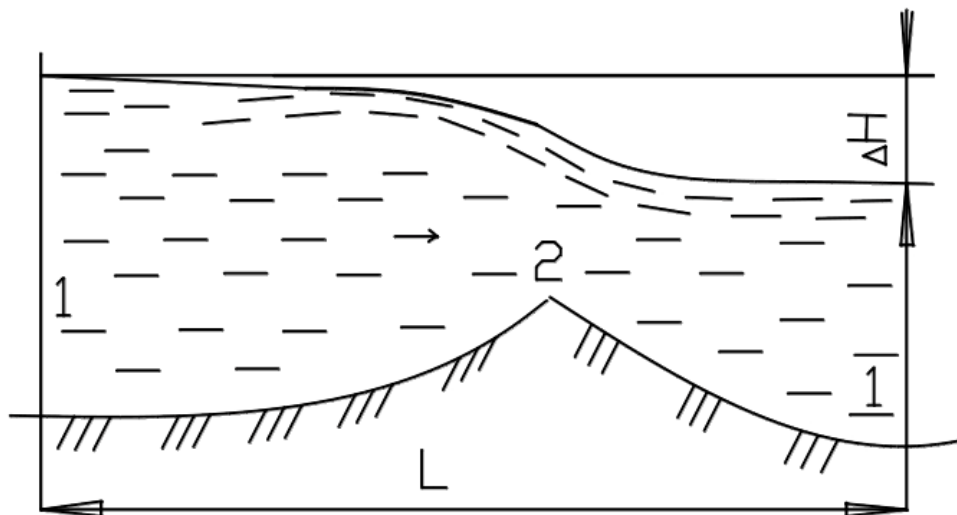


Рис.4. Продольный профиль по фарватеру:
1 – плес; 2 - гребень переката

Наблюдение и измерение характеристик речного потока проводят в специально выбранных вертикальных плоскостях, называемых створами. След такой плоскости на плане называют линией створа. Створ чаще располагают перпендикулярно основному течению (нормальный створ, или поперечник), а иногда под углом к нему (косой створ) или вдоль реки (продольник).

Гидрологический режим рек включает водный, термический, ледовый и русловой режимы. Водный режим характеризуется изменением во времени уровней, расходов и объемов воды в реках и почвогрунтах. Основными фазами (периодами) водного режима равнинных рек России являются весеннее половодье, дождевые паводки, летняя и зимняя межени.

В зимнем периоде рек наблюдаются три фазы: замерзание, ледостав и ледоход. Замерзание заканчивается образованием ледяного покрова, а ледостав завершается вскрытием реки.

Замерзание реки начинается с образования неподвижных полосок льда (заберегов) у берегов. Затем вода в реке охлаждается по всей глубине потока до 0°C , и вокруг взвешенных наносов и в придонном слое потока

образуются кристаллы льда. Они всплывают на поверхность, образуя шугу. При дальнейшем понижении температуры всплывшие массы льда смерзаются и образуют осенний ледоход. Затем количество и размеры льдин увеличиваются. В условиях низких температур льдины смерзаются и образуют сплошной ледяной покров, т.е. наступает период ледостава.

Весной при таянии снега и поступлении воды в реку поверх льда возникают вспучивания, подвижки, разрушение и движение льда, т.е. начинается весенний ледоход.

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ

Количество (объем) воды, протекающей в реках и находящейся в озерах, болотах, в почвах и грунтах земной поверхности, непрерывно изменяется. В соответствии с изменением количества воды уровни поверхностей водных объектов также непрерывно меняются. Характер этих колебаний определяется влиянием ряда факторов, обуславливающих многолетние, годовые, сезонные и суточные колебания [2].

Многолетние колебания уровней связаны с периодическими изменениями климата. Длительные (например, вековые) похолодания или потепления вызывают уменьшение или увеличение таяния снегов и ледников на повышенных участках земной поверхности и соответствующие изменения количества воды и её уровня в реках, озёрах, морях. Другой причиной многолетних колебаний являются геологические процессы (поднятие или опускание дна водоёма) или размыв русла рек, снижающий уровень воды в реке. Годовые колебания уровня вызываются метеорологическими условиями данного года (количеством выпавших осадков, температурой, влажностью воздуха, ветром). Так, в годы с обильными осадками уровни стоят выше, чем в засушливые годы. Сезонные колебания уровня воды зависят от географического положения района и распределения осадков внутри года. Это обстоятельство вызывает подъём уровня на одних реках весной, на других – осенью. На сезонные колебания уровней оказывают влияние гидротехнические сооружения. Суточные колебания наиболее выражены на небольших реках в периоды дождей или на реках, питающихся водой при таянии ледников в горах, вследствие суточного изменения солнечной радиации и температуры воздуха. Значительные суточные колебания наблюдаются в нижних бьефах гидроэлектростанций, работающих по суточному графику нагрузки.

Наблюдения за уровнями воды в реках имеют большое практическое значение. Их результаты используются для рационального и надёжного проектирования и строительства мостов, плотин, гидроэлектростанций, пристаней, водозаборов, ирригационных (оросительных) каналов, дорог и населённых пунктов. Так, построенный без достаточно полного учёта

гидрологических условий мост может оказаться препятствием для судоходства на реке в период высоких уровней вод или будет затопляться. Самотечные водозаборы без достаточной изученности режима колебаний уровня реки могут в маловодные меженные периоды оказаться без воды. Населённые пункты и береговые сооружения, находящиеся вблизи реки, в многоводные периоды или в периоды ледохода могут подвергаться разрушительному действию наводнений и льда.

Наблюдения за уровнями воды имеют важное значение и для самой гидрометрии: они позволяют по связи расходов с уровнями воды получить представление о значениях расходов воды за прошлые периоды времени, а также вычислить сток.

Наблюдения за уровнями воды, водомерные посты

Уровнем называется высота поверхности воды, отсчитываемая относительно некоторой постоянной плоскости сравнения, которая называется нулем графика поста. Сведения об уровнях необходимо иметь для возможности проектирования, строительства и эксплуатации различных гидротехнических сооружений, в том числе и мостовых переходов.

Для измерения уровней воды в реках служат водомерные посты. Каждый водомерный пост имеет специальные устройства для непосредственных измерений уровней воды (свай, рейки, самопишущие приборы и т.д.) и постоянные знаки – реперы, которые используются для определения высотного положения всех водомерных устройств (головок свай, нуля рек). Нуль графика поста принимают ниже самого низкого уровня, для того чтобы отсчеты по водомерной рейке были положительными.

По своему устройству водомерные посты делятся на две группы: простые, на которых измерение уровней воды проводится непосредственно водомерными рейками, и автоматические, на которых колебания уровня воды непрерывно и автоматически воспринимаются датчиком (в качестве датчика обычно используют поплавковое или манометрическое устройство). Автоматические посты оборудованы устройствами фиксации, хранения и передачи данных.

К простым водомерным постам относятся свайные, речные, смешанные (свайно-речные) и передаточные. Свайные посты сооружаются на беспойменных нескальных берегах, речные – на пойменных террасах или скальных берегах, смешанные – на высоких пойменных берегах, передаточные – на обрывистых берегах, затрудняющих доступ к воде. Особенность передаточных водомерных

постов состоит в том, что место отсчета переносится с поверхности воды в другой, более удобный для непосредственного наблюдения пункт.

Свайный водомерный пост (рис. 5) состоит из ряда свай, установленных в створе, перпендикулярном течению реки. Сваи применяют деревянные, железобетонные и металлические. Их забивают на глубину ниже линии промерзания, не менее чем на 0,5 м. Торец верхней сваи должен быть на 0,25 – 0,50 м выше наблюдаемого уровня высоких вод (УВВ), а торец нижней сваи – на 0,25 – 0,50 м ниже уровня низких вод (УНВ). Сваи устанавливаются так, чтобы разность отметок торцов соседних свай составляла 0,7 – 0,8 м, а при пологом берегу 0,2 – 0,4 м.

Возвышение торцов свай над поверхностью земли должно быть не более 0,25 м. Расстояние между сваями принимается не более 2,0 м (для удобства наблюдений). На незатопляемом берегу устанавливается репер. Уровни воды измеряются переносной водомерной рейкой (деревянной или металлической), которая ставится на шляпку гвоздя ближайшей к берегу затопленной сваи.

Речной водомерный пост является наиболее простым по устройству и удобным для производства наблюдений. Для устройства речного поста рекомендуется использовать существующие гидротехнические сооружения (мосты, плотины, набережные).

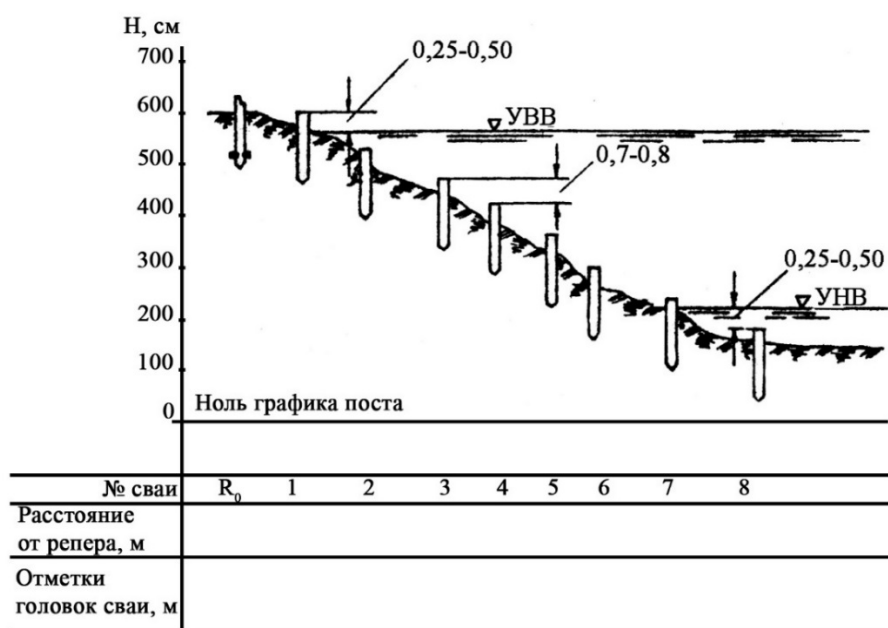


Рис. 5. Свайный водомерный пост

Водомерные рейки укрепляют на устое моста, на стенке плотины или набережной. Устанавливать их следует в местах, наиболее защищенных ото льда и плывущих предметов (например, с низовой стороны устоев, на боковых стенках сооружений и др.). При отсутствии гидротехнических

сооружений водомерные рейки укрепляют на одиночной, специально забитой свае или на кусте свай. Рейки применяют деревянные или металлические.

Смешанные водомерные посты устраивают так, чтобы низкие уровни можно было наблюдать по сваям, а высокие – по рейкам.

Автоматические посты непрерывно фиксируют и записывают значение уровня без участия наблюдателя. Они состоят из датчика поплавкового или манометрического типа и регистрирующего прибора.

Дистанционные посты автоматически регистрируют и передают показания измерений высоты уровня. Они содержат датчик уровня (поплавковый, манометрический, радиоактивный), передающее устройство (радио- или электропроводную связь с источником питания) и регистрирующий прибор (самописец или шкальный указатель).

На каждом водомерном посту ведется журнал, в котором, кроме отсчетов уровней, проводятся записи о различных гидрологических явлениях, наблюдаемых на реке (ледоход, заторы льда, зажоры и т.д.).

Наблюдения на водпостах проводятся ежедневно в 8 и 20 ч по местному времени, а в период половодий чаще, иногда при большой скорости подъема и спада – ежечасно. Если на реке волнение, то отсчеты по рейке берутся дважды – при набеге и отходе волны и определяется их среднее значение. Если уровень приходится на середину деления, то его значение округляют до четного числа. Точность отсчетов при измерении уровней составляет 1 см.

Кроме уровней на водпосту измеряют температуру воды и воздуха, отмечают направление ветра, волнение на реке, изменение русла, появление водной растительности, начало и конец навигации, наблюдают за ледовыми явлениями: осенью – за появлением сала (отдельные скопления смерзшихся ледяных игл в воде), шуги (рыхлые скопления льда и снега), зажоров (скопление шуги подо льдом) и весной – за появлением закраин (полосы открытой воды вдоль берегов), подвижки льда, ледохода, заторов (задержки льда при ледоходе). Измерение толщины льда, снега на льду и подледной шуги проводятся 10-го, 20-го числа и в последний день месяца.

По результатам обработки материалов водомерных наблюдений составляют график колебаний уровней (рис. 6).

Определение продольного уклона водной поверхности

Определение продольного уклона водной поверхности необходимо при определении скоростей течения и расходов воды гидравлично-гидрометрическим методом, а также при определении отметок во время построения плана участка реки (канала).

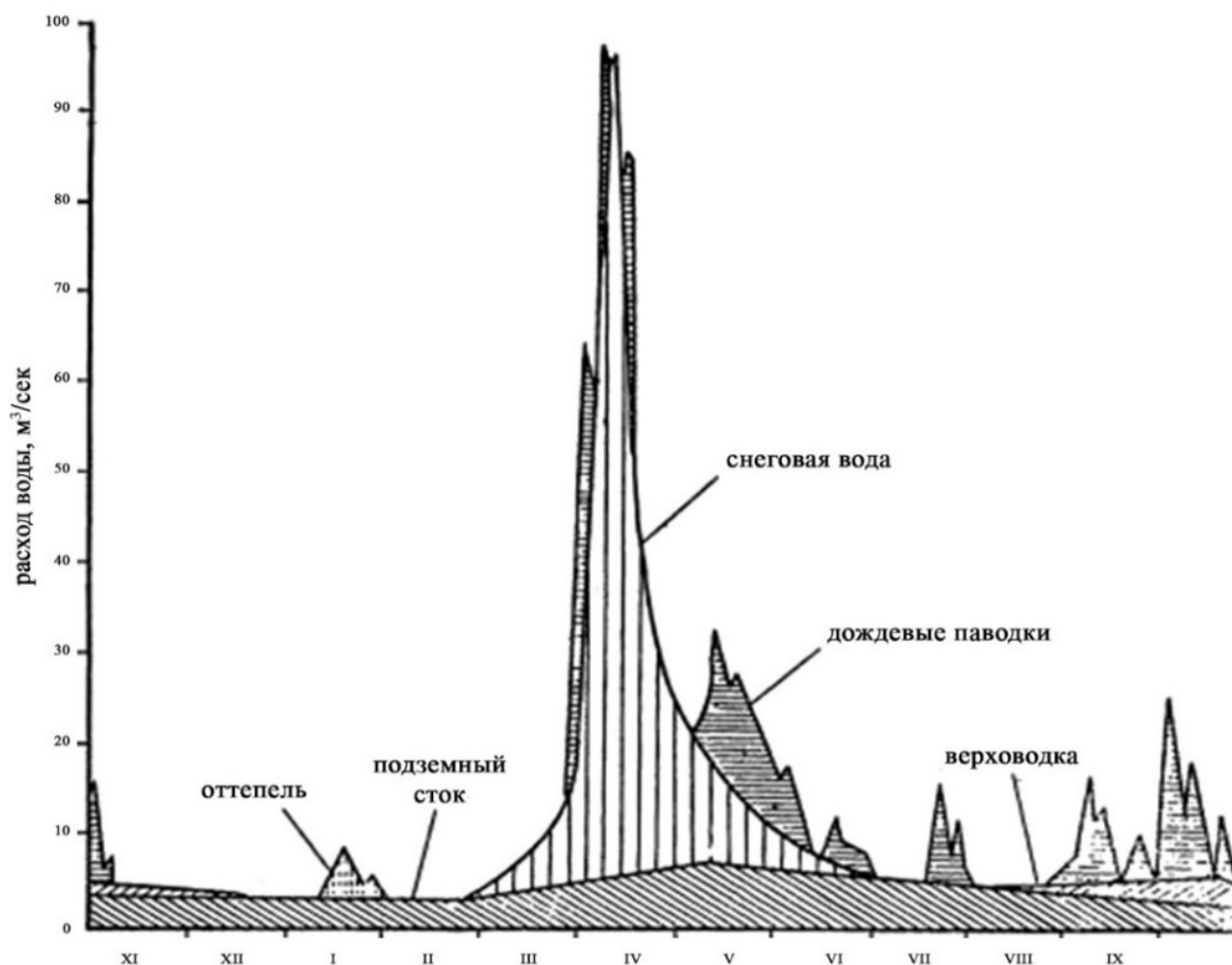


Рис. 6. График колебаний уровней вод в реках

При динамичном изменении уровня определение продольного уклона целесообразно проводить трижды. Для возможности сопоставления результатов продольный уклон определяют при срезочном уровне во время разбивки створов, а также во время измерения скоростей течения поплавками и гидрометрической вертушкой.

Для измерения уклона в двух точках, находящихся на участке около уреза, одновременно забивают колышки заподлицо с поверхностью воды. Данные точки с целью повышения точности результатов следует брать по возможности дальше друг от друга (с учетом оптических возможностей нивелира) и лучше в ранее разбитых створах для исключения дополнительных промеров расстояний. Верхние торцы колышков должны быть ровно отпилены. При наличии волнения целесообразно рядом с урезом воды выкопать небольшие приямки, сообщающиеся с потоком узкой горловиной. Упомянутые колышки в этом случае забивают в приямки.

Нивелир устанавливают на равном расстоянии от забитых кольшков. На кольшки ставят нивелирные рейки и определяют превышение между уровнями воды в рассматриваемых точках. При необходимости по дальномеру или с помощью ленты измеряют расстояние между кольшками. Результаты записывают в журнал нивелирования. Продольный уклон водной поверхности определяют по полученным данным при камеральной обработке [4].

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИН В РЕКАХ

Общие сведения о глубинах

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

Значения глубин используются для определения геометрических характеристик живых сечений, построения продольных и поперечных профилей, планов рек в изобатах (линиях равных глубин) и др. Значения необходимы не только для решений этих задач гидрометрического характера, но и для проектирования самих конструкций мостовых переходов и других гидротехнических сооружений [3].

Приборы, методика и обработка результатов при измерении глубин

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

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

Глубины более 6 м измеряют лотом. Он представляет собой чугунный груз массой 0,5 – 100 кг, который имеет цилиндрическую, конусообразную, пирамидальную или рыбовидную форму. Лот опускается в воду или вручную (ручной лот), или с помощью лебедки (механический

лот). Ручной лот имеет груз массой до 10 кг. Груз привязывается к пеньковой бечеве (лотлиню). Лотлинь размечается через 10 – 20 см цветными лоскутами или кожаными марками. В качестве лотлиня может использоваться мягкий стальной трос. Механический лот имеет груз массой до 100 кг. Масса груза и диаметр троса принимаются в зависимости от скорости течения.

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

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

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

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

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

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

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

На основании результатов измерения глубин строится план дна реки в горизонталях или изобатах (линиях равных глубин) и вычерчиваются профили живых сечений в различных гидростворах. На рис. 7 приведен образец профиля живого сечения реки. Для каждого профиля вычисляют следующие морфологические характеристики:

1) площадь водного сечения ω определяется с помощью планиметра или аналитически суммированием площадей прямоугольных треугольников и трапеций, на которые делится сечение промерными вертикалями:

$$\omega = \Sigma 0.5(h_i + h_{i+1})v_i, \quad (1)$$

где v_i – расстояние между соседними вертикалями, м;

h_i и h_{i+1} - глубины на соседних вертикалях, м (см. рис. 7);

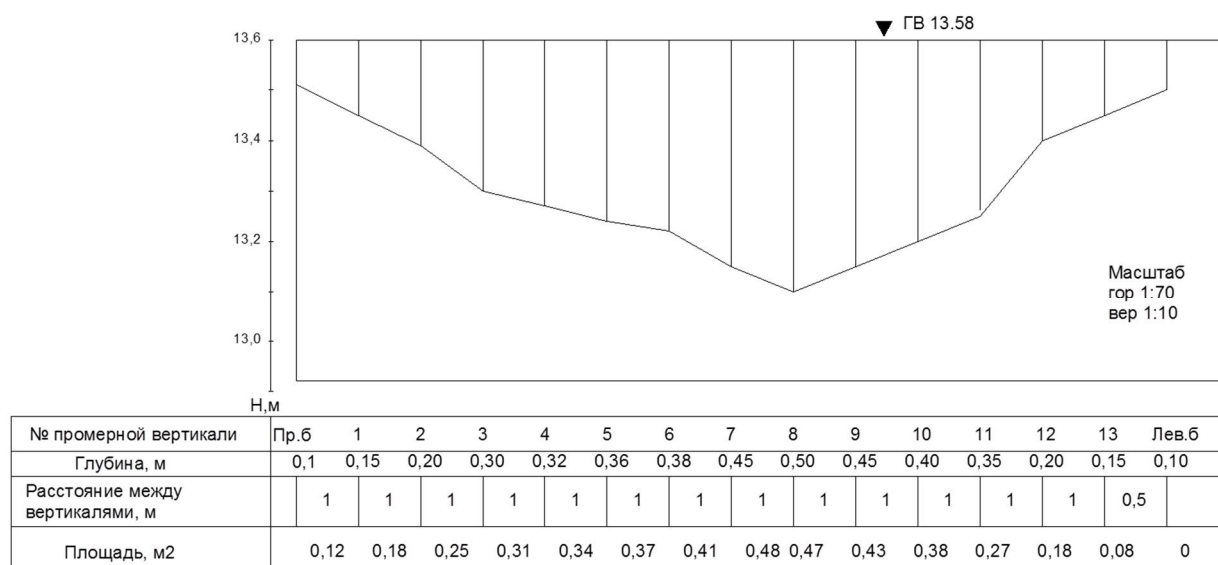


Рис. 7. Поперечный профиль реки

2) смоченный периметр χ – длина контура живого сечения по стенкам русла; измеряется на чертеже (курвиметром, линейкой) или подсчитывается по формуле

$$\chi = \Sigma (v_i^2 + (h_{i+1} - h_i)^2)^{0,5}; \quad (2)$$

3) ширина реки B определяется разностью расстояний урезом левого и правого берегов от постоянного начала;

4) гидравлический радиус $R = \omega / \chi$;

5) средняя глубина $h_{cp} = \omega / B$;

6) наибольшая глубина реки h_{max} устанавливается по промерной книжке.

Результаты промеров по поперечникам позволяют составить план реки в изобатах (линия равных глубин) аналогично построению плана местности в горизонталях. Отличие состоит в том, что отсчет делается не от горизонтальной плоскости вверх, а от свободной поверхности реки вниз (рис. 8). Предварительно наносят на план линии урезов воды, они

являются изобатами с нулевыми глубинами. Обозначают на плане точками промерные вертикали и записывают около них соответствующие глубины, ориентируясь на которые проводят изобаты. На плане намечают точки, соответствующие наибольшим глубинам на профилях и галсах, и проводят через них линию наибольших глубин – *фарватер*.

Для составления *продольного профиля реки* (рис. 9) наносят линии свободной поверхности и дна вдоль фарватера, а также уровень реки самого высоководного года, и делают отметки бровок берега, реперов, населенных пунктов.

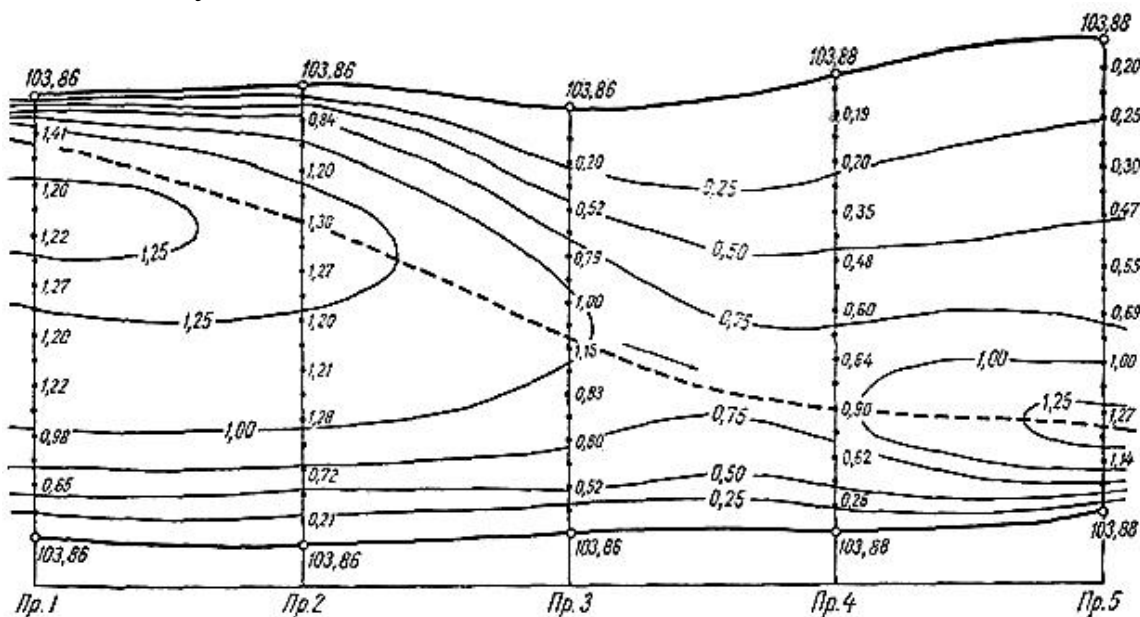


Рис. 8. План реки в изобатах

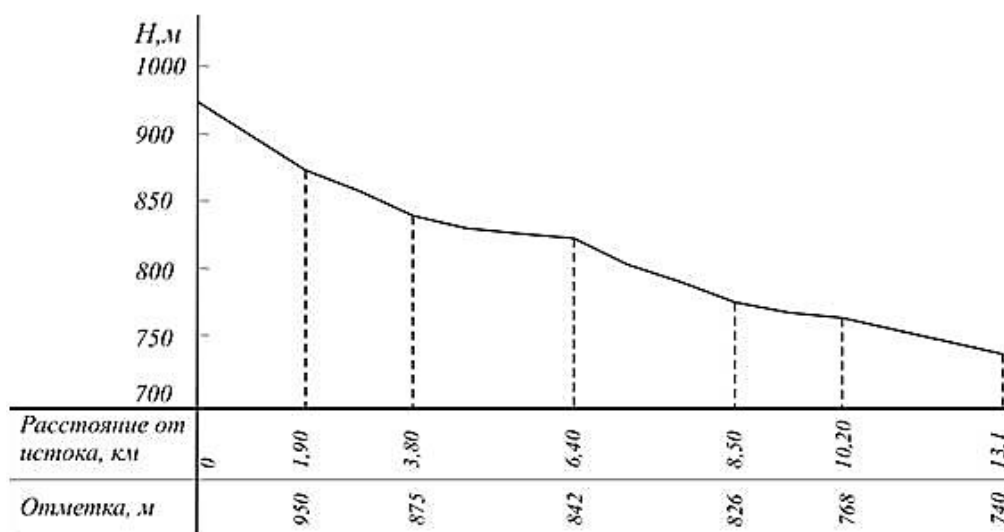


Рис. 9. Продольный профиль реки

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ

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

Существуют проверенные методики и специальные приборы для измерения скорости течения [3].

Распределение скоростей в речном потоке

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

Течение в реке вызывается силой тяжести воды, которая движется по руслу под уклон с высоких мест (от истока) на низкие (к устью реки). Ее скорость возрастает с увеличением продольного уклона реки и снижается на участках с более шероховатым руслом. Ввиду подтормаживающего действия поверхности русла скорость течения вблизи дна и берегов меньше, чем у поверхности или на середине реки.

Движение воды в реках почти всегда турбулентное. Неровности дна русла (выступы, камни, гряды) вызывают завихрения (вращение) масс жидкости, которые, отрываясь от дна, перемещаются во всей толще потока и создают пульсации скорости около некоторого осредненного значения с относительно большим периодом времени. Поэтому для более точного определения осредненной во времени скорости при гидрометрических работах ее фиксируют в каждой точке (не менее, чем 100 с).

Рассмотрим распределение осредненной продольной местной скорости V по глубине и ширине потока. Распределение скоростей по глубине потока (рис. 10, а) может быть описано формулой

$$V = V_{\Pi} (y/h)^{1/7}, \quad (3)$$

где V_{Π} - поверхностная скорость;

y - расстояние от дна;

h - глубина воды на вертикали.

Если измерить площадь эпюры скоростей и разделить ее на глубину вертикали, то получим *среднюю скорость на вертикали* V_B . Наблюдениями установлено, что средняя скорость на вертикали открытого потока обычно равна местной скорости на глубине $0,6h$ от поверхности, а ее отношение к поверхностной скорости лежит в

диапазоне $K_B=0,85 - 0,65$ и определяется по формуле

$$K_B = V_B/V_{II} = C/(C+8), \quad (4)$$

где C – коэффициент Шези (скоростной множитель).

Нормальный вид эпюры скоростей может искажаться под влиянием различных факторов, например, наличия неровности дна или водорослей, ледяного покрова (рис. 10).

Отношение средней по живому сечению скорости V к максимальной поверхностной скорости V_{max} может быть оценено по формуле

$$K = V/V_{max} = C/(C + 14). \quad (5)$$

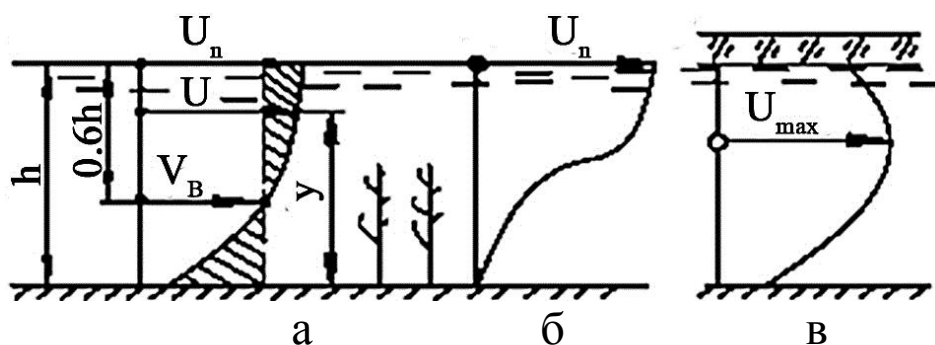


Рис. 10. Распределение скоростей по глубине:
 а – нормальное, б – при наличии водорослей, в – при ледяном покрове

Приборы для измерения скоростей

Основными приборами для измерения скоростей течения воды в реках и каналах являются гидрометрические поплавки и вертушки (рис. 11). *Поплавком* называют тело, свободно перемещаемое потоком. В речной гидрометрии чаще всего применяют поверхностные поплавки, реже глубинные и поплавки-интеграторы.

Поверхностные поплавки применяются для измерения скоростей и направлений течения на *свободной поверхности* водотока. Они чаще изготавливаются в виде деревянных кружков диаметром 10 – 30 см, толщиной 3 – 5 см и снабжаются флажком для улучшения их видимости (рис. 11, а). Более точно отражают движение поверхностного слоя воды поплавки в виде крестовин из поставленных на ребро досок. В качестве поверхностных поплавков могут использоваться частично наполненные водой бутылки, отдельные куски древесины, пятна масла на воде, льдины и другие предметы, плывущие по реке.

Принцип измерения скорости поплавками непосредственно вытекает из ее определения как пути, пройденного в единицу времени:

$$V_{\Pi} = L/t, \quad (6)$$

где L – длина траектории поплавок, пройденная им за время t .

Для работы с поплавками на малых реках в качестве дополнительного оборудования нужен секундомер, а на больших – еще лодка и угломерный инструмент для фиксирования положения поплавков в плане аналогично координированию промеров глубин. Точность определения поверхностной скорости зависит от погрешностей измерений пути и времени. К недостаткам поверхностных поплавков можно отнести невозможность измерения ими скоростей течения в отдельных точках и в ветреную погоду.

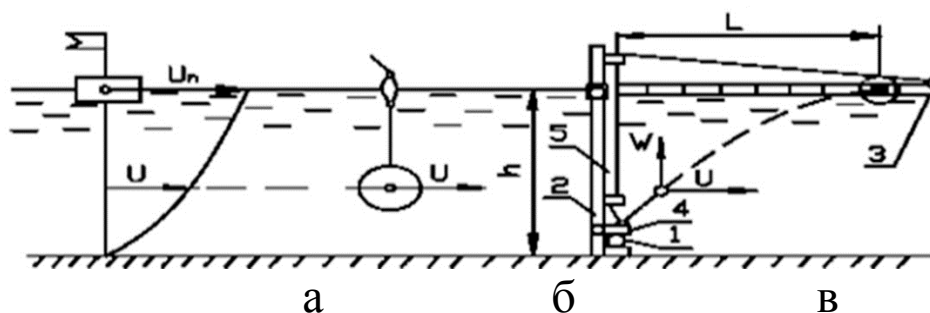


Рис. 11. Гидрометрические поплавки:
а – поверхностный, б – глубинный, в – интеграционный

Глубинные поплавки позволяют измерять скорость и направление течения на заданной глубине. Глубинный поплавок состоит из двух связанных нитью поплавков (рис. 11, б). Нижний поплавок значительно больше верхнего и представляет собой проваренный в олифе деревянный шар или сосуд (бутылка, пузырек), частично заполненный водой или песком с таким расчетом, чтобы его средняя плотность немного превышала плотность воды. Верхний поплавок – легкий, изготавливается из пробки или пенопласта. Он удерживает нижний поплавок на нужной для определения скорости глубине и указывает его положение в плане. Методика определения скоростей та же, что и для поверхностных поплавков.

Интеграционные поплавки позволяют сразу измерить среднюю по вертикали (глубине) скорость течения. В качестве поплавок-интеграторов применяют деревянные, пенопластовые или другие легкие шарики, а иногда масляные капли или пузырьки воздуха, закачиваемого

по шлангу на дно русла.

Для измерения скорости поплавков I с помощью устройства, состоящего из штанги 2 и плавающей рейки 3 , погружают на дно, затем выпускают его, поднимая накладку 4 шнуром 5 (рис. 11, в). Поплавок всплывает на поверхность с постоянной скоростью w и одновременно сносится течением на расстояние L с переменными по глубине скоростями V , интегрируя их. Измерив время всплытия t , можно определить среднюю скорость на вертикали, как $V_g=L/t$. Измерение времени всплытия можно исключить, так как его можно вычислить по формуле $t=h/w$ через глубину на вертикали h , если заранее определить опытным путем скорость всплытия w поплавка в стоячей воде. Поплавок-интегратор дает погрешность измерения более 10 %.

Гидрометрическая вертушка является наиболее распространенным и надежным прибором для измерения скорости течения воды в реках. Метод измерения вертушкой основан на зависимости частоты вращения лопастного винта от скорости набегающего на него потока.

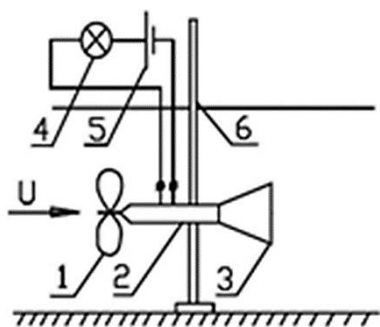


Рис. 12. Схема гидрометрической вертушки

Наиболее распространенные конструкции гидрометрических вертушек содержат лопастный винт 1 с контактным механизмом, корпус 2 с электрическими клеммами, стабилизатор (хвост) 3 , регистратор частоты вращения (лампочка 4 , электрический звонок или электромеханический счетчик) и источник питания 5 (рис. 12). Вертушка крепится к штанге 6 или тросу и опускается в заданную точку вертикали.

Благодаря стабилизатору вертушка устанавливается навстречу потоку, и винт начинает вращаться, вызывая через определенное количество оборотов (обычно через 1 или 20 оборотов) кратковременное замыкание контактов и срабатывание регистратора (мигание лампочки). Наблюдатель подсчитывает количество сигналов (миганий), а затем число оборотов винта N за заданный промежуток времени t (обычно 100 с), вычисляет частоту вращения винта $n=N/t$ и через нее по градуированному графику определяет скорость течения V_v в точке установки вертушки. На графике показана наименьшая скорость V_0 набегающего потока, при которой винт начинает вращаться.

Градуировка вертушки представляет собой процесс, обратный процессу измерения скоростей течения. При этом определяются частоты вращения винта при разных известных скоростях перемещения вертушки в стоячей воде и по ним строится градуировочная зависимость. В этом случае движение воды заменяется на движение самой вертушки.

Различают два способа измерения скоростей течения воды вертушками: точечный и интеграционный. *Точечный* способ заключается в измерении скоростей V_e в фиксированных точках. Эти точки и вертикали, на которых измеряют скорости, называют скоростными. При пятиточечном способе скорости измеряют на вертикали: у поверхности, на глубине $0,2h$; $0,6h$; $0,8h$ (считая от поверхности воды) и у дна. Скорости в этих точках – V_{II} , $V_{0,2}$, $V_{0,6}$, $V_{0,8}$, V_q , а средняя скорость на вертикали:

$$V_B = (V_{II} + 3V_{0,2} + 3V_{0,6} + 3V_{0,8} + V_q) / 10. \quad (7)$$

В случае измерения скоростей в трех, двух и одной точках

$$V_B = (V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8}) / 4, \quad (8)$$

$$V_B = (V_{0,2} + V_{0,8}) / 2, \quad (9)$$

$$V_B = V_{0,6}. \quad (10)$$

Пятиточечный способ обычно применяют при глубине $h > 1$ м, трехточечный – при $0,6 \dots 1,0$ м, двухточечный – при $0,35 \dots 0,6$ м, одноточечный – при глубине менее $0,35$ м.

Интеграционный способ позволяет измерить сразу среднюю скорость по вертикали, горизонтали (по ширине потока) или по всему живому сечению. Например, если равномерно опускать вертушку во время ее работы по всей глубине h на вертикали до дна и скорости течения будут лежать в области линейной части градуировочной зависимости, то средняя скорость на вертикали V_B определится средней частотой вращения винта n за период опускания t по формуле

$$V_B = kN/t = kn, \quad (11)$$

где k – гидравлический шаг вертушки;

N – суммарное число оборотов винта вертушки на вертикали.

Интеграционный способ ускоряет проведение полевых работ. Например, интеграцией (суммированием) скоростей по живому сечению можно за один рейс катера или лодки измерить среднюю скорость, а по ней определить расход реки. Однако при этом снижается точность полученных результатов и требуется более сложное оборудование.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ

Методы определения расходов

Все основные методы определения расходов воды детально описаны в учебнике для вузов [5].

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

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

$$Q = V\omega, \quad (12)$$

где V – средняя скорость течения;

ω – средняя площадь водного (живого) сечения потока.

Расход воды геометрически представляется как объем водного пространства, заключенный между горизонтальной плоскостью живого сечения и поверхностью, проходящей через концы векторов скоростей течения. Это водяное тело называется гидрометрической моделью расхода воды (рис. 13).

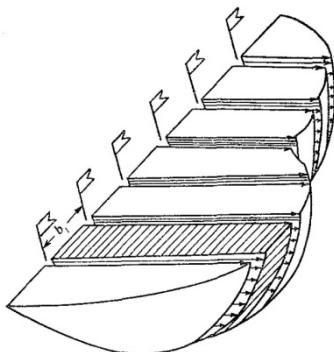


Рис. 13. Модель расхода воды в единицу времени

Модель измеренного расхода воды является формой синтеза его элементов и зависит от применяемых методов измерения. Основные методы измерения расхода:

1) метод «скорость-площадь», основанный на измерении поперечного сечения потока и скоростей течения в точках или интегрально на вертикалях, в отсеках и по ширине русла;

2) метод «уклон-площадь», использующий продольный уклон водной поверхности, площадь и гидравлический радиус живого сечения;

3) метод смешения с вводом в поток индикаторов и определением степени их разбавления;

4) объемный метод, основанный на фиксации времени наполнения мерных емкостей;

5) гидравлические методы, осуществляемые с использованием специальных расходомерных устройств и характеристик пропускной способности гидротехнических сооружений (труб);

6) физические методы – с применением ультразвука, электромагнитной индукции и др.

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

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

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

В настоящее время получили развитие два способа:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} V_{cp} &= K_B V_{\Pi}, \\ V_{cp} &= K V_{max}, \end{aligned} \quad (13)$$

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

Скорость также рассчитывается по формулам (7) – (10) при замерах вертушками. Тогда общий расход определится суммированием расходов через отдельные площади поперечного сечения между вертикалями:

$$Q = \sum b_i(V_i + V_{i+1})(h_i + h_{i+1})/4. \quad (14)$$

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

$$Q = KV_{max}\omega. \quad (15)$$

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

$$Q = \omega C(Ri)^{0,5}, \quad (16)$$

где ω – площадь водного (живого) сечения потока;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус живого сечения;

i – продольный уклон водной поверхности в реке.

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

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

$$C = R^{1/6}/\eta, \quad (17)$$

где η – коэффициент шероховатости, определяемый в зависимости от характеристик русла по таблицам 1, 2.

Таблица 1

Значения коэффициента шероховатости η для открытых каналов в нескальном грунте без облицовки

<i>Описание водотока</i>	<i>Коэффициент шероховатости</i>
Канал прямой с постоянными живыми сечениями:	
а) чистый, только что выполненный	0,018
б) чистый после выветривания	0,022
в) чистый, ложе канала гравелистое	0,025
г) в канале небольшая растительность	0,027
Канал извилистый с переменными живыми сечениями:	
а) без растительности	0,025
б) заросший травой	0,030
в) с густой травой и водорослями	0,035
г) с земляным дном и бутовыми стенками	0,030
д) с каменным дном и откосами, заросшими водорослями	0,033
е) с мощеным дном и чистыми откосами	0,040
Канал, откопанный драглайном или землечерпалкой:	
а) без растительности	0,028
б) с небольшой растительностью на берегах	0,050
Каналы, не поддерживаемые в исправности (травы и кусты не расчищаются):	
а) густая растительность высотой, равной глубине потока	0,080
б) чистое дно, заросли по берегам	0,050
в) то же, при высоком уровне воды	0,070
г) густой кустарник по берегам; высокий уровень воды	0,100

Таблица 2

Значения коэффициента шероховатости η для рек

<i>Характеристика русла</i>	<i>Коэффициент шероховатости</i>
Естественное русло в благоприятных условиях (чистое, прямое, земляное, со свободным течением)	0,025 – 0,033
Чистое извилистое ложе с небольшим числом отмелей	0,033 – 0,045
То же, но слегка заросшее и с камнями	0,035 – 0,050
Значительно заросшие участки рек с очень медленным течением и глубокими промоинами	0,050 – 0,080

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

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

Измерив концентрации C_1 и C_2 химическим или электрометрическим (по электропроводности) методом, величину расхода реки Q вычисляют из условия равенства расходов соли в верхнем и нижнем створах: $C_1q = C_2(Q + q)$, откуда $Q = q(C_1 - C_2)/C_2$. Погрешность метода оценивается в 10%.

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

Гидравлические методы. В гидрометрии для определения расхода широко используют водосливы с тонкой стенкой, которые представляют собой стенку, перегораживающую поток (ручей) поперек и имеющую прямоугольный, трапецидальный или треугольный вырез для пропуска воды. Наибольшее распространение получил треугольный водослив с углом выреза в 90° (рис. 14, а). Расход воды определяется по измеряемому геометрическому напору H из формулы $Q = 1,4 H^{2,5}$. При трапецидальном водосливе (рис. 14, б) с углом $tg\alpha = 0,25$ используют формулу $Q = 1,86 BH^{1,5}$. При прямоугольном водосливе с тонкой стенкой $Q = 1,95 BH^{1,5}$. При прямоугольном водосливе с широким порогом $Q = 1,4 BH^{1,5}$.

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

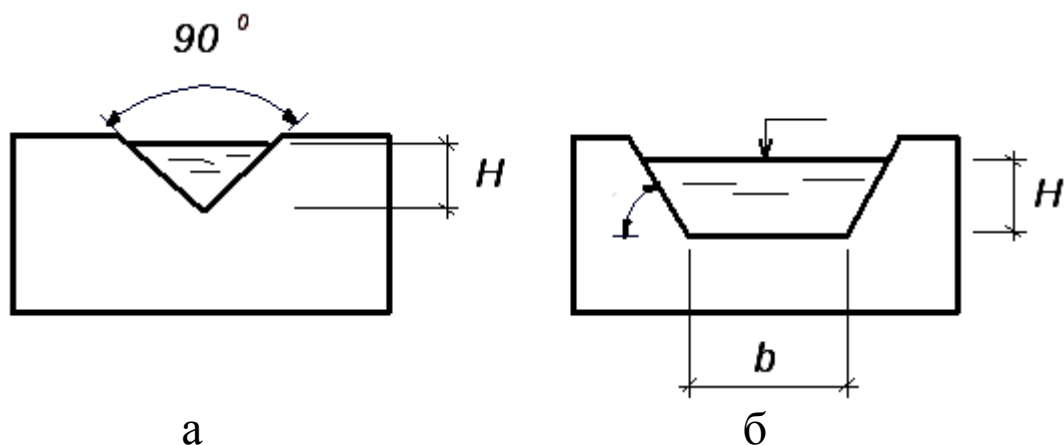


Рис. 14. Схема водослива: а – треугольный, б – трапецидальный

Малые мосты и дорожные трубы также могут быть использованы для определения расхода. Они работают по принципу водослива с широким порогом при нулевой его высоте и по схеме протекания делятся на свободные и подтопленные со стороны нижнего бьефа.

По гидравлическим показателям конструкции малые трубы можно подразделить на безнапорные водопропускные трубы (рис. 15, а), работающие, как водослив с широким порогом, напорные (рис. 15, б) и полунапорные (рис. 15, в), работающие, как насадки и короткие трубы или отверстия в тонкой стенке.

Пропускная способность безнапорных труб зависит от наличия подтопления. У неподтопленных труб она определяется по формуле водослива с широким порогом:

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{1.5}, \quad (18)$$

где Q – расход воды, м³/с;

m – коэффициент расхода;

b – ширина отверстия, м;

g – ускорение силы тяжести, равное 9,8 м/с²;

H_0 – полный напор с учетом скорости подхода, м.

Для подтопленных труб пропускная способность определяется по формуле

$$Q = m\sigma_{\Pi}\sqrt{2g}H_0^{1.5}, \quad (19)$$

где σ_{Π} – коэффициент подтопления.

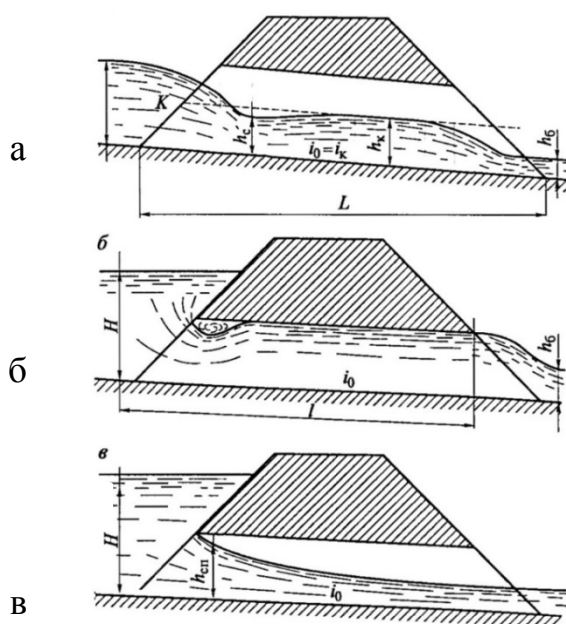


Рис. 15. Схема водослива:

а – безнапорная труба, б – напорная труба, в – полунапорная труба;

K – поверхность воды в трубе при безнапорном режиме; h_c – глубина воды в сжатом сечении; h_k – критическая глубина; h_b – глубина в нижнем бьефе (бытовая); h_{cn} – глубина воды на участке спада; i_0 – уклон дна трубы; i_k – критический уклон дна трубы; H – напор воды перед трубой; l – длина трубы между расчетными сечениями; L – полная длина трубы

Для труб большого сечения в формуле (18) под величиной b следует принимать среднюю величину, определяемую по площади и глубине соответствующего сечения. При расчете по сжатому сечению в конце входного участка $b = \omega_c / h_c$.

Способ гидравлического расчета безнапорных труб зависит от их длины L , продольного уклона i_0 и бытовой глубины воды в нижнем бьефе h_b .

Безнапорные трубы можно подразделить на короткие и длинные, неподтопленные и подтопленные.

Короткие неподтопленные трубы. Ориентировочно можно считать, что при $i_0 < i_k$ трубы будут короткими, если их длина $L \leq 20 h_T$, где h_T – глубина воды в трубе, м. Пропускная способность определяется по формуле (18).

Длинные неподтопленные трубы оказывают влияние на напор перед трубой. При заданном расходе Q напор перед длинной трубой $H_{дл}$ приближенно (более точно – для круглых труб) можно определить по формуле

$$H_{дл} = H + 0,005 h_T (L/h_T - 20) (H/h_T)^2, \quad (20)$$

где H – напор перед короткой трубой, м;

L_T – длина длинной трубы, м.

Трубы с затопленным входом. Если глубина потока на входе в трубу $h_{вх}$ превышает вертикальный размер входного отверстия, то вход окажется затопленным.

Полунапорные трубы работают по принципу истечения из отверстия. Пропускная способность определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_0 - h_c)}, \quad (21)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω – площадь поперечного сечения трубы, м²;

H_0 – гидродинамический напор, м;

h_c – глубина сжатого сечения, м.

Напорные трубы работают по принципу насадка. Пропускную способность напорных труб можно определить по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H_0 - i_0 l - h)}, \quad (22)$$

где i_0 – уклон трубы;

l – длина трубы, м;

h – глубина на выходе из трубы при гидростатическом распределении давления, м.

Подмостовые русла средних и больших мостов также могут быть использованы для приближенной оценки расхода воды. Расходы Q , пропускаемые через подмостовые русла на поймах, можно приближенно определить по формуле

$$Q = \varphi \omega (2g\Delta Z)^{1/2}, \quad (23)$$

где φ – коэффициент скорости, принимают равным 0,5 – 0,7;

ω – площадь живого сечения под мостами;

ΔZ – разность уровней воды с верховой стороны насыпи у границы разлива и в отверстии моста.

ИЗУЧЕНИЕ ТВЕРДОГО СТОКА И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА НАНОСАМИ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Все понятия, определения и методические основы наблюдения за наносами и донными отложениями приведены здесь в соответствии с учебным пособием [6].

Общие сведения о твердом стоке

Воды рек и других водотоков всегда содержат в себе то или иное количество твердых частиц и растворенных веществ. Общее количество этих продуктов, проносимое водотоком за определенный период, например за год, называется *твердым стоком*. Твердые частицы, транспортируемые водой, принято называть *наносами*. Наносы состоят из минеральных зерен различной крупности; в состав наносов могут входить также частицы органического происхождения.

Наличие твердого стока обуславливается процессами механической и химической эрозии. Механическая эрозия (размыв) производится в основном поверхностными водами, а химическая – главным образом грунтовыми. Основная масса наносов поступает в реки с их водосборных бассейнов, но некоторая часть их образуется за счет размыва русла.

Транспортируемые водным потоком наносы принято разделять на *взвешенные*, перемещающиеся в толще потока во взвешенном состоянии, и *донные* (их иногда называют влекомыми). Такое деление является условным, так как частицы одной и той же крупности могут перемещаться как во взвешенном состоянии, так и путем влечения по дну в зависимости от скорости течения: чем больше скорость потока, тем более крупные частицы могут переходить во взвешенное состояние. Однако разделение наносов на взвешенные и донные удобно в методическом отношении, так как изучение отдельных видов наносов проводится различными методами. Донные наносы состоят из более крупных частиц, чем взвешенные.

Твердый сток реки может быть определен в полном объеме только в результате учета всех указанных категорий наносов и *растворенных веществ*. При гидрометрических измерениях отдельно учитывают расход взвешенных наносов (R , кг/с), расход донных наносов (G , кг/с) и расход растворенных веществ (S , кг/с).

Измерение расхода взвешенных наносов основано на определении мутности воды, т. е. весового содержания наносов в единице объема воды. Мутность (p) выражается зависимостью

$$\rho = \frac{\rho_n 10^6}{V}, \quad (24)$$

где ρ_n – масса наносов в пробе;

V – объем пробы воды в миллилитрах; тогда ρ – в г/м^3 .

Измерение расхода донных наносов основано на определении элементарного расхода их, т. е. веса наносов, перемещающихся через единицу длины смоченного периметра русла в одну секунду. Элементарный расход выражается зависимостью

$$g = \frac{100 \rho_D}{tl}, \quad (25)$$

где ρ_D – вес наносов в пробе;

t – продолжительность наблюдений в секундах;

l – ширина входного отверстия прибора в сантиметрах.

Тогда g – в $\text{г}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Измерение расхода растворенных веществ основано на определении минерализации воды, т. е. весового количества (сухого остатка) их в единице объема воды. Минерализация выражается зависимостью

$$\alpha = \frac{\rho_c 10^6}{V}, \quad (26)$$

где ρ_c – вес сухого остатка;

V – объем воды в миллилитрах; тогда α – в г/м^3 .

Изучение твердого стока имеет целью получить следующие его характеристики:

а) годовой сток взвешенных и донных наносов и растворенных веществ с распределением его внутри года;

б) состав взвешенных и донных наносов по крупности частиц, содержание в них органических веществ;

в) солевой состав растворенных веществ с внутригодовым распределением ионов.

Изучение твердого стока рек имеет большое научное и практическое значение. Знание режима движения, состава и объема стока наносов позволяет решать ряд весьма важных проблем практического назначения. Например, большое значение этот вопрос приобретает в связи с проектированием и эксплуатацией водохранилищ, расчет заиления которых не может быть выполнен достаточно надежно без фактических данных о стоке наносов. В районах орошаемого земледелия учет стока и режима движения наносов необходим для разработки мероприятий по

предупреждению заиления каналов и водохранилищ. Большое значение изучение режима движения наносов и их отложений имеет для судоходства. Для улучшения судоходных условий рек ежегодно ведутся в большом объеме выправительные и дноуглубительные работы. Учет количества и состава наносов весьма важен при проектировании гидроэлектростанций: под действием наносов могут истираться лопатки турбин, стенки подводных трубопроводов и др.

При использовании рек для водоснабжения, обводнения, орошения необходимо учитывать химический состав воды и количество растворенных в ней веществ. Весьма важно знать химический состав воды при гидротехническом строительстве, так как содержащиеся в воде вещества могут оказывать агрессивное воздействие на бетонные сооружения.

Наносы можно классифицировать по размеру частиц. За размер частицы принимают ее средний диаметр. Частицы в зависимости от состава (глина, ил, песок и др.) подразделяются на мелкие, средние и крупные.

Движение донных наносов заключается в силовом воздействии потока, приводящем к раскачиванию отдельных частиц и отрыву их ото дна. При отрыве частица приобретает вращательное движение и поднимается на некоторую высоту, затем падает на дно. Такое скачкообразное движение называется сальтацией. Кроме сальтации, наблюдается перемещение наносов перекачиванием и реже скольжением по дну.

Возрастание водности и соответственно содержания наносов в реках обычно сопутствует увеличению мутности. Величина мутности в реках, содержащих мало наносов, составляет несколько десятков граммов в кубометре воды.

Изучение стока взвешенных наносов, приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами

Для учета взвешенных наносов берут пробы воды приборами, называемыми батометрами. Различают батометры мгновенного и длительного наполнения. При отборе проб батометрами мгновенного наполнения необходимо брать пробы воды в каждой точке с некоторой повторностью. В настоящее время батометры мгновенного наполнения в гидрометеорологических исследованиях не применяются.

Батометры длительного наполнения при взятии пробы воды выдерживают в каждой точке в течение времени, необходимого для наполнения прибора водой, следовательно, в той или иной степени учитывают пульсацию мутности. Применяют батометры длительного наполнения следующих типов: батометр-бутылка на штанге и в грузе,

вакуумный батометр. Кроме того, в отдельных случаях применяют обыкновенную бутылку из прозрачного стекла на штанге и в грузе.

В настоящее время используется и фотометрический метод определения мутности, однако широкого распространения он пока не имеет из-за недостаточно разработанных методики и приборов.

Батометр-бутылка на штанге имеет типовую схему и состоит из литровой широкогорлой бутылки, укрепляемой на штанге с помощью специальной обоймы. При вертикальном положении штанги продольная ось бутылки образует угол с горизонтальной линией, равный 25° . Такое наклонное положение бутылки улучшает условия входа воды в нее и выхода воздуха через воздухоотводящую трубку. Бутылка снабжена металлической головкой, через которую проходят водозаборная и воздухоотводящая трубки. Наконечники (насадки) этих трубок подбирают с различными диаметрами отверстий в соответствии со скоростью течения воды. Хвостовой стабилизатор обеспечивает установку прибора по течению. Кроме того, батометру придается горизонтальное положение при закреплении его на штанге, что позволяет брать пробы в придонных слоях потока, на расстоянии 10 см от дна.

Пробы воды на мутность берут батометром-бутылкой на штанге интеграционным или точечным способом. Интеграционное взятие проб воды рекомендуется при глубинах не менее 2 м. Это вызвано тем, что водозаборная трубка при наклонном положении бутылки не доходит до дна на 20 см и в нижнем слое потока проба воды не забирается. При небольших глубинах это существенно сказывается на точности определения мутности. Точечный способ взятия проб применяют при глубинах от 0,5 до 2,0 м. При больших глубинах попадающая в батометр вода при его опускании может существенно повлиять на точность определения мутности в нижних точках вертикали.

Батометр-бутылка в грузе снабжен хвостовым оперением специальной формы – стабилизатор вынесен назад на круглой штанге, а на конце ее укреплен поплавков обтекаемой формы. Прибор подвешивается на тросе с таким расчетом, чтобы в воздухе центр тяжести батометра был несколько смещен к хвосту. Этим достигается правильное направление прибора при соприкосновении с водной поверхностью. В водной среде батометр принимает горизонтальное положение благодаря наличию поплавка. Рыскание сводится к минимуму ввиду большой длины хвостовой части и наличия четырехлопастного стабилизатора.

Во внутреннюю полость батометра вставляется литровая широкогорлая бутылка с головкой и трубками, как у батометра на штанге. Надежное поступление воды в бутылку наблюдается при скоростях не менее 0,5 м/с; при меньших скоростях батометр неприменим.

Вакуумный батометр действует за счет создания вакуума в камере

батометра, благодаря чему вода из реки засасывается в камеру по шлангу, на конце которого имеется наконечник, располагаемый в требуемой точке потока.

Типовой вакуумный батометр состоит из камеры емкостью 3 л, водозаборной трубки, ручного насоса, крана-тройника, шлангов и вакуумметра. Батометр может применяться на штанге и на тросе с грузом. В последнем случае на грузе может, кроме того, укрепляться гидрометрическая вертушка для одновременного измерения скоростей течения воды.

При взятии пробы воды в камере батометра создается с помощью насоса начальный вакуум, величина которого должна быть такой, чтобы скорость поступления воды в водозаборную трубку равнялась бы скорости течения в данной точке потока. Величина создаваемого вакуума контролируется по вакуумметру и поддерживается на необходимом уровне с помощью насоса на протяжении всего времени забора пробы. Необходимая величина вакуума зависит от высоты камеры над поверхностью воды.

Фотометрический метод определения мутности

Рассмотренные приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами в настоящее время широко применяются и обеспечивают получение удовлетворительных результатов на равнинных и отчасти на горных реках. В связи с этим делаются попытки применить новые физические принципы определения мутности. Одним из методов является фотометрический, основанный на измерении ослабления светового луча взвешенными в воде наносами. Имеются многочисленные разработки приборов для измерения мутности фотоэлектрическим методом. Эти приборы носят общее название *фотомутномеры (мутномеры)*.

Работа современных фотомутномеров строится на закономерностях оптики: сквозь анализируемую жидкость пропускают луч света с одного либо нескольких датчиков под разными углами относительно источника, в качестве которого в данной модели выступают датчики (инфракрасные светодиоды). В момент столкновения с твердыми частицами жидкой среды луч рассеивается силой потока, который затем фиксируется измерителем как основа для вычисления мутности.

Измерение расхода взвешенных наносов

Измерение расхода взвешенных наносов обычно совмещается с измерением расходов воды и заключается в отборе проб воды для последующего определения веса содержащихся в ней наносов и

вычисления мутности, т. е. весового содержания наносов в единице объема воды. Пробы воды берут описанными выше приборами на скоростных вертикалях одновременно с измерением скоростей течения.

При измерении расхода взвешенных наносов берут следующие пробы воды:

1) пробы на мутность на скоростных вертикалях для вычисления расхода наносов;

2) контрольные единичные пробы на мутность для установления связи между мутностью единичной пробы и средней мутностью воды;

3) пробы для определения крупности взвешенных наносов.

Для вычисления стока наносов берут ежедневные единичные пробы воды в том же месте живого сечения, в котором брали контрольные единичные пробы при измерении расхода воды.

Для правильного учета естественного стока наносов створ, в котором берут пробы воды на мутность, должен находиться на участке реки, где отсутствуют искажения мутности воды (например, землечерпание в русле, выпуск сточных вод промышленными предприятиями и т. п.).

Количество измерений расходов взвешенных наносов в течение года устанавливают в зависимости от режима реки и степени изученности стока наносов в данном створе.

Как уже указывалось, измерение расхода взвешенных наносов проводится совместно с измерением расхода воды и поэтому включает в себя операции, необходимые для измерения расхода воды (измерения уровня воды и уклона водной поверхности, промеры глубин, измерение скоростей течения); дополнительно берут пробы воды на мутность. Способы определения расхода наносов соответственно едины с определением расхода воды (точечный, суммарный и интеграционный).

Объемы проб при каждом способе устанавливают из расчета, чтобы при последующем фильтровании осадок наносов на фильтре был бы массой не менее 0,1 г. Если объемы проб меньше указанного, то это может повлечь за собой погрешности вследствие потерь наносов при фильтровании. Если прибор не может взять пробу сразу в требуемом объеме, то следует брать повторные пробы. Объем каждой пробы должен быть измерен на месте.

Взятые пробы воды со взвешенными наносами сливают каждую в отдельную посуду, предварительно тщательно вымытую чистой водой, и закупоривают. Проба снабжается этикеткой с указанием названия реки, створа, номера расхода, точки на вертикали, объема пробы и даты. Первичная обработка проб проводится на посту и заключается в выделении наносов из воды путем автоматического фильтрования, фильтрования с предварительным отстоем наносов или фильтрования под давлением.

Контрольные единичные пробы воды на мутность берут при каждом измерении расхода взвешенных наносов в том же месте, где берут ежедневные единичные пробы, теми же приборами и в том же объеме. Первичная обработка проб проводится на посту, а взвешивание фильтров с наносами – в стационарной лаборатории. По весу наносов в пробе и объему пробы определяют мутность контрольной единичной пробы.

Пробы для определения крупности взвешенных наносов берут не при каждом измерении расхода наносов, а только в характерные периоды гидрологического режима – половодье, паводки и межень (при мутности более 50 г/м^3). Пробы берут во время измерения расхода наносов на всех скоростных вертикалях тем же прибором и тем же способом, что и пробы для измерения расхода наносов, но отдельно от них. Взятые пробы сливают в одну для всего живого сечения. При детальном способе пробы для определения крупности берут в двух точках на вертикали: на $0,2h$ и $0,8h$. Объем пробы зависит от мутности воды в реке и от того, какой вес наносов требуется для проведения анализа: при анализе методом фракциометра навеска должна составлять $0,5 - 2,0 \text{ г}$, при анализе методом «пипетка»–фракциометр – $2 - 7 \text{ г}$.

Ежедневные единичные пробы воды на мутность берутся в сроки водомерных наблюдений один (в 8 часов) или два раза в сутки (в 8 и 20 часов). В периоды небольшой мутности, в межень, пробы берутся один раз, при повышении мутности свыше 100 г/м^3 (в паводки и половодья) – два раза. При резких колебаниях мутности, например на горных реках с паводочным режимом при внутрисуточном ходе мутности, пробы берут учащенно. При малой мутности (менее 50 г/м^3) пробы сливают по пятидневкам и анализируют суммарную пробу. При мутности менее 20 г/м^3 (в периоды устойчивой летней и зимней межени) анализируют суммарные пробы по декадам.

Изучение стока донных наносов, приборы для взятия проб донных наносов

Для изучения стока донных наносов применяют специальные приборы – наносоуловители, называемые донными батометрами. Принцип действия их заключается в следующем: прибор устанавливается на дне и в течение определенного времени улавливает влекомые наносы на участке дна по ширине, равной входному отверстию прибора. После подъема прибора определяют объем и вес пробы, а также проводят ее анализ.

Существует большое количество конструкций донных батометров, но применяемые в настоящее время батометры нельзя признать совершенными – они еще не обеспечивают достаточной точности измерения. Несмотря на кажущуюся простоту принципа действия донного

батометра, создание такого прибора, обеспечивающего достаточную точность измерений, оказывается делом весьма сложным.

Основные трудности в создании донного батометра сводятся к следующему:

1) при установке прибора на неровное дно трудно получить хорошее сопряжение приемной части прибора с дном. Наличие неровностей дна, в том числе песчаных гряд, приводит к тому, что наносы могут частично пойти под прибор, а при вдавливании прибора в дно поступление в него наносов будет преувеличенным;

2) прибор, поставленный на дно потока, нарушает скоростное поле в придонном слое, а следовательно, и перемещение наносов по дну;

3) донные наносы двигаются неравномерно, а в ряде случаев и с перерывами;

4) положение прибора на дне потока, а также работу его в мутной воде или при большой глубине невозможно контролировать.

Батометры для донных наносов подразделяются на две группы: батометры для мелких донных наносов (песок, гравий) и батометры для крупных донных наносов (гравий, галька).

Типовой батометр для мелких донных наносов может применяться в руслах с песчаными и гравелистыми наносами диаметром до 1 см. Масса батометров около 30 кг. Опускается на дно с помощью лебедки, применим при скоростях течения до 1,5 м/с и глубинах до 20 м. Им можно пользоваться и при больших скоростях, но при этом необходимо делать оттяжки или увеличивать массу груза. Он состоит из двух основных частей: ловушки и кожуха. Ловушка представляет собой съемное дно прибора и состоит из плоского лотка длиной 70 см, в который вкладывается рама с жалюзийными перегородками. Передняя часть лотка образует трамплин, несколько выступающий перед входом в лоток.

Батометр-сетка предназначен для учета крупной гальки, влекомой по дну. Батометр состоит из металлической рамы и натянутой на нее проволочной сетки. Опускается батометр на штанге. Размер ячеек сетки устанавливается в соответствии с наименьшим диаметром гальки, улавливаемой батометром. Ширина входного отверстия батометра составляет 0,2 – 0,4 м. Недостатком батометра-сетки является неполный учет донных наносов, так как частицы диаметром меньше размера ячеек не улавливаются.

Разработан *регистратор движения донных наносов*, действие которого основано на фиксации соударений движущихся частиц с чувствительным элементом прибора.

Исследования движения донных наносов на горных реках выявили, что они перемещаются преимущественно путем сальтации. Приемная

пластина датчика, устанавливаемого на дне, воспринимает удары сальтирующих частиц.

ИЗУЧЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Общие сведения

При изучении процесса формирования речных русел, каналов, ложа стоячих водоемов и заиления водохранилищ, а также при гидрохимических и гидробиологических исследованиях необходимо знать строение и состав отложений на дне водоемов.

Донные отложения в реках можно рассматривать как временно неподвижные наносы, формирующие дно. В определенные фазы гидрологического режима может происходить размыв ранее отложившихся наносов, в другие фазы – их аккумуляция. Донные отложения в водохранилищах и особенно в озерах накапливаются в течение длительного времени, отличаются по составу от речных отложений и представлены более мелкими фракциями.

Донные отложения могут быть как минерального, так и органического происхождения. Минеральные грунты бывают представлены главным образом различными комбинациями ила, глины, песка, гравия, гальки.

Органогенные грунты состоят обычно из различного рода сапропелей, входящих как правило в состав озерных отложений. Сапропель в сыром состоянии представляет собой студенистую, различной консистенции однородную и мелкозернистую массу различных цветов (коричневого, серого, желтоватого и пр.). После сушки сапропель становится твердым и в воде не размокает.

Изучение донных отложений проводится путем взятия проб. На гидрометрических створах пробы донных отложений берутся одновременно со взятием проб взвешенных наносов, предназначенных для определения их крупности, и при измерении расходов донных наносов на всех скоростных вертикалях створа.

Взятые пробы донных отложений анализируются в лабораториях, где определяется механический состав, т. е. крупность фракций, а при надобности и минералогический состав.

Приборы для взятия проб донных отложений

Грунты, из которых состоят донные отложения, обладают различными механическими свойствами, что затрудняет создание универсального прибора для взятия проб. Поэтому существует большое количество различных приборов, которые следует применять в соответствии со

свойствами исследуемых грунтов. Кроме того, устройство прибора во многом зависит от глубины водоема, на котором предполагается брать пробы донных отложений. Пробы донных отложений всегда желательно брать без нарушения их структуры, но если требуется определить только род грунта, то соблюдение этого условия не обязательно.

Все приборы для взятия проб донных отложений можно подразделить на две группы: приборы для взятия пробы грунта с нарушением его структуры и приборы для взятия пробы грунта без нарушения его структуры. Из приборов первой группы в настоящее время применяют главным образом дночерпатели (цепной, штанговый) и иногда драги простейшего устройства. Из приборов второй группы применяют различного рода донные щупы.

Приборы для взятия проб грунта с нарушением структуры. Дночерпатель предназначен для взятия проб донных отложений из галечниковых и гравелисто-галечных грунтов. Драга простейшего устройства состоит из металлической рамы и мешка для сбора грунта. Драга прикрепляется на тросе и для сбора грунта (или бентоса) выбрасывается из шлюпки на дно водоема. При движении шлюпки драга перемещается по дну, при этом заостренный край наклонной пластины рамы скребет дно, а грунт поступает через щель рамы в мешок.

Приборы для взятия проб грунта без нарушения структуры. Донный щуп предназначен для взятия проб донных отложений в илистых, песчаных, гравелистых и мелкогалечных грунтах. Применяется на штанге или шесте. Глубина взятия пробы зависит от длины штанги и шеста, а также от скорости течения воды, но не может быть более 6 м. Основным рабочим органом щупа является заборный стакан длиной 140 мм и диаметром 40 мм, внутри которого имеется поршень.

Используются еще и *грунтовые трубки*, предназначенные для взятия проб донных отложений с судна, стоящего на якорю или находящегося в движении. Приборы в основном предназначены для морских исследований, но некоторые из них могут применяться и при изучении донных отложений на озерах и водохранилищах, а также в устьевых участках рек. Трубка для взятия проб с судна на якорю состоит в основном из трех частей: трубки, коронки, груза со стабилизатором. Трубка служит для помещения взятой пробы. Внутри трубки имеется вкладыш, представляющий собой разъемную латунную трубку, которая вынимается вместе с пробой, чем и достигается сохранение структуры грунта.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ, РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

Характеристики озер

Озеро – естественный водоем суши с замедленным водообменом. Как правило, озера обладают выработанными под воздействием ветрового волнения берегами. Для образования озера необходимы два неперенных условия – наличие естественной котловины, т.е. замкнутого понижения земной поверхности, и находящегося в этой котловине определенного объема воды.

Озера подразделяют по следующим классификациям.

По размеру озера подразделяют на:

- очень большие – площадью свыше 1000 км²;
- большие – площадью от 101 до 1000 км²;
- средние – площадью от 10 до 100 км²;
- малые – площадью менее 10 км².

По степени постоянства озера делят на:

- постоянные;
- временные (эфемерные); это водоемы, которые заполняются водой лишь во влажные периоды года.

По географическому положению озера подразделяют на:

- интразональные, которые находятся в той же географической (ландшафтной) зоне, что и водосбор озера;
- полизональные, водосбор которых расположен в нескольких географических зонах.

По происхождению озерные котловины могут быть:

- тектонические;
- вулканические;
- метеоритные;
- ледниковые;
- карстовые;
- термокарстовые;
- суффозионные;
- речные;
- морские;
- эоловые;
- органогенные.

По характеру водообмена озёра делят на:

- сточные;
- бессточные.

Морфология и морфометрия озер. *Котловиной* называют естественное понижение земной поверхности различного происхождения. *Ложь* – это поверхность, непосредственно занятая водой. *Береговая область, береговой уступ, побережье и береговая отмель* – эти части называют *литоралью*. За пределами литорали находится *подводный откос*. Глубоководная часть озера – это *пелагиаль*; дно озера называют *профундалью*.

Основными морфометрическими характеристиками озера (рис. 16) служат: *площадь озера* $F_{оз}$, *объем воды в озере* $V_{оз}$, *длина береговой линии* $L_{бер.л}$, проведенной по урезу воды, *длина озера* $L_{оз}$ – кратчайшее расстояние по поверхности воды вдоль оси озера между наиболее удаленными точками береговой линии, *ширина озера* $B_{оз}$ – расстояние между противоположными берегами озера, измеренное по линии, перпендикулярной оси озера в любой его части; наибольшее значение этой величины называют максимальной шириной озера $B_{оз.мах}$. Среднюю ширину B озера вычисляют по формуле (27). *Глубина озера* $h_{оз}$, *максимальная глубина* $h_{оз.мах}$, *средняя глубина* $h_{оз.ср}$, определяются по формуле (28).

$$B = F_{оз} / L_{оз}, \quad (27)$$

$$h_{оз.ср} = V_{оз} / F_{оз}. \quad (28)$$

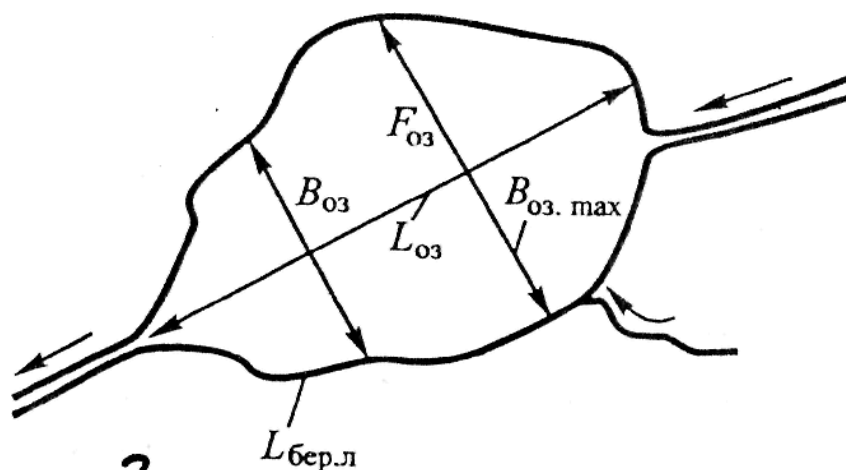


Рис. 16. Морфометрические характеристики озера

По данным промеров глубин (аналогично методике промеров глубин на реках) строится план озера в изобатах (рис. 17).

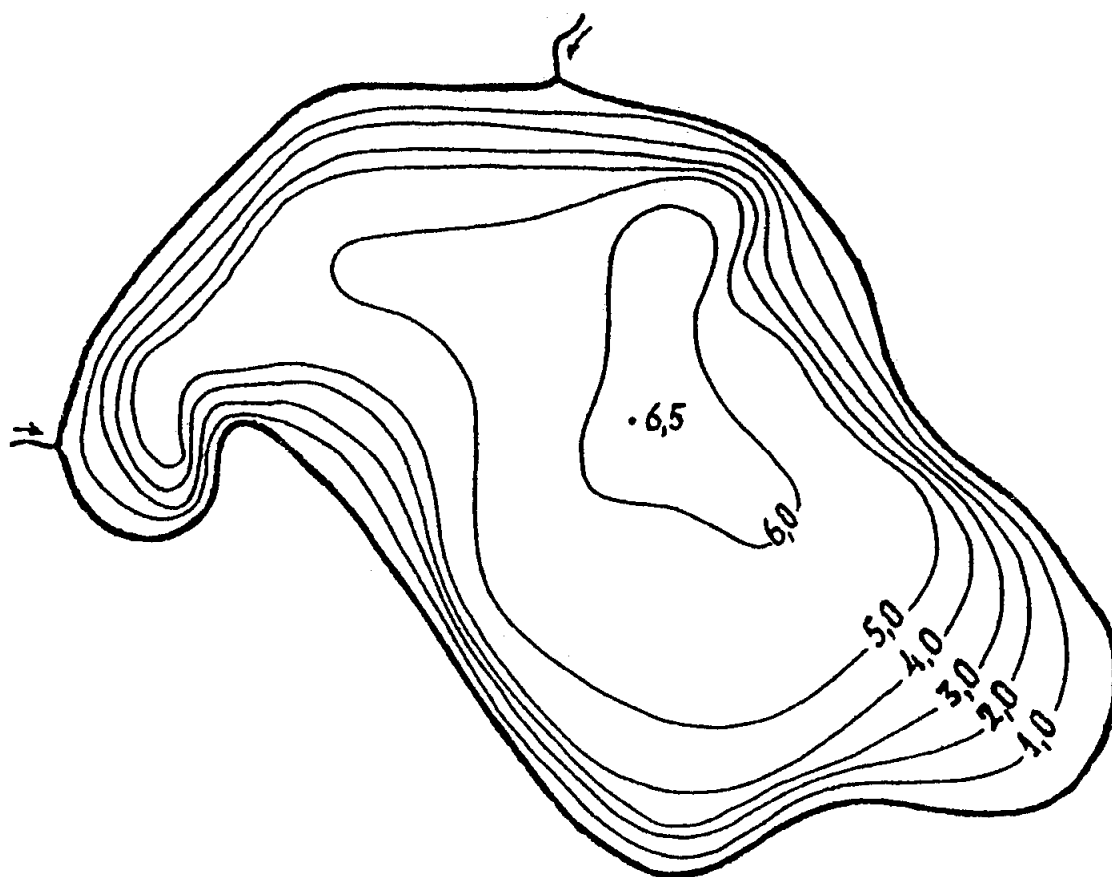


Рис. 17. План озера в изобатах

Водообмен в озерах. Показателем водообмена в озере, или интенсивности водообмена (смены) вод в озере, служит так называемый коэффициент условного водообмена K_e . Если составляющие водного баланса озера представлены в $\text{км}^3/\text{год}$, то величина $1/K_e$ численно равна периоду условного водообмена (водообновления), выраженному в годах. Наиболее общая закономерность, свойственная водообмену озера, следующая: чем меньше объем озера, тем при прочих равных условиях коэффициент водообмена больше.

Гидрохимические характеристики озер. Классификация по минерализации:

- пресные с соленостью менее 1%,
- солоноватые с соленостью от 1 до 25 %,
- соленые с соленостью 25 – 50 % (озера с морской соленостью).

Озера с соленостью воды выше, чем в океане (35 %), называют минеральными. Минерализация воды озер увеличивается от менее засушливых районов к более засушливым. В этом же направлении происходит и трансформация основного химического состава вод – воды из гидрокарбонатного класса переходят в сульфатный и хлоридный, а из

кальциевой группы – в магниевую и натриевую. Помимо растворенных солей вода озер содержит не только биогенные вещества (соединения азота (N), фосфора (P), кремния (Si), железа (Fe) и др.), но и растворенные газы (кислород (O_2), азот (N_2), диоксид углерода (CO_2), сероводород (H_2S) и др.), органические вещества.

Биогенные вещества в озерной воде необходимы для жизнедеятельности водных организмов, однако их избыток приводит к ухудшению качества воды в озерах.

Гидробиологические характеристики озер. Как и другие водные объекты, озера населены водными организмами. По условиям питания водных организмов озера подразделяются на:

- *олиготрофные* – с малым количеством питательных веществ;
- *евтрофные* – с большим поступлением питательных веществ;
- *дистрофные* – содержащие в воде избыточное количество органического вещества; и продукты его неполного окисления становятся вредными для жизнедеятельности организмов;
- *мезотрофные* – со средними трофическими условиями.

Наносы и донные отложения в озерах. По аналогии с любым водным объектом баланс взвешенных наносов в озерах складывается из следующих основных составляющих:

- приходная часть – поступление наносов с речным стоком (вследствие разрушения берегов), эолового приноса продуктов отмирания живых организмов;
- расходная часть – унос с речным стоком и аккумуляция на дне (донные отложения).

Донные отложения по происхождению подразделяются на терригенные (в основном минеральные частицы, поступающие с водосбора и берегов озера), биогенные и хемогенные (результат гидробиологических и гидрохимических процессов в водной толще озера).

По составу донные отложения делятся на минеральные (песок, минеральный ил, соли), сапропели (биогенные илы) и торфянистые.

Характеристики водохранилищ

Под *регулированием речного стока* понимают перераспределение во времени объема стока в соответствии с требованиями водопользования, а также в целях борьбы с наводнениями. Речной сток регулируют с помощью специальных искусственных водоемов, называемых *водохранилищами* или *прудами* (рис. 18, 19).

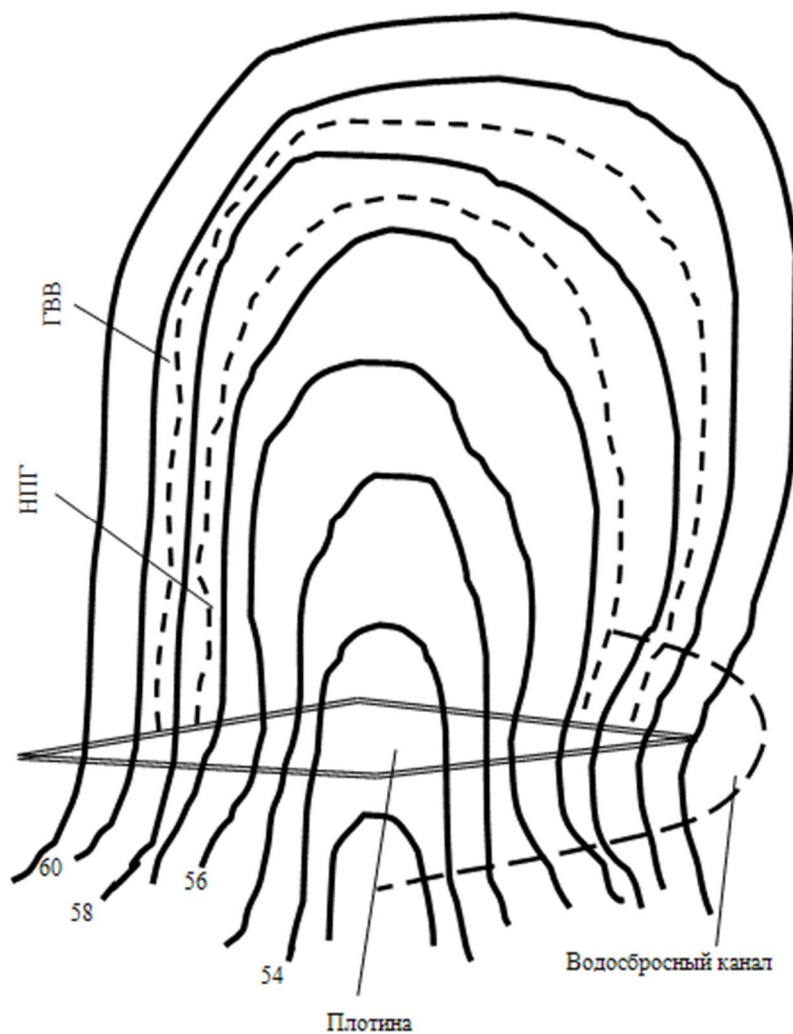


Рис. 18. План водохранилища

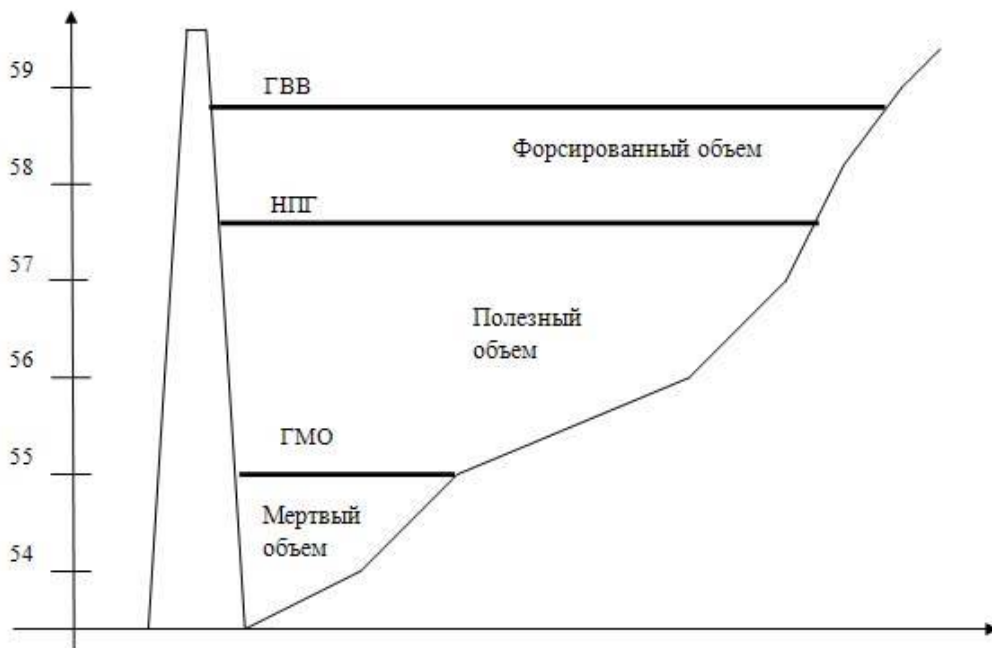


Рис. 19. Продольный профиль водохранилища

Водохранилище – это искусственный водоём, образованный для накопления и хранения воды в целях её использования в практических целях. *Пруд* – искусственный водоём для хранения воды с целью бытового и промышленного водоснабжения, орошения, разведения рыбы и водоплавающей птицы, а также для санитарных, противопожарных и спортивных потребностей. Различают *копанные* (копань) и *плотинные* пруды. Принято подразделение: прудом считается искусственный водоём площадью менее 1 км², площадь водохранилища более 1 км².

При проектировании объема чаши водохранилищ учитывают:

- объем потребляемой воды на различные цели (бытовые, промышленные и т. д.) – *полезный объем*;
- минимальные объемы воды для поддержания удовлетворительного санитарного состояния – *минимальный (мертвый) объем*;
- *объем потерь* на испарение, заиление, фильтрацию и льдообразование;
- *резервный (форсировочный) объем* – для предохранения от подтопления нижележащих территорий при половодье и паводках.

Условные уровни воды (горизонты), разграничивающие данные объемы: горизонт малого (мертвого) объема (ГМО), нормальный подпорный горизонт (НПГ), горизонт высоких вод (ГВВ).

К основным характеристикам водохранилища относят зависимости площади водной поверхности Ω и объема воды V в водохранилище от уровня H или глубины h в нем. Кривую $\Omega = \Omega(H)$ или $\Omega = \Omega(h)$ называют *кривой площадей водной поверхности водохранилища*; кривую $V = V(H)$ или $V = V(h)$ – *кривой объемов водохранилища*, а вместе – это *батиграфические кривые* (рис. 20).

Исходными материалами для построения кривой площадей являются крупномасштабные топографические карты. Принимая поверхность воды горизонтальной, определяют планиметрированием площади Ω или с помощью ГИС-программ, соответствующие различным уровням воды H и заключенные между отдельными горизонталями и створом плотины, замыкающими горизонтали у берегов.

Объем воды в водохранилище находят обычно путем последовательного суммирования частичных объемов ΔV_i , заключенных между смежными горизонталями, по формуле

$$\Delta V_i = 0,5(\Omega_i + \Omega_{i+1}) \Delta H_i, \quad (29)$$

где Ω_i , и Ω_{i+1} – площади, соответствующие уровням воды H_i , и H_{i+1} ; $H_{i+1} - H_i$ – приращение уровня воды; $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$.

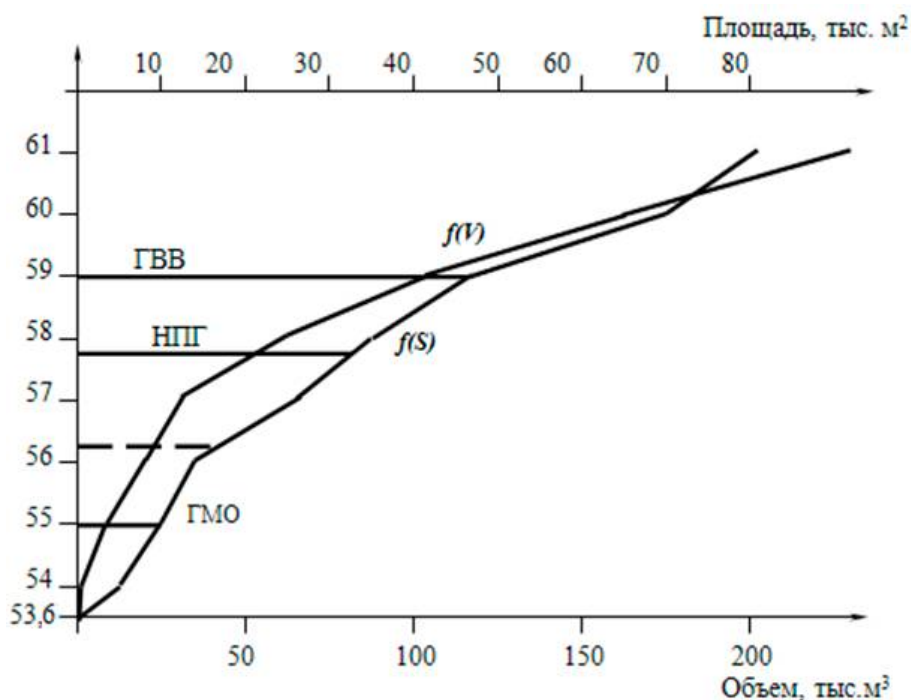


Рис. 20. Батиграфические кривые

В случае, если зависимость $\Omega(H)$ имеет сложный вид и соотношение площадей между смежными уровнями воды $\Omega_{i+1} / \Omega_i > 1,5$, может быть применена формула усеченной пирамиды:

$$\Delta V_i = 1/3 (\Omega_i + \Omega_{i+1} + \sqrt{\Omega_i \Omega_{i+1}}) \Delta H_i. \quad (30)$$

Объем первого придонного слоя воды вычисляют по формуле усеченного параболоида:

$$\Delta V_0 = 2/3 \Omega_0 \Delta H_0. \quad (31)$$

Объем воды в водохранилище, соответствующий уровню H_i , получают суммированием частичных объемов, расположенных ниже этого уровня:

$$V_{H_i} = \sum_{H_0}^{H_i} \Delta V_i. \quad (32)$$

При определении динамических объемов учитывают криволинейность свободной поверхности воды в водохранилище. При этом применяют способы построения кривых свободной поверхности. Однако на крупных слабопроточных водохранилищах уклон водной поверхности незначителен, поэтому при вычислении объемов воды ее поверхность, как правило, принимают горизонтальной.

По данным расчета строят кривую объемов $V = V(H)$. Важными характеристиками водохранилища являются также

- средняя глубина:

$$h_{cp} = V_{H_i} / \Omega_{H_i}; \quad (33)$$

- критерий площади литорали (мелководья):

$$L_{\Omega_i} = V_{H_i} / \Omega_{H_i}. \quad (34)$$

Здесь Ω_{H_i} , V_{H_i} и Ω_{L_i} – соответственно площадь водной поверхности, объем воды и площадь литорали (мелководья) в водохранилище при уровне H_i .

К мелководной зоне водохранилища относят его прибрежную часть с глубиной $h \leq 2$ м. Площадь этой зоны

$$\Omega_{L_i} = \Omega_{H_i} - \Omega_{H_i-2}, \quad (35)$$

где Ω_{H_i-2} – площадь водной поверхности водохранилища, соответствующая уровню воды $H = H_i - 2$ м; ее определяют с помощью кривой $\Omega = \Omega(H)$ (см. рис. 20).

Из формул (34) и (35) следует, что если уровень воды у плотины превышает отметку дна водохранилища не более чем в 2 м, то $\Omega_{H_i-2} = 0$ и, следовательно, $\Omega_{L_i} = \Omega_{H_i}$, а критерий литорали $L_{\Omega_i} = 1$. С повышением уровня воды критерий литорали уменьшается.

Кривые $h_{cp}(H)$ и $L_{\Omega}(H)$ обычно совмещают с батиграфическими кривыми.

Наряду с батиграфическими, обычно строят также *объемные кривые* – кривые наполнения площади водной поверхности и средней глубины водохранилища от объема воды в нем: $H(V)$, $\Omega(V)$ и $h_{cp}(V)$.

Батиграфические и объемные кривые строят в системе прямоугольных координат. Масштаб построения кривых принимают кратным 2, 5, 10, 20, 50 и т. д.

Кривые $V=V(H)$ и $H = H(V)$ имеют плавное очертание, остальные кривые, отражающие индивидуальные особенности топографии местности, строят по точкам, которые соединяют отрезками прямых.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волчек А.А., Курсаков В.К., Волчек Ан.А. Гидрометрическая практика. Горки : УО «БГСА», 2011. 240 с.
2. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия: учебное пособие Л. : Гидрометеиздат, 1972. 441 с.
3. Слабожанин Г.Д. Гидрометрия: учебное пособие к самостоятельной работе по гидрологии по направлению подготовки бакалавров 270800 «Строительство». Томск: ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», 2014. 58 с.
4. Посыпанов С.В. Гидрометрия: методические указания к проведению учебной практики (издание 2-е, переработанное и дополненное). Архангельск : РИО С(А)ФУ, 2010. 46 с.
5. Карасев И.Ф., Васильев А.В., Субботина Е.С. Гидрометрия: учебник для вузов по спец. «Гидрология суши». Л. : Гидрометеиздат, 1991. 375 с.
6. Быков В.Д., Васильев А.В., Гидрометрия: учебное пособие Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.