

**И. Ф. Карасев
И. Г. Шумков**

ГИДРОМЕТРИЯ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по гидрометеорологии
и контролю природной среды
для учащихся гидрометеорологических техникумов
в качестве учебника



Ленинград
Гидрометеоиздат
1985

УДК [556.04+556.071.08](075.3)

501.49
к21

Рецензенты: Московский гидрометеорологический техникум (В. П. Шабан), Харь-
ковский гидрометеорологический техникум (В. У. Шаман)

Излагаются сведения об организации и методах гидрологических наблюдений на реках, озерах и водохранилищах, оценивается точность и область их применения, описываются устройства, приемы и условия эксплуатации гидрологических приборов и вспомогательного оборудования. Излагаются методы учета стока воды и наносов, составления русловых водных балансов и балансов химических веществ и других видов контроля за использованием водных ресурсов по качественным и количественным показателям. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения гидрологических наблюдений.

Предназначен для учащихся гидрометеорологических техникумов, может быть полезен для студентов гидрометеорологических институтов и университетов, а также для специалистов, работающих на гидрологической сети Государственного комитета по гидрометеорологии и контролю природной среды, в гидроэнергетике и водном хозяйстве.

The book "Hydrometry" by J. F. Karasev and I. G. Shumkov gives information on the organization and methods for hydrological observations on rivers, lakes and reservoirs, and evaluates the accuracy and scope of their application; it describes devices, ways and conditions for the operation of hydrological instruments and auxiliary equipment. An emphasis is made to the methods for accelerated measurements of water discharges and other hydrological characteristics.

Methods are presented for a compilation of channel water balances and balances of chemical matters, as well as other types of control for water resources development according to qualitative and quantitative factors accomplished within the system of the national water resources inventory and water cadastre compilation. Problems of a metrological provision with hydrological observations are considered.

The textbook is intended for the students of hydrometeorological technical secondary schools. It may be of use for students of universities and hydrometeorological institutes, as well as for the specialists engaged in the hydrological network of the USSR State Committee for Hydrometeorology and Control of the Natural Environment, in hydroenergetics and water management.

Иосиф Филиппович Карасев

Игорь Григорьевич Шумков

ГИДРОМЕТРИЯ

Редактор Л. А. Чепелкина. Художник А. В. Никандров. Художественный редактор В. В. Быков. Технический редактор М. И. Браинина. Корректор А. В. Хюрлес.

ИБ № 1646. Сдано в набор 28.01.85. Подписано в печать 13.06.85. М-27907. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 24. Кр.-отт. 24. Уч.-изд. л. 26,53. Тираж 4770 экз. Индекс ГЛ-53. Заказ № 92. Цена 1 р. 10 к. Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Печатный переулок, 6.

К 1903030200-097 34-85
069(02)-85

Ленинградский Гидрометеоиздат, 1985 г.
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-х 195186 Малоохтинский пр., 96

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник подготовлен в соответствии с программой курса «Гидрометрия» для гидрометеорологических техникумов, утвержденной Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды.

Комплекс методов и средств измерений в значительной мере регламентирован Наставлениями гидрологическим станциям и постам, и естественно, курс гидрометрии должен опираться на содержащиеся в них положения в той мере, в какой это необходимо для обеспечения единства измерений — одного из основных требований законодательной метрологии. Вместе с тем гидрометрия, как и другие дисциплины, связанные с изучением природной среды, предполагает постоянное развитие и оптимизацию методов наблюдений для получения все более полной и достоверной информации о гидрологических процессах. В настоящее время осуществляется техническое переоснащение сети гидрологических станций и постов. Все более широкое распространение получают методы ускоренных (сокращенных) измерений расхода воды, модели оперативного и режимного учета стока, расчет русловых водных балансов и другие новые методические разработки. Все это освещено в учебнике, чтобы подготовить будущих техникумов-гидрологов к освоению усовершенствованных средств и методов наблюдений.

В действующих программах курса гидрометрии все еще сохраняется описание устаревших приборов, способов измерения и обработки их результатов (вычисление стока методом Стаута и приведение кривой расходов к основному сечению и т. п.). Все, что уже принадлежит истории гидрометрии, следует рассматривать не столько с точки зрения практического применения, сколько для более глубокого физического представления о соответствующих факторах, которым обязано появление тех или иных измерительных приемов и графических построений.

Процессы получения и обработки гидрологической информации в современных условиях сведены в отдельные комплексы, относящиеся соответственно к измерениям, интерпретации и обобщению данных, подготовки режимных изданий, содержанию и эксплуатации измерительной техники. Эти комплексы одновременно являются составной частью системы Государственного учета вод и водного кадастра, а также Общегосударственной службы наблюдений и контроля окружающей среды. Этим обусловлена необходимость отступить от традиционного построения курса гидрометрии, при котором весь состав работ — от измерений до обработки их результатов и получения таблиц для кадастровых изданий — излагался по каждому элементу режима в отдельности. В данном случае сохранено поэлементное описание процессов измерений, а операциям, связанным с учетом стока, ведением кадастра и метрологическим обеспечением, посвящены особые

главы и разделы. Так, при изложении процессов измерений описан порядок заполнения полевых книжек, а составление таблиц гидрологического ежегодника рассмотрено в главе 7, посвященной ведению Государственного учета вод и водного кадастра. В соответствующие комплексы включены работы, которые ранее описывались изолированно. Например, проведение инспекций гидрологических постов отнесено к числу мероприятий, связанных с ведением Государственного учета вод, а градуировка средств измерений рассматривается как один из видов работ по метрологическому обеспечению наблюдений.

В отличие от традиционных курсов гидрометрии, много внимания уделено оценкам точности и оптимизации наблюдений. В учебнике, насколько позволил его объем, освещены наиболее важные методические разработки отдела гидрометрии ГГИ и опыт гидрологических работ на сети станций и постов.

Большое место в книге отведено изложению объективно-статистических методов обработки данных как основных предпосылок использования ЭВМ. Хотя некоторые аналитические построения на первый взгляд могут показаться сложными, фактически для их усвоения достаточно математических знаний в объеме программы средней школы.

Термины и определения, принятые в учебнике, соответствуют Наставлениям, ГОСТам и положениям, установленным в методических руководствах по ведению Государственного водного кадастра.

При подготовке учебника работа была распределена следующим образом: введение, главы 1—4, 6, 8 и 9 в основном написаны И. Ф. Карасевым. Автором глав 5 и 7, а также разделов и подразделов 1.4, 1.5, 2.3, 2.4, 4.4.4, 4.5, 4.6.1, 8.3, 9.2 является И. Г. Шумков.

В подготовке материалов и разработках отдельных методических примеров для учебника принимали участие сотрудники отдела гидрометрии ГГИ — В. В. Алексеев, Л. А. Попова, А. В. Савельева, Н. К. Сибирякова, Т. И. Соколова, а в оформлении книги — Т. И. Маклакова и Т. В. Михайлова, за что им выражается сердечная благодарность.

И. Ф. Карасев

ВВЕДЕНИЕ. Предмет гидрометрии

Гидрометрия представляет собой раздел гидрологии суши — науки о режиме и ресурсах поверхностных вод (рек, озер и водохранилищ). Определенное указание на предмет гидрометрии заключено в самом ее названии, образованном из двух греческих слов, которые в переводе означают «вода» и «измеряю». Но, конечно, этим не исчерпывается содержание современной гидрометрии. Более полно она определяется как наука о методах наблюдений за режимом водных объектов, движением воды и наносов, применяемых при этом устройствах и приборах, а также способах обработки результатов измерений (ГОСТ 19179—73). К водным объектам, которые рассматривает гидрометрия, в общем случае относятся реки, каналы, озера и водохранилища. Вместе с тем некоторые разделы гидрометрии могут выступать как самостоятельные дисциплины, например речная гидрометрия и учет водных ресурсов, аэрогидрометрия, эксплуатационно-мелиоративная гидрометрия и т. п.

Первоначально гидрометрия развивалась как измерительная часть гидравлики рек и озер и ее предметом было определение главным образом гидравлических элементов — уровней воды и скоростей течения. Измерения на отдельных объектах выполнялись изолированно без взаимной увязки результатов наблюдений. С развитием гидрологических исследований коренным образом изменилось значение гидрометрии: в комплекс ее задач включается уже не только собственное измерение, но и методическое обоснование сети пунктов наблюдений, обеспечивающих более или менее целостное и систематическое изучение режима вод суши.

Источниками гидрологической информации служат гидрологические посты¹ — пункты наблюдения за комплексом элементов гидрологического режима (уровнями и расходами воды, ледовыми явлениями и температурой водных масс, наносами и зарастанием русла). Гидрологические элементы претерпевают непрерывные изменения во времени и по длине рек. Чтобы изучить закономерности этих изменений и контролировать состояние водных объектов, необходима регулярно действующая сеть постов на реках, озерах и водохранилищах. Размещение и плотность постов должны быть оптимальными. Это означает, во-первых, что требования к изучению гидрологического режима обеспечиваются при возможно меньшем количестве постов и, во-вторых, что результаты наблюдений на каждом из постов отражают условия, характерные для достаточно большого участка реки или определенного физико-географического района. Понятно, что такая сеть не может появиться в короткий срок, а складывается исторически, в течение более или менее длительного времени.

¹ Название «водомерные посты» противоречит комплексному характеру выполняемых на них наблюдений и является устаревшим.

Таблица 1

Основные этапы развития гидрологических наблюдений на территории СССР

Год	Этапы развития гидрологической сети
1879	Открытие массовой сети из 205 уровенных постов и начало систематических измерений расхода воды на крупных реках. Разработка инструкции по наблюдениям и поверке постов
1894	Организация постов на осушительных и оросительных каналах и на реках — источниках орошения и водоприемниках
1910—1913	Развертывание регулярных гидрологических наблюдений на малых реках. Численность сети к началу 1914 г. достигла 1134, из них 202 пункта учета стока
1919	Организация Государственного гидрологического института (ГГИ)
1921	Уменьшение численности гидрологической сети до 740, из них 165 пунктов учета стока
1929	Создание Единой гидрометеорологической службы СССР. Рост численности сети до 2708, из них 863 пункта учета стока
1927—1930	Организация отечественного производства гидрологических приборов
1940	Составление и начало реализации перспективного плана развития гидрологической сети. Численность сети — 4247, в том числе 2021 пункт учета стока Организация службы поверки гидрологических приборов
1945	Массовое открытие гидрологических постов на малых реках — 437 постов. Общая численность сети — 3772 поста
1946	Составление второго проекта генерального плана развития единой опорной сети гидрометеорологических станций и постов. Численность сети — 4077 постов, из них 1976 с учетом стока воды
1946—1962	Ускоренное развитие гидрологической сети — достигнутая численность гидрологических постов 6143, из них 4766 пунктов учета стока
1970—1974	Разработка третьего перспективного плана рационализации размещения и развития пунктов гидрологических наблюдений на реках, озерах и водохранилищах на 1975—1990 гг. Численность сети на 1970 г. — 6123, из них 4840 учитывающих сток
1975	Начало реализации перспективного плана развития сети
1985	Численность сети 7130 постов, в том числе 5550 с измерением стока воды

Первые устройства для наблюдений за уровнями воды появились в IV тысячелетии до нашей эры на р. Ниле — ниломеры. Регулярно действующие уровенные посты создаются в Европе лишь в XIII веке. Массовое развитие сети пунктов гидрологических наблюдений в России относится к 1874—1884 гг., хотя посты для наблюдений за уровнями Москвы-реки появились уже в середине XVII в., а в устье Невы — в 1705 г.

После Октябрьской революции вся совокупность гидрологических постов преобразована в единую опорную сеть наблюдений за режимом и состоянием водных объектов. Методическим центром этой сети является Государственный гидрологический институт (ГГИ), основанный в 1919 г. В ГГИ разрабатывались общесетевые методические руководства и планы развития гидрологической сети, приборы и техническое оснащение ее постов. Осуществление этих важных мероприятий в 20—30-е годы связано с деятельностью В. Г. Глушкова. В послевоенные годы большой вклад в развитие системы гидрологических наблюдений внесли В. А. Урываев, А. К. Проскуряков, О. Н. Борсук и др.

Рост численности гидрологических постов отражает развитие народного хозяйства, хотя и не всегда находился в общем соответствии его темпам (табл. 1). Так, некоторый застой в увеличении количества постов в 1965—1975 гг. сменился тенденцией ускоренного увеличения их численности в последние годы.

В современных условиях чрезвычайно возросла роль водного фактора в экономике и социальном развитии общества. В связи с этим в нашей стране осуществляется преобразование всей системы получения гидрологической информации, широко внедряются новые средства измерений, передачи и обработки данных (автоматические приборы, быстродействующие каналы связи, ЭВМ и т. п.).

Система гидрологических наблюдений

Система гидрологических наблюдений включает сеть станций и постов на реках, крупных каналах, озерах и водохранилищах, центры обработки данных и оперативно-прогностического обслуживания народного хозяйства (гидрометеорологические обсерватории).

Гидрологическим постом называется пункт на водном объекте, оборудованный устройствами и приборами для проведения систематических гидрологических наблюдений. Посты находятся в ведении **гидрологических станций**, которые осуществляют обслуживание и методическое руководство их работой. За гидрологической станцией закрепляется 12—20 постов.

Совокупность постов, расположенных на реках и озерах, образует **государственную гидрологическую сеть**. Она включает основные и специальные посты, находящиеся в ведении Госкомгидромета и его территориальных управлений.

Основные посты подразделяются на:

- реперные, предназначенные для изучения многолетних и вековых колебаний гидрологического режима (они могут быть перенесены или закрыты лишь в исключительных случаях);

- периодические, составляющие основную массу постов и обеспечивающие территориальную детализацию характеристик гидрологического режима; эти посты имеют ограниченный срок действия.

Состав наблюдений, выполняемых на основных постах, подразделяется на две программы:

- основную, включающую измерения расходов воды, наблюдения за уровнем и температурой воды, толщиной льда, шуги, наблюдения за метеоэлементами и визуальные наблюдения за состоянием реки (волнением, распространением водной растительности и ледовыми явлениями);

- дополнительную, в которую входят некоторые специальные элементы, характеризующие русловый режим, сток наносов, химический состав и качество воды.

Наблюдения по основной программе выполняются на всех гидрологических постах, хотя и не по всем элементам. Дополнительная программа устанавливается в зависимости от особенностей использования водных ресурсов в конкретных речных бассейнах.

Разряды гидрологических постов зависят от состава измеряемых гидрологических элементов: I — сток воды, уровень воды, сток наносов, температура воды, ледовый режим, химический состав воды (качество воды); II — те же наблюдения, кроме стока воды и стока наносов; III — только наблюдения за уровнем и температурой воды.

Специальные посты выполняют углубленные исследования режима вод суши по разработанным для них программам, которые, как правило, включают наряду со стандартными видами наблюдений, осуществляемых на постах основной сети (перечислены выше), некоторые особые виды наблюдений; например, испарение с водной поверхности, уровень грунтовых вод и т. п. Эти посты входят в состав наблюдательной сети станций, организуемых для изучения отдельных объектов или элементов режима вод суши. К таким станциям относятся:

- озерные, осуществляющие комплекс наблюдений за гидрологическим режимом озер и водохранилищ;

- болотные, изучающие гидрометеорологический режим и микроклимат болотных массивов с целью определения их роли в водном балансе и народном хозяйстве данного района;

- воднобалансовые, изучающие составляющие водного баланса и их взаимосвязь в различных физико-географических районах как в естественных условиях, так и в условиях орошения, проведения агротехнических и лесомелиоративных мероприятий.

Кроме государственной сети, находящейся в системе Государственного комитета по гидрометеорологии и контролю природной среды СССР, существуют гидрологические станции и посты ведомственного подчинения, организованные различными учреждениями

(хозяйственными, проектными, научными и др.) для специальных целей. Наиболее многочисленная сеть таких станций и постов создана Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР; эта сеть действует на оросительных системах и обеспечивает оперативный учет использования воды. Имеются гидрологические посты в системе Министерства речного флота РСФСР (на шлюзах и отдельных участках судоходных рек), а также в проектных организациях. Наблюдения на этих станциях и постах ведутся периодически (посезонно) или в течение ограниченного срока, обычно во время изысканий, выполняемых для проектирования и строительства сооружений.

Основная гидрологическая сеть взаимодействует с определенными звеньями, а частью входит в состав недавно созданных в нашей стране систем: государственного учета вод и их использования (ГУВ) и общегосударственной службы наблюдений и контроля за уровнем загрязнения объектов внешней среды (ОГСНК).

Система государственного учета охватывает все воды (водные объекты) и объекты водопользования промышленных, строительных, транспортных, сельскохозяйственных и иных предприятий, организаций и учреждений независимо от их ведомственной принадлежности.

Роль государственной гидрологической сети в системе ГУВ — учет ресурсов поверхностных вод. Для оценки запасов подземных вод существует сеть гидрогеологических станций Министерства геологии СССР. Учет использования водных ресурсов ведут Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР и предприятия-водопользователи.

Сеть ОГСНК включает стационарные и специализированные пункты наблюдений за уровнем загрязнения поверхностных вод по физическим, химическим и гидробиологическим показателям. В составе этой службы действуют также временные экспедиционные пункты для получения данных на водных объектах, не охваченных стационарными и специализированными наблюдениями.

В последнее время на территории Советского Союза организованы станции **фонового мониторинга** состояния окружающей среды. В их состав включаются и гидрологические посты, если в зоне наблюдений имеются водные объекты.

Как видим, комплекс гидрометеорологических наблюдений обширен и многообразен. Поэтому важно, чтобы наблюдения за элементами режима вод суши удовлетворяли условиям сопоставимости и единства измерений. Требования, которые при этом должны соблюдаться, излагаются в Наставлениях гидрометеорологическим станциям и постам, различных методических указаниях, метрологических руководствах и государственных стандартах. Основные положения этих важнейших документов приведены в главе 9. Однако для лучшего понимания содержания глав, посвященных измерению гидрологических элементов, остановимся на некоторых метрологических понятиях и характеристиках.

Сущность и показатели точности измерений

Любое измерение можно рассматривать как устранение некоторой части неопределенности наших представлений о состоянии предметов и явлений. В этом состоит познавательная роль измерений. Действительно, «наука начинается с тех пор, как начинают измерять» (Д. И. Менделеев). С метрологической точки зрения под измерением понимают «нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств» (ГОСТ 16263—70).

По способам получения результатов различают следующие виды измерений:

- прямые, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных;
- косвенные, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям;
- совокупные, производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин;
- совместные, производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними.

Конечно, результаты измерений всегда отклоняются от истинных значений измеряемой величины, хотя это истинное значение бывает неизвестно (иначе измерения не имели бы практического смысла). Необходимо в каждом случае сформулировать по крайней мере понятие об измеряемой величине. Такие определения понятий всегда существуют, они разработаны и для гидрометеорологических элементов. Характеристиками отклонения измеренных значений величин от истинных служат погрешности измерения. В зависимости от их происхождения различают:

- инструментальные погрешности, обусловленные погрешностями применяемых средств измерения;
- погрешности метода, происходящие от несовершенства используемых методов измерения.

По своим статистическим свойствам те и другие погрешности проявляют себя как случайные и систематические.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Отличительный признак случайных погрешностей — неопределенность их происхождения, так как они представляют собой следствие многих причин, из которых ни одна не принимает доминирующего характера. Этим объясняется тот факт, что случайные погрешности чаще всего подчинены нормальному закону распределения. Их положительные и отрицательные значения равноверо-

ятны. Этим объясняется статистическое сглаживание погрешностей многократных измерений.

Если результаты ряда равноточных измерений $X_1, X_2, \dots, X_N$ представляются средним арифметическим

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N X_i / N, \quad (1)$$

то оценкой для средней квадратической погрешности отдельного измерения служит выражение

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}. \quad (2)$$

Средняя квадратическая погрешность самой арифметической середины равна

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma_X / \sqrt{N}. \quad (3)$$

Достаточно точные значения характеристик $\bar{X}$, σ_X и $\sigma_{\bar{X}}$ получаются лишь при сравнительно большом числе измерений (25—30).

В гидрологических и водохозяйственных расчетах важно знать возможное предельное значение случайной погрешности m_p , которое зависит от принимаемой (доверительной) вероятности ее неперевышения p . В большинстве случаев исходят из равенства $p=0,95$, при этом

$$m_{0,95} = 1,96\sigma_X.$$

Систематические погрешности, в отличие от случайных, остаются постоянными или изменяются закономерно при повторных изменениях одной и той же величины, сохраняя связь с вызывающими их факторами. Когда такие факторы выявлены и оценено значение систематической погрешности Δ , она должна быть исключена из результатов измерения введением поправки, равной Δ по значению, но с противоположным знаком. Если этого не удалось сделать, остается некоторая неисключенная часть систематических погрешностей Δ , которая в общем случае может меняться от измерения к измерению. Считается, что Δ следует закону равномерного распределения, что дает основание установить наибольшее значение этой погрешности:

$$m_{\Delta} = \sqrt{3}S_{\Delta}, \quad (4)$$

где S_{Δ} — оценка среднего квадратического отклонения неисключенных остатков систематических погрешностей.

Результаты измерений могут содержать грубые погрешности (промахи наблюдений). Они бывают связаны с резким нарушением условий измерения из-за непредвиденного постороннего вмешательства, неисправности приборов и пр. Промахи должны

исключаться из совокупности результатов измерения с использованием соответствующих критериев. Например, согласно критерию Ф. Греббса, значение X должно быть отброшено, если при доверительной вероятности $p=0,95$ и объеме выборки (количестве измерений) $N=10\div 25$ имеет место неравенство

$$|X - \bar{X}|/\sigma_X > (2,30 \div 2,70). \quad (5)$$

Общая погрешность результатов измерения характеризуется суммарной погрешностью, которая включает случайные и систематические погрешности. При взаимной независимости частных погрешностей средняя квадратическая погрешность результата выражается геометрической суммой составляющих

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}. \quad (6)$$

Эта формула имеет наиболее широкое практическое применение.

Приведенные правила суммирования применяются и в том случае, когда результирующая погрешность образуется из совокупности случайных и систематических составляющих.

Для оценки точности результатов косвенных измерений применяется метод частных погрешностей. В его основе лежит представление результирующей погрешности σ_p как совокупности составляющих σ_i , которые относятся к результатам прямых измерений X_i . Определение σ_p производится по формуле, сходной с (6), но включающей весовые коэффициенты k_i для частных погрешностей σ_i

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N k_i^2 \sigma_i^2}. \quad (7)$$

Значения k_i зависят от вида измерительной функции $F(X_i)$ и степени взаимной корреляции (связанности) погрешностей σ_i .

Оценка точности измерения многих гидрологических элементов осложняется невозможностью непосредственного сравнения получаемых результатов с показаниями эталонных и образцовых средств измерения. Однако гидрометрия знает другой путь решения этой задачи: в качестве эталонных (действительных) значений используются результаты серии косвенных измерений в одних и тех же условиях или единичных (отдельных) измерений, выполненных при повышенной дискретности (детальности) и точности определения элементов X_i .

Исследование погрешностей измерений важно не только для оценки качества получаемой информации, но и для оптимизации самих измерений. Цель оптимизации — обеспечить требуемую точность данных при наименьших затратах труда и времени на выполнение измерительных операций.

При оптимизации косвенных измерений используется принцип

равного или исключенного влияния частных погрешностей на точность получаемого результата. Согласно ГОСТу 1297—76, влияющую величину можно считать не оказывающей воздействия на точностную характеристику, если вызванное ею изменение не превосходит одной пятой от значения этой характеристики.

Если оптимизируется погрешность измерений σ_n и их частота (дискретность) во времени и пространстве, принимается во внимание среднее квадратическое значение отклонений элемента от нормы σ_x и корреляция между ними. Оптимальным можно считать соотношение

$$\sigma_n \leq (0,5 \div 0,65) \sigma_x.$$

Описание методов оптимизации наблюдений можно найти в Наставлениях и специальных руководствах. Приведенные общие положения и зависимости ниже будут конкретизированы в виде расчетных формул для погрешностей измерения уровней, расходов воды и других элементов режима рек, озер и водохранилищ.

1.1. Водный режим рек

Многообразные процессы и явления, наблюдающиеся на реках, в совокупности определяют их *гидрологический режим*. В более узком смысле к *водному режиму* относятся колебания уровней, скоростей течения и расходов воды, а к термическому — изменение температуры воды и ледовому — процессы ледообразования.

Водный режим характеризуют два основных взаимосвязанных элемента:

уровень воды — высота водной поверхности над условной горизонтальной плоскостью сравнения;

расход воды — объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени.

Уровень воды наиболее доступен для измерения и вместе с тем — это один из весьма информативных гидрологических элементов.

В гидрологии данные уровенных наблюдений используются для учета речного стока по связи расходов с уровнями воды.

По температуре воды можно судить о ее качестве, развитии в ней водолюбивых растений и организмов. Данные о процессах охлаждения воды позволяют предсказывать начало наступления ледовых явлений.

В сведениях об уровнях и температуре воды заинтересованы многие отрасли народного хозяйства. Данные об уровнях необходимы для организации судоходства и лесосплава на реках, так как на их основе определяются транзитные глубины русла. Уровни воды — важная составная часть информации, используемой при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений. С учетом амплитуды колебания уровней назначаются отметки и размеры подпорных сооружений и водопропускных отверстий, устанавливается высота незатопляемых территорий и глубина заложения водозаборов.

1.1.1. Фазы водного режима

Различают три главнейшие фазы водного режима: половодье, паводки и межень.

Половодьем называется фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и ледников. Фаза водного режима,

которая может многократно повторяться в различные сезоны и характеризуется интенсивным обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей, называется *паводком*. В природе часто наблюдается сочетание снеготаяния и дождевых осадков. В этом случае отнесение фазы режима к половодью или паводку зависит от преобладания снегового или дождевого питания.

В отличие от высоководных фаз, *межень* характеризуется длительным стоянием низких уровней и расходов воды. Собственно меженью называют период, когда реки переходят на подземное пи-

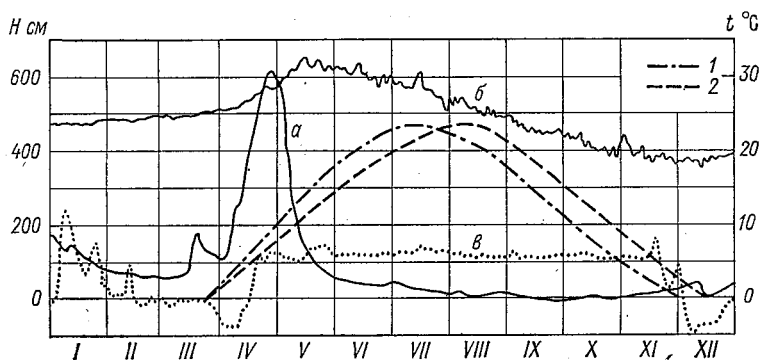


Рис. 1.1. Графики колебания уровней и температуры воды р. Дона.

Уровни воды за 1969 г.: а — ст-ца Казанская (естественный режим); б — г. Калач (зона подпора Цимлянского водохранилища); в — ст-ца Николаевская (нижний бьеф). Температура воды по ст-це Николаевской: 1 — в естественных условиях; 2 — после создания водохранилища.

тание. Она наблюдается как летом, так и зимой и может быть устойчивой и прерывистой.

В естественных условиях фазы водного режима вполне отчетливо прослеживаются на графиках колебания уровня воды. В большинстве случаев они имеют сезонный характер. Начало половодья соответствует дате заметного и непрерывающегося подъема уровня (рис. 1.1 а). Создание водохранилища приводит к существенным преобразованиям водного и термического режима реки не только на участке, превращенном в искусственный водоем, но и далеко за его пределами. В зоне выклинивания подпора фаза половодья оказывается всякий раз незавершенной (рис. 1.1 б). В нижнем бьефе в результате попусков из водохранилища практически исчезает фаза межени (рис. 1.1 в). Температура воды здесь в весенний период повышается позже, чем до создания водохранилища, а осенью задерживается остывание воды.

1.1.2. Суточный ход и местные изменения высоты уровней

Изменения уровней, обусловленные сменой фаз водного режима, имеют общий (фоновый) характер. На них накладываются колебания в течение суток — *суточный ход уровней*. Сутки — естественный

период, которому следуют циклы изменения температуры воздуха, солнечной радиации и интенсивности испарения, что в свою очередь приводит к соответствующим изменениям уровня и температуры воды.

Общий характер суточного хода уровня определяется особенностями питания реки. При ледниковом питании наблюдается одно волнообразное повышение уровня (рис 1.2). Прохождение пика паводка по отношению к моменту максимума температуры воздуха запаздывает на время, которое зависит от площади водосбора.

Более сложны условия формирования снеговых и дождевых паводков. Снеготаяние, наступающее в результате общего потеп-

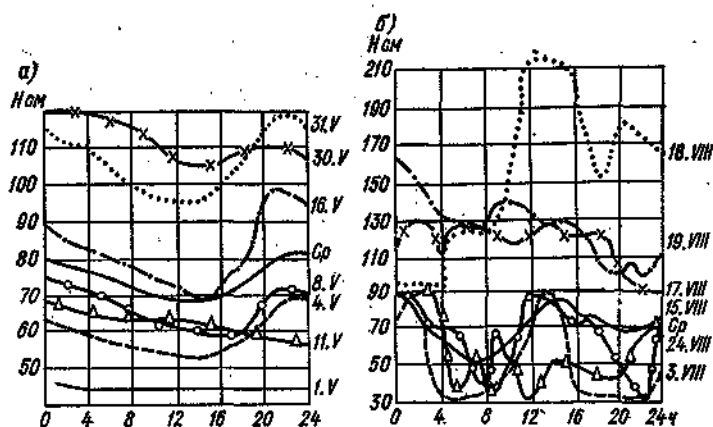


Рис. 1.2. Суточный ход уровня на горных и предгорных реках.

а — р. Каракол — устье р. Кашкасу, 1969 г.; б — р. Риони — с. Намохвани, 1977 г.

ления на всей площади бассейна, создает волну половодья. Конкретный характер суточного хода уровня зависит от чередования потеплений и похолоданий, а также от положения частей бассейна, где они наблюдались. В горных областях снеготаяние нередко создает несколько волн паводка в течение суток.

Влияние дождей на колебания уровня зависит от их характера — обложной дождь или пятнистый (локальный). В первом случае волны паводков растягиваются на несколько суток, во втором — резкие подъемы и спады укладываются в одни сутки.

На горных реках нередко наблюдается суточный ход уровня, обусловленный испарением с водной поверхности. Он становится особенно заметным к осени, когда стаивают последние снежники в горах.

Преобладающая амплитуда суточного хода уровня на реках Советского Союза составляет 0,5—1,0 м, количество пунктов с суточным ходом уровня достигает 3200, или более половины общей численности гидрологических постов.

Одно из распространенных явлений на реках — *переменный подпор* уровня. Подпор приурочен к сужениям и расширениям речных долин и русел. Переменные подпоры — характерная особенность хвостовых зон водохранилищ, созданных в долинах рек. Сложная картина хода уровня наблюдается в месте впадения в основную реку крупных притоков при несовпадении фаз их водного режима.

Большие подъемы уровня возникают при мощных заторах (в среднем 3—5 м) и зажорах (1—2 м).

На устьевых участках многих рек, впадающих в открытые моря, происходят заметные колебания уровня, вызванные влиянием приливов, которые иногда распространяются на значительные расстояния (например, до 250—300 км на реках Хатанге и Анадыре, до 120 км на Северной Двине).

Значительные подъемы уровня в устьях рек, впадающих в море, возникают при подходе так называемых длинных волн, которые появляются первоначально на большом удалении в открытом море. Длинные волны — одна из основных причин катастрофического подъема уровней в Невской губе и наводнений в Ленинграде.

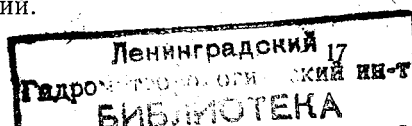
Воздействие ветра на водную поверхность создает *сгоны* и *нагоны* уровня, которые особенно заметны на широких и открытых участках рек.

Под влиянием центробежных сил инерции на поворотах русла создаются местные *перекосы водной* поверхности. Разность уровней у противоположных берегов обратно пропорциональна радиусу кривизны русла и растет с увеличением скоростей течения. На горных реках эта разность нередко достигает 0,4—0,8 м.

Еще одна причина перекоса уровней — сила инерции Кориолиса, возникающая под влиянием вращения Земли. В северном полушарии она вызывает повышение уровня у правого берега. Однако этот перекося водной поверхности относительно мал и даже на больших реках в средних широтах составляет лишь несколько сантиметров.

1.2. Организация и оборудование гидрологических постов

Качество информации, получаемой на гидрологических постах, во многом зависит от того, насколько рационально они размещены. Положение поста как пункта наблюдений устанавливается в планах развития и рационализации гидрологической сети, которые разрабатываются в УГКС. Выбор же участка наблюдений и расположения постовых устройств осуществляется с учетом местных условий. Определить наилучшее место для создания гидрологического поста может только достаточно опытный специалист-гидролог. Перенос поста с одного места на другое связан с большими материальными затратами и крайне нежелателен из-за возможного нарушения непрерывного ряда наблюдений.



1.2.1. Требования к участку реки и выбор местоположения гидрологических постов

Гидрологический пост — пункт на водном объекте, оборудованный устройствами и приборами для проведения систематических гидрологических наблюдений. Пост дает так называемые *точечные* данные. По ним судят о состоянии реки на некотором ее протяжении вверх и вниз по течению от поста. Отсюда вытекает первое требование к участку наблюдений: он должен быть характерен для достаточно большого протяжения реки с тем, чтобы получаемая информация соответствовала происходящим на ней явлениям и процессам. Движение потока в его пределах должно оставаться близким к равномерному. Для этого практически достаточно, чтобы на протяжении по крайней мере трех-пятикратной ширины между бровками меженного русла уклоны водной поверхности и профили поперечных сечений оставались сравнительно однообразными. Существенно также, чтобы скорость потока сохранялась (была заметной) по всей ширине русла, а направление течения оставалось по возможности параллельным берегам. Иными словами, должны быть исключены косоstrуиность и резкая неравномерность распределения скоростей потока по ширине русла.

Известно, что на реках чередуются относительно мелководные участки (перекаты) и глубокие (плесы). Посты всегда следует располагать на плесовых участках, где гидрологические условия более благоприятные (равномерный поток, достаточные глубины и т. п.), чем на перекатах. Что касается горных рек, то там удобно вести наблюдения выше порогов и стремнин, где течение сравнительно спокойное, а русло менее загромождено камнями.

Предпочтительно располагать посты на беспойменных участках, но если этого не избежать, пойма должна быть не слишком широкой, без староречий и значительных зарослей кустарника.

Вообще на участке наблюдений по возможности должны отсутствовать вовсе или слабо проявляться факторы, нарушающие правильность течений или искажающие связь уровней и расходов воды (деформации и значительное зарастание русла, заторы льда, переменный подпор и т. п.).

По условиям удобства наблюдений гидрологические посты целесообразно располагать на неразмываемых берегах средней крутизны ($20-30^\circ$). Подходы к постам должны быть удобны и безопасны как в половодье, так и в межень. Не следует располагать их вблизи причалов судов и в зонах отдыха на воде. Важно, чтобы посты находились по возможности вблизи средств телефонно-телеграфной связи. Если пост открывается на участке, где существует или намечается построить гидротехнические сооружения, необходимо по данным технического проекта определить дальность распространения подпора от них L . Если такие данные отсутствуют,

можно воспользоваться формулой, приведенной в Наставлении вып. 6, ч. 1:

$$L = a(h_0 + z)/i,$$

где h_0 — средняя глубина при отсутствии подпора, м; z — значение подпора (разность уровней верхнего и нижнего бьефов), м; i — средний уклон водной поверхности при отсутствии подпора, выраженный в относительных единицах (не в промилле). При отсутствии данных об уклоне водной поверхности он может быть заменен осредненным значением уклона дна реки; a — коэффициент, зависящий от отношения z/h_0 и определяемый по следующим данным:

z/h_0	5,0	2,0	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
a	0,96	0,91	0,85	0,76	0,67	0,58	0,41	0,24

Как видим, перечень условий, которые должны быть учтены при открытии постов, достаточно широк. Поэтому, кроме изучения карт и описаний реки, необходимо провести рекогносцировочное обследование.

1.2.2. Рекогносцировочное обследование и съемка участка реки

Рекогносцировка — это разновидность экспедиционных исследований участка реки с двумя основными целями: 1) выбрать благоприятный для наблюдений участок расположения поста, 2) оценить диапазон изменений характеристик гидрологического режима, которые будут изучаться на гидрологическом посту, а именно: уровней воды, глубин и скоростей потока, мутности воды, условий ледообразования и т. п.

Рекогносцировочное обследование целесообразно проводить дважды: при низком уровне летней межени и в период весеннего половодья или паводка. Все работы выполняются начальником или инженером гидрологической станции при участии техника-гидролога.

После ознакомления с картографическими материалами проводится маршрутное обследование изучаемого участка реки для выбора наиболее благоприятного местоположения поста. При этом не выполняются трудоемкие измерения, а лишь по внешним признакам, о которых говорилось выше, определяется пригодность участка для организации гидрологических наблюдений.

После того как сделан выбор, все внимание рекогносцировочной группы обращается на оценку условий, в которых окажется пост. Выясняется возможность и причины переменного подпора, зажоров, заторов льда, оценивается устойчивость берегов, условия измерения в половодье и зимний период. Особое значение имеет определение амплитуды колебания уровня воды. Важно отыскать следы и метки максимальных уровней. Иногда их делают несмы-

ваемой краской и зарубками на деревьях, устоях мостов и стенах зданий. На эти метки укажут местные жители.

Значительный и наиболее трудоемкий этап рекогносцировки — топографическая съемка участка и высотное обоснование гидрологического поста.

Топографическая съемка представляет собой совокупность геодезических измерений, выполняемых для получения плана местности. Различные виды и порядок топографических съемок описываются в курсах геодезии и инструкциях ГУГК при Совете Министров СССР. Для составления планов участка гидрологического поста производится тахеометрическая и мензульная съемка; в труднодоступных районах прибегают к аэрофотосъемке.

На реках шириной до 100 м протяженность участка съемки равна пятикратной ширине меженного русла ($5B$), а на более крупных реках она может быть сокращена до $(2-3)B$. Отдельно снимается участок гидрометрического створа, если он значительно удален от створа уровненных наблюдений.

Масштаб съемки рассчитывается так, чтобы меженное русло реки занимало на планшете полосу шириной не менее 4—5 см. Значения масштабов в зависимости от ширины русла B следующие:

B м	50	50—100	100—500	500
M	1:1000	1:2000	1:5000	1:10 000

Съемка местности начинается с разбивки сети пунктов планового и высотного обоснования. При крупномасштабной съемке эта сеть состоит из магистрали и поперечных профилей, которые закрепляются реперами, угловыми знаками и пикетами. Их плановое и высотное положение определяется с высокой точностью. На реках шириной до 200 м магистраль прокладывается лишь по одному берегу. Пикеты по длине магистрали располагаются на равных расстояниях (через 100 м). Одновременно могут быть разбиты промерные поперечники через 20 или 50 м. При большей ширине реки магистраль разбивается на каждом берегу, чтобы обеспечить достаточную точность съемки. Обе магистрали должны образовывать замкнутый полигон, причем увязка его N внутренних углов должна быть такой, чтобы их сумма была близка к теоретической $S=180(N-2)$. Допускаемые расхождения регламентируются в инструкциях.

Стороны магистралей и полигонов измеряются оптическими дальномерами, стальными лентами и рулетками дважды — в прямом и обратном направлении. Расхождение результатов не должно превышать $0,001 l$ — их полусумма принимается за действительную длину измеряемой стороны l .

Высотное обоснование производится после разбивки магистрали и поперечников. При этом осуществляется двойное нивелирование всей сети закрепленных пунктов и характерных точек местности (цоколей каменных зданий, площадок бетонных

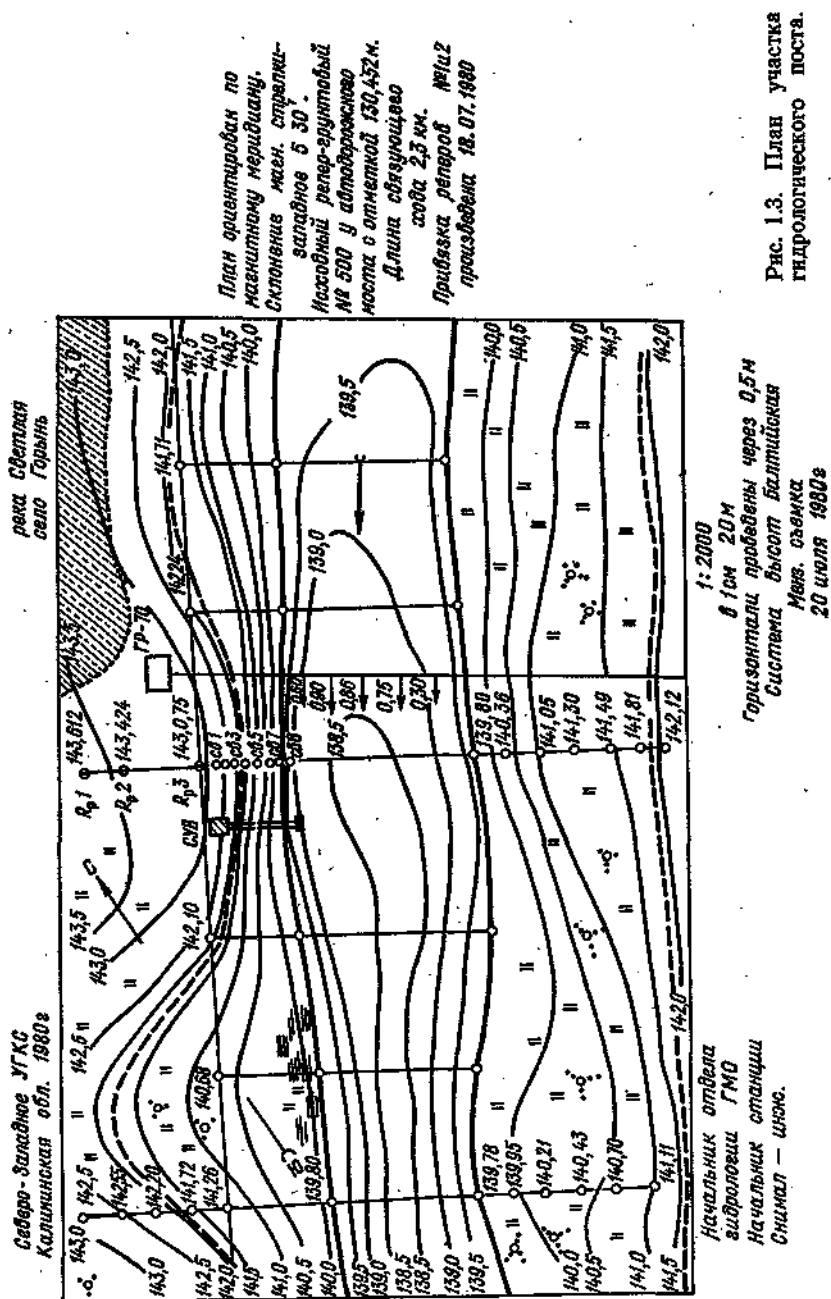


Рис. 1.3. План участка
гидрологического поста.

сооружений и т. п.), включая следы и метки высоких уровней. Вслед за тем приступают к промерам русла и съемке береговой ситуации. Следует иметь в виду, что на плане требуется с достаточной полнотой отобразить условия движения потока для всей амплитуды колебания уровней, особенно в половодье. Поэтому необходимо воспроизвести очертания коренных берегов, контуры кустарника и различных пойменных угодий, установить отметки уровня, при которых начинается течение в протоках, староречьях и в отдельных частях поймы.

После завершения съемочных работ оформляется топографический план участка (рис. 1.3) и поперечные профили русла с использованием общепринятых условных обозначений.

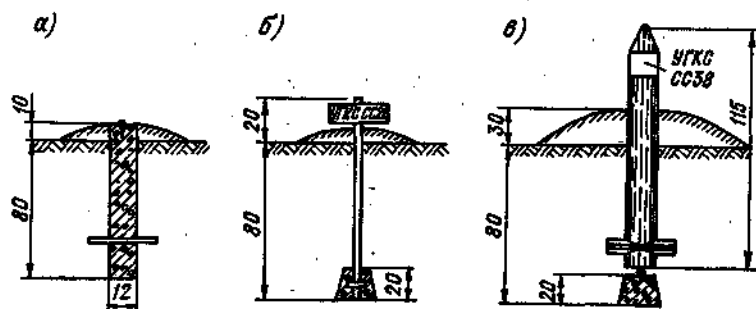


Рис. 1.4. Долговременные знаки закрепления съемочных сетей.

а — бетонный пилон; б — отрезок железной трубы, рельса или углового железа с бетонным монолитом; в — деревянный столб с крестовиной на бетонном монолите. Размеры знаков, их заглубление и высота насыпи указаны в см.

Изображение реки на плане дается линиями урезов воды в момент съемки и при наивысшем (историческом) уровне с указанием отметок высот. Рельеф русла и берегов изображается в горизонталях. Их сечение назначается через 0,25; 0,5 или 1,0 м в зависимости от сложности рельефа и масштаба съемки. На поперечных профилях показывается рабочий и наивысший уровень воды, а профиль поверхности земли на каждом берегу должен превышать последний на 0,5—1,0 м.

После того как нанесены все элементы ситуации (дороги, мосты, береговые сооружения и угодья), на плане и поперечном профиле русла намечают расположение постовых сооружений и устройств. Затем производят горизонтальную привязку, нивелировку знаков съемочной сети и реперов. Их положение рекомендуется закреплять. Этим создается возможность повторного использования съемочной сети и высотного обоснования.

В качестве знаков закрепления съемочных сетей долговременного типа применяются:

— бетонные пилоны (столбы) размером $12 \times 12 \times 90$ см (рис. 1.4 а);

- железные трубы диаметром 35—60 мм, отрезки рельсов или углового железа с бетонным якорем-монолитом (рис. 1.4 б);
- деревянные столбы диаметром не менее 15 см с крестовиной, опирающейся на бетонный монолит (рис. 1.4 в).

1.2.3. Оборудование гидрологических постов

Условия наблюдений на реках многообразны и часто бывают весьма сложны. Чтобы обеспечить возможность регулярных наблюдений при любых фазах режима, гидрологические посты должны быть оснащены соответствующим оборудованием и устройствами, обеспечивающими безопасный доступ к местам наблюдений.

Постовые устройства и оборудование подразделяются на четыре группы соответственно различным комплексам наблюдений и работ:

- устройства и приборы для наблюдения за уровнем и температурой воды;
- установки и средства измерения расходов воды и наносов (включая приборы для отбора проб на химический анализ растворенных и загрязняющих веществ);
- установки и приборы для наблюдения за температурой воздуха, осадками и другими метеорологическими элементами;
- знаки плановой и высотной основы — реперы, которые служат для контроля неизменности положения постовых устройств и точек отсчета уровней.

В дальнейшем рассматриваются приборы и постовое оборудование для отдельных видов гидрометрических наблюдений и работ.

1.2.4. Простейшие устройства для наблюдений за уровнями воды

По конструкции устройства для наблюдений за уровнем воды подразделяются на простейшие (реечные, свайные, смешанные реечно-свайные, передаточные) и автоматизированные.

Реечные устройства состоят из одной или нескольких деревянных или металлических реек, укрепленных на стенках набережных, устоях мостов и плотин (рис. 1.5 а). Если пост создается в зоне неукрепленного берега, то при небольшой амплитуде колебания уровней (до 3 м) рейка может быть установлена на специально забитых одиночных сваях (рис. 1.5 б) или кустах свай (рис. 1.5 в). Глубина забивки должна составлять не менее 2 м, а место для устройства поста выбирается так, чтобы обеспечивалась сохранность рейки и неизменность ее высотного положения. С этой целью рейки иногда устанавливают в береговых ковшах или естественных выбоинах берега (рис. 1.6). При размещении поста на сооружениях рейка укрепляется в наиболее защищенных от пływущих предметов и льдин местах (с низовой стороны или боковых стенках устоев).

Наиболее проста деревянная рейка. Она представляет собой брус сечением 14×4 см длиной до 3—4 м, на лицевой стороне

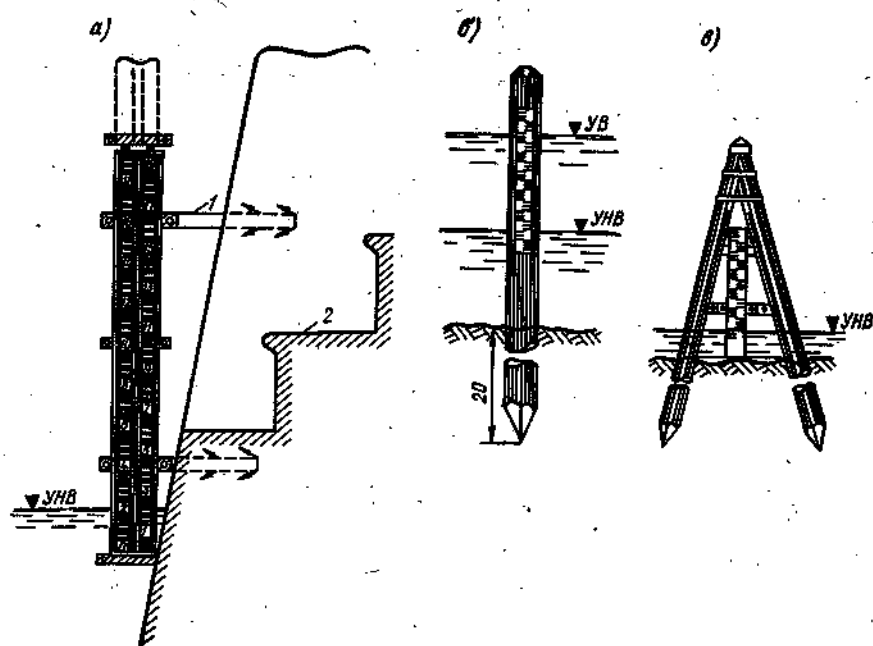


Рис. 1.5. Реечные посты на стенке мостового устоя (а), одиночной свае (б) и кусте свай (в).

1 — кронштейны для крепления рейки к стенке; 2 — ступени для подхода к рейке.

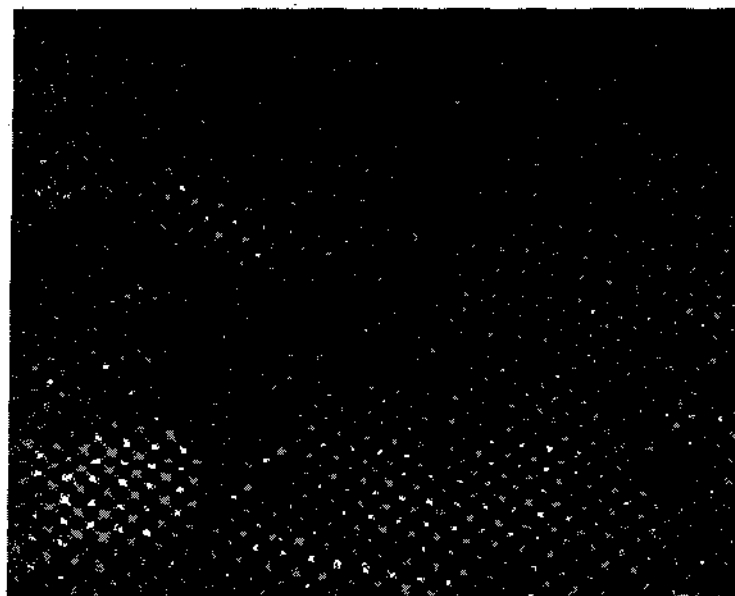


Рис. 1.6. Рейки в береговом ковше.

которого масляной краской или способом вырезания (выжигания) нанесены деления через 2 см и дециметры.

Из-за недолговечности деревянных реек им предпочитают чугунные или металлические эмалированные рейки, изготавливаемые на заводах.

Чугунная рейка (рис. 1.5 а) собирается из отдельных чугунных пластин, укрепляемых на прочном бруске, и крепится на откосе или опоре с помощью металлических пластин с отверстиями для болтов. Шкалу рейки с делениями через 2 см образуют фарфо-



Рис. 1.7. Наклонная рейка на бетонном откосе.

ровые вкладыши. Их при необходимости можно заменять запасными. Чугунная рейка достаточно долговечна и прочна.

Более легка рейка из листовой стали длиной 0,5 м и сечением 120×3 мм с делениями из цветной эмали.

В зависимости от амплитуды колебания уровней рейка может быть составлена из различного количества пластин-звеньев. Нулевое деление рейки должно быть опущено на 0,2—0,5 м ниже наименьшего уровня, а верх рейки поднят на столько же выше наивысшего уровня.

Установка реек в вертикальном положении вблизи отлогих берегов связана с некоторыми затруднениями. Более просто на откосе можно укрепить наклонные рейки. Они особенно удобны на откосах с бетонным покрытием и лестничными спусками (рис. 1.7). Разметка рейки производится в зависимости от угла ее наклона к горизонту α . Если цена деления по вертикали равна h , то длина одного деления наклонной рейки составит $l = h / \sin \alpha$.

Свайные устройства получили наибольшее распространение. Они наиболее удобны на равнинных реках при значительной

амплитуде колебания уровня воды и сравнительно отлогих берегах. Свайное устройство состоит из ряда свай, забитых в одном створе по нормали к направлению течения реки (рис. 1.8).

Места для свай назначают на заранее построенном поперечном профиле реки, полученном по данным нивелировки. При этом должны соблюдаться следующие условия:

1) головка верхней сваи должна быть на 0,25—0,50 м выше наивысшего уровня, а нижней сваи — на 0,25—0,50 м ниже наинизшего уровня;

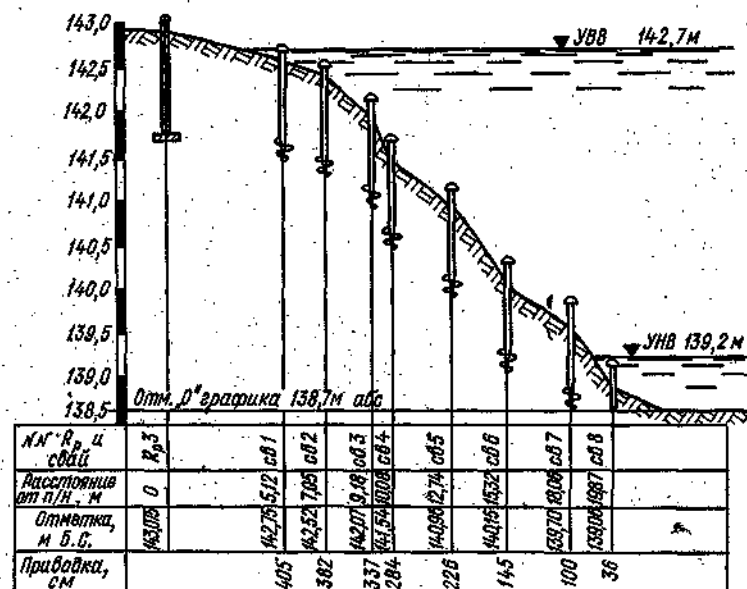


Рис. 1.8. Свайный гидрологический пост.

2) превышение одной сваи над другой должно составлять 0,30—0,80 м и во всяком случае оно назначается с таким расчетом, чтобы расстояние между сваями не превосходило 2,0 м.

Высотное положение свай не должно изменяться. С этой целью их следует забивать на глубину 1,5—2,0 м, но обязательно до непромерзающего слоя грунта с углублением в него на 0,5—0,7 м. В зоне многолетней мерзлоты свая должна проходить весь деятельный слой и заглубляться в мерзлый грунт не менее чем на 0,5 м. На ту же глубину свая должна входить в плотный подстилающий слой, если выше располагаются слабые илистые или торфянистые грунты.

В плотных породах или при наличии в грунтах включений валунов сваи приходится не забивать, а закапывать. При этом нижний конец деревянных свай снабжается крестовиной, а низ металлических заделывается в бетонный монолит.

Сваи забиваются вертикально в намеченных местах и в одном створе (по натянутому шнуру). Головки свай не должны возвышаться над землей более чем на 0,1—0,2 м.

Сваи изготавливаются из различных материалов: дерева, металла и железобетона.

Для изготовления деревянных свай следует использовать дубовые и лиственничные бревна диаметром 20—25 см. Их нижние концы заостряются на три-четыре грани и оковываются полосовым железом, а верхние снабжаются бугелями, которые предотвращают размочаливание древесины при забивке. Чтобы предохранить сваи от гниения, их обугливают или осмаливают, но лучше использовать дерево, подвергнутое заводской антисептической пропитке.

Металлические стандартные сваи изготавливаются на заводах (лишь в редких случаях используют различные заменители: куски балок, рельсов и труб). Серийно выпускаемая металлическая свая ПИ-20 состоит из чугунного винта, металлической трубы и головки (рис. 1.9). Труба заполнена битумом, а все части скрепляются заклепками. Длина свай 2,16 м. В грунт свая закручивается спе-

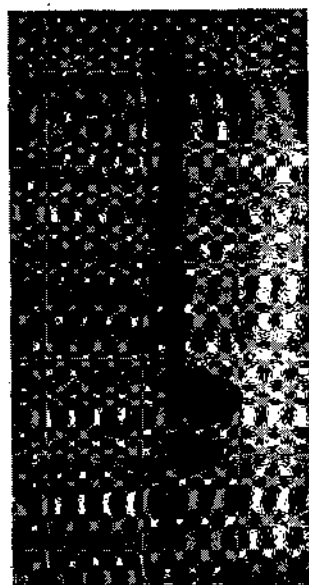


Рис. 1.9. Металлическая свая ПИ-20.

циальным ключом так, чтобы над поверхностью земли возвышалась лишь ее головка.

Железобетонные сваи при необходимости могут быть заказаны на заводах железобетонных конструкций.

После установки сваи окрашиваются и нумеруются по порядку — от контрольного репера вниз, начиная с верхней. Головки свай окрашиваются белилами, а номера проставляются красной или черной краской на стороне, обращенной к реке. В центр каждой деревянной сваи забивается гвоздь или штырь с широкой шляпкой.

Высота уровня воды на свайных устройствах измеряется переносными рейками, которые ставятся на штырь деревянной или головку металлической сваи, ближайшей к берегу из числа затопленных.

Переносные рейки размечаются через 1 см. Они могут быть деревянные — брусок ромбического сечения длиной 1,10 м, но чаще применяют металлические рейки двух типов. Рейка ГР-104

(рис. 1.10 а) изготавливается из дюралюминиевой трубки диаметром 25 мм с деревянной ручкой; длина рейки 100 см.

Сложнее конструкция рейки с успокоителем ГР-23 (рис. 1.10 б).

Она представляет собой резервуар ромбовидного сечения, склеенный из пластмассовых пластин, на которые нанесена шкала с делениями через 1 см и оцифровкой через 10 см. В основании рейки имеется отверстие, перекрываемое клапаном. При измерении рейка погружается в воду с открытым клапаном. После заполнения рейки водой клапан закрывают, извлекают рейку из воды и отсчитывают высоту установившегося уровня.

Кроме обычных реек, на постах устанавливаются так называемые максимальные рейки, предназначенные для измерения наивысших уровней между сроками наблюдений.

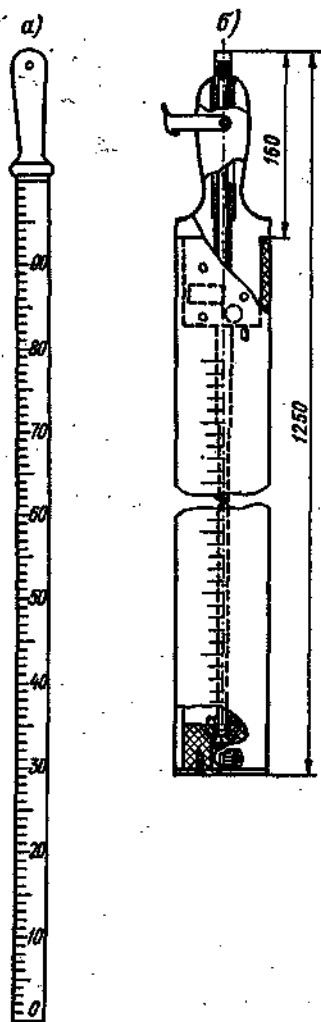


Рис. 1.10. Переносные рейки.

а — рейка ГР-104, б — рейка с успокоителем ГР-23 (размеры в мм).

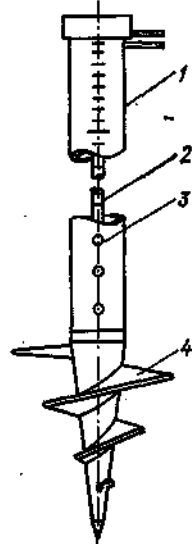


Рис. 1.11. Максимальная рейка ГР-45.

1 — труба, 2 — шток, 3 — отверстия, 4 — винтовой наконечник.

Максимальная стандартная рейка ГР-45 (рис. 1.11) представляет собой трубу с отверстиями. Посредством винтового наконечника рейка ввинчивается в грунт. Во внутреннюю полость рейки вставляется шток с сантиметровыми делениями. Поверхность

штока окрашивается мелом. Максимальный уровень определяется по высоте смытого мелового слоя. Диапазон измерения составляет 1,5 м.

Смешанные реечно-свайные устройства целесообразно устраивать при резких переломах в профиле берега или вблизи набережных и мостовых устоев. Их оборудование включает несколько свай, забитых в пологой части берегового откоса, и реек, устанавливаемых вертикально на сваях или стенках сооружений.

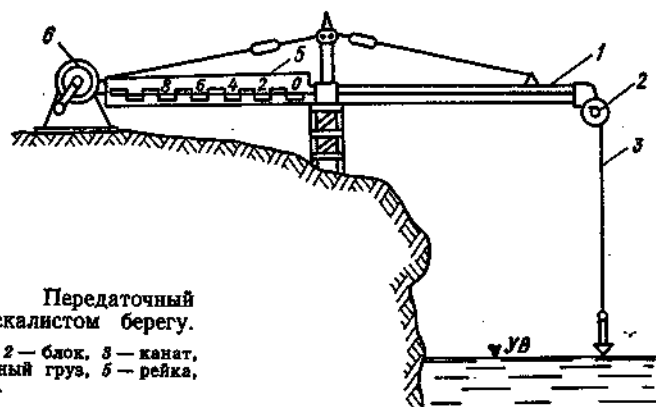


Рис. 1.12. Передаточный пост на скалистом берегу.

1 — стрела, 2 — блок, 3 — канат, 4 — контактный груз, 5 — рейка, 6 — вьюшка.

Передаточные устройства представляют собой простейшие дистанционные установки, устраиваемые на реках с обрывистыми берегами, где доступ к воде затруднен. Основная его часть — стрела с блоком, через который перекидывается тонкий стальной канат с контактным грузом (рис. 1.12). Вдоль стрелы закрепляется рейка, нулевое деление которой обращено в сторону реки. Отсчеты высоты уровня производятся по длине каната, наматываемого на вьюшку.

Основной недостаток передаточных постов — невозможность их использования при ледоставе. Кроме того, механическая система передачи высоты уровня не всегда обеспечивает необходимую точность отсчета. Поэтому такие посты не получили массового распространения.

1.2.5. Средства автоматизированных наблюдений за уровнем воды

Измерения уровня сравнительно легко поддаются автоматизации, которая может быть осуществлена простыми средствами, без применения электронных устройств. К таким средствам относятся поплавковые регистраторы и самописцы уровня различных систем. Они появились в прошлом веке, но с успехом применяются и в наши дни. В СССР выпускаются самописцы уровня воды (СУВ) поплавкового типа.

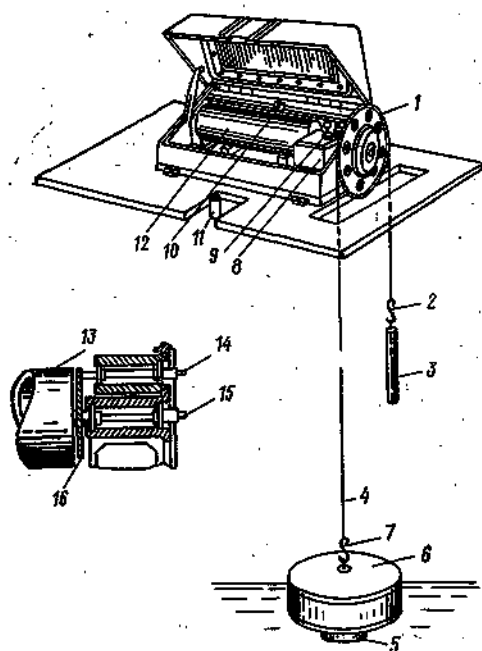


Рис. 1.13. Самописец уровня «Валдай».

1 — поплавковое колесо, 2 — зажимы, 3 — противовес, 4 — канат, 5 — груз, 6 — поплавок, 7 — поплавковое колесо, 8 — часовой механизм, 9 — заводная головка, 10 — каретка, 11 — гири, 12 — барабан, 13 — сцепление, 14 — дополнительная ось, 15 — основная ось, 16 — шестерня.

Самописец «Валдай» (рис. 1.13) — наиболее распространен на гидрологической сети. Состоит из двух систем: поплавковой и регистрирующей. Поплавок диаметром 250 мм с грузом подвешивается на мягком металлическом канате с противовесом на противоположном конце (для крепления служат зажимы). Подвесной канатик перекидывается через поплавковое колесо, которое состоит из малого и большого дисков, имеющих длину окружности соответственно 300

и 600 мм. Поплавковое колесо приводит во вращение барабан, находящийся на основной оси прибора. Для изменения масштабов записи уровня прибор снабжен дополнительной осью, трубкой сцепления и шестерней на основной оси.

К регистрирующей системе, кроме барабана, относится часовой механизм, каретка с пером, которая скользит по двум направляющим стержням. Перемещение каретки происходит под действием часового механизма посредством стальной струны, навитой одним концом на барабанчик заводной головки; на другом конце подвешена гиря — привод часов.

Запись на ленте барабана может быть произведена в четырех масштабах в зависимости от амплитуды колебания уровней:

Амплитуда уровня, м.	до 1	1—2	2—3	3—6
Масштаб записи . . .	1 : 1	1 : 2	1 : 5	1 : 10

Каждому из масштабов соответствует определенное положение передаточных звеньев.

При крупных масштабах записи поплавковое колесо закрепляется на основной оси прибора, причем масштаб 1:1 будет получен при наложении поплавкового канатика на малый диск, а масштаб 1:2 — на большой.

Для записи хода уровня в мелких масштабах поплавковое колесо устанавливается на вспомогательную ось, тогда при наवेशи-

вании поплавка на малый диск будет получен масштаб 1:5 и соответственно 1:10, если ввести в действие большой диск.

Часовой механизм снабжен сменными барабанчиками привода, которые позволяют вести запись в двух масштабах времени — 12 и 24 мм в час.

Погрешность регистрации уровня на ленте составляет 1 мм на один оборот барабана.

Смена ленты самописца должна производиться через 24 ч.

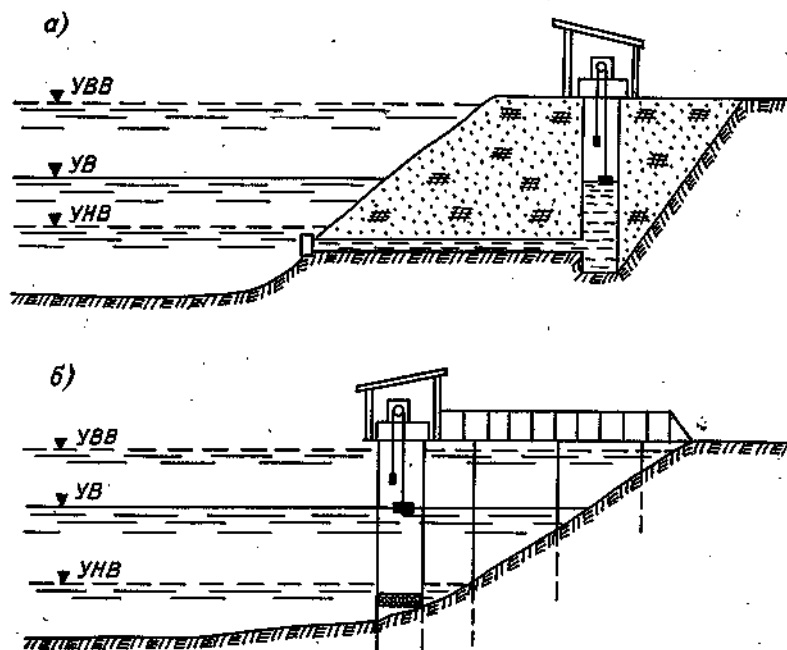


Рис. 1.14. Схемы берегового (а) и островного (б) типов установки СУВ.

Именно в ежедневном обслуживании прибора и заключается недостаток самописца «Валдай».

Самописец длительного действия ГР-38 более автономен, рассчитан на продолжительную работу без смены ленты и подзаводки пружинных часов. В отличие от самописца «Валдай», в приборе ГР-38 движение поплавка вызывает горизонтальные перемещения каретки с пером, а часовой механизм вращает барабан со скоростью 1 оборот за 8, 16 и 32 сут в зависимости от передаточных чисел сменных зубчатых шестеренок.

Наибольшее распространение получила установка СУВ в береговых колодцах, соединенных с рекой трубами или открытыми подводными каналами (рис. 1.14 а). Такая установка достаточно экономична и сравнительно проста в осуществлении при колебаниях уровня в пределах 5—6 м. Стенки колодца устраи-

так и гидростатические варианты. Эти приборы регистрируют уровень в графической форме; линия наносится иглой, которая сдвигает верхний слой особой бумаги. Унифицированные уровнемеры могут быть подключены к устройствам дистанционной передачи и автоматической обработки данных. Первые образцы таких измерительных систем входят в состав агрегатного комплекса средств гидрометеорологической техники и позволят объединить регистрацию и обработку результатов измерения комплекса гидрологических элементов.

Независимо от типа автоматизированных постов при каждом из них устраиваются контрольные посты — реечные или свайные. Они служат для контроля неизменности нулей наблюдений уровнемеров.

Сооружения для установки уровнемеров рекомендуется строить по типовым проектам, разработанным в ГГИ. Приведенные в них конструкции достаточно разнообразны, так что всегда можно выбрать наиболее экономичный и эффективный вариант установки уровнемеров с учетом особенностей водного объекта.

Значения уровней с лент самописцев снимаются через равные промежутки времени или же по характерным (переломным) точкам и записываются во вкладыш № 2 (книжка КГ-1МС (н) в соответствии с Наставлением вып. 2, ч. II (1975 г.).

1.2.6. Реперы и система отметок на гидрологических постах

Наблюдения за уровнями воды от произвольных нулей отсчета имеют лишь местное значение. Чтобы данные об уровнях были сопоставимы с измерениями на других постах и в равные периоды времени, они должны быть отнесены к единой высотной системе. Именно для этого и предназначаются реперы, устанавливаемые на гидрологических постах. Их должно быть по крайней мере два: основной, удовлетворяющий требованиям долговечности и неизменяемости своей высоты и контрольный, который размещается возможно ближе к постовым устройствам, чтобы было удобно проверять высотное положение свай и нулей реек.

Основной репер служит для проверки контрольного. Он привязывается нивелировкой III или IV класса двойным ходом к ближайшему реперу государственной опорной геодезической сети, имеющему отметку в Балтийской системе (БС). Лишь в исключительных случаях на удаленных постах основному реперу может быть придана условная отметка.

Основные реперы (рис. 1.17 а) следует делать потайными из сборных железобетонных элементов: пилона и якоря-плиты, закладываемых в скважину или котлован. Основание якоря располагается на 0,50—0,65 м ниже глубины промерзания. Дно скважины или котлована при этом заливают цементным раствором (толщина его слоя должна составлять 0,2—0,5 м). Чтобы потай-

ной репер можно было легко найти, вблизи от него устанавливаются наружные опознавательные знаки и метки.

Для устройства основного репера пригодны также отрезки рельсов и швеллеров, нижний конец которых заделывается в бетонный монолит.

Стандартный грунтовый репер ГР-43 (рис. 1.17 б) состоит из металлической трубы, снабженной винтом. На верхнюю часть трубы насаживается головка. Все части репера скрепляются за-

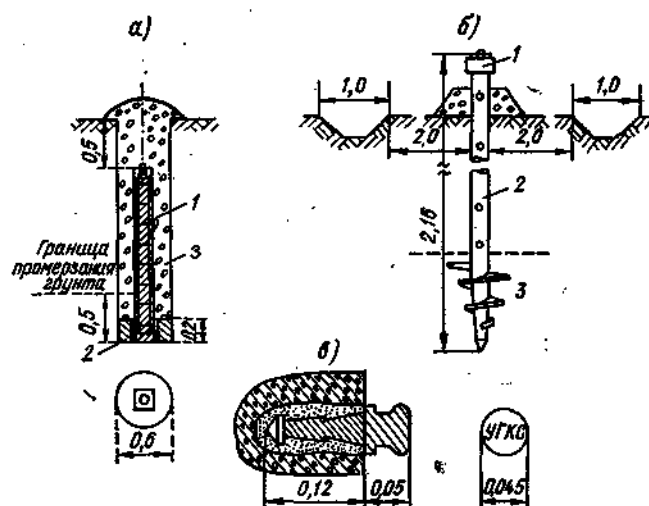


Рис. 1.17. Реперы гидрологических постов.

а — потайной грунтовый репер: 1 — пилон, 2 — якорь-плата, 3 — котлован; б — стандартный грунтовый репер: 1 — головка; 2 — металлическая труба, 3 — винт; в — репер-марка. Размеры конструкций, заглубление и высота насыпки указаны в метрах.

клепками, а полость трубы заполняется разогретым битумом. При установке основного репера нижний конец трубы заливается бетоном. Если репер используется в качестве контрольного, конструкция ввинчивается в грунт при помощи рычага и цепной петли. Глубина закладки должна превосходить глубину промерзания на 0,50—0,65 м, а при слабых грунтах винтовой якорь должен входить в плотную породу не менее чем на 1,0 м. Вокруг репера насыпается курган и роется круговая канава для отвода воды.

Реперы-марки. Если вблизи поста располагаются капитальные здания и сооружения, то целесообразно устанавливать стенные чугунные реперы-марки (рис. 1.17 в). Они состоят из хвоста уступчатой формы длиной 120 мм и диска с полочкой для установки рейки. Репер закладывается в заполненный цементным раствором шпур, пробуриваемый в стенах на высоте 0,4—0,6 м над поверхностью земли.

Временные реперы из прочных пород дерева в виде столбов диаметром 0,2—0,3 м и длиной 2,3—2,5 м устраивают при отсутствии необходимых конструкций. В нижнюю часть столба врубается крестовина из двух брусев длиной по 0,70 м. Столб осматривается или обжигается, а затем опускается в котлован и засыпается песком или щебнем с тщательной утрамбовкой.

Отметки (высоты) реперов выражаются в двух системах: Балтийской, если отметка репера получена от репера государственной высотной сети посредством нивелирования III или IV класса, или условной, когда такую привязку не удается выполнить. При записи отметки соответственно проставляется «БС» и «усл.» (например: 138,024 м БС).

Все постовые устройства (нули реек, головки свай) получают отметки в системе высот, принятой для основного репера.

Непосредственное измерение (отсчет) высоты уровня производится от нуля наблюдений, под которым подразумевается горизонтальная плоскость, расположенная на высоте головок свай или нулевых делений реек. Таким образом, каждая свая или рейка имеет свой нуль наблюдений. Его высотное положение может быть изменено вместе с изменением высоты постовых устройств.

Преимущество показаний уровня, измеренного по различным сваям (рейкам), обеспечивается тем, что все уровенные наблюдения приводят к нулю графика гидрологического поста¹ — условной горизонтальной плоскости сравнения, принимаемой за нуль отсчета при измерениях уровня. Высотное положение этой плоскости назначается ниже самого низкого уровня, чтобы избежать отрицательных отсчетов. Кроме того, целесообразно назначать нуль поста не просто ниже наинизшего уровня, а приблизительно на высоте, соответствующей наименьшей отметке дна в створе поста. Для перевода отсчета высоты уровня воды H_0 , сделанного от нуля наблюдений, в высоту водной поверхности над нулем поста H служит привodka ($H_{пр}$) — превышение головки

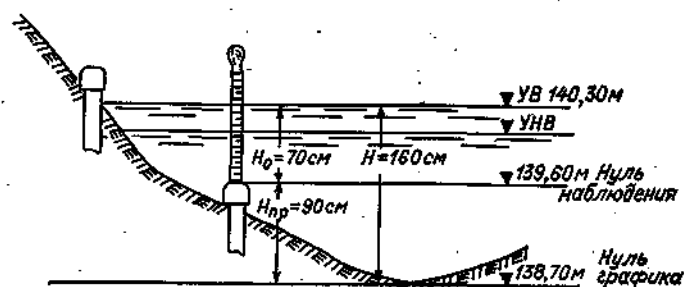


Рис. 1.18. Высотная система наблюдений за уровнем на гидрологическом посту.

¹ В изданиях государственного водного кадастра (ГВК) употребляется «нуль поста».

сваям или нулю рейки над нулем поста. Высота уровня воды над нулем поста равна (рис. 1.18)

$$H = H_0 \pm H_{\text{пр.}}$$

Если высоту уровня требуется выразить в системе высот государственной геодезической сети, то к высоте уровня над нулем поста нужно прибавить отметку нуля графика гидрологического поста.

1.2.7. Открытие и техническая документация гидрологических постов

Перечень необходимого оборудования устанавливается в процессе рекогносцировочного обследования участка реки и затем доставляется на пост. Строительно-монтажные работы по его устройству выполняются силами ремонтно-восстановительных партий УГКС и гидрологической станции с участием наблюдателя поста. При этом соблюдаются требования и правила установки и размещения постового оборудования, изложенные выше.

Одна из ответственных работ, выполняемых при открытии поста,— высотная привязка реперов. Для этого должно быть произведено нивелирование IV класса в одном направлении при длине хода до ближайшего репера государственной сети, не превышающем 50 км. Если это расстояние больше 50 км, нивелирование ведется в прямом и обратном направлении.

Уровнемерные устройства привязываются к постовым реперам нивелированием IV класса, которое ведется замкнутым ходом в одном направлении от основного репера через контрольный к рейкам или сваям и от них обратно к основному реперу. В последующем проверка высотного положения уровнемерных устройств производится от контрольного репера, сам же он периодически (один раз в 1—2 года) проверяется от основного репера.

После окончания строительно-монтажных работ и укомплектования приборами, необходимыми для выполнения наблюдений, составляется «Техническое дело поста». Оно содержит план участка и поперечный профиль русла в створе поста, сведения о постовом оборудовании, составе и сроках наблюдений. Особое значение имеют разделы, в которых регламентируются методика и точность производимых измерений, иными словами, метрологические требования, которые должны быть соблюдены для того, чтобы обеспечить надежность получаемых на посту данных.

Техническое дело — основной документ поста, оно составляется в двух экземплярах и рассчитано на ведение в течение 10 лет, после чего заменяется новым.

Для записи результатов наблюдений на гидрологических постах служат специальные книжки КГ (вторая буква индекса указывает на гидрологический характер информации). В связи с осу-

ществляемой автоматизацией сбора, обработки и распространения данных форма таблиц, содержащихся в книжках КГ, разработана с учетом требований подготовки записанных в них сведений для перевода на перфоленды и ввода в ЭВМ. Для гидрологических постов предназначены книжки:

КГ-1М (н) — запись результатов наблюдений за уровнями воды, состоянием водного объекта, температурой воды и воздуха, осадками и ледовыми явлениями;

КГ-3М (н) — запись измерений расходов воды вертушкой и глубинными поплавками;

КГ-7М (н) — запись результатов измерения расходов воды поверхностными поплавками;

КГ-6М (н) — запись данных измерений взвешенных и влекомых наносов.

Все книжки включают, кроме смысловых данных, призначную часть, предназначенную для автоматизированного поиска информации. Заполнение призначной части производится на гидрологических станциях. Эта часть состоит из двух групп: общей для всех видов наблюдений и специальной — только для книжки данного вида.

Данные, содержащиеся в книжках, группируются так, что запись результатов гидрологических наблюдений, предназначенных для автоматизированной обработки, производится в пределах утолщено очерченных рамок на страницах книжек.

В книжках предусмотрена возможность записи признаков качества наблюдений (это делается на станциях). В случае пропуска наблюдений ставится тире (—), а если наблюдение производилось, но явление в данный срок отсутствовало — знак / (наклонная черта). Если наблюдения не должны производиться в отдельные сроки (не включены в программу наблюдений), соответствующая графа в книжке остается пустой.

Более конкретные указания по заполнению книжек приведены ниже в разделах, посвященных отдельным видам наблюдений.

1.2.8. Содержание гидрологических постов и обязанности наблюдателей

Измерения и наблюдения на гидрологических постах выполняет наблюдатель, нанимаемый из местных жителей, или разъездная гидрометрическая бригада, если пост оснащен автоматическими уровнемерами, не требующими ежедневного обслуживания.

Наблюдатель должен знать цель выполняемых им наблюдений, конструкцию и порядок использования постовых устройств, состав, сроки и приемы наблюдений и работ, выполняемых на посту, порядок записи и обработки результатов наблюдений и, наконец, адреса подачи телеграмм и отсылки заполненных книжек.

Техник, инструктирующий наблюдателя, должен в течение нескольких дней лично произвести совместно с ним все наблюдения

и записи, пока не убедится, что наблюдатель вполне подготовлен к самостоятельной работе. Особое внимание уделяется инструктажу по правилам техники безопасности.

Наблюдатель должен быть обеспечен комплектом приборов и принадлежностей, в который входят: 1) часы, 2) нивелир или уровень (ватерпас) с двумя нивелировочными рейками длиной 2—4 м, 3) переносные уровнемерные рейки, 4) снегомерные и ледо-шугомерные рейки, 5) водный термометр, 6) электрический фонарик.

В распоряжении наблюдателя должны быть инструменты для пробивки лунок во льду (ледобур) и околки свай ото льда (пешня). Для ремонтных и других работ по уходу за постовыми устройствами необходимы лопата, багор, топор, пила и другие инструменты.

На посту должен быть запас свай и реек. В необходимых случаях наблюдателю выделяется лодка и приспособления (трапы и переносные мостики), чтобы иметь возможность доступа к уровнемерным устройствам. И наконец, наблюдателю должна быть выдана документация — инструкция по производству наблюдений и технике безопасности, книжки для записи наблюдений, коды и шифры для передачи данных (на информационных постах).

Исправность постового оборудования и безопасность работы наблюдателей при любых условиях погоды и состояния реки — одно из основных требований к содержанию гидрологических постов.

Правила ухода за измерительными устройствами и оборудованием изложены в инструкциях и Наставлениях. Наблюдатель должен знать не только то, как пользоваться теми или иными устройствами и приборами, но и что надо делать, чтобы обеспечить их сохранность и безотказность работы. Необходимо регулярно окрашивать и смазывать металлические части, подверженные коррозии. Важно вовремя принимать меры по защите постовых устройств от подмыва течением. Сваи, соединительные трубы и колодцы СУВ надо своевременно окалывать ото льда, чтобы не допустить повреждений при подвижках ледяного покрова.

Особое значение имеет контроль неизменности высотного положения нулей наблюдений. Их нарушение обесценивает данные об уровнях воды. Контрольное нивелирование уровнемерных устройств производится в сроки, зависящие от надежности установки этих устройств и местных условий, могущих служить причиной их повреждения. Ориентировочно для контрольного нивелирования рекомендуются следующие сроки:

а) для постов, у которых за ряд прошлых лет отметки не изменялись, — один раз в год перед наступлением половодья или периода паводков;

б) при неустойчивом высотном положении постовых устройств — два-три раза в год: перед замерзанием, перед вскрытием и в летнюю межень;

в) для постов в условиях многолетней мерзлоты — четыре раза в год: перед вскрытием, после спада паводка, во второй половине лета (в период наибольшего оттаивания грунта) и в первой половине зимы, после того как грунт промерзнет на значительную глубину.

При нивелировании свайного устройства определяются отметки головок свай, расположенных выше уровня воды, и одной-двух свай, находящихся под водой. На речных устройствах должны быть определены отметки нулей всех уровневых реек. Нивелирная рейка при этом устанавливается на верхний обрез постовой рейки или на гвозди, забитые на целых дециметровых делениях или на нуле рейки. Если к рейке подойти невозможно, то вблизи уреза забивается колышек вровень с поверхностью воды и одновременно делается отсчет по рейке. Затем нивелировкой определяется отметка колышка, равная отметке уровня воды в момент отсчета.

При нивелировании установки самописца уровня нужно определить отметки свай и нулей реек внешнего и внутреннего контрольных постов, а также отметку площадки столика самописца.

При нивелировании передаточного устройства определяется привodka нуля горизонтальной рейки к нулю поста. Для этого нивелированием урезного колышка определяется превышение уровня над нулем поста и одновременно производится отсчет по горизонтальной рейке в момент касания грузом поверхности воды. По этим данным вычисляется привodka нуля горизонтальной рейки.

Одновременно с нивелированием постовых устройств нивелируется уровень воды в створе поста по колу, забитому вровень с поверхностью воды.

На свайных постах, кроме нивелирования, для текущего контроля нулей наблюдений необходимо производить отсчеты одновременно по соседним сваям. Привodka проверяемой сваи должна быть изменена, если разность показаний уровня ΔH превысит удвоенную погрешность измерения Δ_n : $\Delta H > 2\Delta_n$. При погрешности отсчета уровня 1 см изменение привodka становится необходимым, если $\Delta H > 2$ см.

В случае повреждения постовых устройств наблюдатель должен самостоятельно выполнить ремонт, который ему по силам. Прежде всего должны быть обязательно восстановлены поврежденные сваи или рейки. Если не удастся установить их с соблюдением всех требований, о которых говорилось выше, допускается временно установка кольев, забитых на глубину не менее 1 м, взамен свай и уровневых реек. Сразу же должна быть произведена нивелировка или ватерпасовка, чтобы определить отметки этих временных устройств. Приемы ватерпасовки подробно описаны в Наставлении вып. 2, ч. II и вполне по силам наблюдателю.

1.3. Наблюдения за уровнем и продольным уклоном водной поверхности

1.3.1. Измерение уровня воды

Уровень воды — один из наиболее регулярно измеряемых элементов водного режима — фиксируется ежедневно один или несколько раз.

Частота измерений зависит от характера колебаний уровня: она должна быть такой, чтобы по результатам срочных наблюдений можно было с достаточной точностью определить средний суточный уровень воды и установить его самое высокое и самое низкое положение. В большинстве случаев вполне достаточно измерять уровень дважды в сутки — утром и вечером, что соответствует принятым на гидрологической сети основным срокам наблюдений — в 8 и 20 ч местного (поясного) времени как в летний, так и в зимний период. При незначительных и плавных колебаниях уровня допустимо наблюдать его один раз в сутки — в 8 ч. При значительном суточном ходе уровня в периоды половодья, паводков и попусков воды из водохранилищ, заломов леса, зажоров и заторов необходимо переходить к учащенным измерениям (через каждые 2—4 ч) или непрерывной регистрации и уровня посредством СУВ и автоматизированных уровнемеров.

Чтобы установить дополнительные сроки наблюдений, проводят учащенные (через 1—2 ч) измерения в течение двух-трех характерных весенних половодий или паводков. При обработке полученных данных выделяют моменты времени, в которые наблюдаются смены тенденций в изменении уровня (переход от подъема к спаду или наоборот). К этим моментам и должны быть приурочены дополнительные сроки наблюдений.

Высота уровня воды на неавтоматизированных постах обычно измеряется с погрешностью 1 см. При переходе к автоматизированным наблюдениям должна устанавливаться оптимальная точность измерения уровня, так как стоимость и состав измерительной аппаратуры определяются заданной погрешностью регистрации элемента. Допускаемая погрешность измерения зависит от задач, решаемых по данным об уровне воды. Так, если уровни используются для вычисления средних суточных расходов воды по связи $Q(H)$, то можно принять следующие средние квадратические погрешности измерения уровня σ_H в зависимости от амплитуды его колебаний $A = H_{\text{макс}} - H_{\text{мин}}$:

A м	$< 2,5$	2,5—5,0	5,0—10
σ_H см	0,5	1,0	2,0

Если уровни воды измеряются для определения уклонов водной поверхности, напоров на гидрологических расходомерах,

объемов аккумуляции воды в водохранилищах или установления возможностей затопления важных объектов, погрешность измерения уровней не должна превышать 2—3 мм.

Точность измерения уровня для каждого поста назначает гидрологическая станция. Запись наблюдений за уровнями воды производится в книжке КГ-1М (н) (табл. 1.1), которая удовлетворяет требованиям подготовки данных к занесению на технические носители для обработки на ЭВМ. В этой книжке заключены в рамку и закодированы графы, которые подлежат переводу на перфорационные или магнитные ленты.

Наиболее просто высота уровня определяется по реечным устройствам. Для этого отсчитывается деление рейки, ближайшее к поверхности воды. Если уровень находится посередине между делениями, записывается четное из них. При отсчете глаза наблюдателя должны находиться возможно ближе к поверхности воды (вот почему так важно оборудовать удобные подходы к местам наблюдений!).

При волнах на поверхности воды высотой не более 15 см фиксируются высшее и низшее деления рейки, достигаемые колеблющейся поверхностью. В полевую книжку записывается среднее из этих двух отсчетов. В случае более значительного волнения записываются осредненные значения высоты уровня по отсчетам для гребней и ложбин по крайней мере пяти волн. Однако в этих случаях лучше пользоваться рейкой с успокоителями типа ГР-23.

На свайном устройстве высота уровня воды измеряется переносной рейкой, которая ставится вертикально на головку ближайшей к берегу затопленной сваи. Отсчеты высоты уровня по свае, головка которой возвышается над водой, допускается производить лишь при одновременных наблюдениях по двум сваям или в исключительных случаях, когда невозможно установить дополнительную сваю. Переносная рейка в этом случае приставляется к свае так, чтобы нижний конец ее касался поверхности воды; отсчет производится на уровне головки сваи. При записи в книжку результатов наблюдений перед цифрой, соответствующей отсчету уровня, ставится знак минус.

Отсчеты значений уровня по переносной рейке на свайном посту должны производиться так, чтобы глаза наблюдателя находились возможно ближе к поверхности воды, так как иначе будут получаться неправильные отсчеты.

При погрешности отсчета уровня 1 см записывается ближайшее из делений, около которого находится поверхность воды. Если уровень находится посередине между делениями, записывается четное из них (например, 10,5 записывается 10 см, а 13,5 записывается 14 см).

При подъеме или спаде уровня воды, когда нужно переходить при наблюдении с одной сваи на другую, и через 10—15 дней в период устойчивого уровня следует производить в два срока подряд одновременные отсчеты по двум соседним сваям. Такие отсчеты позволят выяснить, не изменилось ли высотное положение

Таблица 1.1

Форма и порядок заполнения таблиц
«Книжки для записи гидрологических наблюдений» КГ-1М (н)

Номер строки	Число	Время (ч., мин.)	Уровень воды над постом, см	Код состояния водного объекта	Температура (испр.), °C				Осадки, мм	Ветер по коду	Примечание
					Воды	Воздуха	Воды	Воздуха			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
-41	1	8	306	565	0,0	—	4,2	1,33	00		
-42	1	20	312	565	0,0	0,5	/	/	00		
-43	2	2	318	565	570			/			
-44	2	8	325	565	543	0,4	8,2	/	00		
-45	2	14	342	51 605							
-46	2	20	306	600	0,8	5,0	6,21	3,2			
.....											
77	16	8	267	600	10,2	14,8	/	00			
78	16	18	258	600			20,01	11	5		
79	16	18	318	681			/	00	2		
80	16	20	290	600	12,0	16,0	/	00			

Номер строки	Уровень воды, см		Температура, °C		Среднее за сутки	Состояние водного объекта (словесная характеристика)	Номер проб на СГ и других замерений
	Номер	Счит	Воды	Воздуха	Уровень, см		
11	12	13	14	15	16	17	18
41	9	41	0,0	—	4,2		Ледостав
42	9/8	47/6	0,0	0,5	809	00	Ледостав
43	8	12					Ледостав, трещины в ледяном покрове
44	8	19	0,4	8,2			Подвижка льда
45	8	36					Ледоход
46	9	41	0,8	5,0	823	0,6	Чисто
.....							
77	9/10	2/44	10,2	14,8			Чисто
78	10	35					Чисто
79	150	150					Сброс воды выше поста
80	9	25	12,0		278	11,1	Чисто

свай. Номера свай и отсчеты уровня в этом случае записываются дробью.

Если измерить уровень по постоянным сваям (рейкам) невозможно, нужно установить временную сваю (кол) и ватерпасовкой от ближайшего репера или сваи определить ее приводку.

Большое значение имеет определение высшего уровня воды. Если на посту имеется отметчик высшего уровня, то наблюдатель в каждый срок должен измерять высоту метки, оставленной этим уровнем, и подготавливать прибор для дальнейших наблюдений. При пропуске по какой-либо причине высшего уровня наблюдатель должен установить его высоту по следам, оставленным паводком на местности. Метка высшего уровня закрепляется колышком, вбитым вровень с поверхностью земли, или краской на дереве, скале и т. п. с тем, чтобы нивелированием от репера или ближайшей сваи определить отметку высшего уровня. Сведения о способе определения экстремальных уровней в КГ-1М (н) записываются в графе 10 в цифровом коде.

Так если уровень получен по максимальной рейке, то в графе 10 пишется цифра 2, в случае определения уровня нивелированием или при измерении расхода воды указывается соответственно цифра 4 или 5.

Наблюдения по самописцу уровня заключаются в производстве отсчетов уровня по контрольным постам и в смене ленты самописца. При суточном заводе часового механизма лента обычно меняется в 8 ч, тогда же наблюдатель производит отсчет уровня по контрольному посту и на ленте прибора делает запись высоты уровня над нулем поста.

Рекомендуется следующий порядок наблюдений:

1) подготавливается новая лента; на ней пишется порядковый номер, дата, название реки и пункта наблюдений;

2) измеряется высота уровня воды по контрольным постам;

3) на старой ленте самописца пером делается засечка в виде вертикальной черты длиной около 1 см, слева от засечки записывается время в часах и минутах, а справа — высота уровня над нулем поста, после чего на барабан надевается новая лента;

4) барабан устанавливается в рабочее положение, заводится часовой механизм самописца;

5) производится настройка прибора: перо устанавливается в точку, соответствующей времени и высоте уровня, на ленте делается вертикальная засечка и рядом с ней записывается время и уровень;

6) проверяется исправность работы самописца в течение 5 мин. Линия записи должна быть тонкой, ровной и без разрывов.

Проведение наблюдений осложняется в особых условиях водного и ледового режима: при катастрофических паводках, пересыхании и перемерзании реки, заторах и т. п. В таких случаях требуется зафиксировать экстремальные (наивысшие и наименьшие) уровни и не допустить перерыва в срочных наблюдениях. Как правило, в этот период наблюдатель должен посещать пост

между сроками наблюдений, чтобы вовремя установить изменение обстановки на реке.

Для последующего анализа качества наблюдений за уровнем воды производятся визуальные определения состояния реки, характеристики ветра и волнения с записью в соответствующих графах КГ-1М (н) в цифровых кодах. Направление и сила ветра кодируются следующим образом:

Код	Направление ветра	Код	Сила ветра
0	штиль	0	штиль
1	по течению	1	слабый
2	против течения	2	умеренный
3	с левого берега	3	сильный
4	с правого берега		

Например, ветер против течения, слабый будет записан в графе 9 числом 21.

Другие характеристики состояния водного объекта (образование и разрушение ледяного покрова, ледостав, лесосплав, зарастание, русловые процессы, хозяйственные мероприятия и прочие сведения), а также волнение кодируются соответствующей группой цифр в графах 4 и 5, используя каталог кодов гидрологических наблюдений.

1.3.2. Наблюдения за продольным уклоном водной поверхности

Уклоном называется падение свободной поверхности по длине потока, отнесенное к расстоянию между пунктами измерений высоты уровня.

Уклоны водной поверхности измеряются геодезическими методами по разности отметок уровня на смежных уклонных постах: верхнем по течению z_v и нижнем z_n — при известном расстоянии между ними — базисе L_0

$$I = (z_v - z_n) / L_0.$$

Уклон принято выражать в относительных единицах: десятичной дробью или в промилле ‰ (в тысячных долях), которые численно равны падению уровня в метрах на 1 км.

В большинстве случаев одним из уклонных постов служит основной пост. Положение второго, собственно уклонного, поста зависит от морфологии участка наблюдений и водного режима реки.

Если рассматривать достаточно протяженный участок реки длиной L , то можно определить так называемый частный уклон $I_{\text{ч}}$. Когда падение свободной поверхности устанавливается для участка значительного протяжения, то может быть получен так называемый общий уклон I_0 .

При организации наблюдений за уклоном решаются две задачи: выбор местоположения уклонных постов и определение расстояния между ними, гарантирующее надежное измерение падения

уровней. Чем больше L_0 , тем значительней падение между постами Δz , следовательно, точнее определен уклон. Но слишком длинный базис увеличивает затраты времени на переход наблюдателя от одного уклонного поста к другому. Поэтому важно установить минимально необходимую длину базиса L_0 . Рис. 1.19 составлен в предположении, что уровни на уклонных постах отсчитываются с погрешностью 1 см, а отметка нулей наблюдений определена нивелированием IV класса. Как видим, на равнинных реках при $I=0,05-0,10\%$ длина базиса становится чрезмерной. Ее можно сократить, если для привязки постов использовать более точное нивелирование — II и III класса, а для отсчетов уровня

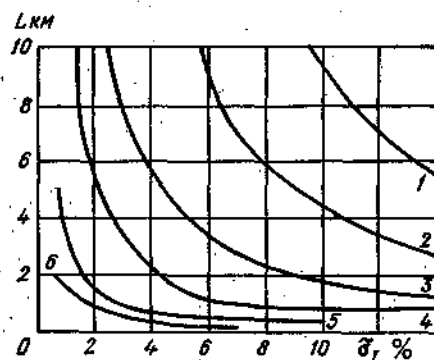


Рис. 1.19. Зависимость погрешности определения уклона от длины базиса измерений.

1) $I=0,03\%$; 2) $I=0,05\%$; 3) $I=0,1\%$;
4) $I=0,2\%$; 5) $I=0,5\%$; 6) $I=1\%$.

применять рейки с успокоителями, которые позволяют произвести отсчеты уровня с погрешностью 0,3—0,5 см.

На горных реках, где можно было бы из-за больших падений ограничиться сравнительно коротким базисом, рекомендуется увеличивать расстояние между уклонными постами сверх расчетной длины, чтобы сгладить погрешности измерений уровня, вызванные его возмущениями от местных препятствий. Целесообразно также размещать уклонные посты по обоим берегам.

Наблюдения за уклонами должны выполняться в различные фазы гидрологического режима с охватом полной амплитуды изменения уровней воды с тем, чтобы получить зависимость $I=f(H)$. Особого внимания наблюдения за уклоном требуют при высоких уровнях и в зимний период при заторно-зажорных явлениях.

Серии наблюдений за уклонами на реках с устойчивым руслом выполняются в течение 1—2 лет, а в дальнейшем — один раз в 3—4 года.

1.3.3. Обработка результатов наблюдений за уровнем и уклоном водной поверхности

Первичная обработка данных об уровнях воды начинается с того, что высота уровня над нулем поста за каждый срок вычисляется как сумма отсчета H_0 и приводки $H_{пр}$ свая или нуле-

вого деления стационарной рейки. Затем по данным срочных наблюдений определяется средний суточный уровень воды H_c . Его значение при двусрочных наблюдениях получается как полусумма срочных значений за 8 и 20 ч

$$H_c = 0,5 (H_8 + H_{20}).$$

При многосрочных наблюдениях H_c вычисляется как среднее взвешенное по продолжительности интервалов между сроками наблюдений (расчетные формулы приведены в Наставлении, вып. 2, ч. 2).

Количество необходимых сроков наблюдений зависит от характера суточных колебаний уровня. Приведенные в Наставлении формулы для вычисления H_c соответствуют достаточно плавному ходу уровня в течение суток. В более сложном случае H_c целесообразно определять на статистической основе по уравнению регрессии

$$H_c = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i H_i,$$

где a_0 — свободный член, выражающий постоянную поправку к уровню H_c ; a_i — весовые коэффициенты для срочных уровней H_i .

Коэффициенты a_i определяются методом наименьших квадратов в результате обработки на ЭВМ учащенных или непрерывных наблюдений (лент СУВ) за уровнями воды по характерным фазам режима. Как показали исследования ГГИ, даже при весьма сложном изменении уровней в естественных условиях, например на горных и полугорных реках, в большинстве случаев достаточно четырехсрочных наблюдений за уровнем, но взятых с различными весовыми коэффициентами a_i по результатам расчетов на ЭВМ.

Применение СУВ позволяет исключить погрешности измерения уровней, связанные с недостаточным количеством сроков, при условии правильной обработки ленты. Она начинается с проверки записи, внесения поправок времени (в случае неточного хода часов) и проведения четкой линии уровня, если его полевая запись оказалась расплывчатой и прерывистой. Затем снимаются показания уровня — через равные интервалы или в характерных (переломных) точках. Последний прием обработки предпочтительнее, так как при его применении всегда фиксируются суточные максимумы и минимумы уровня. Для записи данных с лент самописца используется специальный вкладыш КГ-1МА(н) к книжке КГ-1М(н).

При обработке ленты методом характерных точек средний за сутки уровень выражается следующим образом:

$$H_c = \frac{1}{24} \left[\frac{H_1 + H_2}{2} T_{1-2} + \frac{H_2 + H_3}{2} T_{2-3} + \dots + \frac{H_{n-1} + H_n}{2} T_{(n-1)-n} \right],$$

где $H_1, H_2, \dots, H_n$ — уровни на границах интервала между характерными точками продолжительностью $T_{1-2}, T_{2-3}, \dots, T_{(n-1)-n}$.

Результаты наблюдений за уклоном водной поверхности: время наблюдений и отсчеты положения уровней относительно головок свай или нулей реек на верхнем и нижнем уклонных постах — записываются в книжку КГ-14 М. Дальнейшая обработка включает:

- вычисление отметки уровня над нулем поста (он обычно назначается общим для верхнего и нижнего постов);

- определение падения Δz между уклонными постами как разности высот уровня над нулем поста;

- вычисление уклона водной поверхности делением Δz на длину базиса L_6 (обе величины при этом должны быть выражены в одинаковых единицах измерения, например в метрах):

$$I = (\Delta z / L_6) \cdot 1000 \text{ ‰}$$

Длина базиса остается неизменной в течение всего времени, пока не изменится положение постов.

Результаты всех видов наблюдений за уклоном водной поверхности, проводимых в отчетном году (данные книжек КГ-14М, КГ-3М(н) и журналов нивелирования) записываются в сводную таблицу ТГ-14М(н), которая по окончании года перфорируется.

1.4. Термический режим рек и наблюдения за температурой воды

1.4.1. Закономерности распределения температуры воды в потоке

Колебания температуры воды в реках происходят в результате теплообмена между ее массой и окружающей средой — воздухом и ложем русла. Небольшая доля в тепловом балансе речных вод принадлежит теплу, возникающему внутри потока в результате потери части его энергии на преодоление гидравлических сопротивлений.

Перенос тепла в толщу потока от поверхности раздела с атмосферой и грунтом совершается в результате турбулентного перемешивания. Этот процесс весьма скоротечен. Так, по расчетам В. М. Маккавеева, повышение температуры поверхностного слоя потока глубиной 2 м достигает придонной зоны на горных реках уже через 0,5 мин, на равнинных — через 2 мин. Вот почему распределение температуры воды в живом сечении остается сравнительно однородным (перепады обычно не превышают 0,5°C). Однако по мере затухания скоростей течения, например в зонах подпора водохранилищ (рис. 1.20), различие температуры поверхностных и придонных слоев становится существенным. Наибольшие изменения температуры воды по глубине и ширине потока приурочены к выходам в русло грунтовых вод (подводных клю-

чей) и впадению притоков, если их водные массы холоднее или теплее, чем главной реки.

Как видим, распределение температуры воды в потоке оказывается достаточно сложным, поэтому важно правильно выбирать место стационарных наблюдений. Оно должно отвечать условию репрезентативности получаемых данных. Это означает, что между температурой в точке наблюдения и ее средним значением по сечению реки должна существовать устойчивая связь. Кроме того, на вышерасположенном и непосредственно примыкающем к створу

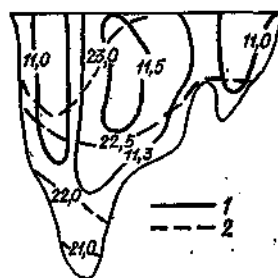


Рис. 1.20. Изотермы (линии равных значений температуры) воды в зоне подпора водохранилища Днепровской ГЭС в паводок (1) и в межень (2).

стационарных наблюдений участках реки не должно наблюдаться систематического изменения температуры по его длине. Соблюдение этих условий проверяется сравнительными измерениями температуры в точке стационарных наблюдений и в нескольких точках стрежневой зоны вышерасположенного участка, протяженность которого для малых рек назначается равной 0,5—0,6 км, а для больших рек — 2—3 км. Такие температурные съемки необходимо повторить в год открытия гидрологического поста 10—15 раз, осветив ими все необходимые характерные фазы режима реки (половодье, межень, дождевые паводки и др.). В случае появления выше места наблюдений новых источников сброса вод с температурой, отличной от температуры воды в реке, контрольные температурные съемки должны быть повторены.

1.4.2. Наблюдения за температурой воды

Наблюдения за температурой воды производятся обычно два раза в день в утренний и вечерний сроки уровенных наблюдений (8 и 20 ч), охватывая период от первых весенних оттепелей до ледостава. При неустойчивом ледоставе, прерываемом периодами вскрытия, наблюдения за температурой ведутся круглый год.

Измерение температуры воды производится ртутными и электрическими термометрами.

Обычный водный термометр (рис. 1.21) имеет шкалу с ценой деления 0,2°C, что позволяет производить измерение температуры с погрешностью до 0,1°C в диапазоне от —5 до 30°C. В переходные периоды для более точного установления момента перехода температуры воды через 0°C пользуются микротермометром

с ценой деления шкалы $0,01^{\circ}\text{C}$ (диапазон измерений от $-0,8$ до $1,2^{\circ}\text{C}$).

Для предохранения от повреждений водный термометр вставляется в металлическую оправу, которая оканчивается стаканчиком с отверстиями. Вода, заполняющая стаканчик, при измерении температуры препятствует прямому контакту окружающего воздуха с ртутным резервуаром термометра после его извлечения из воды.

Термометр опускается в воду на шнуре. Время выдержки термометра в точке 5—8 мин, заглубление не более 0,5 м.

Электрические термометры имеют две модификации: электротермометр ГР-41 предназначен для измерения температуры в диапазоне от -1 до 35°C с погрешностью до $0,1^{\circ}$, а микроэлектротермометр ГР-51 работает в диапазоне от $-0,2$ до $1,6^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $0,01^{\circ}$. В качестве первичного преобразователя температуры в электротермометре использована медная проволока, сопротивление которой меняется в зависимости от температуры. Измерительная часть прибора представляет собой равновесный электроизмерительный мост с круговым реохордом. Мост питается переменным током звуковой частоты, вырабатываемым специальным генератором, питающимся от сухого гальванического элемента напряжением 1,5 В. Измерительная часть и преобразователь связаны между собой кабелем. В комплект прибора входят также наушники ТОН-1 и ТОН-2.

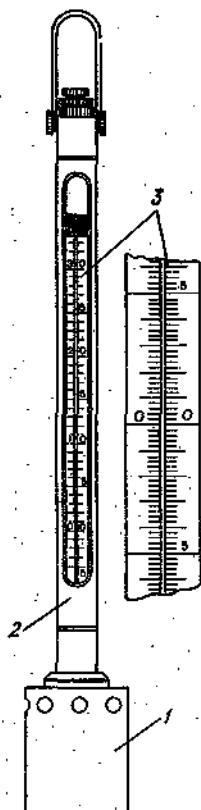


Рис. 1.21. Водный термометр с ценой деления $0,2^{\circ}$.

1 — стакан с отверстиями, 2 — металлическая оправка, 3 — шкала.

При измерении температуры преобразователь погружается на заданную глубину и выдерживается в ней 1—2 мин. Вращая ручку реохорда, добиваются исчезновения в наушниках звукового сигнала. Сняв со шкалы значение сопротивления, определяют по градуировочной таблице соответствующую температуру.

Запись наблюдаемых отсчетов температуры воды производится в книжке КГ-1М(н) в графе 14. Затем в отсчеты по термометру при температуре воды ниже 2°C вводятся инструментальные поправки, которые приведены в книжке КГ-1М(н) согласно выписке из свидетельства о последней поверке термометра, высылаемой со станции вместе с термометром. Инструментальные поправки при температуре воды выше 2°C в показания термометра не вводятся. Исправленные значения температуры воды записываются в графу 6,

которая подлежит перфорации. Вычисленные средние значения за декаду, месяц и наибольшая за месяц записываются в соответствующие таблицы книжки КГ-1М(н).

1.5. Наблюдения за ледовыми явлениями и толщиной льда

1.5.1. Ледовый режим рек

Многообразие климатических и гидрологических условий приводит к тому, что ледовые явления на реках развиваются неодинаково. Различают четыре типа ледового режима рек:

- 1) ледообразование без ледостава — горные и предгорные районы Кавказа, Средней Азии, Алтая и др.;
- 2) неустойчивый ледостав — районы, которым свойственны зимние оттепели: южная и западная часть Европейской территории СССР, Прибалтика, Кавказ и Средняя Азия;
- 3) устойчивый ледостав — северная и центральная часть Европейской территории СССР, Сибирь и Дальний Восток;
- 4) перемерзание и наледи — северо-восточная часть Европейской территории СССР, Восточная Сибирь и Дальний Восток.

Ледотермические процессы, как и водный режим, претерпевают коренные изменения при создании гидроузлов и водохранилищ. Вместо устойчивого ледостава, могут наблюдаться систематические подвижки льда, вызванные попусками расходов воды из водохранилища. На приплотинных участках образуются незамерзающие полыньи (иногда они достигают длины 20—30 км).

В ледовом режиме рек различают три периода: замерзание, ледостав и вскрытие. Для каждого из них характерна специфическая совокупность ледяных образований и ледовых явлений.

Период замерзания начинается с появления первых кристаллов поверхностного и внутриводного льда и заканчивается формированием сплошного ледяного покрова. Для этого периода характерны шугоходы и осенние ледоходы, образование ледяных перемычек и зажоров, особенно мощных на реках, текущих с юга на север.

После установления ледостава толщина льда сначала нарастает, а затем к концу ледостава начинает убывать. Первоначально гладкий и ненарушенный ледяной покров в течение зимы деформируется, в нем возникают трещины и полыньи, образуются торосы, навалы льда и т. д.

В период вскрытия происходит интенсивное разрушение ледяного покрова, приводящее сначала к его подвижкам, а затем к появлению участков открытой воды и ледоходу, в результате которого река полностью очищается ото льда. Наиболее опасное ледовое явление этого периода — заторы.

Изучение ледового режима рек осуществляется путем стандартных и специальных наблюдений.

Стандартные наблюдения выполняются на гидрологических постах и включают в себя систематические визуальные наблюдения за возникновением, развитием и исчезновением всех видов ледяных образований и ледовых явлений, а также измерения толщины ледяного покрова на участках поста в постоянных точках.

К специальным наблюдениям относятся ледомерные съемки, авиаразведка ледовой обстановки на участках рек значительной протяженности, измерения расходов льда и шуги, наблюдения за зажорно-заторными явлениями, состоянием ледовых переправ, размерами полыней ниже и выше гидроузлов и некоторые другие виды работ. Специальные наблюдения проводятся, как правило, работниками гидрологических станций и гидрографических партий.

1.5.2. Визуальные наблюдения за ледовой обстановкой и измерение толщины льда

Визуальные наблюдения за ледяными образованиями и ледовыми явлениями проводятся наблюдателями гидрологических постов два раза в сутки (в утренний и вечерний сроки наблюдений за уровнем воды или в ближайшее к ним светлое время) начиная с момента их появления и кончая полным освобождением реки ото льда. Очень важно, чтобы в районе поста имелись условия для хорошего обзора вверх и вниз по течению реки на расстояние, равное двум-трем ее ширинам.

При визуальных наблюдениях фиксируются все ледяные образования и ледовые явления с указанием их расположения, при этом даются их количественные характеристики (ширина заберегов, густота шугохода и ледохода в баллах, размеры полыней, ширина и протяженность трещин и т. д.). Запись производится в книжках КГ-1М(н), а при значительном разнообразии и быстрой смене ледовой обстановки ведется хронологический дневник, который впоследствии прикладывается к книжке. При сложной ледовой обстановке в районе поста, когда описать все ее детали трудно, рекомендуется составлять картограммы ледяных образований и ледовых явлений, используя для этого условные обозначения, приведенные в Наставлении вып. 2, ч. II.

Кроме элементов ледовой обстановки, должны быть зафиксированы даты начала и окончания навигации и передвижения по льду (пешего, конного и автомобильного).

После анализа сведения о ледовой обстановке должны быть подготовлены для занесения в таблицу ЕУВ, входящую в состав ежегодно публикуемых данных — одной из основных форм ГВК. В табл. 1.2 приведены в сокращенном виде различные группы характеристик состояний водного объекта, в том числе и ледовых явлений. Наряду с указанием цифровых кодов для занесения характеристик в книжку КГ-1М (н) в табл. 1.2 приводятся условные обозначения и сокращенные названия состояния объекта, принятые в таблицах ГВК.

Таблица 1.2

Код состояния водного объекта

Состояние водного объекта (словесная характеристика)	Обозначения в таблицах ГВК (ежегодные данные)		Цифры кода книжек КГ-1М(н), КГ-3М(н), КГ-6М(н)
	ЕУВ	ИРВ, ИРН	
Чисто		св	600
Сало, снежура	:	сало	511, 512
Забереги	)	заб.	513, 515
Редкий ледоход	х	рдх	516
Редкий шугоход; донный лед	*	ршгх	519; 520
Средний, густой ледоход	л	лх	516
Ледоход вторичный	+	втлх	518
Средний, густой шугоход	ш	шгх	519
Ледостав	І	лдст	565
с торосами	:	лдсттр	566
не сплошной	Z	нплдст	563
с шугой	┐	лдстш	569
Закраины	(	закр	539
Разводья	р	разв	544
Подвижка льда	П	подв	543
Вода на льду	і	влп	537
Зажор (затор)			
ниже поста	<	зжрп	535 (531)
выше поста	>	зжрп	534 (530)
Изменение ледовых условий техни- ческими средствами	≠	измлу	532, 536, 576
Лед			
плавающий	—	пллд	548
ярусный	—	лдярус	573
осевший	N	нвллд	522
Пятры	Я	пятр	521
Река промерзла	ПРМЗ		575
Река пересохла	ПРСХ		660
Лесосплав	L	лесспл	611
Залом леса	┐	залес	614 (615)
выше (ниже) поста			
Водная растительность	T	тр	622—629
Искажение уровня воды естествен- ными или искусственными явле- ниями	/	искур	652—659
Искажение стока воды искусствен- ными явлениями	∨	искст	677—682
Естественные или искусственные де- формации русла	D	деформ	635—648
Стоячая вода	B		664

Измерение толщины льда производится в районе гидрологического поста обычно в двух постоянных местах (у берега и на середине реки) в течение всего периода, когда безопасен выход на лед. При толщине льда менее 30 см и в период таяния наблюдения осуществляются один раз в пятидневку (5, 10, 15, 20, 25-го числа и в последний день месяца), а при толщине льда более 30 см — в последние дни первой, второй декады и месяца.

Ледовые буры ГР-7 или ПИ-8 (рис. 1.22) используются для просверливания скважин (лунки) для измерения толщины льда. Можно использовать и буры других конструкций.

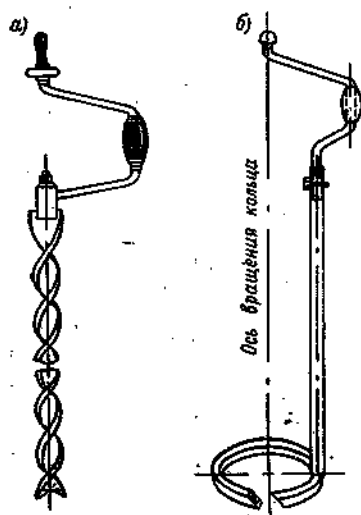


Рис. 1.22. Ледовые буры ГР-7 (а) и ПИ-8 (б).

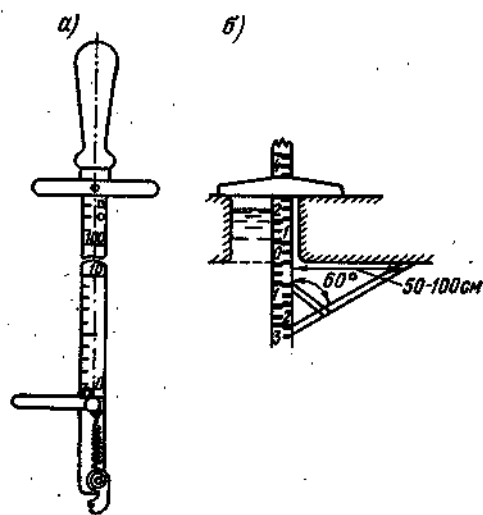


Рис. 1.23. Ледомерные рейки ГР-7 (а) и ГР-31 (б).

Толщина льда измеряется либо металлической ледомерной рейкой, входящей в комплект ледобура ГР-7, либо деревянной ледоснегомерной рейкой ГР-31. Конструкция реек и принцип измерения ими ясны из рис. 1.23.

Одновременно с измерением толщины льда определяется высота снежного покрова у лунки, глубины погружения льда и шуги, а также высота слоя воды на льду. Отмечается характер залегания снежного покрова и поверхности льда. Толщина льда и высота снежного покрова измеряются с погрешностью 1 см.

Глубина погружения шуги определяется ледомерной (ледоснегомерной) рейкой (по изменению сопротивления вращения рейки вокруг ее оси) или звуковой шугомерной рейкой ГР-85, состоящей из шугоосязывающего преобразователя, полупроводникового усилителя звуковой частоты и телефонных наушников (рис. 1.24). При измерении первичный преобразователь крепится к штанге и вводится в лунку. Нижняя граница шуги определяется по прекраще-

нию шума в наушниках, который создается в результате трения «усов» преобразователя о стенки лунки и шугу.

Для исключения случайных погрешностей на реках шириной более 25 м толщина льда определяется в трехкратной повторности (в трех разных лунках), полученные результаты осредняются. Использовать ранее просверленные лунки для последующих измерений не разрешается. Если расхождение результатов измерения в трех лунках не превышает 10 %, а также при толщине льда более 70 см можно ограничиться наблюдениями лишь в одной.

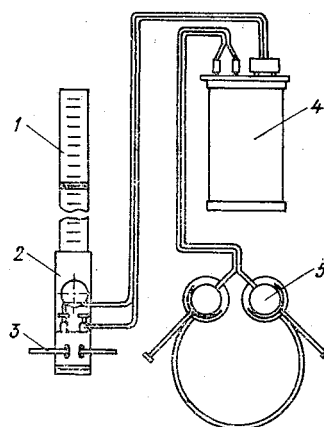


Рис. 1.24. Звуковая шугомерная рейка ГР-85.

1 — гидрометрическая штанга, 2 — первичный преобразователь, 3 — «усы», 4 — усилитель звуковой частоты, 5 — телефонные наушники.

При выборе места для систематических наблюдений исходят из требований репрезентативности получаемых данных о толщине ледяного покрова. Контроль за соблюдением этого условия осуществляется периодическими ледомерными съемками с обязательным включением в них точек стационарных наблюдений.

В первые два-три года наблюдений за ледовым режимом контрольные ледомерные съемки производятся 2 раза за время ледостава (в начале и конце этого периода). В дальнейшем они повторяются один раз в 8—10 лет. На реках, где условия формирования льда непостоянные, ледомерные съемки производятся ежегодно.

Результаты измерений общей толщины льда, толщины погруженного льда и шуги, высоты снега на льду и плотности снега, высоты слоя наледной воды и толщины наледного льда, а также места измерения (на середине реки, у берега, на плесе, на перекате) записываются в соответствующие графы книжки КГ-1М (н). Для записи наблюдений за каждую декаду или пентаду отводится три строки, в которых приводятся данные наблюдений по одной—трем точкам. Четвертая строка предназначена для записи средних значений элементов, она заключена в рамку, так как эти данные подлежат перфорации.

1.5.3. Изучение зажорно-заторных явлений и авиаразведка ледовой обстановки

Заторы и зажоры относятся к наиболее опасным явлениям ледового режима рек.

Заторы — скопление льдин в русле реки во время весеннего ледохода, вызывающее стеснение водного сечения и связанный с этим подъем уровня воды. В заторном скоплении льда принято выделять три характерные зоны (рис. 1.25): а) «замок», или «очаг», затора (не вскрывшийся ото льда участок реки или перемычка из ледяных полей); б) собственно затор, или «голова» затора (многослойное скопление льдин); в) шлейф затора (однослой-

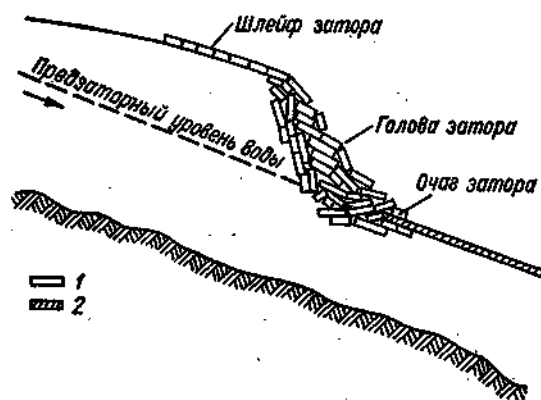


Рис. 1.25. Характерные зоны скопления заторного льда.

1 — скопление отдельных льдин, 2 — сплошной ледяной покров.

ное скопление льдин в зоне подпора). На крупных реках зона выклинивания подпора иногда распространяется на многие десятки километров.

Образование заторов обычно приурочено к крутым поворотам или сужениям русла, местам расположения островов, зонам выклинивания подпора водохранилищ, устьевым участкам рек и нижним бьефам ГЭС.

Зажоры — скопления шуги с включением мелкобитого льда в русле реки, вызывающие стеснение водного сечения и связанный с этим подъем уровня, формируются в период образования ледяного покрова и при ледоставе ниже крупных полыней. Хотя зажорные скопления шуги и льда значительно стесняют живое сечение рек, в связи с малой водностью последних в зимний период это обычно не влечет за собой опасных наводнений. Исключение составляют горные реки и реки с зарегулированным режимом.

Для изучения заторов и зажоров на участках, где они возникают, в осенний период создается сеть из пяти-шести постов, на которых ведутся наблюдения за уровнями воды и ледовой обстановкой. С особой тщательностью фиксируются условия замерзания,

наличие шуги и занос ее под кромку льда, скорость продвижения кромки льда, расходы шуги и льда и т. п.

В предвесенний период производится ледомерная съемка участка для определения запаса ледяного материала и оценки степени закупорки живого сечения реки. В этом случае при выполнении ледомерной съемки необходимо дополнительно определять в каждой лунке глубину воды.

С начала вскрытия производятся учащенные наблюдения за уровнями воды, картирование ледовой обстановки, фиксация подвижек льда, измерение расходов льда.

Важное место при изучении заторно-зажорных явлений отводится авиаразведкам ледовой обстановки. Элементы ледовой обстановки оцениваются визуально с самолета и наносятся на заранее подготовленную карту-бланк. Для удобства работы поперечный масштаб карты-бланка назначается крупнее продольного: ширина изображения реки должна составлять 1,5—2,0 см. Картирование сопровождается подробными записями в бортовом журнале. Помимо исчерпывающей характеристики ледяных образований и ледовых явлений, в нем приводятся сведения о дате, времени прохождения контрольных пунктов маршрута полета, облачности, условиях видимости и т. п.

Картирование следует дополнять выборочной аэрофотосъемкой наиболее важных элементов ледовой обстановки. Применение аэрофотосъемки особенно целесообразно для оценки зон затопления, густоты ледохода (шугохода), скорости перемещения кромки ледостава (путем повторных съемок через достаточные промежутки времени) и других количественных характеристик ледового режима. Аэрофотосъемку лучше выполнять специальными аэрофотоаппаратами, но могут быть использованы и обыкновенные любительские фотоаппараты.

По материалам авиаразведки составляется краткая записка, которая передается оперативным органам УГКС. В особо экстренных случаях информация может быть передана непосредственно с борта самолета.

1.6. Визуальные наблюдения за водной растительностью и факторами руслового режима

1.6.1. Наблюдения за водной растительностью

Водная растительность, создающая сопротивление движению потока, встречается почти во всех климатических зонах. Она обуславливает повышение уровня воды, заболачивание пойм и заиление русел.

На реках встречаются три вида растительности:

- сорняки, растущие по берегам (осоты, горчак, солянки и др.);
- полупогруженные водные растения (камыш, рогоз, осока, ситник, стрелолист и др.);

— погруженные водные растения и растения с плавающими листьями (рдест, роголистник, хара, уруть, элодея, кувшинки и др.).

Вегетация водных растений начинается при температуре воды 5—10°C и продолжается 125—230 сут. Во многих случаях неполностью отмершие растения вмерзают в лед и продолжают стеснять русло и зимой.

Сведения о водной растительности имеют большое значение для оценки пропускной способности русла и обоснования методики учета стока воды.

Наблюдения за развитием водной растительности производятся ежедневно с записью в книжке КГ-1М(н). Кроме того, в течение всего сезона вегетации растений каждое 10, 20-е число и в последний день месяца производится обследование участка реки в районе расположения поста. Результаты записываются в книжку КГ-1М(н) с указанием вида водной растительности, ее распространения по длине и ширине реки, густоты и состояния. Распространение растительности по длине реки указывается относительно створа поста: на сколько метров выше и ниже створа, по всей ли длине обследуемого участка или встречаются участки, лишенные растительности. Отмечается характер зарастания: сплошь, пятнами, по берегам. Ширина заросших береговых полос указывается в метрах. Густота произрастания оценивается визуально в баллах: редкая (01—03 балла), средняя (04—06 балла), густая (07—10 баллов). Отмечается, возвышаются ли растения над водой или они не доходят до поверхности воды. В этом случае указывается глубина их погружения в метрах. Особо отмечаются случаи, когда водная растительность стелется по дну, когда растительность, не отмирая полностью, сохраняется при ледоставе.

После паводков производится обследование водной растительности на участке поста и отмечается, насколько изменилось ее состояние: растения лежат на дне, частично вырваны, засыпаны наносами, остались без изменения.

1.6.2. Наблюдения за деформациями и другими изменениями русла

Движение потока сопровождается изменениями в рельефе дна и очертаний берегов, особенно при легкоразмываемых грунтах. В свою очередь под воздействием русловых переформирований происходит перестройка скоростной структуры потока. Наглядно это можно представить так:

поток $\rightleftharpoons$ русло.

Изменения гидравлических (относящихся к потоку) и морфологических (свойственных руслу) условий должны приниматься во внимание при выполнении наблюдений. В поле зрения наблюдателя постоянно должны находиться все явления, могущие вызвать изменение режима и условий течения реки: образование или размыв отмелей, кос, осередков, островков; расчистки русла; дно-

углубительные работы; образование новых протоков-рукавов; вынос большого количества насосов и отложений конусов выноса в устьях притоков (оврагов, саев); обвалы или оползни берегов; сход снежных лавин в долине реки; наличие лесосплава — модем или плотами с указанием его густоты в баллах: редкая (01—03 балла), средняя (04—06 баллов), сплошь (07—10 баллов); образование заломов леса; устройство лесных запаней; создание новых постоянных или временных запруд, перемычек, устройство новых мостов; периоды попусков — сбросов воды из вышерасположенного водохранилища и другие явления.

Описываются выдающиеся паводки, сели, лавины, наводнения и отмечаются события, нарушающие нормальное использование реки для судоходства, водоснабжения, орошения, энергетики.

Все эти наблюдения ведутся визуально, т. е. без применения каких-либо средств измерения. Результаты заносятся в книжку КГ-1М (н) или КГ-3М(н) соответственно тому, производится ли они во время измерения уровней или расходов воды. В тех случаях, когда трудно описать сложившуюся обстановку в районе поста, рекомендуется составить картограмму (зарисовку), используя условные обозначения, приведенные в Наставлении вып. 2, ч. II.

Глава

2

ПРОМЕРЫ ГЛУБИН И РУСЛОВЫЕ СЪЕМКИ

2.1. Оборудование и средства для измерения глубин

Измерение глубин — один из наиболее распространенных видов наблюдений.

Глубиной называется расстояние по вертикали от поверхности воды до дна. Глубина русла рассматривается прежде всего как один из элементов расхода воды. Но измерение глубин, или, иначе, промеры русла, выполняется также для определения рельефа дна и выявления опасных для судоходства мест, контроля русловых переформирований в зонах гидроузлов, водозаборных и сбросных сооружений. В этих случаях производится русловая съемка участков рек и акваторий. В зависимости от целей исследования русла его промеры выполняются в различные сезоны года как при высоких, так и при низких уровнях.

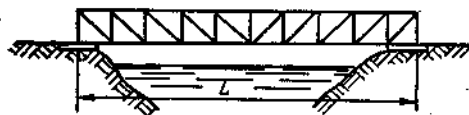
Измерение глубин, как правило, производится не в одной точке, а по всей ширине русла и длине изучаемого участка.

2.1.1. Оборудование и устройства для промеров русла

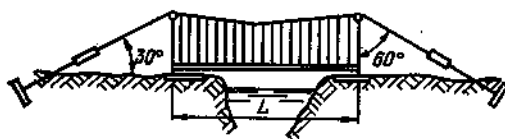
Существует большое количество различных по конструкции устройств, используемых при измерении глубин. Все они могут быть подразделены на шесть основных разновидностей (табл. 2.1).

Таблица 2.1
Основные типы оборудования гидрометрических створов

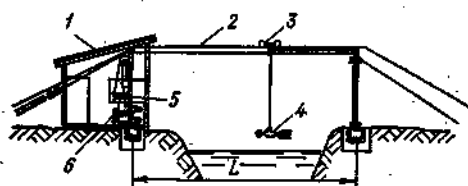
Конструктивная характеристика



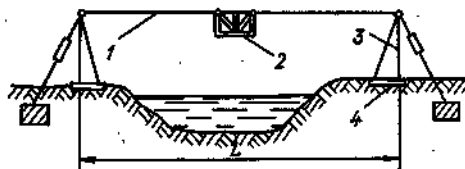
Мост решетчатый для малых рек и каналов. Пролеты $L = 12, 16, 20$ и 24 м. Расчетная нагрузка 100 кг/п. м. Конструкция сборная, секционная



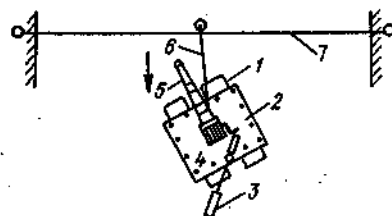
Мост подвесной с несущими канатами диаметром в зависимости от пролета от $16,5$ до $33,5$ мм. Пролеты $L = 25, 50, 75$ и 100 м. Расчетная нагрузка 75 кг/п. м



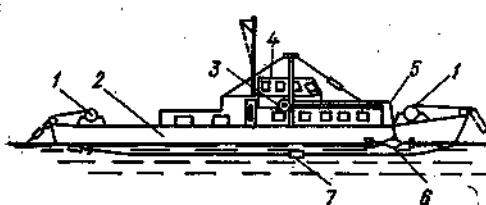
Дистанционная гидрометрическая установка ГР-64М для рек шириной до 200 м. Масса груза 100 кг. Основные элементы: 1 — кабина, 2 — канатная система, 3 — каретка, 4 — гидрометрический груз, 5 — пульт управления с блоком счетчиков, 6 — двухбарабанная лебедка с электроприводом



Людочная переправа двухканатная пролетом до 200 м. Полезная временная нагрузка — от 340 до 490 кг. Люлька сварная размером в плане 1700 к 1300 мм. Основные элементы: 1 — ездовой канат, 2 — люлька, 3 — опора, 4 — фундамент опоры, 5 — анкер ездового каната



Паромная переправа для рек шириной $200-300$ м. Грузоподъемность $2-3$ т. Основные элементы: 1 — понтон, 2 — палуба, 3 — руль, 4 — лебедка, 5 — стрела для опускания приборов, 6 — буксирный канат, 7 — ездовой канат



Гидрометрическое судно. Водоизмещение до 150 т. Мощность двигателей до 300 л. с. Основные элементы: 1 — якорные лебедки, 2 — корпус, 3 — лебедка для опускания приборов, 4 — рубка, 5 — поворотная стрела, 6 — вертушка на грузе, 7 — забортные блоки эхолота

ГРЧ

Все типы гидрометрического оборудования, применяемого на гидрологической сети, кроме судов, сконструированы в ГГИ. Дистанционные установки ГР-70 и ГР-64 выпускаются серийно, гидрометрические мостики, люлочные и паромные (лодочные) переправы изготавливаются на местах по типовым проектам лаборатории гидрометрических сооружений ГГИ (С. С. Гинко, О. М. Янченко, А. В. Иванов).

При измерении расходов воды на средних и больших реках используются моторные лодки и катера, применяемые на речном транспорте и лесосплаве.

2.1.2. Средства измерения глубин

Приборы для измерения глубин подразделяются на две группы: 1) для измерения глубин в отдельных точках и 2) для непрерывной съемки профиля дна.

В качестве средств точечных измерений служат наиболее простые приборы.

Наметка — шест диаметром 4—5 см, длиной до 5—6 м, изготовляемый из дерева или легких дюралюминиевых трубок и разме-

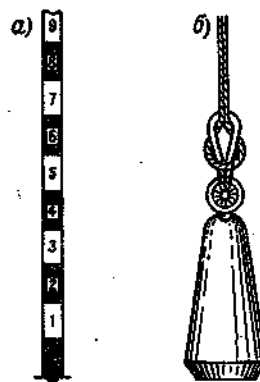


Рис. 2.1. Наметка (а) и ручной промерный лот (б).

ченный на дециметры масляной краской контрастных цветов (рис. 2.1 а). Нижний конец деревянной наметки оковывается железным башмаком, который помогает погружению ее в воду и предохраняет от раскалывания при ударах о дно. Вместо наметок при глубинах, не превышающих 3 м, можно использовать гидрометрические штанги.

Ручной лот представляет собой груз массой до 10 кг (рис. 2.1 б). На одном конце лота — углубление для взятия проб донного грунта, на другом — ушко, к которому привязывается лотлинь — пеньковая или капроновая бечева (шнур) диаметром 5—10 мм. Лотлинь размечается через 0,1—0,2 м марками из лоскутов цветной ткани или кожи. Чтобы бечева не вытягивалась, ее до разметки два-три дня вымачивают в воде, а затем высуши-

вают, натягивая между двумя столбами под нагрузкой 30—40 кг. Для лотлиния не пригоден стальной канат (трос), так как он может повредить руки и неудобен в обращении.

Промеры глубин наметкой и лотом требуют некоторой сноровки: их забрасывают против течения и с упреждением по ходу судна так, чтобы в момент отсчета глубины наметка или лотлинь находились в вертикальном положении.

Механический лот состоит из мерного каната и лебедки для опускания и подъема груза.

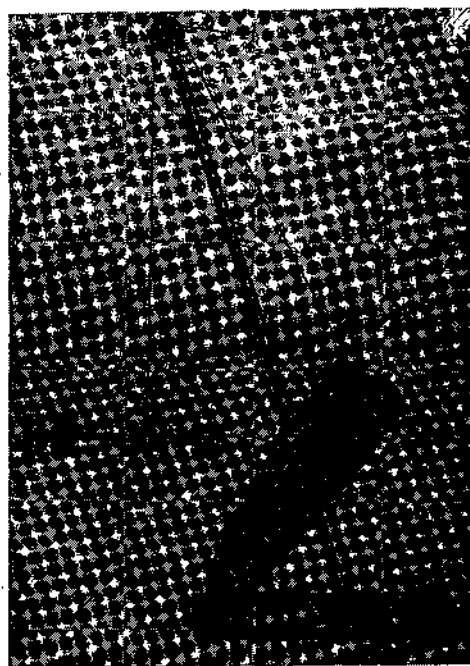
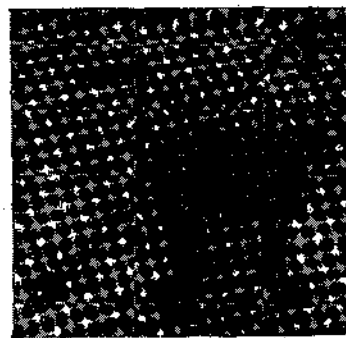


Рис. 2.2. Гидрометрические лебедки «Нева» (а) и «Луга» (б).

1 — блок, 2 — стрела, 3 — рукоятка, 4 — барабан, 5 — рама, 6 — плита.



На гидрологических постах применяются различные типы гидрометрических лебедок: «Луга» и «Нева» предназначены для лодочных и паромных переправ, ГР-36 с поворотной стрелой — преимущественно для судов, ГР-65 используется на люечных переправах. Каждая лебедка независимо от конструкции включает четыре основные части: станину, грузовую стрелу, вышку для каната, счетчик глубин для определения длины вытравленного каната.

Лебедка «Нева» (рис. 2.2 а). Станина представляет собой плиту, к которой присоединена рама, удерживающая стрелу. Шарнирное крепление подвижных частей обеспечивает изменение выноса стрелы от 0,3 до 1,0 м и угла наклона — от 30 до 60°. Один конец подъемного каната перекинут через блок с предохранитель-

ной дужкой, а другой намотан на барабан, который вращается рукояткой. На противоположном конце оси барабана укреплен счетчик глубин. Лебедка снабжена ручным и ножным тормозом, храповиком с собачкой. В комплект входит специальный стальной канат длиной до 25 м, диаметром 2,8—3,0 мм с сердечником из медного изолированного провода. Грузоподъемность лебедки до 60 кг при собственной массе 32 кг.

Лебедка «Луга» (рис. 2.2 б) более портативна. Ее масса всего 20 кг, стрела отделена от станины, что создает дополнительные удобства на рабочем месте: например, стрела может быть закреп-

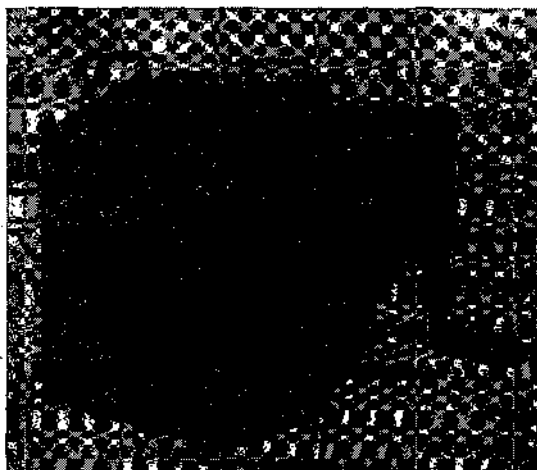


Рис. 2.3. Лебедка ГР-65. Общий вид при закрытом кожухе.

лена в носовой части судна, а станина с вьюшкой — ближе к корме.

Лебедка ГР-65 предназначена для люлечных переправ. Она не имеет стрелы, так как промерный лот или приборы опускаются в прорезь настила люльки непосредственно под лебедкой. Конструкция лебедки ГР-65 не вполне удовлетворяет требованиям облегчения и безопасности работы при промерах глубин горных рек в условиях значительных скоростей течения. В связи с этим В. И. Яковлевым (ГГИ) разработана модифицированная конструкция лебедки ГР-65М (рис. 2.3). Ее отличительная особенность — закрытое исполнение, при котором обеспечивается сохранность подъемного механизма. Особое достоинство лебедки — в грузоупорном тормозе, предотвращающем свободное падение груза и травмы работающих. Грузоупорный тормоз исключает необходимость переключения храпового стопора при переходе от подъема к опусканию. Лебедка ГР-65М укомплектована стальным канатом (тросом) длиной 30 м, имеющим токопроводящую жилу для подключения электрических цепей приборов. Счетчик лебедки показывает глубину потока в сантиметрах. Специальное устройство фиксирует угол отбоя грузового каната с погрешностью 1°.

Грузоподъемность лебедки 100 кг, собственная масса не превышает 50 кг.

Лебедка ГР-36 с поворотной стрелой (рис. 2.4) удобна для использования на понтонах и катерах. Ее грузоподъемность 100 кг. Станина несет поворотную колонку со стрелой, подъемным устройством и вьюшкой. Вся система может вращаться вокруг вер-

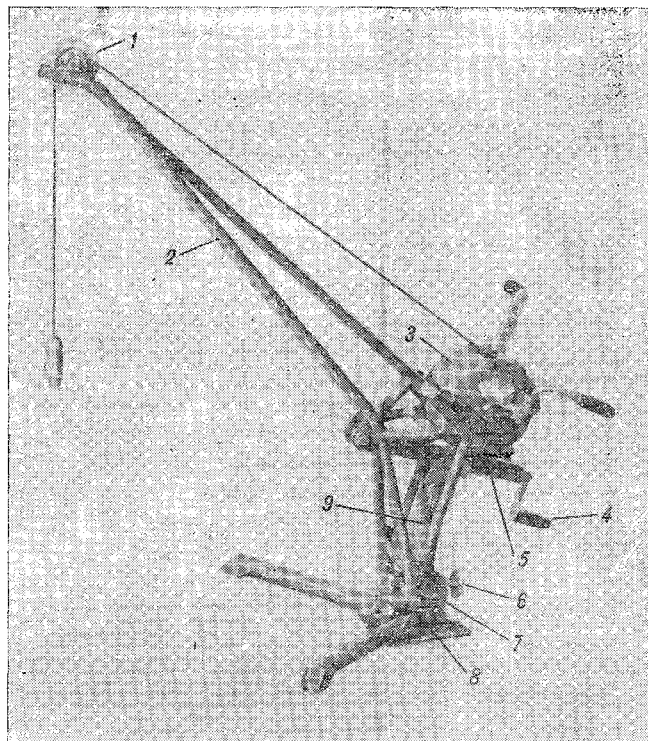


Рис. 2.4. Лебедка с поворотной стрелой ГР-36.

1 — блок, 2 — стрела, 3 — вьюшка, 4 — рукоятка подъема и опускания стрелы, 5 — подъемное устройство, 6 — винтовой зажим, 7 — прижимная колодка, 8 — станина, 9 — поворотная колонка.

тикальной оси на 360°. Стрела может быть зафиксирована в любом положении с помощью зажима и прижимной колодки. Барабан вьюшки при однослойном укладе вмещает 25 м стального каната.

Существуют и другие типы лебедок и подъемных устройств. Так, унифицированные лебедки допускают их трансформацию применительно к местам установки — в лодке, на катере или люлочной переправе, соответственно — со стрелой и без стрелы.

Приемы измерения глубины с применением механических лотов и различных типов лебедок практически одинаковы. Чтобы опу-

стить лот, надо повернуть рукоятку барабана назад, откинув собачку храпового колеса и травить канат под тяжестью груза, сдерживая вращение барабана ножным или ручным тормозом. Когда нижняя поверхность груза коснется воды, барабан стопорится и показания счетчика ставятся на нуль. Затем лот опускается до дна и записывается глубина воды.

При работе с лебедками следует строго соблюдать правила техники безопасности: избегать резких торможений грузовой системы; при подъеме груза собачка должна быть накинута на храповое колесо, чтобы исключить возвратное движение барабана; следить за укладкой или стравливанием каната, не допускать его выхода из канавок и попадания за щеки барабана. При стравливании каната на барабане всегда должно оставаться не менее пяти-шести витков.

Чтобы избежать обрыва стальных канатов, их диаметр подбирается в зависимости от массы груза и скоростей течения и должен быть не меньше значений, приведенных в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Диаметр стального каната в зависимости от массы груза G и скорости течения v

v м/с	G кг	d мм
$< 1,0$	10—15	$< 1,0$
1—2	25—50	1,5—1,8
2—3	50—75	2—3
> 3	75—100	3—4

Некоторые другие условия выбора груза и каната приведены ниже, в п. 2.2.3.

Эхолоты — наиболее совершенные средства измерения глубин, обеспечивают полную автоматизацию промеров. Принцип действия эхолотов заключается в послыке ультразвуковых импульсов и приеме их эха — отраженных сигналов. Промежуток времени, в течение которого совершается этот цикл, пропорционален глубине. Профиль дна непрерывно вычерчивается на специальной электротермической бумаге, протягиваемой между барабанами регистрирующего устройства.

Рассмотрим основные конструктивные узлы прибора на примере эхолота «Кубань» (рис. 2.5 а), предназначенного для измерения глубин в диапазоне 0,2—20 м с погрешностью $\pm 1,5\%$ при скорости судна до 35 км/ч. Центральный блок эхолота включает электродвигатель, вращающий перо через редуктор, на оси которого помещен кулачок посыльного контакта. Лентопротяжный узел состоит из двух вращающихся барабанов для наматывания и сматывания электротермической бумаги. Перо образует скользящий контакт, через который в момент послыки и приема импульсов проходит ток, прожигающий бумагу. Цепь послыки—приема

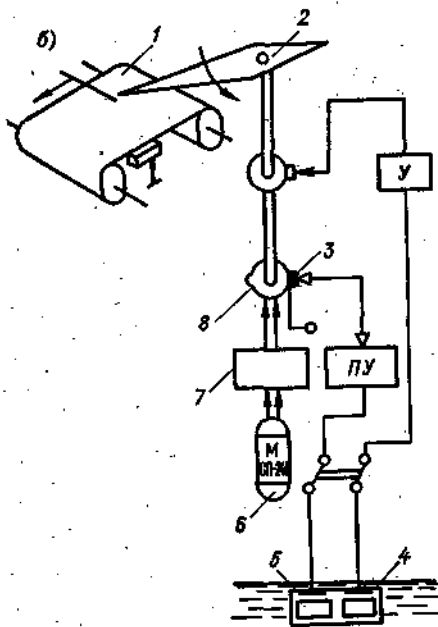
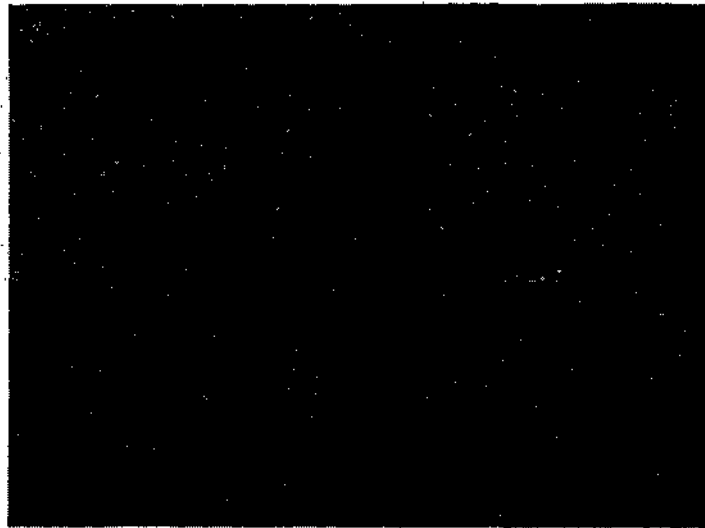


Рис. 2.5. Эхолот «Кубань»:

а — общий вид установки на моторной лодке; б — блок-схема (без цепи сигнализации о минимальных глубинах).
 1 — лентопотяжный узел, 2 — перо, 3 — посыльный контакт, 4 — приемник, 5 — излучатель-вибратор, 6 — электродвигатель, 7 — редуктор, 8 — кулачок.

импульсов включает вибратор-излучатель и приемник с устройствами для усиления сигналов. В заводском исполнении пьезоэлектрические вибраторы эхолота помещены в защитный кожух. При промерах с мотолодок этот кожух можно снять, чтобы облегчить установку эхолота (рис. 2.5 а).

В комплект эхолота входит аккумуляторная батарея напряжением 24 В и преобразователь постоянного тока в переменный. Масса прибора около 42 кг.

Одно из преимуществ эхолота «Кубань» — четкая запись линии дна, достигаемая благодаря контактному перу, а некоторый недостаток заключается в том, что глубина записывается по дуге окружности, что несколько затрудняет обработку батиграммы.

Вертикальный масштаб записи глубин зависит от скорости звука в воде, которая изменяется в зависимости от температуры (при +12°C в пресной воде скорость звука равна 1450 м/с). Для компенсации погрешностей, связанных с неравномерным распределением температуры воды по глубине, перед началом работы производят коррекцию (настройку) эхолота так, чтобы скорость вращения его пера соответствовала скорости звука при данной температуре воды. Для коррекции эхолота промерное судно устанавливается на якорь в достаточно глубоком месте с твердым дном. Затем измеряется расстояние от нижней плоскости вибратора до дна и глубина погружения низа вибратора от поверхности воды, включается эхолот и регулятор скорости вращения пера устанавливается так, чтобы запись на батиграмме соответствовала действительной глубине.

Как показывает опыт применения эхолота на оросительных каналах, в частности работы, проведенные В. Н. Прилипко, несмотря на высокую концентрацию наносов в придонном слое, отражение ультразвукового луча происходило от границы неподвижного дна. Иными словами, мутность воды практически не препятствует применению эхолотов для измерения глубин на реках и каналах.

Кроме эхолотов с записью, получают распространение эхолоты со стрелочным указателем глубин. Они значительно легче эхолотов-самописцев. Так, масса центрального прибора эхолота с указателем типа ЭПО-10М составляет всего 1,5 кг. Диапазон измерения глубины этим эхолотом — до 10 м, питание — от батарей напряжением 12 В. Эхолот обеспечивается пьезоэлектрическими вибраторами, которые устанавливаются на кронштейне навесного типа, удобного для крепления на моторных лодках.

2.2. Измерение глубин

2.2.1. Подготовка к проведению промеров глубин

Комплекс промеров включает: а) определение положения промерных точек (вертикалей) в плане; б) измерение глубин в каждой промерной точке; в) определение уровня воды; г) установление характера грунтов, слагающих дно реки.

Наиболее простой способ координирования промерных точек — непосредственное измерение расстояний от постоянного начала створа посредством ленты, рулетки, размеченного шнура, каната. В постоянно закрепленных створах соответственно закрепляется и разметка промерных вертикалей.

Более сложны геодезические методы координирования — засечка промерных точек теодолитом, секстантом и мензулой, применяемые при промерах с моторных лодок и катеров.

Способ промеров глубин зависит от общей цели работ. Если они выполняются для определения расходов воды, то измерение глубин производится в гидрометрическом створе, чтобы получить поперечный профиль и площадь водного сечения. Если промеры входят в состав русловых съемок, глубины измеряются по поперечникам, косым галсам и продольникам.

Точность измерения глубин в точке зависит как от самой глубины, так и от средств измерения. При использовании штанг, наметок и лотов отсчеты глубины h должны производиться с точностью, равной половине цены деления Δ . В практике считается допустимой относительная погрешность измерения не более 2 %. Отсюда вытекают следующие требования к разметке лотлиния и наметок:

Глубина, м	до 1	1—2	2—5
Цена деления, см . . .	1,0	2,0	5,0

При измерении глубин более 5,0 м применяются лоты. Погрешность отсчета по счетчикам лебедок механических лотов составляет 1 см и является вполне достаточной. Лотлинии ручных лотов обычно размечают через 0,2 м (более дробная разметка затрудняет визуальные отсчеты). Ясно, что в этом случае точность промеров оказывается очень низкой и недопустима при измерении глубин для определения площадей живых сечений потока. Применение ручных лотов допускается лишь при русловых съемках и не рекомендуется при измерениях расходов воды.

Наблюдения за уровнями воды ведутся на ближайшем гидрологическом посту. Высота уровня измеряется в начале и конце работы на каждом поперечнике (профиле).

Характер грунтов определяется визуально или с помощью лотов и специальных донных щупов. Данные о грунтах представляют интерес при расчете деформаций русла и транспорта наносов. Кроме того, эти данные позволяют судить о точности измерения глубин.

2.2.2. Промеры глубин в гидрометрических створах равнинных рек

Организация промерных работ зависит от оборудования, которое используется при их выполнении. Обычно измерения глубин в гидрометрических створах производятся с мостиков, люлочных, лодочных (паромных) переправ и судов, а зимой — со льда.

Глубины воды по профилю измеряются через равные расстояния в 20—50 промерных точках (вертикалях). Расстояние между промерными вертикалями зависит от ширины реки, рельефа дна и требуемой точности определения площади водного (живого) сечения.

Наиболее просты приемы промеров русла с гидрометрических мостиков. Расстояние до точек измерения глубин при этом определяется мерной лентой или по заранее произведенной разметке мостовых конструкций² (балок или края настила мостика). Достаточно приспособлены для промеров глубин установки ГР-64 и ГР-70. Они обеспечивают дистанционные измерения глубин и расстояний, значения которых определяются по показаниям счетчиков на пульте управления.

При ледоставе облегчается доступ для выполнения промеров по всей ширине реки; затруднения связаны с необходимостью пробивать или бурить лунки для опускания наметок и лотов. В каждой промерной точке сначала

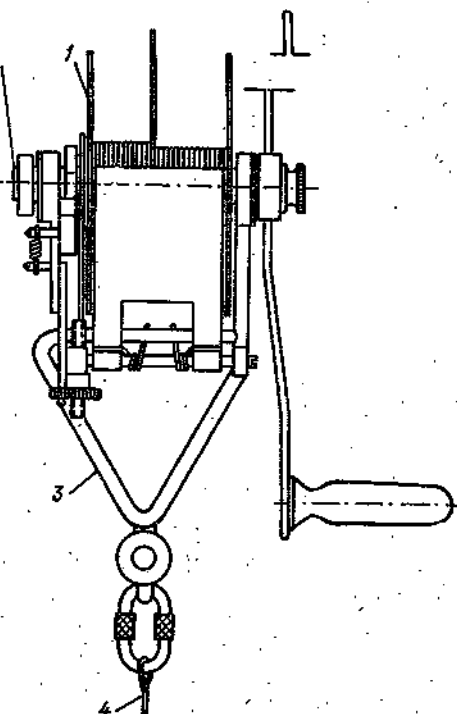


Рис. 2.6. Подвесная вьюшка ГР-75.

1 — барабан, 2 — ось вращения, 3 — стреловидная оправа, 4 — канат.

определяется высота снега, затем глубина воды, общая толщина льда, глубина погружения льда и шуги. На каждом промерном профиле определяется расстояние от постоянного начала до уреза воды по нижней поверхности льда. Для этого у каждого берега пробивается несколько лунок. Расстояние от постоянного начала до урезов по уровню воды определяется с использованием профиля гидрометрического створа.

При открытом русле измерение глубин выполняется с использованием лодочных переправ, моторных лодок и катеров. Для производства промеров на реках шириной до 200 м наводится лодочная переправа с ездовым и разметочным тросами.

При наведении лодочной переправы на реках шириной до 100 м для перетягивания ездового каната служит подвесная вьюшка ГР-75 (рис. 2.6). На ее барабан наматывается 150 м стального каната диаметром 2,8 мм. Барабан вьюшки вращается на оси,

вставленной в стреловидную оправу. Форма этой оправы обеспечивает центрирование вьюшки, работающей в подвешенном состоянии. Стремя вьюшки присоединяется к отрезку каната, который крепится к береговой опоре. В комплект вьюшки входит стойка, которая закрепляется в кормовой части лодки. Вьюшка надевается на шток стойки, с нее разматывается канат, закрепленный свободным концом на берегу. После того как лодка достигнет противоположного берега, вьюшка снимается со стойки и с помощью карабина крепится к заранее подготовленной опоре. После этого производится натяжение каната.

Для переброски стального каната сравнительно большого диаметра (более 12 мм) сначала натягивается тонкий канат, как

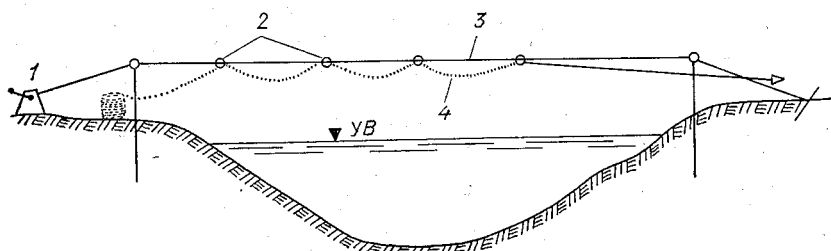


Рис. 2.7. Схема наведения канатной переправы.

1 — лебедка строительная, 2 — скользящее кольцо, 3 — разметочный канат, 4 — ездовой канат.

описано выше, затем по нему переправляется ездовой канат, подвешенный на скользящих проволочных кольцах, чтобы он не погружался в воду и не сносился течением (рис. 2.7).

Разметочный канат натягивается над ездовым канатом так, чтобы исключить провес и обеспечить измерение расстояний по створу с погрешностью не более 2—3 %. Один конец каната удобно закреплять за столб, установленный в точке постоянного начала так, чтобы на нем находилась нулевая метка. Разметочный канат разбивается на равные интервалы (1—5 м) в зависимости от ширины реки.

При ширине реки более 200—300 м промеры выполняются с моторных лодок и катеров, а расстояние до промерных точек определяется засечками теодолитом (мензулой с кипрегелем) с берега или секстантом с судна. Положение поперечного профиля в этом случае закрепляется двумя створными знаками. Они указывают направление промерного профиля: наблюдатель будет находиться в створе, пока передний знак 2 закрывает задний 1 (рис. 2.8 а). Створный знак представляет собой шест или столб высотой 3—5 м с укрепленным на нем щитом, окрашенным в яркий цвет, контрастный фону местности. Два створных знака образуют одну визуальную систему и вместе называются *створом*. На реках шириной до 500 м устанавливается одна пара створных знаков на берегу,

где проложена магистраль, а на более широких реках — на каждом берегу.

При промерах с засечками с берега мензула или теодолит устанавливаются в одной из точек береговой магистрали. Стоянка выбирается в таком месте, чтобы с нее можно было производить засечки на нескольких профилях и чтобы углы между их направлением и лучом визирования на промерную точку были не менее 30° . Если установить угломерный инструмент в точке магистрали не удастся, стоянка может быть вынесена в любое удобное место, но и в этом случае расстояния до промерных точек должны определяться от магистрали.

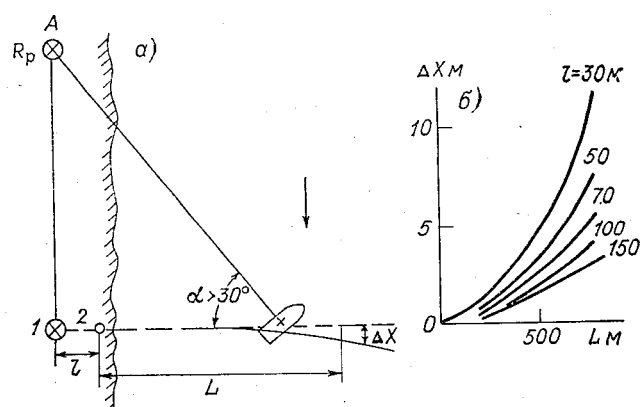


Рис. 2.8. Координирование промеров.

a — схема засечки положения точек измерения глубины мензулой или теодолитом из точки *A*; *b* — связь отклонений от створа Δx с расстоянием L от переднего знака и разном знаком L .

Засечки промеров производятся по сигналам с лодки (судна) в момент измерения глубины или по сигналам с берега. В первом случае всегда удастся зафиксировать положение резких переломов профиля дна, а во втором обеспечивается более равномерное распределение промерных точек, так как их положение на профиле намечается заранее и глубина измеряется по сигналу с берега в момент, когда судно находится в намеченной точке.

При значительном количестве промерных точек засечки обычно производятся через два-три измерения глубины, а положение промежуточных точек определяется по интерполяции.

Сигналы при промерах глубин подаются отмахками флажками разного цвета. Для засечек промерных точек отмахка дается поочередно красным и белым флажком, а для засечек положения урезов поднимаются одновременно оба флажка.

При работе с мензулой мензулист в момент отмахки делает по линейке кипрегеля отметку черточкой на линии профиля, пишет номер засечки и первую букву цвета флажка, например: 1к, 2б и т. д. При засечках теодолитом в момент отмахки отсчиты-

вается угол между направлением магистрали и лучом визирования на промерную точку. В промерной книжке (в лодке) записывается глубина, номер точки, цвет флажка и характер грунта.

Точность координирования промеров зависит от того, как устойчиво удерживается гидрометрическое судно в створе, закрепленном двумя береговыми знаками. С удалением от берега возможность отклонения от створа Δx возрастает, а при одном и том же удалении L оно тем меньше, чем на большее расстояние l разнесены створные знаки. Функция $\Delta x = f(L, l)$ представлена на рис. 2.8 б в виде семейства кривых. Их можно использовать для проверки правильности установки створа. Приведем пример такой проверки.

Точность проводки судов оценивается так называемой навигационной погрешностью $\sigma_{ук}$ — средним квадратическим отклонением от судового хода $B_{сх}$. В нашем случае $B_{сх} = 2\Delta x$. Для $\sigma_{ук}$ на прямолинейных участках при $B_{сх} \leq 600$ м можно принимать зависимость

$$\sigma_{ук} = 0,0002B_{сх}^2 + 0,042B_{сх}. \quad (2.1)$$

Пусть гидрометрический створ оборудован двумя створными знаками на расстоянии друг от друга $l = 30$ м. Тогда в 500 м от берега, согласно графику на рис. 2.8 б, $B_{сх} = 2 \cdot 6 = 12$ м. Навигационная погрешность при этом составит

$$\sigma_{ук} = 0,0002 \cdot 12^2 + 0,042 \cdot 12 = 0,55 \text{ м},$$

что можно считать вполне допустимым.

Приведенные соотношения могут быть использованы при оптимизации измерений, входящих в комплекс русловых съемок и промеров глубин.

2.2.3. Промеры глубин на горных реках

Отличительная особенность горных рек — сложный рельеф валунно-галечного дна и неровность водной поверхности. Разность отметок уровня по ширине русла может достигать нескольких десятков сантиметров (рис. 2.9). В этих условиях при промерах глубин уже нельзя исходить из представления о горизонтальности водной поверхности; ее действительные отметки определяются нивелированием одновременно с промерами поперечного профиля русла. В качестве неизменного начала для отсчета относительной высоты уровня и дна может служить туго натянутый разметочный канат или балки гидрометрического мостика (их отметка определяется нивелированием от репера поста). В этом случае каждый раз делаются два измерения расстояний по вертикали — до дна и до поверхности воды. Разность этих расстояний дает значение глубины. При высоко подвешенной люлочной переправе (рис. 2.9) сначала нивелирной рейкой определяют расстояние l от туго натянутого каната до верха груза диаметром d , а затем, установив счетчик глубин на нуль, опускают груз и делают два отсчета — в момент касания поверхности воды и дна. Соответ-

ственно этому получают расстояния $H_{пв}$ и $H_{д}$, которые дают возможность определить отметки:

поверхности воды

$$z_{пв} = z_{рк} - l - d - H_{пв}, \quad (2.2)$$

дна

$$z_{д} = z_{рк} - l - d - H_{д}. \quad (2.3)$$

(здесь $z_{рк}$ — отметка разметочного каната).

Выступающие валуны и провалы между ними вносят неопределенность в очертания дна горных рек. В. Г. Андреянов рекомендовал в этих случаях измерять глубины в трех створах: основном, верхнем и нижнем, отстоящих от основного на расстояниях, равных интервалу между промерными вертикалями. Положение расчетного дна соответствует среднему уровню выступающих поверхностей валунов в каждом из трех створов.

Измерение глубин осложняется волновыми колебаниями водной поверхности. Чтобы зафиксировать ее осредненное по-

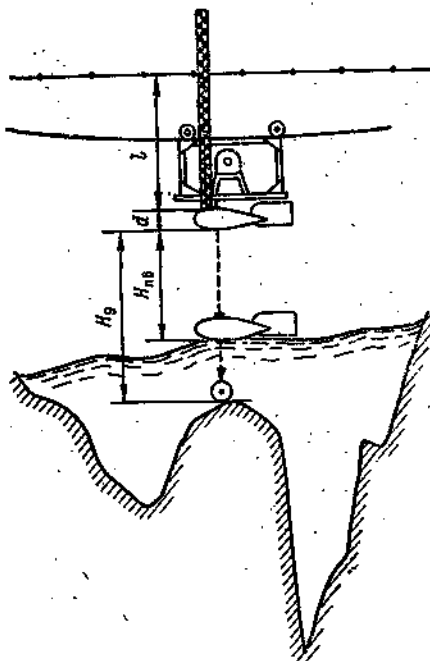


Рис. 2.9. Измерение глубин русла и съемка профиля водной поверхности с люлечной переправы.

ложение, производят серию из 10 отсчетов уровня, соответствующих гребням и впадинам волн, и принимают среднее значение из их полусумм.

При работе с высокорасположенных мостиков и люлечных переправ отсчет глубины затрудняется набегом течения на штангу и слабой различимостью делений на ней. В этом случае удобно использовать металлический ползунок, опускаемый по штанге до поверхности воды на размеченном шнуре (по нему отсчитывается надводная длина штанги). Можно применять для этой цели и различные скользящие шаблоны из толстой стальной проволоки.

Рассмотрим еще один фактор, осложняющий измерение глубин на горных реках, — отклонение (относ) груза и приборов, опускаемых на канате, под действием течения. Глубина их погружения h всегда оказывается меньше, чем длина вытравленного каната l_k . Определение поправки Δl , которая должна вычи-

таться из l_k , требует решения задачи о равновесии погруженной в поток тяжелой нити. Относ приборов, подвешенных в потоке на канате, исследован Д. Я. Ратковичем. В результате теоретических и натурных исследований им получены соотношения, позволяющие уточнить рекомендации Наставления вып. 6, ч. 1. Рассмотрим три основные задачи (табл. 2.3):

Таблица 2.3

Основные расчетные операции, выполняемые при измерении глубин лотом

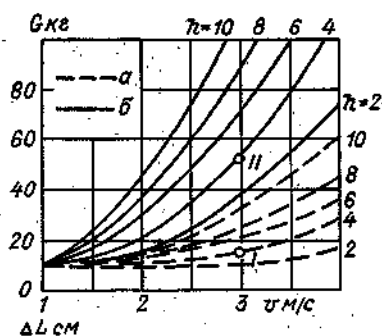
Операция

Расчетные схемы и графики

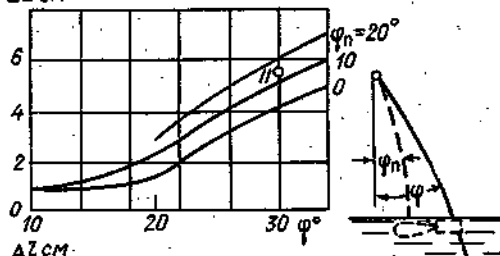
1. Выбор оборудования по условиям:

- а) непревышения угла откоса каната более $40-45^\circ$
- б) возможности не учитывать угол откоса каната

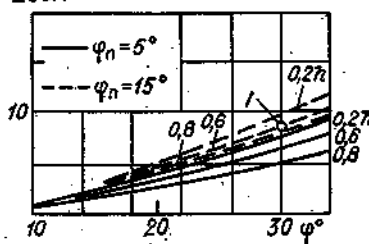
Диаметр каната 3 мм



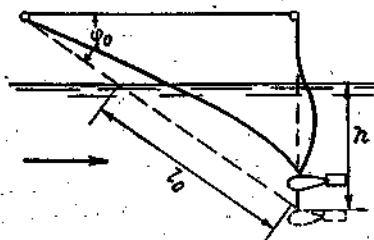
2. Определение поправки (со знаком минус) к длине смоченного каната при промерах русла — в см на 1 м длины смоченного каната



3. Определение притравки (со знаком плюс) для выхода на заданные относительные глубины (при отсутствии электрошнура вертушки) — в см на 1 м длины смоченного троса



4. Расчет поправки (со знаком минус) к длине смоченного каната с оттяжкой по уравнению (3.5)



1) подбор оборудования по условиям ограничения угла отбоя каната;

2) определение глубины погружения прибора по известной длине вытравленного каната;

3) опускание прибора на заданную глубину.

Аргументами расчетных зависимостей служат скорости течения, масса и диаметры груза и каната, а также углы отклонения каната от вертикали в положениях, когда груз с прибором погружен под уровень воды (φ_n) и опущен на любую глубину вплоть до касания дна (φ). В табл. 2.3 приведены графики, которые предназначены для решения указанных задач. Покажем на примерах, как это можно сделать.

Пусть максимальная глубина потока составляет $h=4$, средняя скорость $v=3$ м/с, диаметр стального каната $d=3$ мм.

Задача 1. Вариант а. Определить массу груза, при которой отбоя системы не превысит 45° .

По соответствующей кривой находим (точка I) $G=15$ кг.

Вариант б. Установить, при какой массе груза можно не учитывать отбоя каната.

Ответ получаем в точке II: $G=52$ кг. Окончательно принимаем с некоторым запасом стандартный груз массой $G=75$ кг.

Задача 2. Определить поправку к длине смоченного каната l , получаемой как разность показаний счетчика глубин при грузе на поверхности воды и на дне.

Значение поправки Δl со знаком минус (в см на 1 м длины смоченного каната) зависит лишь от угла отклонения груза, когда он погружен в поверхностный слой потока (φ_n) и до дна (φ). Пусть $\varphi_n=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$. Тогда по одной из кривых пункта 2 табл. 2.3 получим (точка I): $\Delta l=-5,5$ см. Отсюда следует, что при длине смоченной части каната $l=4,2$ м глубина составит

$$h=4,2 - 0,055 \cdot 4,2 = 3,97 \text{ м.}$$

Задача 3. При том же угле отбоя $\varphi_n=15^\circ$ определить притравку (дополнительную длину) Δl со знаком плюс (в см на 1 м длины смоченного каната) в положении, когда груз с прибором находится на глубине $0,6 h$ (глубина на вертикали $h=4$ м) и угол $\varphi=30^\circ$.

По графику пункта 3 табл. 2.3 находим значение притравки $\Delta l=0,08$ м. Следовательно, для опускания груза с прибором на рабочую глубину $h_p=0,6 h=0,6 \cdot 4=2,4$ м потребуется вытравить канат на такую длину, чтобы его смоченная часть составила

$$l=h_p/(1-\Delta l)=2,4:(1-0,08)=2,6 \text{ м.}$$

По Наставлению вып. 2, ч. II можно не принимать во внимание отклонение каната от вертикали до 10° . Однако из графика табл. 2.3 следует, что и в этом случае для более точного определения глубины потока и погружения груза желательно вводить поправку или притравку каната из расчета 1 см на 1 м длины каната с соответствующим знаком.

Рассмотрим схему измерения глубин лотом с оттяжкой, широко распространенную на гидрологической сети табл. 2.3, пункт 4. Считается, что при незначительном отклонении надводной части несущего каната от вертикали (в это положение он приводится под действием оттяжки) различие между глубиной погружения прибора и смоченной частью каната можно пренебречь. Однако, как установлено экспериментами, выполненными В. В. Гончаровым в градуировочном бассейне ГГИ, глубина

погружения груза, если определять ее по длине вытравленного каната, оказывается завышенной, например, при $v = 3$ м/с и $G = 15$ кг на 5 %. Соответствующая поправка δl со знаком минус в долях от l_k вычисляется по формуле

$$\delta l = 0,029 + 7,78v^2 [d (l_o \sin \varphi_o + l_k) \Omega] (1 - 1,6 \cos \varphi_o) / G, \quad (2.4)$$

где d — диаметр грузового каната и оттяжки, м; G — масса груза, кг; Ω — площадь миделева сечения груза, м²; v — скорость течения, м/с; l_o — длина оттяжки, м; φ_o — угол, составленный направлением горизонтали и оттяжкой при вертикальном положении грузового каната (формула действительна в диапазоне $\varphi_o = 53 \div 60^\circ$).

2.3. Русловые съемки

2.3.1. Русловые съемки посредством промеров глубин

Русловая съемка — это комплекс геодезических измерений и промеров глубин для составления гидрографического плана участка реки в изобатах (линиях равных глубин) или горизонталях.

Наиболее распространенный способ русловой съемки — промеры по поперечникам, имеющим единую планово-высотную основу. Последнее достигается геодезической привязкой поперечников к разбиваемому на берегу в пределах участка съемки магистральному ходу. Число поперечников и количество промерных точек на каждом из них назначается с таким расчетом, чтобы расстояния между ними были по крайней мере в 3—5 раз меньше минимальных продольных и поперечных размеров неровностей дна, которые желательно выявить в результате съемки.

При значительных скоростях течения, затрудняющих точную проводку судна по створам, промеры при русловых съемках могут выполняться по косым галсам или по продольникам. Определение местоположения промерных точек осуществляется чаще всего двумя угломерными геодезическими инструментами, устанавливаемыми в пунктах плановой опорной сети. Достаточно эффективна и обратная засечка, которая производится с промерного судна одновременно двумя секстантами по заранее установленным трем береговым ориентирам. В этом случае одновременно измеряются два угла α_1 и α_2 (рис. 2.10). Засечку секстантами применяют в тех случаях, когда установка угломерных инструментов на берегу занимает много времени или места возможных стоянок оказываются затопленными.

Существуют полуавтоматические судовые системы для промеров. Одна из таких систем применена для съемки перекатных участков на Дону. Она включает несколько эхолотов, размещенных на разных расстояниях от бортов судна на консолях и три теодолита с сельсинами, передающими углы поворота теодолитов на пульт регистрации данных. Наблюдатели, стоя на специальной

площадке кругового обзора, непрерывно визируют теодолитами на три береговых пункта, определяя таким образом положение судна в любой момент времени.

Более совершенна радиофазовая система координирования промеров — речной радиолог. Она состоит из трех радиостанций: задающей на судне и двух отражающих на берегу, что позволяет определить местоположение судна, так же как в способе прямой геодезической засечки.

Русловые съемки, особенно на участках большой протяженности, занимают достаточно много времени, за которое уровни воды и уклоны водной поверхности в реке могут измениться, в результате чего глубины, измеренные на разных поперечниках, галсах

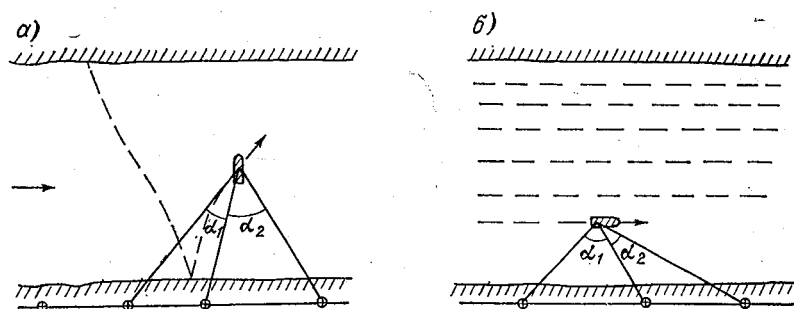


Рис. 2.10. Схема промеров по косым галсам (а) и продольникам (б) с определением местоположения судна обратной засечкой двумя секстантами.

или продольниках окажутся несравнимыми. Чтобы устранить эту неопределенность, значения глубин в пределах всего участка съемки приводят к *мгновенному уровню*, называемому также условным, или срезочным, уровнем, в качестве которого чаще всего принимают наиболее низкий уровень за время съемки.

Для решения этой задачи, как правило, используется временная (специально создаваемая на время съемки) система уровневых постов. С этой целью в один и тот же момент времени в пределах участка съемки забивается несколько урезных кольев так, чтобы их головки оказались вровень с поверхностью воды. Плановое положение кольев определяют путем привязки их к магистральному ходу, а отметки головок — нивелированием от ближайшего репера. При промерах рабочий уровень на данном поперечнике (галсе) определяют по ближайшему колу. Приведение измеренных глубин к мгновенному уровню производится введением в их значения поправки, численно равной разности отметок мгновенного и рабочего уровней $\Delta H = H_{\text{мгн}} - H_{\text{раб}}$.

В связи с тем что в качестве условного уровня обычно принимается низший уровень за время съемки, поправка ΔH имеет, как правило, отрицательные значения, почему ее (равно как и операцию по ее введению) часто называют *срезкой глубин*.

2.3.2. Русловые съемки по меткам высоких вод

Особый вид русловых съемок выполняется при рекогносцировочных обследованиях водотоков для определения максимальных расходов воды по меткам уровней высоких вод (УВВ). Такие обследования включают следующие виды работ: установление меток УВВ, съемки поперечных профилей русла и определение продольного уклона водной поверхности на специально выбранном участке.

Положение УВВ определяется путем опроса местных жителей и по следам паводка на берегах и сооружениях; смыву рыхлых грунтов со скалистых берегов и коренных пород, отложению ила, плавника и мусора, различной степени развития растительности на границе затопления и т. п. Продольные уклоны определяются нивелированием по меткам УВВ и для контроля по дну тальвега или урезу воды в момент съемки. Следует особо фиксировать очаги местных подъемов и понижений уровня.

Особое внимание при съемках необходимо обращать на выделение характерных участков с различной шероховатостью русла, обмер и фотографирование элементов шероховатости дна и берегов.

2.3.3. Аэрофотосъемка пойменных участков рек

Для получения планов пойменных участков рек иногда целесообразно использовать так называемый метод аэрофотосъемки последовательных затоплений поймы, т. е. аэрофотосъемку урезов воды при разных уровнях (рис. 2.11). Такое «водное нивелирование» применяется, например, также для определения приращений



Рис. 2.11. Определение профиля водного сечения аэрофотосъемками последовательных затоплений.

1 — уровень воды в момент съемки; 2 — фактический профиль; 3 — профиль, полученный в результате съемки.

объемов воды в губах, эстуариях и бессточных понижениях. Действительно, если высотная отметка водной поверхности во всех точках водного объекта одинакова, то линии урезов воды тождественны горизонталям рельефа.

При использовании этого способа на поймах рек основные трудности возникают как раз в связи с тем, что предпосылка о неизменности уровня воды по ширине поймы в общем случае не может быть принята: поперечные перекосы уровня, особенно на широких, сильно расчлененных поймах иногда достигают 1,0—1,5 м. В связи с этим съемка последовательных затоплений должна обязательно сопровождаться наблюдениями за режимом

изменения уровня воды на нескольких равномерно расположенных в пределах съемочного участка уровненных постах.

Аэрофотосъемка последовательных затоплений поймы выполняется в масштабах не мельче 1:5000. Камеральная обработка сводится к переносу на плановую основу изображений урезов воды. В качестве плановой основы обычно используют фотоплан участка съемки, полученный в меженный период. Отметки урезных линий в разных точках плана уточняются по данным наблюдений на ближайших к этим точкам уровненных постах.

2.4. Обработка промеров

2.4.1. Первичная обработка материалов

В зависимости от принятой методики промеров глубин и определения местоположения промерных точек полевые материалы могут быть представлены следующими сочетаниями форм записи (фиксации) результатов:

- а) книжками для записи промеров глубин;
- б) книжками для записи промеров глубин и журналами (мензульными планшетами) засечек промерных точек;
- в) лентами эхолотирования (батиграммами) и журналами (мензульными планшетами) засечек контрольных точек.

Для записи промеров глубин служит книжка КГ-2, в которой предусмотрены графы для занесения расстояний, глубин, углов отбоя каната и соответствующих поправок. По измеренным глубинам и уровням определяются отметки дна. Кроме того, по каждому промерному поперечнику приводятся следующие данные: о грунте, способах определения местоположения промерных вертикалей и измерения глубин, указывается время начала и конца измерений, состояние реки (тихо, волнение, ледоход и пр.) и другие сведения.

Обработка книжки сводится к выполнению следующих операций:

— введение поправки в измеренные значения глубин на изменение уровня воды за время измерения (эта операция выполняется только в том случае, если промеры производились одним ходом);

— расчет поправки на отбоя каната и вычисление исправленной глубины;

— вычисление отметок дна.

Поправка к измеренным глубинам в связи с изменением уровня воды за время между началом и окончанием промеров рассчитывается для каждой промерной точки по формуле

$$\Delta H_i = 0,5 (H_k - H_n) [1 - 2(i - 1)/(N - 1)],$$

где H_n , H_k — уровень воды в начале и конце измерения; N — общее число промерных точек; i — номер промерной точки, для которой вычисляется поправка.

Отметка дна в каждой промерной точке определяется как разность между отметкой рабочего уровня воды и исправленным значением глубины.

Если положение промерных вертикалей засекалось угломерными инструментами, то расстояние от постоянного начала определяется после геодезических измерений.

При измерении эхолотом глубины в точках засечек судна снимаются с батиграмм. Особенности обработки батиграмм в зависимости от типа эхолота приводятся в инструкции к прибору.

При засечках промерных точек двумя угломерными инструментами с берега или с судна, что в основном имеет место при промерах по косым галсам или продольникам, расстояния отдельных точек от магистрали могут быть определены только после нанесения их на план.

2.4.2. Построение профиля поперечного сечения русла

Наиболее удобной формой графического представления данных промеров по отдельным поперечникам является построение профилей поперечных сечений.

Профиль поперечного сечения строится на листе миллиметровой бумаги в системе координат, по горизонтальной оси которой откладываются расстояния от постоянного начала до промерных вертикалей, а по вертикальной — глубины или отметки дна (рис. 2.12). На профиль наносится положение рабочего уровня воды с указанием его отметки и даты промера. Под графиком, кроме шкалы расстояний, выписываются значения глубин и от-

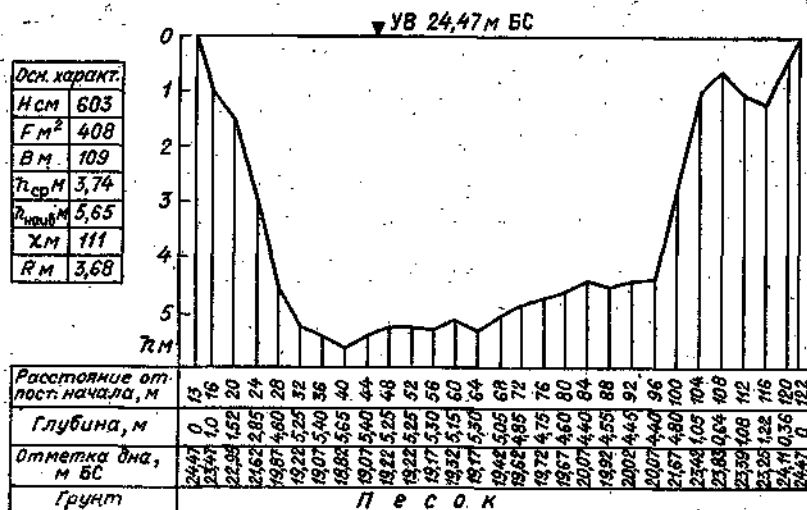


Рис. 2.12. Профиль поперечного сечения реки.

меток дна на промерных вертикалях, а также указывается характер грунта, слагающего дно.

В «Технических делах» гидрологических постов рекомендуется иметь профили поперечных сечений в гидрометрических створах и створе основного поста до уровня высоких вод. Данные для построения таких профилей получают в результате совместных промерных и нивелировочных работ. На них, кроме рабочего уровня, должны быть указаны высший и низший уровни за период наблюдений на данном посту и соответствующие им даты.

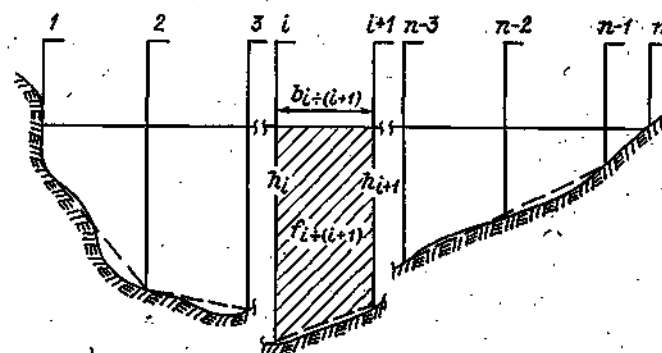


Рис. 2.13. К вычислению площади поперечного сечения реки.

Важными морфометрическими характеристиками профиля поперечного сечения, широко используемыми при расчетах пропускной способности русел, являются: площадь, ширина, средняя и наибольшая глубина, смоченный периметр, гидравлический радиус и относительная ширина. Их значения также могут быть рассчитаны по данным промеров глубин.

Площадь поперечного сечения F может быть определена планиметрированием профиля или с помощью палетки, но чаще она вычисляется аналитически как сумма площадей трапеций $f_{i+(i+1)}$, образуемых двумя соседними промерными вертикалями, поверхностью воды и линией дна (рис. 2.13). При этом линия дна между вертикалями принимается условно прямой, соединяющей точки дна на промерных вертикалях. В соответствии с этим можем записать следующее выражение для вычисления площади поперечного сечения:

$$F = \sum_{i=1}^{N-1} f_{i+(i+1)} = \sum_{i=1}^{N-1} 0,5 (h_i + h_{i+1}) b_{i+(i+1)}, \quad (2.5)$$

где $f_{i+(i+1)}$, $b_{i+(i+1)}$ — площадь и ширина отсека поперечного сечения, ограниченного двумя соседними i -й и $(i+1)$ -й промерными вертикалями; h_i , h_{i+1} — глубины на i -й и $(i+1)$ -й промерных

вертикалях; N — число промерных вертикалей, включая урезы (рис. 2.13).

В пределах поперечного сечения реки обычно выделяют водное сечение, живое сечение и мертвое пространство.

Водное сечение при открытом русле совпадает с поперечным сечением. При наличии ледяного покрова верхней границей водного сечения является кромка погруженного в воду льда, поэтому его площадь в этом случае меньше площади поперечного сечения на площадь погруженного льда.

Живое сечение — это часть водного сечения, в которой наблюдается течение воды. Области сечения, где течение не наблюдается, называются *мертвыми пространствами*. В частном случае, когда мертвые пространства отсутствуют, живое и водное сечения совпадают.

Ширина поперечного сечения, или, что то же самое, ширина реки B , — это расстояние между урезами воды, вычисляемое по разности расстояний от постоянного начала до урезов дальнего и ближнего берегов.

Средняя глубина сечения h_{cp} подсчитывается как частное от деления площади поперечного сечения на ширину

$$h_{cp} = F/B, \quad (2.6)$$

а значение наибольшей глубины h_{max} выбирается из промерной книжки.

Смоченный периметр χ при открытом русле — это длина линии дна между урезами воды. По данным промеров эта характеристика вычисляется как сумма гипотенуз прямоугольных треугольников, катетами которых служат разности глубин на соседних вертикалях $h_i - h_{i+1}$ и расстояния между этими вертикалями $b_{i \div (i+1)}$:

$$\chi = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(h_i - h_{i+1})^2 + b_{i \div (i+1)}^2}. \quad (2.7)$$

При наличии ледяного покрова длина смоченного периметра включает в себя также длину нижней поверхности погруженного в воду льда. Частное от деления площади поперечного сечения на длину смоченного периметра

$$R = F/\chi \quad (2.8)$$

называется *гидравлическим радиусом*. Для рек с относительной шириной $b = B/h_{cp}$ более 10 значение гидравлического радиуса при свободном ото льда русле близко к средней глубине.

2.4.3. Обработка материалов русловых съемок

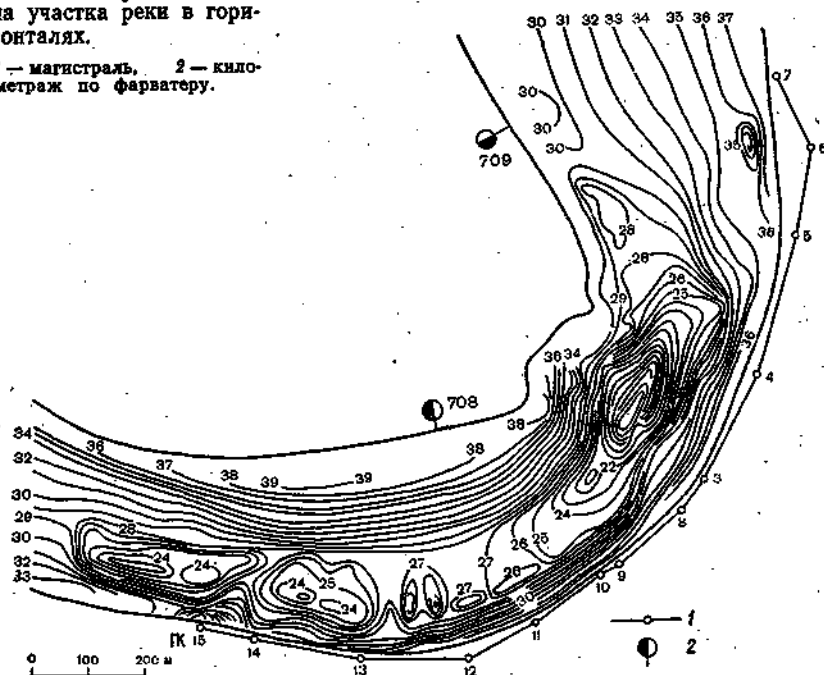
Основная форма представления результатов русловой съемки — план участка реки в изобатах (линиях равных глубин) или в горизонталях, а также характерные поперечные профили русла.

При построении плана придерживаются такой последовательности операций:

- а) приводят измеренные глубины к мгновенному уровню;
- б) на лист ватмана наносят в выбранном масштабе магистраль с поперечниками и стоянки инструментов;
- в) определяют и наносят на план положение промерных точек, используя для этого данные о их расстояниях от постоянного начала или засечках угломерными инструментами;

Рис. 2.14. Фрагмент плана участка реки в горизонталях.

1 — магистраль, 2 — километр по фарватеру.



г) одновременно с нанесением на план промерных точек выписывают у каждой из них приведенное к мгновенному уровню значение глубины или отметку дна;

д) интерполируя значения глубин (отметок дна), проводят между точками изобаты (горизонтали).

Сечение изобат (горизонталей) назначается в зависимости от максимальной глубины на исследуемом участке, а также от принятого масштаба плана — обычно 0,1; 0,25; 0,5; 1,0 или 2,0 м.

План участка реки в изобатах удобен для общей характеристики реки, а также для целей судоходства. Для изучения динамики русловых деформаций и решения некоторых других специальных задач более удобно оперировать с планом в горизонталях. Фрагмент плана участка реки показан на рис. 2.14.

2.5. Оценка точности и оптимизация измерений площадей водного сечения потока

2.5.1. Точность определения площади водного сечения и оптимальное количество промерных вертикалей

Погрешность определения площади водного сечения представляется совокупностью двух основных погрешностей: измерения глубин σ_h и дискретизации поперечного профиля русла σ_d .

Погрешность измерения глубин образуется по крайней мере из трех составляющих:

1) инструментальной погрешности; ее среднее квадратическое значение обычно принимается при промерах наметкой $\bar{\sigma}_n = 2\%$, лотом $\bar{\sigma}_l = 4 \div 5\%$;

2) морфометрической погрешности $\bar{\sigma}_m$, обусловленной отклонениями промерного судна от створа при грядовом строении дна, а на горных реках, кроме того, — негоризонтальностью зеркала воды по ширине потока. Значение $\bar{\sigma}_m$ в руслах средней устойчивости лежит в пределах $1-2\%$;

3) деформационной погрешности $\bar{\sigma}_{\text{деф}}$, обусловленной размывом или намывом дна за время измерения расхода воды; этот вид погрешности может быть ощутим на реках с неустойчивым руслом типа Амударьи.

Совокупная средняя квадратическая погрешность измерения глубин, таким образом, составляет

$$\bar{\sigma}_h = \sqrt{\bar{\sigma}_n^2 + \bar{\sigma}_m^2 + \bar{\sigma}_{\text{деф}}^2} = 2,5 \div 5,0 \%$$

Нижний предел относится соответственно к промерам наметкой сравнительно устойчивых русел средних рек, верхний отвечает наиболее неблагоприятным условиям измерений глубин лотом при легкодеформирующемся ложе.

Решающее влияние на точность определения площади водного сечения оказывает погрешность дискретизации поперечного профиля русла, зависящая от формы русла и количества промерных вертикалей N : чем их больше, тем точнее результат измерения.

Относительная средняя квадратическая погрешность определения площади водного сечения оценивается по формуле, полученной И. Ф. Карасевым:

$$\bar{\sigma}_F = 0,305 \frac{m(m+1)}{(N+1)1,5\sqrt{2m-1}} \left[1 + \frac{16(N+1)2(2m-1)}{3m^2} \bar{\sigma}_h^2 \right]^{0,5}. \quad (2.9)$$

В этом выражении характеристикой формы поперечного профиля русла служит величина

$$m = (h_{\text{макс}} - 1)/h_{\text{ср.}}$$

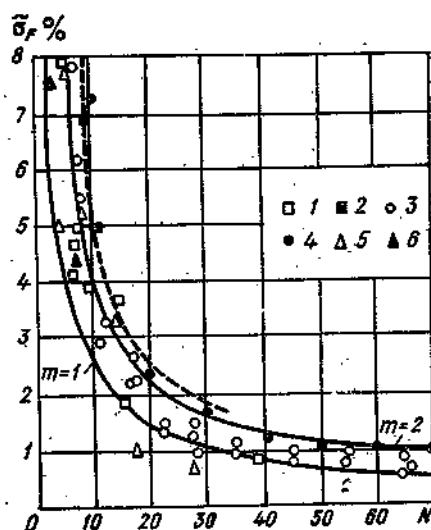
Формула (2.9) действительна для русел сложной формы при $m > 0,5$, когда оно дает знакопеременные погрешности (рис. 2.15). Для речных русел характерны значения $m = 0,7 + 1,2$, при наличии пойм — $m > 1,2$.

В правильном параболическом русле ($m = 0,5$) погрешности определения площади водного сечения получают отрицательный знак, т. е. принимают систематический характер, и могут быть оценены погрешностью приближенного интегрирования (соответствующие формулы можно найти в курсах высшей математики для техникумов).

Как показывают кривые, рассчитанные по формуле (2.9), относительная погрешность $\bar{\sigma}_F$ резко падает по мере увеличения количества промерных вертикалей N (рис.

Рис. 2.15. Зависимость средней квадратической погрешности определения площади водного сечения от количества промерных вертикалей.

По данным: В. Н. Гончарова для поперечных (1) и продольных (2) профилей русла, 3 — О. Н. Борсука, 4 — Н. К. Сибиряковой, 5 — В. А. Кудышкина, 6 — Г. Н. Хмаладзе.



2.15). Однако при увеличении N сверх некоторого значения N_0 точность определения площади водного сечения повышается не существенно. В этом смысле N_0 выражает оптимальное количество промерных вертикалей. Оно зависит от формы русла: например, $N_0 = 25$ при относительно простых очертаниях поперечного профиля русла ($m = 1$) и $N_0 = 35$ при $m = 2$.

Если промеры русла выполняются эхолотом с непрерывной регистрацией глубин, то погрешность дискретизации, а вместе с нею и погрешность, оцениваемая по формуле (2.9), становится близкой к нулю. Но при промерах эхолотом сохраняются погрешности, которые по своему характеру приближаются к систематическим: инструментальная $\Delta_{\text{ин}}$ и морфометрическая $\bar{\sigma}_M$. Последняя связана с отклонением промерного судна от створа. При относительно небольшой ширине русла, особенно в каналах, эта погрешность в основном определяет точность эхолотных промеров (ее количественные оценки изучены недостаточно). По данным наблюдений на Каракумском канале, средняя квадратическая погрешность эхолотирования поперечных сечений колеблется в пределах 1—2 %.

2.5.2. Согласование точности угловых и линейных измерений

Использование надежной плановой основы для координирования промеров не гарантирует исключение погрешностей привязки промерных точек: для их уменьшения необходимо обеспечить согласование точности угловых и линейных измерений.

Рассмотрим типовую схему координирования промеров (см. рис. 2.8). Гидрометрическое судно движется в створе, закрепленном береговыми знаками 1 и 2, а засечки промерных вертикалей производятся из пункта А. Какова должна быть точность угловых измерений, если расстояния измеряются с точностью 1/3000?

При схеме засечек, близкой к равностороннему треугольнику, необходимо соблюсти следующее соотношение средних квадратических погрешностей измерения углов $\sigma_{\text{уг}}$ и линий $\sigma_{\text{л}}$:

$$\sigma_{\text{уг}} \leq \rho \sigma_{\text{л}} \sqrt{2} / L,$$

где $\rho = 57^{\circ}17'44''$; L — длина линии. В нашем примере:

$$\sigma_{\text{уг}} \leq \rho \sqrt{2} / 3000 = 100''.$$

Такую точность вполне обеспечивают обычные технические теодолиты при квалифицированном использовании. Что касается мензул, то погрешность построения с их помощью углов выражается формулой

$$\sigma_{\text{уг}} = 40''/l,$$

где l — длина стороны угла на планшете, см. Отсюда следует, что требования согласования точности угловых и линейных измерений в нашем примере будут удовлетворены, если стороны углов на планшете не короче 25 см.

Глава 3 ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ В РУСЛОВЫХ ПОТОКАХ

3.1. Общие сведения о скоростной структуре турбулентных потоков

Движение воды в реках всегда *турбулентное*. Иногда такое течение называют беспорядочным. В действительности же, хотя скорости отдельных частиц турбулентного потока и в самом деле подвержены случайным колебаниям, при более или менее длительном наблюдении в нем выделяются достаточно устойчивые *вихревые структуры* и *вторичные* (циркуляционные) *течения*, кото-

рые наложены на первичное (продольное) движение воды. Причины этих вихреобразований и течений не всегда физически ясны. Наиболее четко они устанавливаются для двух видов вторичных течений — под действием центробежных сил на повороте русла (рис. 3.1 а) и кориолисовых ускорений от вращения Земли (рис. 3.1 б). В первом случае поверхностные струи, обладающие более высокой скоростью, направлены к вогнутому берегу, а во втором — к правому в северном полушарии и к левому в южном. Придонные компенсирующие струи принимают противоположное

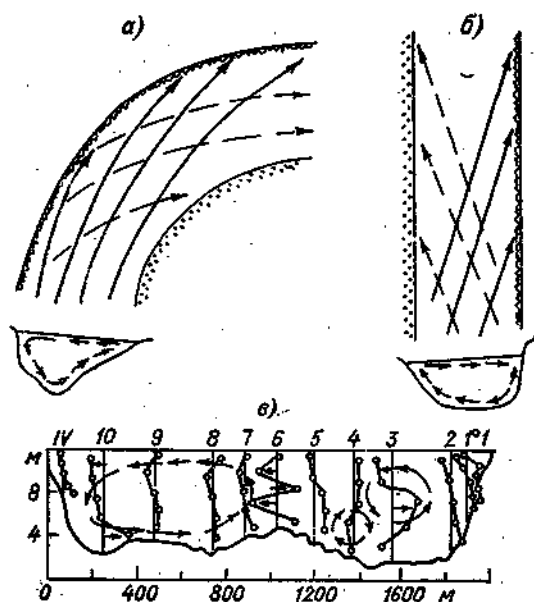


Рис. 3.1. Вторичные (циркуляционные) течения в речных потоках.

а — на изгибе русла; б — под действием сил Кориолиса в северном полушарии; в — эпюры вторичных течений на р. Амуре по данным И. А. Соловьева.

направление. Так возникает *поперечная циркуляция* водных масс. Считают также, что вторичные течения — результат потери направляющего действия берегов на поток. Каким бы ни был механизм этих течений, они вполне реальны. Известный русский гидротехник Н. С. Лебявский вторичные течения (он называл их *сбойными*) рассматривал как решающий фактор формирования русла.

Вместе с тем следует иметь в виду, что вторичные течения, как правило, не сохраняются в виде устойчивых циркуляций, охватывающих целые области потока, как это схематично показано на рис. 3.1 а, б. Они то возникают, то распадаются. Так создается сложная картина течений, в которой трудно выделить

четко обособленные формы водных масс (рис. 3.1 в). В совокупности вся эта система сложных движений проявляется как турбулентность руслового потока.

3.1.1. Осредненные и пульсационные скорости турбулентных потоков

Путь, который частица воды проходит в единицу времени, называется *скоростью течения*. Какую бы область турбулентного потока мы не взяли, скорость течения в ней не остается постоянной и непрерывно изменяется как по *модулю* — абсолютному значению, так и по направлению. Это явление носит название *пульсации скоростей*. Если зафиксировать их в виде непрерывного

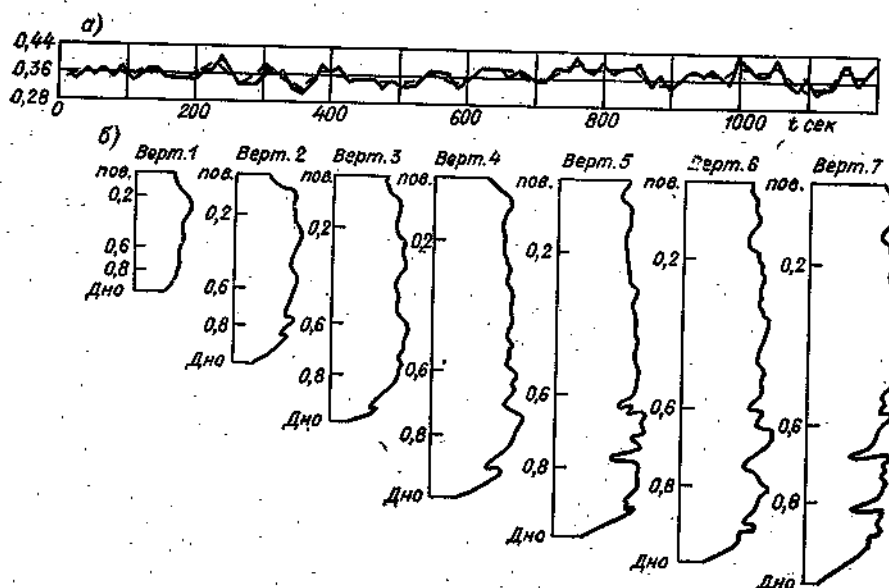


Рис. 3.2. Мгновенные скорости течения по результатам исследований ГГИ.

а — хронограмма пульсации скоростей течения (р. Сaurь, 1961 г.); квазипериодические возмущения показаны штриховой линией; б — годографы скоростей на вертикалях (Большой Ставропольский канал, 1972 г.).

графика, то получим хронограмму скоростей (рис. 3.2 а). Она имеет пилообразную форму, в которой наряду с относительно случайными пульсациями можно различить чередование квазипериодических возмущений. На рис. 3.2 б представлен график — годограф мгновенных скоростей на вертикалях открытого потока. Как видим, изменчивость скоростей в пространстве не менее сложна, чем во времени.

В дальнейшем мы будем различать *мгновенную* и *осредненную* скорости. Под *осредненной* скоростью понимают среднее

из N мгновенных значений скоростей u_i , определенных в данной точке за достаточно длительный промежуток времени:

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^N u_i / N. \quad (3.1)$$

Пульсация скоростей течения оценивается средним квадратическим отклонением их мгновенных значений от осредненных

$$\sigma_u = \left[\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 / (N - 1) \right]^{0.5}. \quad (3.2)$$

При достаточно длительном наблюдении в пульсационных колебаниях скорости прослеживается некоторая периодичность, которая характеризуется так называемым временем корреляции τ_k (оно имеет смысл продолжительности существования турбулентных образований).

Несмотря на пульсационные эффекты, осредненные скорости достаточно устойчивы во времени, если поток стационарен. Вместе с тем они не одинаковы в различных точках живого сечения. Существуют определенные закономерности распределения осредненных скоростей по ширине и глубине потока¹:

Распределение скоростей по ширине потока следует за распределением глубин, при этом средние скорости на вертикалях с достаточной точностью выражаются формулой Шези—Маннинга

$$v = C \sqrt{hI} = h^{0.67} \sqrt{I} / n, \quad (3.3)$$

где I — уклон водной поверхности; C — коэффициент Шези; n — коэффициент шероховатости.

Эпюра распределения по ширине потока средних на вертикалях скоростей, если ее построить, приняв за ось абсцисс поверхность воды, будет зеркально отражать очертания дна (рис. 3.3).

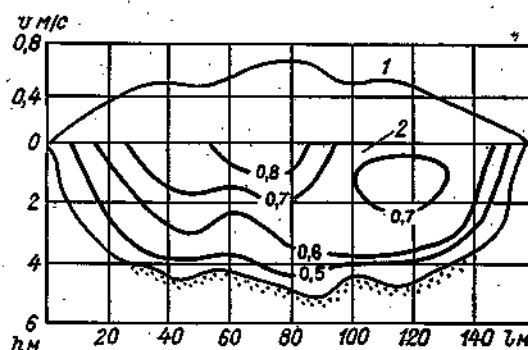


Рис. 3.3. Распределение скоростей течения по ширине (1) и живому сечению (2) Каракумского канала (1980 г., наблюдения В. М. Хачатурова).

¹ В дальнейшем будем опускать определение «осредненная», за исключением случаев, когда требуется подчеркнуть, что речь идет не о мгновенных скоростях.

Скоростная структура в живом сечении потока изображается построением линий равных скоростей — *изотак* (рис. 3.3). В случае относительно правильного распределения скоростей в открытом русле изотак имеют вид разомкнутых кривых, так как скорости увеличиваются от дна к поверхности. При ледяном покрове изотак принимают кольцеобразные очертания. Но и в открытом потоке возможно образование обособленных зон повышенных скоростей (см. контур изотак 0,7 в правой части рис. 3.3). Появление таких зон связано с недостаточной устойчивостью движения потока в русле относительно большой ширины, в которой берега все более утрачивают свое влияние на распределение скоростей. Эпюра распределения скоростей по глубине потока оказывается не менее сложной. Чаще всего она образует плавную кривую параболического или логарифмического вида (рис. 3.4 а). В открытом русле наибольшая скорость наблюда-

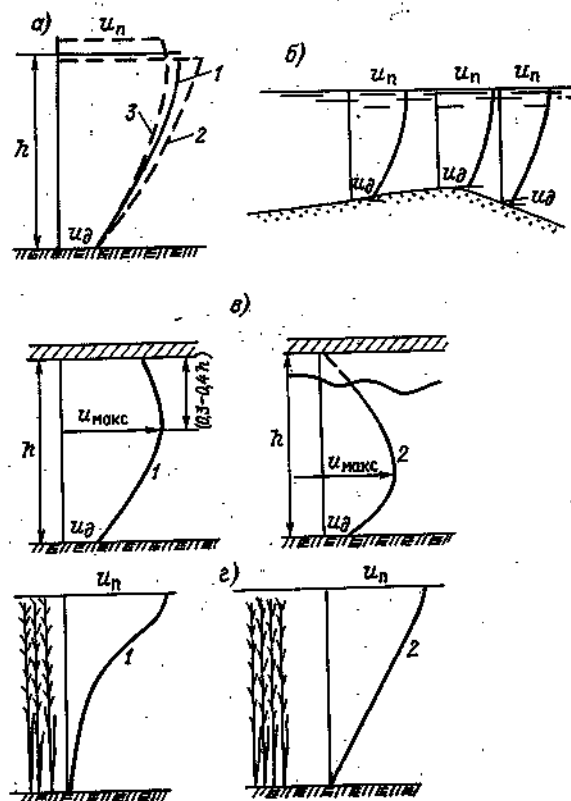


Рис. 3.4. Распределение осредненных скоростей течения по глубине речных потоков при различном состоянии русла.

а — открытый поток (1), при ветре по течению (2), против течения (3); б — трансформация эпюры скоростей по длине гряды; в — при ледоставе без шуги (1) и при наличии ее скопления (2); г — при зарастании русла водной растительностью, ветвящейся у дна (1) и поверхности воды (2); д — при зарастании русла водной растительностью, ветвящейся у дна (1) и поверхности воды (2).

ется на поверхности воды, наименьшая — у дна (соответственно различной степени влияния твердой границы потока). Однако в зависимости от плановых форм русла и рельефа дна, его шероховатости, ледяных образований, зарастания и других факторов эпюры скоростей могут быть весьма различными (рис. 3.4 б, в).

При открытом русле наибольшая скорость часто оказывается ниже водной поверхности, что объясняется не столько трением потока о воздух, сколько воздействием различных турбулентных возмущений. С появлением ледяного покрова наибольшая скорость наблюдается уже ближе к середине глубины потока. При этом чем больше шероховатость нижней поверхности льда, тем глубже будет располагаться максимальная скорость. Если подолгом образуется шуга, создающая большое сопротивление движению воды, максимум скорости заглубляется ниже середины вертикали. В заросшем русле, как правило, зона наибольших скоростей располагается в поверхностных слоях потока, а в нижних наблюдается замедленное течение, принимающее характер фильтрационного просачивания сквозь пористую среду. Таким же становится течение в толще зажоров и шуговых скоплений (коэффициент фильтрации для шуги зависит от ее пористости и составляет 0,5—1,3 м/с).

При обтекании неровностей дна (гребней перекатов и донных гряд) наблюдается относительное выравнивание скоростей по вертикали. За препятствиями же, напротив, скоростная эпюра претерпевает искажения, при которых на дне появляется так называемая динамическая тень и течение замедляется.

3.1.2. Аналитические зависимости для распределения скоростей течения в открытых руслах

Исторически одним из первых аналитических представлений эпюры распределения скоростей была парабола (Прони, Дююи, Базен). В XX веке с появлением полуэмпирической теории турбулентности Прандтля—Кармана предпочтение отдается логарифмической кривой. Традиционные параболические и логарифмические кривые не пригодны для аппроксимации эпюры скоростей при заглубленном максимуме, а такие профили — вовсе не исключение на реках и каналах. Приведем более универсальную зависимость, которая может быть легко получена из параболы Базена, если ввести в нее дополнительную степень свободы — нефиксированное положение максимума скорости на вертикали (рис. 3.5 а):

$$u = u_{\max} - mv_* (1 - \alpha_m z)^2 / \sqrt{g}, \quad (3.4)$$

где $v_* = \sqrt{ghI}$ — динамическая скорость; $m = 24,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ — эмпирический коэффициент Базена; $z = z/h$ (z отсчитывается от вершин выступов донной шероховатости); $u_{\max}$ — максимальная скорость на относительной высоте $z_m = 1/\alpha_m$, которая не обязательно

совпадает с поверхностью потока, так как предполагается, что в общем случае $\alpha_m \approx 1$.

Формула (3.4) описывает распределение скоростей в основной зоне потока. Что касается слоев, близких к жестким границам, в том числе и придонных, то этим условиям в наибольшей мере отвечают логарифмические кривые.

Следует иметь в виду, что при обычных измерениях скоростей на реках и каналах освещается лишь основная зона потока (примерно от вершин наибольших выступов шероховатости и до поверхности воды). В связи с этим придонная скорость оказывается отличной от нуля. В самом же пограничном (придонном) слое скорость течения падает по линейному закону от конечного значения

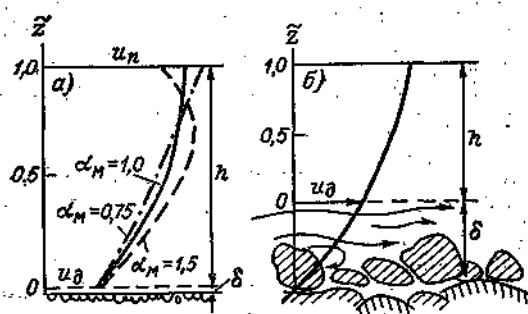


Рис. 3.5. Эпюра распределения скоростей по вертикали в открытом потоке.

а — основная зона по зависимости (3.4); б — пограничный (придонный) слой.

чения до нуля в месте контакта с жесткой границей. Толщина придонного слоя δ соизмерима с высотой выступа шероховатости $\delta_{ш}$. В песчаных руслах δ на несколько порядков уступает h ($\delta \ll h$), и, следовательно, придонную часть эпюры скоростей можно не принимать во внимание. В валунно-галечных руслах горных и полугорных рек масштаб δ соизмерим с h ($\delta \sim h$), и поэтому должна быть особо учтена часть эпюры в пределах придонного слоя (рис. 3.5 б).

Во многих задачах гидрометрии необходимо иметь сведения о соотношении средних и поверхностных скоростей, осредненных по вертикали K_v или живому сечению потока K .

Гидравлические зависимости для K_v , вообще говоря, могут быть получены на основе уравнений профиля осредненных скоростей на вертикали. Такие формулы предложены Г. В. Железняковым, А. В. Караушевым и другими исследователями. Из параболического распределения скоростей в форме (3.4) при $\alpha_m = 1$ (максимум скорости на поверхности потока) имеем

$$K_v = v/u_n = C/(C + 0,33m). \quad (3.5)$$

Эта зависимость, как и другие формулы гидравлики для K_v , соответствует условиям плоского равномерного потока в русле неограниченной ширины. Но в природе таких русел не бывает, а значит, коэффициент перехода K_v от поверхностной скорости к средней на вертикали не тождествен коэффициенту K , являю-

щелся характеристикой распределения скоростей течения во всем поперечном сечении. Значения K зависят не только от сопротивления движению потока, характеризуемого коэффициентом Шези C , но и от относительной ширины русла $B=b/h$. Этим условиям отвечает формула, предложенная И. Ф. Карасевым; в упрощенном виде при $b \geq 45$ она представляется следующей:

$$K = 0,77 + 0,43 \sqrt{\tilde{C} - 3,8}, \quad (3.6)$$

где

$$\tilde{C} = C/\sqrt{g} \geq 3,8.$$

3.2. Приборы для измерения скорости и направления течения

Приборы для измерения скорости течения отличаются большим конструктивным разнообразием. В перечне применяемых приборов можно найти как устройства, имеющие большую давность, так и последние достижения измерительной техники.

По характеру контакта с потоком приборы для измерения скоростей течения можно подразделить на три группы:

1) приборы и приспособления — метки течения в виде поплавков и вносимых в поток веществ;

2) приборы, основанные на применении физических эффектов, создаваемых текущей водой:

— термогидрометры, в которых используется тепловое взаимодействие чувствительного элемента и обтекающих его струй;

— ультразвуковые установки, реализующие эффект различия скоростей распространения ультразвука по течению и против него;

— электромагнитные измерители скорости по разности потенциалов, возникающей в воде при протекании ее через электромагнитный контур;

3) приборы, основанные на гидродинамическом взаимодействии с потоком воды — гидрофлюгеры, установленные на якоря, шесты, динамометры и гидрометрические вертушки.

Несмотря на указанную общность приборов и установок отдельно взятой группы, они отличаются качественным различием в конструктивном отношении, что в определенной степени отражает историю развития измерительной техники.

3.2.1. Поплавки и метки течений

В практике современной гидрометрии еще широко используются простые поплавки. Они незаменимы при ускоренных измерениях и как бы получили новую жизнь в связи с развитием аэрогидрометрии.

Поплавками можно измерять скорость в поверхностном слое, на различных глубинах и среднюю скорость на вертикали.

Соответственно этому различают поплавки поверхностные, глубинные и интеграционные.

Наиболее проста конструкция **поверхностных поплавков** (рис. 3.6 а). Чаще всего они представляют собой деревянные цилиндры, отпиленные от бревен диаметром 8—30 см в виде «кружков» высотой 2—7 см; более совершенны поплавки в виде крестовин из деревянных или пенопластовых досок с подвешенным

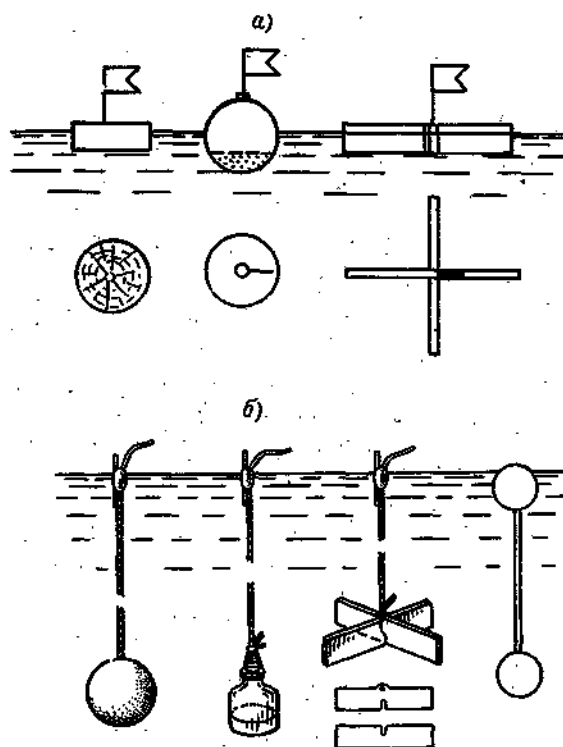


Рис. 3.6. Поплавки.

а — поверхностные, б — глубинные.

грузом. Они применяются на больших реках. При ледоходе роль поплавков играют отдельные льдины.

Во всех случаях размер и форма поплавков выбираются так, чтобы они возможно меньше возвышались над водой и были хорошо видны с берега.

Глубинные поплавки служат для измерения скоростей течения на заданной глубине. Они представляют собой небольшие сосуды шаровидной формы из стекла или синтетических материалов (рис. 3.6 б). Через отверстие в сосуд засыпается песок с расчетом, чтобы поплавок получил относительную плотность 1,05, при которой он не всплывает и не останавливается даже при неровном

дне. Размер поверхностного поплавка, изготавливаемого из пробки или пенопласта в 4—5 раз меньше глубинного (он лишь служит указателем местоположения), поэтому скорость движения системы практически не отличается от скорости на глубине погружения нижнего поплавка.

Если применяется система из двух совершенно одинаковых поплавков, то результирующая скорость их движения равна сумме

$$u_p = 0,5 (u_{\text{пов}} + u_{\text{гл}}),$$

откуда скорость на заданной глубине

$$u_{\text{гл}} = 2u_p - u_{\text{пов}}.$$

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

$$u = L/t.$$

Определение расстояний L по траектории поплавка представляет наиболее сложную операцию в комплексе поплавочных наблюдений. Положение поплавков должно быть тем или иным способом определено, так же как это делается при координировании промеров. Но применение геодезических методов требует создания опорной сети и привлечения многих исполнителей, а в случае аэрофотосъемки — самолета. Чтобы избежать всех этих осложнений нередко прибегают к **привязным поплавкам**, пускаемым с лодок или мостиков на тонкой размеченной нити. Следует правильно выбирать ее длину. Слишком длинная нить задерживает свободное движение поплавка, а короткая — затрудняет точный отсчет времени. Как показывает опыт, оптимальная длина нити должна быть такой, чтобы обеспечить движение поплавка в течение 15 с. Тогда при трех—пяти пусках среднее значение скорости определяется со случайной погрешностью 3—4 %.

Поплавки-интеграторы служат для измерения средних скоростей на вертикали. Если на дно потока опустить шарик, который легче воды, или подвести пузырьки газа, то они будут сноситься течением воды и всплывать на некотором расстоянии от места пуска (рис. 3.7 а). При всплытии поплавки интегрируют скорости течения; расстояние их сноса L зависит от средней скорости на вертикали v и времени всплытия t , следовательно:

$$v = K_{\text{инт}} L/t,$$

где $K_{\text{инт}}$ — коэффициент поплавочной интеграции, зависящий от инерционных свойств поплавка.

В качестве поплавка-интегратора можно использовать пузырьки воздуха, пластмассовые шарики диаметром 30—35 мм, заполненные парафином, или другие типы поплавков, масса которых не меняется в воде.

Для пуска поплавков-интеграторов или подвода воздуха служит простое устройство, состоящее из горизонтальной плавающей рейки и штанги. Поплавок закладывается в углубление поддона штанги. Поддон закрывается накладкой, предохраняющей поплавок от преждевременного всплытия. Накладка с помощью шнура может подниматься вверх и освобождать поплавок. Горизонтальная рейка соединена со штангой и может свободно перемещаться по ней. По горизонтальной рейке определяется расстояние сноса поплавка.

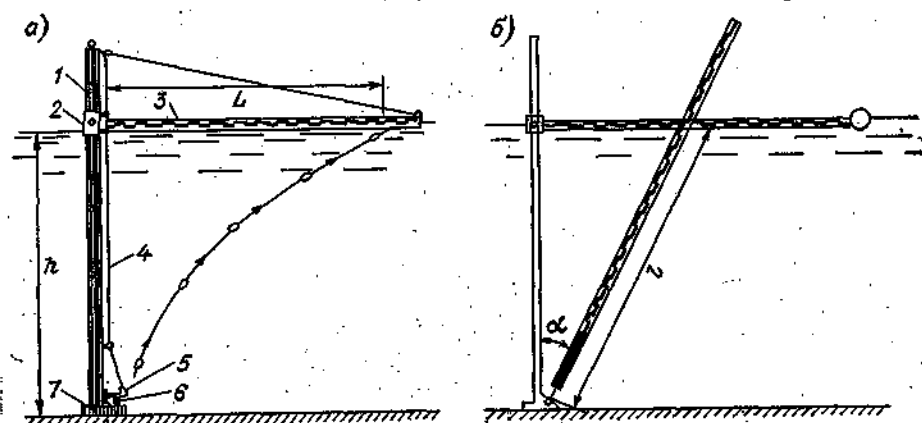


Рис. 3.7. Интеграционные поплавки и устройства.

а — интеграция с помощью поплавков: 1 — штанга, 2 — обойма, 3 — рейка, 4 — шнур, 5 — накладка, 6 — поплавок, 7 — обойма; б — интегрирующий шест.

Если для данного поплавка заранее определить скорость всплытия его в стоячей воде w_0 , то измерение средней скорости течения можно производить без фиксирования времени всплытия, которое выражается отношением h/w_0 . Следовательно, будем иметь

$$v = K_{\text{инт}} w L/h.$$

где h — глубина на вертикали.

Коэффициент интеграции $K_{\text{инт}}$ зависит от формы и плотности поплавка-интегратора, а также от элементарного расхода воды и характера распределения скоростей. Только для пузырьков газа он может приниматься равным единице, для твердых поплавков обычно $K_{\text{инт}} > 1$.

Гидрометрический шест, закрепленный своим нижним концом за поддон штанги (рис. 3.7 б) служит интегратором скоростей по вертикали. Он удобен для измерения малых скоростей течения в зарастающих речных руслах и коллекторно-дренажных каналах. Такие измерения на оросительных системах осуществил В. Э. Вид. Средняя скорость на вертикали является функцией угла откло-

нения шеста α и длины его смоченной части l . Градуировочная зависимость для конкретного шеста может быть получена в результате предварительных испытаний в каналах и лабораторных лотках. Погрешность измерения средней скорости при тщательном изготовлении шестов может быть доведена до $\bar{\sigma}_v = 4 \div 5 \%$.

Применение сжатого воздуха позволяет получить эпюру распределения средних (на вертикалях) скоростей по ширине потока. В установке, реализованной Видом (рис. 3.8), это делается так. В гидростворе по дну русла от берега к берегу проложен перфорированный трубопровод, имеющий на равных расстояниях отверстия, обращенные вниз и закрытые резиновыми кольцевыми клапанами. По трубопроводу от небольшого компрессора, установленного на берегу, непрерывно подается воздух, образующий цепь пузырьков-интеграторов. Всплывая, они визуализируют распределение средних скоростей на вертикалях по ширине потока. Картина распределения поплавков-интеграторов фотографируется с берега. Для трансформации перспективного изображения



Рис. 3.8. Фотопневматическая интеграция скоростей, реализованная В. Э. Видом на оросительном канале, 1970 г.

получаемого на фотопленке, в плановое служат разбиваемые в натуре базисы (на рис. 3.8 они закреплены вехами).

Электролитический отметчик скорости для измерения малых скоростей течения (ГГИ) основан на внесении в поток меток в виде солевого раствора (рис. 3.9). Для ввода раствора в поток служит шприц, смонтированный на штанге, и трубка. На кронштейне, закрепленном на корпусе от вертушки, образующем перемещенный базис измерения (длиной от 20 до 60 см), закреплены подвижные электроды. В момент, когда через них проходит солевое облако, замыкается цепь сигнальной лампочки. Скорость течения определяется так же, как и в случае привязных поплавков.

При выполнении поплавоочных наблюдений следует иметь в виду, что, кроме случайных (их значения приводились выше), возможны значительные систематические погрешности. Укажем их основные источники и возможные пределы.

В условиях неравномерного движения наблюдается несоответствие скорости, осредненной по траектории, и скорости в точке ее пересечения с гидроствором. Возникающая при этом погрешность, по некоторым оценкам, может достигать $\pm (10-15 \%)$.

Поплавочные наблюдения осложняет ветер. Еще недавно считалось, что они вообще должны производиться лишь при штиле.

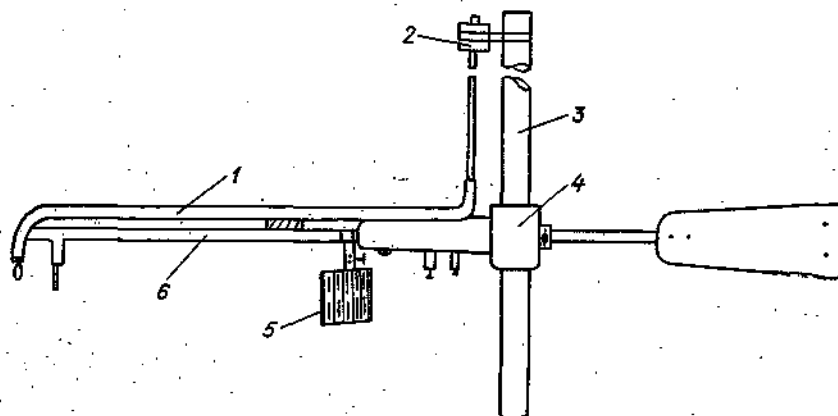


Рис. 3.9. Электролитический измеритель скорости течения.

1 — трубка, 2 — шприц, 3 — штанга, 4 — корпус от вертушки, 5 — электроды, 6 — кронштейн.

Однако разработанная в ГГИ система поправок на ветровой дрейф поплавков позволяет снять это ограничение и проводить наблюдение в условиях умеренного ветра (до 5 м/с).

И наконец, укажем на завышение скорости, вызванное тем, что поплавки опережают движение частиц воды. Так, на горных реках этот обгон может достигать 5—8 % скорости потока. Наименьшее значение погрешности обеспечивают поплавки, у которых хуже обтекаемость и больше глубина погружения, например в виде крестовины из поставленных на ребро досок.

3.2.2. Приборы, основанные на физических эффектах текущей воды

Тепловые измерители скорости течения основаны на измерении интенсивности теплообмена между потоком жидкости и введенным в него чувствительным элементом. Существуют разнообразные типы термогидрометров и термоэлектрических преобразователей. Наиболее общий способ тепловых измерений реализуется при регулярном режиме охлаждения чувствительного элемента. Одна из таких конструктивных схем термогидрометра разработана Г. В. Железняковым.

Термогидрометры применяются главным образом в лабораторных установках. Но необходимость измерения скоростей в малых водотоках, особенно в дренажно-коллекторных каналах, потребо-

вала создания полевых образцов тепловых измерителей. В настоящее время существуют приборы, измеряющие скорости течения в пределах 0,05—1,5 м/с с погрешностью около 1,5 %.

Акустические (ультразвуковые) методы еще недавно применялись лишь для измерения скоростей жидкости в трубопроводах. В последнее время в ряде стран (Япония, США, Англия) и в Советском Союзе появились акустические установки для измерения расходов воды на реках и каналах. Принцип действия и блок-схема такой измерительной системы показаны на рис. 3.10. Мерой скорости течения, осредненной по пути распространения ультразвука, служит разность времени его прохождения

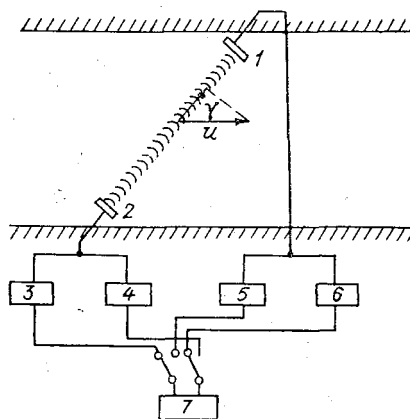


Рис. 3.10. Схема акустической установки для измерения расхода воды.

1, 2 — вибраторы, 3, 5 — приемные блоки, 4, 6 — передающие блоки, 7 — измеритель интервала времени.

от вибратора 1 до вибратора 2 T_1 и обратно T_2 . Геометрические соотношения измерительной схемы позволяют получить зависимость для скорости течения

$$u = L (1/T_1 - 1/T_2) / (2 \cos \gamma) \quad (3.7)$$

Электромагнитные методы измерения скоростей течения широко используются в океанографических исследованиях.

В потоке воды обнаруживается электродвижущая сила, создаваемая магнитным полем Земли, однако напряженность этого естественного поля весьма мала. Поэтому для измерения скоростей течения электромагнитное поле создается искусственно посредством уложенных на дно витков кабеля. Средняя скорость течения потока $v_{\text{ср}}$ пропорциональна разности потенциалов E на концах измерительной цепи

$$v_{\text{ср}} = E / (BH),$$

где H — напряженность поля; B — ширина реки.

Техническая сложность системы состоит в устройстве усиления слабых напряжений между зондами, заложенными по берегам водотока. Электромагнитная установка осуществлена в Англии и дала вполне удовлетворительные результаты. Она особенно

перспективна для измерения расходов воды в зарастающих и деформирующихся руслах, при сложном гидравлическом режиме потока и наличии обратных течений.

3.2.3. Приборы, основанные на гидродинамическом взаимодействии с потоком воды

Эта группа приборов наиболее многочисленна и включает разнообразнейшие устройства, лишенные какого-либо конструктивного сходства. Их объединяет лишь один признак — гидродинамическое взаимодействие с потоком воды. Среди них гидрометрическая вертушка, остающаяся наиболее распространенным измерителем скорости в современной гидрометрии. Вертушке посвящены специаль-

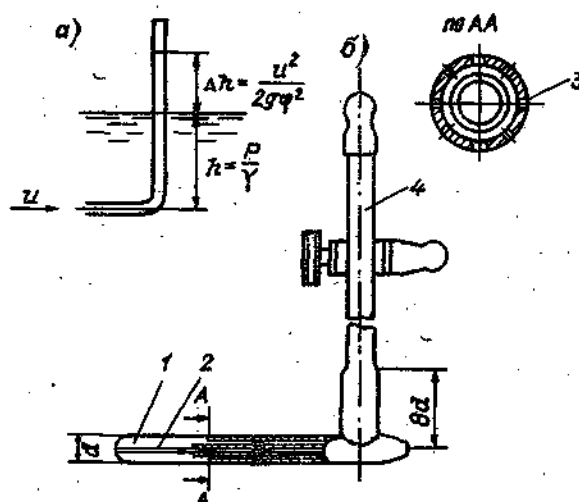


Рис. 3.11. Гидрометрическая трубка.

а — принципиальная схема, б — практически применяемая конструкция.
1 — носик, 2 — отверстие полного давления, 3 — отверстие статического давления, 4 — державка.

ные разделы, здесь приведем лишь краткие сведения о некоторых безлопастных приборах. В их числе прежде всего заслуживает внимания гидрометрическая трубка, преобразующая скорость течения в гидродинамическое давление (рис. 3.11). Ее простейший вариант предложен Г. Пито в 1732 г. Претерпев ряд видоизменений, эта трубка сохраняет первоначальный принцип действия. Если отверстие горизонтального колена направлено навстречу течению (рис. 3.11 а), то уровень в вертикальной части трубки поднимется над свободной поверхностью потока на высоту скоростного напора Δh , позволяющего определить скорость течения:

$$u = \varphi \sqrt{2g \Delta h},$$

где $\varphi < 1$ — коэффициент, учитывающий вязкость жидкости.

В современных устройствах (3.11 б) совмещаются две трубки: одна из них воспринимает гидродинамическое давление, а другая — пьезометрическое. При такой конструкции можно осуществить дистанционные измерения перепада давлений. Гидрометрические трубки применяются для измерения скоростей преимущественно в трубопроводах и лабораторных лотках.

Г. В. Железняковым и Т. В. Одилавадзе предложен прибор, в котором в качестве чувствительного элемента использован механотрон — преобразователь механических перемещений в колебания электрического напряжения. Разработаны лабораторные образцы прибора, но конструктивно они вполне могут быть приспособлены и для полевых измерений.

Безопасные приборы пока уступают вертушкам в масштабах практического применения.

3.2.4. Приборы для определения направления течений

Одним из простых и практичных средств для определения направления течений служат поплавки. Однако их применение требует надежных геодезических засечек и сложной организации работ. Поэтому важно располагать устройствами, в которых совмещалось бы измерение значения и направления скорости.

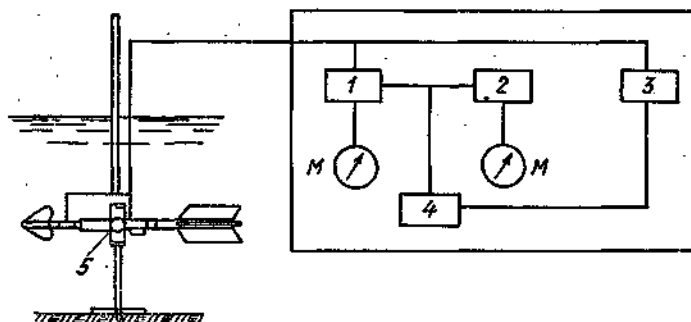


Рис. 3.12. Штанговый измеритель скорости (ВНР).

1 — горизонтальный измерительный мост, 2 — вертикальный измерительный мост, 3 — регистратор скорости течения, 4 — источник питания, 5 — вертушка.

Первоначально образцы измерителей направления течений, так называемые гидрофлюгеры, представляли собой, скорее, плавучие сооружения, чем приборы. Подобный гидрофлюгер, установленный на двух понтонах, использовал в начале века Н. С. Лебявский на реке Днепре.

Современный измеритель направления течения ГР-42 сконструирован П. Н. Бурцевым (этот прибор описан в главе 7).

Существует облегченная конструкция немагнитного измерителя течения на штанге (рис. 3.12). Модуль скоростного вектора

измеряется вертушкой, укрепленной на карданном подвесе и снабженной оперением. Для измерения направлений течения служат мостовые схемы с преобразователями углов поворота карданного подвеса в двух плоскостях — горизонтальной и вертикальной.

3.3. Гидрометрические вертушки

3.3.1. Исторические сведения

Принцип действия вертушки выражен в самом ее названии: в качестве измерителя скорости в ней служит рабочее колесо (винт). Первый вращающийся (роторный) измеритель скорости сконструировал Гук (Англия). В России для измерения скорости судов применялся вертушечный лаг М. В. Ломоносова (1758 г.). Прототип современных вертушек сконструирован Р. Вольтманом в 1790 г. Первоначально вертушки изготовлялись с горизонтальной осью вращения. В 1885 г. американский инженер В. Прайс запатентовал вертушку с вертикальной осью и лопастным ротором. Вертушка Прайса и поныне применяется в США. В Европе получили распространение вертушки А. Отта — с горизонтальной осью.

В России первая вертушка с электрической сигнализацией появилась в 1880 г. В нашей стране использовалась преимущественно вертушка с горизонтальной осью. Ее современная конструкция создана Н. Е. Жестовским. Типы вертушек ГР-21 и ГР-21М, усовершенствованные П. Н. Бурцевым (ГГИ) выпускаются серийно и являются основным средством измерения скоростей течения на гидрологических постах.

В последние годы образцы новых вертушек появились в службе эксплуатации оросительных каналов.

3.3.2. Основы теории и метрологические характеристики

Начало теоретическим исследованиям роторных измерителей скорости положил Г. Х. Сабинин, позже они были продолжены Г. В. Железняковым. Последние разработки по теории вертушек выполнены Н. Н. Алтаем.

Наиболее простой вид уравнения движения вертушки получается при установившемся вращении лопастного винта. Вращающий момент M_v , создаваемый набегающим потоком, уравновешивается суммой трех тормозящих моментов

$$M_v = M_r + M_{т.с} + M_{т.л}, \quad (3.8)$$

где M_r — момент гидравлического сопротивления, обусловленного вихреобразованием у краев лопастей и присоединенными массами

жидкости; $M_{т.с}$ — момент трения скольжения; $M_{т.п}$ — момент трения покоя.

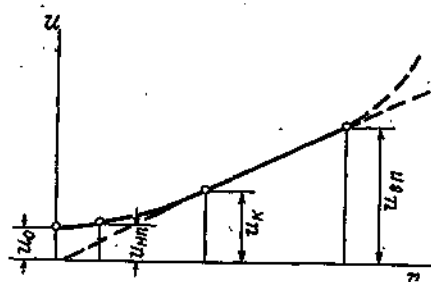
После подстановки соотношений для тормозящих моментов выражение (3.8) преобразуется в характеристическое уравнение вертушки

$$u = kn + \sqrt{b_1 n^2 + b_2}. \quad (3.9)$$

Параметр b_1 , зависит от гидравлических сопротивлений и геометрии винта, а b_2 , кроме того, — от момента трения $M_{т.п}$. В свою очередь $M_{т.п}$ пропорционален квадрату минимальной скорости u_0 , при которой начинается вращение винта. Величина u_0 является одной из метрологических характеристик и называется *начальной скоростью* вертушки.

Уравнение (3.9) в графическом виде представляется гиперболой (рис. 3.13). Эта кривая позволяет указать ряд характерных

Рис. 3.13. Зависимость между числом оборотов лопастного винта вертушки и скоростью течения.



значений скорости — прежде всего $u_{н.п}$ и $u_{в.п}$ — соответственно нижняя и верхняя границы диапазона измеряемых значений скорости. Ясно, что $u_{н.п}$ не тождественно начальной скорости u_0 , при которой вертушка еще не проявляет своих метрологических свойств. Значение $u_{в.п}$ служит характеристикой диапазона измерений.

При $b_1 n^2 \gg b_2$ кривая $u(n)$ приближается к своей асимптоте — прямой

$$u = n(k + \sqrt{b_1}). \quad (3.10)$$

Этому отвечает *критическая скорость* u_k , определяемая Г. В. Железняковым, как то показание вертушки, при котором и выше которого влияние механических сопротивлений на вращение ротора становится незначительным.

Величина $k_2 = k + \sqrt{b_1}$ называется *гидравлическим шагом вертушки*. Как видим, $k_2 > k$, из чего следует, что при одной и той же скорости в реальных условиях винт делает меньше оборотов, чем при отсутствии сопротивлений и вязкости жидкости (разница между k и k_2 достигает 10 %).

Стабильность метрологических свойств вертушки снижается в области малых скоростей $u < u_k$: на ее показания начинает влиять износ подшипников, засорение механизма наносами,

малейшие повреждения оси и лопастей. Влияет и температура воды, от которой зависит вязкость смазки. По некоторым данным, если вертушка градуирована при температуре воды 15°C , то в диапазоне температуры $5-10^{\circ}\text{C}$ наблюдается занижение скорости на $0,5-1,0$ см/с, а при температуре $20-25^{\circ}\text{C}$ — такое же завышение.

Верхний предел измерения $u_{в.п}$ отвечает скорости, при которой связь $u(n)$ становится нелинейной и принимает форму, называемую иногда петлей Эппера (по имени швейцарского инженера, изучавшего этот эффект). Для вертушек типа ГР-21 эта скорость составляет $5,5-8,0$ м/с.

График зависимости $u(n)$ для отдельной вертушки или группы (партии) приборов одного завода-изготовителя устанавливается

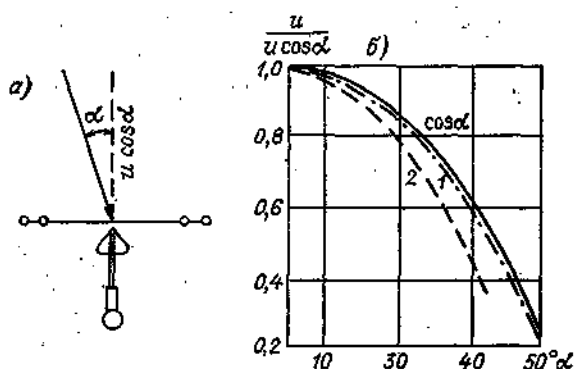


Рис. 3.14. Характеристики компонентности вертушек.

a — схема косо́го набега́ния потока в створе, b — соотношение измеренной скорости u и проекции на нормаль для компонентных (1) и некомпонентных (2) вертушек по результатам испытаний в бассейне.

в результате градуировочных испытаний и носит название *градуировочной кривой*. Градуировка проводится в специальных бассейнах или установках (см. гл. 9).

Рассеяние градуировочной зависимости оценивается в $0,5-2\%$. Оно определяет случайную инструментальную погрешность измерения скорости течения в точке. Однако этим не исчерпываются погрешности вертушечных измерений. Существуют систематические погрешности, порождаемые эффектами взаимодействия вертушки с турбулентным потоком.

При косоструйном направлении течения для измерения расхода воды требуется определять лишь проекцию вектора скорости на нормаль к гидроствору (рис. 3.14 a). При свободном подвесе вертушки на канате в случае значительной косоструйности ($\alpha > 10^{\circ}$) должна вводиться поправка в измеренное значение скорости умножением его на $\cos \alpha$ чтобы не допустить завышения скорости (предполагается, что одновременно с измерением скорости измеряется и угол отклонения оси вертушки α от нормали к створу).

При жестком креплении вертушки на штанге ее лопастьный винт подвержен косому обтеканию. В этом случае, чтобы не вводить поправку на косоуструйность, вертушка должна обладать свойством *компонентности*, т. е. способностью измерять проекцию скорости на ось вращения винта. Иными словами, независимо от направления скорости набегающего потока показания компонентной вертушки при жестком ее закреплении следует закону косинуса (рис. 3.14 б). Вертушки серии ГР обладают компонентным свойством и дают отклонение от величины $u \cos \alpha$ на 3—5 % лишь при большой косоуструйности (до 40°).

На точность показаний вертушки оказывает влияние так называемое *скольжение* лопастьного винта. Этот эффект заключается в том, что при установившемся вращении действительное число оборотов винта n_d меньше того, каким было бы оно при отсутствии сопротивлений n . Характеристикой скольжения служит относительная величина

$$\tilde{n} = (n - n_d)/n.$$

При нормальном обтекании ($\alpha=0$) значительное скольжение наблюдается лишь при малых скоростях потока, и уже при $u > 0,3$ м/с оно составляет всего 3—5 %. При $\alpha=0$ скольжение не служит источником погрешностей измерения, так как его влияние учитывается градуировочной кривой. Положение становится иным при косоуструйном набегающем потоке, когда значения $\tilde{n}$ резко возрастают, особенно при малых скоростях течения. По мере их увеличения скольжение снижается, но все же оно существенно превосходит значения $\tilde{n}$ для нормального обтекания.

Таким образом, компонентность вертушки, обеспечивая измерение проекции скорости течения на нормаль к створу, в то же время не устраняет занижения показаний вертушки, обусловленные возрастающим скольжением винта в косоуструйном потоке.

Наряду с этим инерционность лопастьного винта при взаимодействии с турбулентным потоком создает противоположный эффект завышения измеренных скоростей. Дело в том, что изменение числа оборотов винта происходит не вполне синхронно с пульсацией скорости. Характеристиками инерционных свойств вертушки служат постоянная времени T_0 и связанный с нею путь синхронизации

$$L = T_0 u,$$

а также известный из теоретической механики момент инерции I . Совокупность этих величин находит свое отражение в характеристике, называемой *чувствительностью* вертушки, под которой понимается ее способность реагировать на изменение значения и направления скорости. Особенность этой реакции такова, что лопастьный винт легче следует за положительными пульсациями и менее податлив отрицательным. В этом заключается объяснение того, что влияние турбулентности в конечном счете приводит к завышению осредненной скорости турбулентного потока (для стандартных вертушек оно может достигать 2—3 %).

Итак, с одной стороны, изменение направлений течения в турбулентном потоке вызывает занижение показаний вертушки, а с другой — пульсация скорости завышает их осредненное значение. Одновременное действие обоих факторов приводит к полной или частичной компенсации систематических погрешностей разного знака. Именно поэтому их проявление часто остается незамеченным. Однако в некоторых условиях (повышенной турбулентности и чрезмерной косоуструйности течения) погрешности того или иного знака могут достичь превалирующих значений и, следовательно, должны быть учтены при оценке точности результатов измерения.

3.3.3. Описание гидрометрических вертушек

Вертушка ГР-21, имеющая лопастный винт диаметром 120 мм (рис. 3.15), состоит из следующих основных частей: корпуса, хвостового оперения, ходовой части с контактным механизмом и лопастным винтом, сигнального устройства. В терминах метрологии

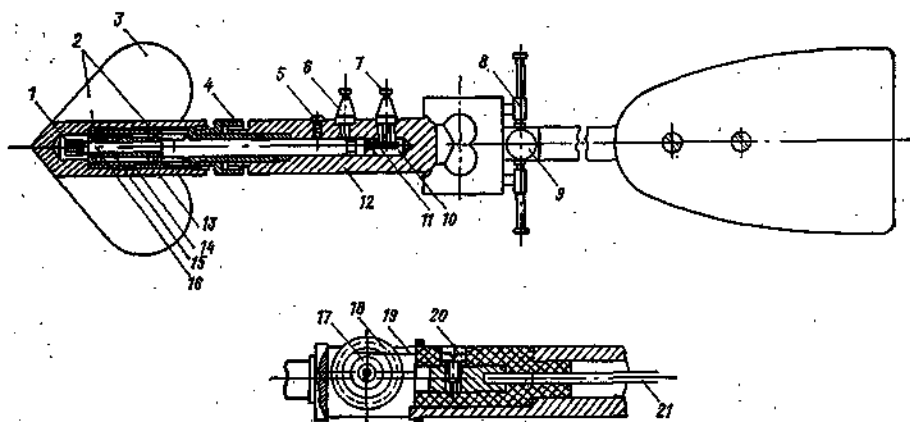


Рис. 3.15. Общий вид вертушки ГР-21 (в разрезе).

1 — осевая гайка, 2 — шарикоподшипник, 3 — лопастный винт, 4 — муфта, 5 — стопорный винт, 6, 7 — клеммы, 8 — зажимной винт, 9 — винт, 10 — контактное гнездо, 11 — ось, 12 — корпус, 13 — наружная втулка, 14 — гильза, 15 — распорная втулка, 16 — ось, 17 — контактный штифт, 18 — червячная шестерня, 19 — пружина, 20 — винт, 21 — электропроводный стержень.

(ГОСТ 16263—70) полный комплект вертушки является измерительным устройством, а ее конструктивные детали представляют собой чувствительный элемент (лопастный винт), первичный преобразователь (контактный механизм) и т. п.

Корпус служит для сочленения частей, крепления прибора на штанге или вертлюге и для подключения сигнальной цепи. В полость передней части корпуса вставляется ось ходовой части и крепится в ней стопорным винтом.

Ходовая часть вертушки состоит из оси с контактным механизмом, двух радиально-упорных шарикоподшипников, внутренней распорной втулки, наружной втулки, осевой гайки. Ходовая часть входит в цилиндрическую полость лопастного винта и крепится в ней муфтой.

Контактный механизм собран из червячной шестерни с двадцатью зубцами, контактного штифта и пружины, винта для ее крепления, электропроводного стержня, изолированного от массы корпуса и соединяющего контактную пружину с гнездом штепселя. Механизм дает одно замыкание электрической сигнальной цепи за один полный оборот червячной шестеренки, что соответствует 20 оборотам лопастного винта.

Сигнальное устройство, состоящее из клеммной панели, звонка, электрической лампочки, переключателя и сигнальных проводов, служит для преобразования электрического импульса в звуковой или световой сигнал.

Электрический ток от отрицательного полюса батареи, состоящей из двух гальванических элементов, подводится к клемме со знаком минус (—) на клеммной панели ящика и далее по проводу к изолированной клемме вертушки, затем к штепсельному гнезду по электропроводному стержню штепселя, по контактной пружине на контактный штифт и на массовую клемму. Далее по второму проводу ток идет на клемму панели со знаком плюс (+), от которой через электрический звонок или электрическую лампочку накаливания — к положительному полюсу батареи.

Сборка вертушки производится в следующем порядке. На ось ходовой части последовательно надеваются внутренняя обойма шарикоподшипника (с сепаратором и шариками), наружная обойма шарикоподшипника заплечиками вверх, внутренняя распорная втулка, наружная распорная втулка, обойма шарикоподшипника заплечиками вниз с внутренней обоймой шарикоподшипника и навинчивается осевая гайка крепления подшипников. Затем на ось надевается гильза с червячной втулкой. Ось вставляется в полость лопастного винта, заполненную предварительно маслом на 5—6 мм выше уступа в глубине полости и закрепляется муфтой, которая надевается на ось со стороны штепсельного штифта. При вводе оси в полость лопастного винта необходимо ввести штифтик на конце гильзы в гнездо в плече уступа полости лопастного винта. При сборке штепсельный штифт оси вставляется в контактное гнездо штепселя в корпусе. Если штепсельный штифт сжат, концы его осторожно раздвигают ножом, чтобы он плотно входил в контактное гнездо. Вставленная в корпус ось с лопастным винтом закрепляется стопорным винтом 5. Следует убедиться, что ось закреплена и не может быть вынута из корпуса. К изолированной массовой клемме 6 присоединяется положительный полюс (+) батареи.

Разборка вертушки производится в порядке, обратном сборке.

Вертушка ГР-21М (модернизированный вариант) отличается от вертушки ГР-21 лишь конструкцией отдельных деталей. Все

операции по ее сборке и разборке осуществляются в порядке, указанном выше. Пределы измерения скоростей вертушки ГР-21 от 0,04 до 5 м/с.

Существенный недостаток вертушки ГР-21 — сравнительно большой интервал между сигналами (через 20 оборотов лопастного винта), что не позволяет использовать их для исследования пульсации скоростей течения и ускоренных измерений расходов воды. Этим требованиям удовлетворяют вертушки, в которых регистрируется каждый оборот или даже части оборота лопастного винта. К числу таких приборов относится вертушка ГР-99.

Вертушка ГР-99 (рис. 3.16), как и другие вертушки, состоит из корпуса, ходовой части и контактного устройства. Ходовая

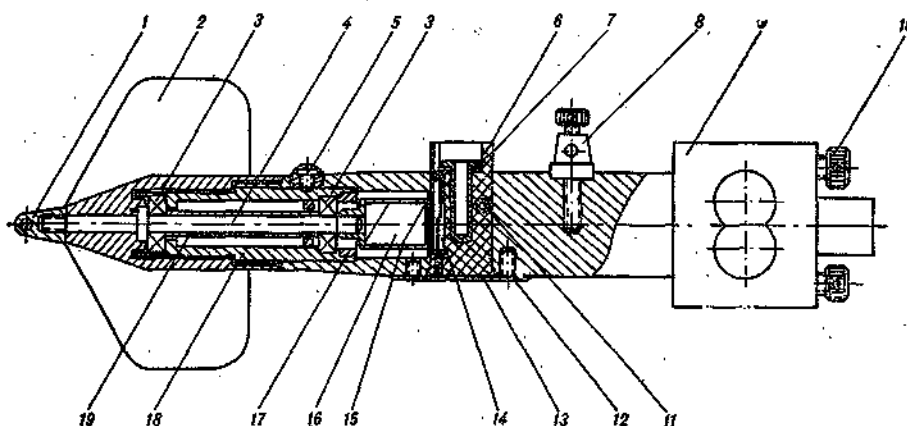


Рис. 3.16. Общий вид вертушки ГР-99 (в разрезе).

1 — гайка, 2 — трехлопастный винт, 3 — радиальные шарикоподшипники, 4 — ось, 5 — винт для крепления ходовой части к корпусу, 6 — изоляционная втулка, 7 — изолированная клемма, 11 — винт, 12 — стержень штепселя, 13 — упорная шайба, 14 — магнитоуправляемый контакт, 15 — обойма, 16 — постоянный магнит, 17 — гайка, 18 — гильза, 19 — распорная втулка.

часть размещена в передней части корпуса и представляет собой трехлопастный винт, установленный на оси и закрепленный гайкой два шарикоподшипника, распорную втулку, гильзу. Ходовая часть вертушки крепится к корпусу винтом.

Главная особенность вертушки ГР-99 заключается в контактном устройстве. Оно состоит из постоянного магнита, закрепленного в обойме на оси ходовой части, и магнитоуправляемого контакта, размещенного в изоляционной втулке, закрепленной в корпусе вертушки посредством прижимной планки и винтом. Постоянный магнит при каждом обороте лопастного винта вызывает одно замыкание магнитоуправляемого контакта. Для подключения сигнальной линии связи служат две клеммы, расположенные на корпусе, одна из которых изолирована, а другая связана с массой корпуса вертушки.

Вертушка к штанге крепится двумя винтами, расположенными

в тыльной части корпуса. Для работы на канатном подвесе вертушка укомплектована вертлюгом и хвостовым оперением.

Счетно-импульсный механизм служит для суммирования электрических импульсов, поступающих от контактного устройства вертушки, и регистрации выдержки времени. Он состоит из электромагнитного счетчика импульсов, стандартного секундомера и рычажного устройства, обеспечивающего синхронное включение и выключение счетчика и секундомера.

Измеритель скоростей течения речных потоков конструкции Н. Я. Соловьева (ГГИ) состоит из вертушки со сменными лопа-

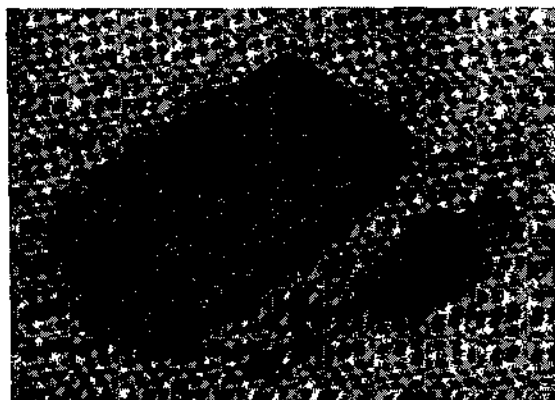


Рис. 3.17. Общий вид однополюсной микровертушки и регистрирующего микрокалькулятор-таймера.

ными винтами диаметром 60 и 120 мм и преобразователя частоты электрических импульсов в скорость течения с цифровым указателем ее значений. Диапазон измерения скоростей от 0,06 до 5,00 м/с с основной погрешностью $\pm 1,5\%$. Продолжительность осреднения измеряемых скоростей потока принята 60 и 100 с. Сигналы подаются при каждом обороте лопастного винта.

Однополюсная микровертушка разработана ЦНИИКИВР (рис. 3.17). В ней применен электролитический способ формирования импульсов: при прохождении лопасти винта у полюса электрода изменяется электрическое сопротивление участка цепи «электрод—земля», формируется импульс тока, который усиливается и регистрируется микрокалькулятором. Способ формирования импульсов не создает дополнительного трения при вращении лопастного винта, что практически обеспечивает линейную зависимость между скоростью и числом импульсов. Это позволяет выбирать и выдерживать время осреднения с помощью таймера таким, что количество импульсов численно равно скорости. Вертушка снабжена набором пластмассовых лопастных винтов диаметром от 2 до 20 мм.

Интегратор ГР-101 представляет собой комплект трех приборов: вертушки, гидрометрического груза и измерительного пульта

(рис. 3.18). Разработан Н. Я. Соловьевым и А. Н. Чижовым (ГГИ). Позволяет получить среднюю скорость на вертикали.

Вертушка — однооборотная с магнитоуправляемым контактом. Диаметр лопастного винта 120 мм, геометрический шаг 200 мм. Погрешность измерения: при скоростях течения 0,08—0,2 м/с — не более $\pm 6\%$, выше 0,2 м/с — не более $\pm 1,5\%$.

Гидрометрический груз — носитель вертушки, удерживающий и ориентирующий ее в потоке посредством стабилизатора с оперением и поплавком. В полости груза размещен донный контакт,

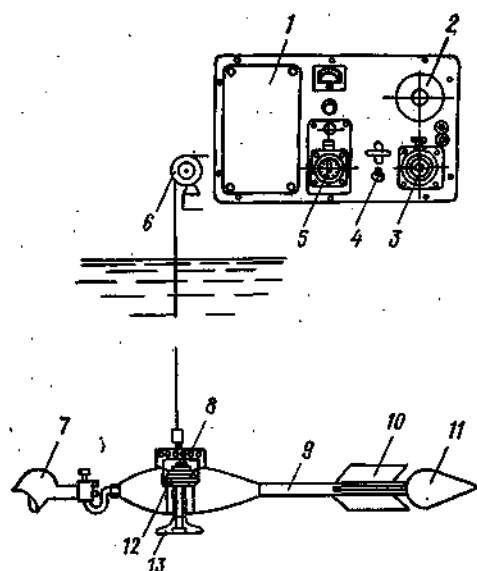


Рис. 3.18. Интегратор ГР-101.

Измерительный пульт: 1 — блок питания, 2 — метроном, 3 — счетчик сигналов, 4 — переключатель в режим измерения скорости или глубины, 5 — секундомер, 6 — лебедка; гидрометрический груз: 7 — вертушка, 8 — планка для подвешивания к канату, 9 — стабилизатор, 10 — оперение груза, 11 — поплавок, 12 — донный контакт, 13 — поддон.

сигнализирующий о достижении дна, когда он замкнется под действием поддона. Планка служит для подвешивания груза к несущему канату лебедки.

Измерительный пульт размещен в металлическом футляре. Регистрация сигналов производится счетчиком, а измерение времени — механическим секундомером, кнопка которого связана с блоком управления цепи вертушки. Пульт снабжен метрономом, подающим звуковые сигналы через заданные промежутки времени. Вращение рукоятки лебедки по сигналам метронома обеспечивает относительную равномерность и необходимую скорость опускания вертушки с грузом. Переключателем прибор переводится в режимы измерения — скорости или глубины.

Интегратор ГР-101 предназначен для применения на реках и каналах при средних скоростях на вертикали от 0,2 до 2,5 м/с и глубинах от 1 до 20 м. Перемещение вертушки по вертикали производится обычными гидрометрическими лебедками и подъемными механизмами дистанционных установок для измерения расхода воды (ГР-64 и ГР-70). Универсальность, портативность и

простота конструкции выгодно отличают ГР-101 от известных за рубежом судовых установок для интеграции скоростей по вертикали. Как показали опытные наблюдения, интегратор ГР-101 ускоряет измерения расхода воды в 1,5—2 раза, сохраняя ту же точность, что и при основном способе.

3.3.4. Принадлежности и сигнально-регистрирующие приборы гидрометрических вертушек

Вспомогательное оборудование и средства, используемые при работе с вертушками, подразделяются на две группы: 1) приспособления для опускания и удержания вертушки в потоке, 2) сигнальные и регистрирующие устройства.

Гидрометрическая штанга служит для крепления на ней вертушки. Изготавливается из металлических труб диаметром 2—4 см с различной формой поперечного сечения (круглой, овальной, яйцевидной); для удобства транспортировки делается разборной в виде звеньев длиной 0,5—2,0 м. Звенья соединяются заподлицо с помощью винтов или свинчиваются. На поверхности штанги нанесены деления через 1,5 или 10 см. На гидрометрических постах применяются штанги круглого сечения диаметром 25—28 мм. Каждая штанга состоит из двух звеньев

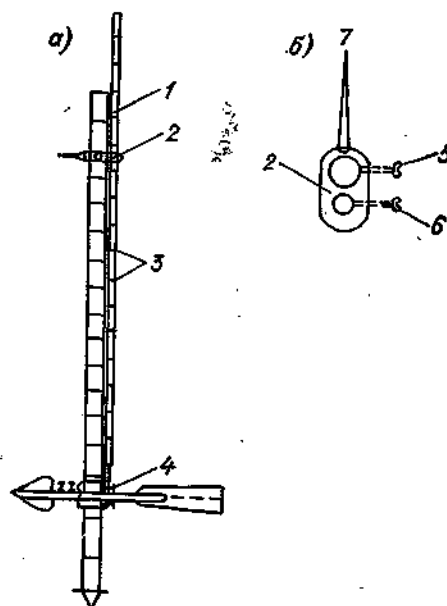


Рис. 3.19. Приспособление для перемещения вертушки по штанге.

а — общий вид, б — хомут; 1 — установочный стержень, 2 — хомут, 3 — шкала засечек через 5 см, 4 — зажимной винт для крепления вертушки к установочному стержню, 5 — винт для крепления хомута к штанге, 6 — винт установочного стержня, 7 — указатель направления.

длиной 150 см, которые могут применяться отдельно или вместе. Штанги могут использоваться с упором в дно реки или без него. Вертушка в первом случае закрепляется винтами неподвижно, и для перемещения ее в нужную точку по глубине штангу вынимают из воды. Применение вертушки на упорной штанге возможно при глубине потока до 2,5 м и при скорости течения до 1,0—1,5 м/с. При большой глубине и значительной скорости течения работать с вертушкой на штанге затруднительно.

В Украинском УГКС предложено приспособление для крепления вертушки на штанге, которое исключает подъем ее из воды для перестановки прибора (рис. 3.19). Основным элемент приспособ-

собления — установочный стержень. Он позволяет передвинуть вертушку, не отрывая штангу ото дна.

Подвесные штанги удерживаются на весу специальными штангодержателями или оттяжками. Вертушка закрепляется на нижнем конце штанги, и для установки на нужной глубине перемещается по высоте вся штанга. Работа с вертушкой на подвесной штанге производится обычно на горных реках с подвесного мостика или гидрометрической люльки.

Указатель направления течения (визир) — применяется для установки вертушки перпендикулярно створу при опускании ее на штанге. Указатель представляет собой металлическую планку с кольцом, закрепляемую на штанге выше поверхности воды параллельно оси вертушки. Указатель должен применяться при измерении скоростей на большой глубине и в мутной воде, когда вертушка сверху не видна.

Стальной канат используется для опускания вертушки в потоки с большими глубинами. Применяются оцинкованные канаты диаметром 1—4 мм. Удобны в работе специальные канаты с сердечником в виде изолированного медного проводника. В этом случае отпадает необходимость иметь дополнительный кабель для передачи сигналов от вертушки.

Вертлюг служит для подвеса вертушки и груза на канате так, чтобы они были обращены навстречу течению. Вертлюг состоит из стержня с двумя кольцами и вращающейся части, к которой крепится вертушка. Посредством карабинов верхнее кольцо вертлюга соединяется с канатом, а нижнее кольцо — с грузом. Чтобы избежать влияния подпора, создаваемого грузом, он подвешивается на расстоянии не менее 25—30 см оси вертушки.

Груз служит для уменьшения отклонения каната, на котором опускается вертушка, от вертикали. Современные грузы рыболовной формы имеют специальный кронштейн или штырь для крепления вертушек, что дает возможность измерять скорости вблизи дна.

Кабель необходим для соединения отдельных элементов электрической цепи контактного устройства вертушки. Кабелем может служить специальный канат с изолированным медным проводником.

Электрический звонок подает сигнал при замыкании сигнальной цепи контактным устройством вертушки. Замыкание происходит через определенное число оборотов лопастного винта вертушки. Вертушка должна быть снабжена двумя приспособлениями для электрической сигнализации (например, звонком и лампочкой), чтобы в случае повреждения одного из них во время работы можно было использовать другое.

Время между сигналами вертушки определяется по секундомеру.

Звуковая сигнализация в сочетании с секундомером вытесняется более совершенными методами регистраций показаний вертушки: самопишущими приборами — хронографами и осциллографами

и цифровыми указателями значений скоростей, осредненных за необходимый интервал времени.

В ЦНИИ комплексного использования водных ресурсов (г. Минск) разработан комплект приборов для установки и регистрации показаний вертушки (рис. 3.20).

В состав комплекта приборов входят пять микровертушек 2, счетно-импульсный блок 4, штанга 3. Счетно-импульсный блок предназначен для усиления полученных от преобразователей импульсов и регистрации их счетчиком. Он представляет собой пятиканальный усилитель с автономным питанием с пятью счетчиками МЭС-54. Для удобства работы и контроля режима усилителя в блок встроены реле времени, контрольный стрелочный прибор.

Штанга снабжена механизмом /

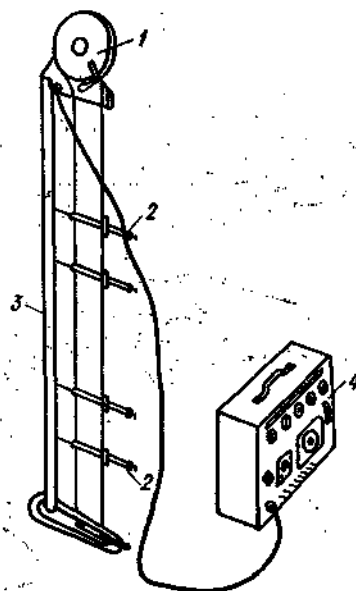


Рис. 3.20. Комплект приборов ЦНИИ комплексного использования водных ресурсов.

для расстановки микровертушек на заданные глубины в виде четырехступенчатого барабана и четырех нерастяжимых нитей, на которых закреплены вертушки. При установке верхней вертушки под уровень воды остальные приборы располагаются по заданной схеме, т. е. пов., 0,2h; 0,6h; 0,8h; дно.

Как показал опыт, применение комплекта позволило увеличить производительность труда наблюдателей в 15—20 раз.

3.3.5. Правила обращения с гидрометрическими вертушками и уход за ними

Правильность показаний гидрометрической вертушки зависит от устойчивости метрологических характеристик, установленных при градуировке. Повреждение лопастного винта, изгиб оси вертушки, коррозия подшипников и другие неисправности ведут к нарушению градуировочной зависимости и утрате вертушкой качеств средства измерения. Поэтому находящиеся в эксплуатации вертушки в определенные сроки (не реже 1 раза в два года) необходимо подвергать градуировке (см. гл. 9). В случае повреждения или неисправности вертушки она подлежит внеплановому ремонту и градуировке. О повреждении во время измерения расхода воды делается отметка в полевой книжке с указа-

нием, на каких вертикалях измерения производились неисправным прибором. Если повреждение обнаружено перед измерением расхода и есть основание предполагать, что оно произошло во время предыдущего измерения, запись об этом делают в книжке измерения предыдущего расхода.

Разборку и сборку вертушки в помещении и в поле следует производить осторожно, над куском материи или плотной бумаги

с загнутыми краями, чтобы не утерять какую-либо мелкую деталь.

Сразу же после измерения расхода воды на берегу реки вертушку обтирают сухой мягкой тряпкой и убирают в ящик.

При обледенении вертушки нельзя скалывать с нее лед или с силой проворачивать лопастный винт. Чтобы обледенение исчезло, вертушку следует погрузить в теплую воду или подержать некоторое время в глубокой части потока.

По возвращении в помещение наблюдатель в тот же день чистит вертушку и

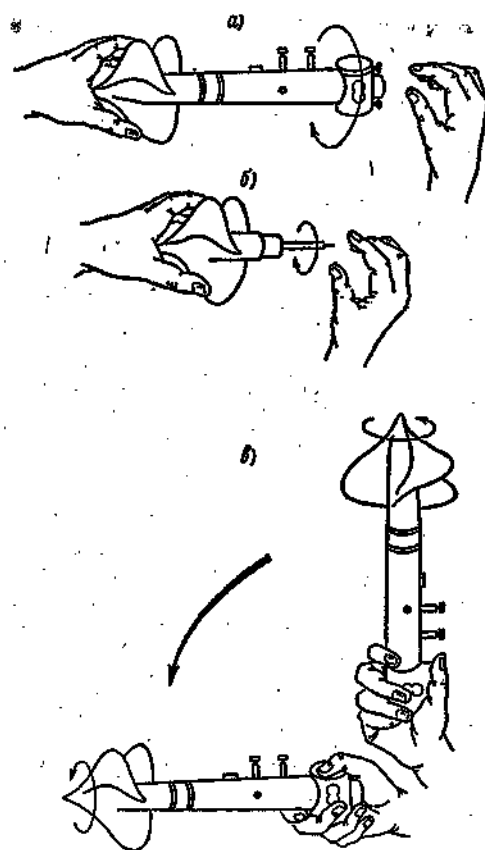


Рис. 3.21. Проверка исправности ходовой части вертушки.

а — проверка центрованности оси испытанием на биение корпуса, б — то же испытанием на биение оси, изменение зазоров между осью и втулкой, в — проверка допусков посадочных размеров наблюдением за изменением легкости хода винта при переводе вертушки из вертикального в горизонтальное положение.

промывает чистым керосином. Вычищенные металлические части должны быть вытерты и обсушены. Для заливки ходовой части следует применять трансформаторное масло, получаемое с гидрологической станции. Другое масло применять запрещается, так как оно может содержать вредные примеси, вызывающие окисление или образование сгустков, что отразится на точности показаний вертушки. Чистить и обтирать каждую часть прибора следует особенно аккуратно, чтобы не погнуть и не испортить. Внутренние части вертушки промывают струей керосина из резиновой груши и очищают ершиком.

При сборке нужно обращать внимание на то, чтобы степень завинчивания винта, укрепляющего ось вертушки, или гайки, зажимающей шайбы шарикоподшипников, была одинакова.

Перед каждым измерением расхода следует тщательно осмотреть все детали ходовой части (ось и подшипники), проверить чистоту, исправность механизма и правильность сборки. При правильной ее сборке лопастный винт в нормальном и слегка наклонном положении должен от легкого дуновения воздуха сделать несколько оборотов.

П. Н. Бурцев рекомендует проверять:

- центровку оси ходовой части (рис. 3.21 *а, б*), для чего зажать винт в одной руке, а другой вращать корпус: на неисправность укажет биение его конца;

- сохранение допусков посадочных размеров (рис. 3.21 *в*); для этого держа вертушку за корпус, ставят ее вертикально, приводят в движение винт и постепенно поворачивают прибор в горизонтальное положение. Если при этом легкость хода винта не будет изменяться, вертушка исправна.

Вертушки ГР-21 и ГР-21М перед каждым измерением расхода воды при скоростях течения меньше 0,5 м/с, проверяют чтобы выяснить неизменность момента сил трения, который зависит от состояния оси и подшипников. Это испытание производится в помещении или защищенном от ветра месте по способу выбега. Вертушку закрепляют на штанге на высоте 1,1 м от пола. На соединительную гайку вертушки навивают нить длиной 100 см с грузиком массой 100 г. Затем груз отпускают и в момент, когда вся нить сойдет с гайки, пускают секундомер. В момент остановки свободного вращения винта секундомер выключают. Разница в продолжительности свободного вращения T по двум испытаниям не должна превышать 20 %. Полученное время (меньше из двух) сравнивают со временем T_0 , которое устанавливается перед началом эксплуатации вертушки. Длительность вращения перед измерением расхода обозначается буквой T с индексом, показывающим порядковый номер измерения этой вертушкой расхода воды, например T_5 , T_{25} и т. д.

Если продолжительность свободного вращения перед измерением данного расхода воды по сравнению с T_0 уменьшится не более чем в 1,5 раза, вертушка признается исправной.

Более простой способ контроля трения ходовой части вертушки, предложенный Н. Я. Соловьевым, — по числу свободных колебаний винта под действием дисбаланса-грузика, прикрепляемого к обреза лопасти. Если масса грузика 1 г, то при температуре воздуха 10—25 °С исправному состоянию соответствует следующее число полных (двойных) колебаний винта: 5 — для вертушки ГР-21М и 4 — для вертушки ГР-99.

При измерении скоростей течения больше 0,5 м/с испытание по способу выбега не производится.

Перед измерением расхода воды проверяют исправность электрических элементов и приводов; регулируют сигнальное устрой-

ство (звонок, зуммер). В первую очередь осматривают и очищают от окислов и грязи винты и гайки, все контакты и концы проводов.

В случае слабого или прерывистого сигнала при замкнутом контакте прерыватель звонка регулируют специальным винтом.

После проверки и регулировки сигнальной электрической системы производят испытание действия контактного механизма вертушки. Для этого производят сборку электрической схемы прибора. При вращении рукой лопастного винта в момент срабатывания контактного устройства должен получаться громкий звуковой или ясный световой сигнал. Если окажется, что все внешние контакты надежны, а сигналы остаются слабыми или прерывистыми,

Таблица 3.1

Неисправности вертушек ГР-21 и ГР-21М и способы их устранения
(по П. Н. Бурцеву)

Признак неисправности	Возможная причина	Способ устранения
Отсутствие сигнала	Загрязнение, коррозия или подгорание контактных поверхностей Отсутствие контакта пружины и штифта шестерни Обрыв провода (кабеля) Падение напряжения батареи гальванических элементов (сети батареи) Нарушение регулировки звонка сигнального устройства	Тщательно прочистить контактные поверхности тряпочкой, смоченной в бензине Зачистить ось и втулку шестерни, подогнуть или заменить контактную пружину Заменить новым или устранить обрыв Заменить новыми батареями Отрегулировать зазор между контактами реле звонка
Непрерывный сигнал	Вода попала в полость оси ходовой части (особенно с высокой минерализацией) Провод (—) соединился с массой вертушки, изолированная клемма соединена с массой. Плохая изоляция стержня штекера в результате порчи перхлорвинилового изоляционного чулка	Разобрать ось вертушки, промыть, прочистить и заменить изоляцию между штепсельным штифтом и осью вертушки Проверить тестером: контакт — масса; изолированная клемма — масса и при необходимости восстановить изоляцию
Дробление сигналов при медленном вращении лопастного винта; при быстром вращении — пропуск сигналов	Загрязнено контактное устройство вертушки Мало давление контактной пружины	Тщательно промыть бензином контактное устройство Подогнуть контактную пружину, зачистить поверхности контактов

открывают контактную камеру вертушки, промывают червячную шестерню и пружину керосином, сушат и снова вращением лопастного винта устанавливают контактную пружину на штифтик. Если и после промывки сигналы будут слабыми, необходимо произвести регулировку прилегания контактной пружины к червячной шестерне.

Сводка о неисправностях вертушек и способах их устранения приведена в табл. 3.1.

Ремонт, не затрагивающий ходовой части вертушки, может производиться на месте, так как после него не требуется градуировки. К такому ремонту относится: замена винтов, клемм, исправление контактного устройства. Ремонт ходовой части вертушки, как правило, должен производиться в специализированных мастерских и бюро поверки, которые имеют градуировочные установки.

Соответствующего ухода требуют принадлежности и сигнальные устройства вертушки. Все погружаемые в воду предметы (штанги, грузы и т. п.) протираются и высушиваются. Электрические кабели отключаются от элементов и наматываются на катушки. Регистрирующие устройства и блоки автоматики содержатся в порядке, предусмотренном в инструкциях по эксплуатации.

3.4. Измерение скоростей течения вертушкой

3.4.1. Измерения в точках

После того как вертушка проверена и подготовлена к работе, ее закрепляют на штанге или канате для опускания в точки измерения скоростей.

На рис. 3.22 приведены схемы крепления и опускания вертушки в поток. Схема а — жесткое крепление на штанге нормально к направлению гидроствора — наиболее распространена. Схема б

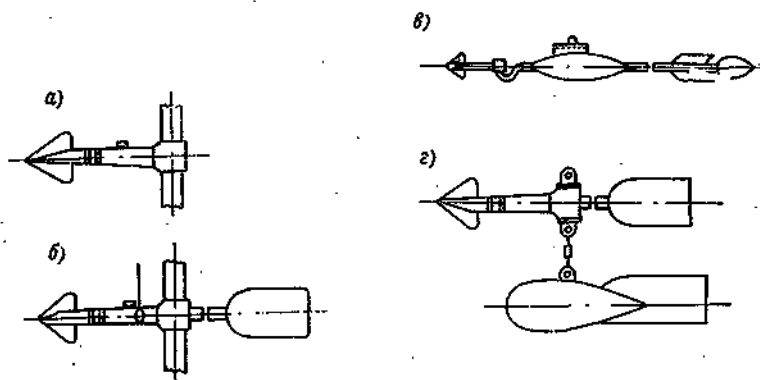


Рис. 3.22. Основные варианты установки вертушек в потоке.

а — жесткое крепление на штанге; б — опускание на штанге без фиксации вертушки стопором (подвес на проводе); в — крепление на кронштейне груза; г — подвес на вертлюге.

применяется в зимних условиях, чтобы избежать обмерзания вертушки при частых извлечений ее из воды для установки на заданную глубину. Хвостовое оперение, свободно насаженное на штангу вертушки, ориентирует ее по направлению набегающего потока. При больших глубинах используется канатный подвес с грузом. Наиболее рациональна установка вертушки на кронштейне груза ПИ-1, снабженного хвостовым оперением и уравнивающим поплавком (схема в). Груз ПИ-1 инерционен. Не реагируя на мелкомасштабные вариации скоростного вектора, он ориентирует вертушку по преобладающему направлению в горизонтальной плоскости. При относительно малых скоростях и больших глубинах удобен рыбовидный груз с креплением вертушки на вертлюге (схема г). Для больших скоростей этот комплект непригоден: ось вертушки получает значительное смещение от нормали к створу в вертикальной плоскости на угол, соизмеримый с углом отбоя каната.

Необходимая продолжительность измерения скорости в отдельных точках зависит главным образом от характеристик пульсации ее мгновенных значений. Чем продолжительней измерение, тем меньше отличается его результат от значений скорости, осредненных за достаточно длительный интервал времени T . Существовали различные представления о необходимой выдержке вертушки (от 2 до 8 мин). В современных условиях мы располагаем возможностью находить оптимальную продолжительность T в зависимости от заданной точности измерения скорости в точке.

Пульсационная погрешность осреднения скорости за период $T \gg \tau_k$ приближенно выражается как

$$\sigma_{\Pi} \approx \sigma_u \sqrt{2\tau_k/T} \quad (3.11)$$

(σ_u и τ_k см. в п. 3.1.1).

Отсюда, задавшись допустимой погрешностью $\sigma_{\Pi} = \Delta_{\text{доп}}$, можно найти необходимую продолжительность измерения

$$T \geq 2 (\sigma_u / \Delta_{\text{доп}})^2 \tau_k. \quad (3.12)$$

Для равнинных рек $\sigma_u \approx 8 \div 12 \%$, $\tau_k = 10 \div 15$ с. Тогда при $\Delta = 3 \div 5 \%$ получим $T = 52 \div 480$ с. В действующих Наставлениях рекомендована выдержка при обычных измерениях 100 с, а при ускоренных — 60 с.

Измерение скорости в точках можно производить в двух различных формах регистрации показаний вертушки: 1) фиксируется время поступления отдельных сигналов, что позволяет проследить характер пульсации скорости в точке (применяется при многоточечном способе измерения расхода воды); 2) записывается общее время и общее число сигналов (используется при измерениях основным и сокращенным способами).

В первом случае после установки вертушки на требуемую глубину пропускают два-три сигнала и по следующему включают секундомер. При редких сигналах записывается время поступле-

ния каждого сигнала, а при частых сигналах — через один, два и более сигналов. Число сигналов (а следовательно, и количество оборотов), поступающих за промежуток времени между записями, называется *приемом*. Число сигналов за прием определяется следующим образом: по концу очередного сигнала включают секундомер и считают количество сигналов, поступивших в течение 15 с. Это количество сигналов и составляет один прием.

Во втором случае, установив вертушку на требуемую глубину, пропускают один-два сигнала (они называются нулевыми), включают секундомер и начинают счет сигналов. Если в течение 60 с поступит два или более сигнала, то по следующему сигналу (первому, поступившему по истечении 60 с) секундомер останавливается и измерение прекращается.

Чтобы получить скорость в точке, сначала вычисляют суммарное количество оборотов N лопастного винта вертушки, умножая число оборотов за прием на число приемов. Затем делением суммы оборотов на продолжительность T наблюдений в секундах определяется число оборотов n лопастного винта в одну секунду: $n = N/T$. По найденному числу оборотов в градуировочной таблице находится соответствующая скорость течения.

3.4.2. Интеграционные измерения

Интеграционные измерения скоростей течения выполняются при перемещении вертушки в поперечном сечении потока по горизонтальным и вертикальным направлениям или зигзагообразным траекториям (последний способ не получил распространение из-за неопределенности пространственной интерпретации результатов измерения). Здесь рассмотрим интеграцию по вертикали, а описание горизонтальной интеграции дано в п. 4.4.

Основное преимущество интеграционного измерения перед точечным — ускорение измерительного процесса и непрерывность регистрации скоростей по пути их интеграции (суммирования) за время перемещения вертушки (отсюда название способа «интеграционный»). При интеграции по вертикали, кроме того, достигается совмещение операций измерения глубины и средней скорости на вертикали, что также дает выигрыш времени.

Процесс интеграции скоростей прибором ГР-101 заключается в перемещении вертушки, находящейся на подвесе лодочной лебедки или канатной системы установок ГР-64 и ГР-70. После проверки функционирования основных блоков интегратора и сборки элементов устройства выполняют следующие операции:

а) устанавливают гидрометрический груз с вертушкой в потоке так, чтобы ее ось совпала с поверхностью воды;

б) сбрасывают на нуль показания счетчика глубины лебедки (установки);

в) погружают вертушку в воду так, чтобы ее ось располагалась на глубине, равной половине диаметра лопастного винта (при волнении глубина отсчитывается от поверхности впадины волны);

г) включают питание и устанавливают переключатель режима работы в положение «скорость», ставят на нуль стрелки секундомера и сбрасывают на нуль показания счетчика сигналов вертушки;

д) устанавливают переключатель метронома соответственно заданной скорости вертикального перемещения вертушки;

е) в момент очередного сигнала метронома нажатием до упора на кнопку управления измерительного пульта включают секундомер и одновременно равномерным вращением рукоятки лебедки в такт сигналам метронома производят перемещение вертушки с грузом по вертикали;

ж) при срабатывании электромагнита измерительного пульта, которое свидетельствует о достижении грузом дна потока и последующей остановке секундомера и счетчика сигналов вертушки, прекращают вращение рукоятки, снимают показания счетчика глубины и приподнимают груз над дном;

и) снимают показания секундомера и счетчика сигналов вертушки.

При необходимости более точного определения глубины следует установить переключатель режима работы установки в положение «Глубина», снова погрузить груз на дно и при срабатывании звонка снять показания счетчика глубины. Измерение завершается включением храпового устройства и подъемом вертушки с грузом на поверхность.

Скорость w перемещения вертушки зависит от глубины вертикали и скорости течения. Значения w не должны превышать пределов, указанных в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Глубина на вертикали, м	Скорость перемещения вертушки, см/с	
	равнинные реки	горные реки
от 1 до 1,5	2,0	—
от 1,5 до 2,0	5,0	2,0
от 2,0 до 3,0	7,5	5,0
от 3,0 до 5,0	10,0	7,5
Свыше 5,0	15,0	10,0

Применение интегратора ГР-101 целесообразно при глубинах более 1 м и скоростях течения более 0,2 м/с. Несоблюдение этих условий ведет к значительным погрешностям измерения. Они связаны с краевыми эффектами регистрации числа оборотов вертушки, подающей сигналы через один оборот, и неполнотой учета скорости в придонном слое.

Действительно, вертушка не может быть опущена ко дну ближе, чем на половину диаметра лопасти. В этих условиях измеренная скорость оказывается завышенной. Необходимая поправка

в долях скорости (со знаком минус) может быть определена по формуле

$$\alpha_v = -0,67 m \tilde{a} / C, \quad (3.13)$$

где $\tilde{a} = a/h$ — относительное расстояние оси вертушки от дна. При $C = 50 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ имеем:

$\tilde{a} \dots \dots$	0,30	0,20	0,15	1,10	0,05
$\alpha_v \dots \dots$	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02

В прошлом, когда применялись грибовидные грузы, из-за плохого обтекания поддона при опускании вертушки получались меньшие значения средней скорости на вертикали, чем при подъеме от дна к поверхности потока. При использовании интегратора ГР-101 это различие не устанавливалось, но наблюдалось завышение скорости, вызванное косым обтеканием лопастного винта, так как он воспринимает равнодействующую скорость течения и подъема (опускания) прибора. При этом вертикальный угол отклонения вертушки достигает 4° , а завышение скорости 1—2 %.

3.4.3. Оценка точности определения средней скорости на вертикали

Одним из элементов расхода воды является средняя скорость на вертикали. При интеграции эта скорость совпадает с измеренным значением с учетом внесенных в него необходимых поправок. Если же средняя скорость на вертикали определяется по результатам точечных измерений, то приходится тем или иным способом воссоздавать очертание скоростной эпюры между точками наблюдения. В этом случае, чтобы получить достаточно надежные результаты, следует учитывать объективные закономерности кинематической структуры потока (о них говорилось выше).

Если бы распределение осредненных скоростей по глубине оставалось строго детерминированным (т. е. не имело бы случайных отклонений от типичной для данных условий эпюры), то было бы безразлично, в каких точках производить измерение. Но, как мы знаем, скоростная структура потока не вполне детерминирована, поэтому точность определения средней скорости зависит не только от количества точек, но и их положения на вертикали.

Случайная погрешность определения средней скорости на вертикали по точечным измерениям σ_v включает три составляющих:

— инструментальную среднюю квадратическую погрешность, $\sigma_{\text{и}}$, обусловленную точностью и устойчивостью характеристик градуирования; значение этой погрешности обычно составляет около 0,5—2 %;

— пульсационную среднюю квадратическую погрешность $\tilde{\sigma}_{\text{п}}$, связанную с ограниченным временем осреднения скоростей; значение определяется по формулам (3.11) в зависимости от продолжительности измерения T ;

— среднюю квадратическую погрешность дискретизации скоростного профиля $\tilde{\sigma}_{\text{д}}$, зависящую от количества точек, в которых измеряется скорость.

Относительная погрешность вычисления средней скорости на вертикали $\bar{\sigma}_v$ оценивается совокупностью указанных частных погрешностей с учетом соотношения (3.11) и характеристик пространственной корреляции скоростей в различных точках вертикали. Приближенное выражение для оценки точности определения v имеет вид

$$\bar{\sigma}_v = [\sigma_u^2(1,67 - 0,2N + 0,02N^2 + \tau_k/T) + 0,5\bar{\sigma}_u]^0,5/\sqrt{N}, \quad (3.14)$$

где N — число точек измерения скоростей на вертикали; T — продолжительность измерения скорости в точке, с; τ_k — время корреляции, с.

Погрешность $\bar{\sigma}_v$ тем меньше, чем больше скоростных точек и продолжительней измерения скорости в них. Так, для равнинных рек ($\sigma_u=0,05$, $\tau_k=10$ с, $\bar{\sigma}_u=2\%$): при двух точках $\bar{\sigma}_u=4,2\%$, при пяти точках $\bar{\sigma}_u=2,5\%$.

Интеграция скоростей по вертикали исключает погрешность дискретизации скоростного профиля $\bar{\sigma}_d$. Тогда, при условии, что поправки на завышение скорости из-за неполноты охвата придонного слоя, согласно (3.13), и косоструйности обтекания вертушки в вертикальной плоскости малы, совокупная погрешность интеграции скоростей $\bar{\sigma}_v$ будет включать только случайные составляющие $\bar{\sigma}_u$ и $\bar{\sigma}_w$. По данным Карасева, для оценки $\bar{\sigma}_v$ применительно к интегратору ГР-101 можно принять зависимость

$$\bar{\sigma}_v = \left[\frac{2\tau_k w_v}{h} \sigma_u^2 + \bar{\sigma}_u^2 \right]^{0,5}. \quad (3.15)$$

Здесь w_v — скорость перемещения вертушки по вертикали (остальные обозначения известны). Величина w_v определяет затраты времени на интеграционные измерения и точность их результатов. Так, для равнинной реки при $\bar{\sigma}_u=0,05$, $\tau_k=10$ с, $h=4$ м и $\bar{\sigma}_u=2\%$, $\bar{\sigma}_v=4,1$ при $w_v=0,10$ м/с. Это значение можно считать оптимальной скоростью перемещения вертушки по вертикали.

Глава 4 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ

4.1. Общая характеристика методов измерения и оборудование гидроворов

4.1.1. Понятие расхода воды

Понятие о расходе воды как характеристике режима и водности рек складывалось по мере развития количественных методов гидрологии. По-видимому, раньше всего оно возникло в пусты-

ных и засушливых районах, страдающих от маловодья. Кочевые племена Сахары водность оазисных источников оценивали количеством верблюдов, которых можно напоить из них. В Древнем Риме существовала мера воды (китария), которая была связана только с диаметром выходного отверстия труб, причем не принимались во внимание ни скорость, ни напор. В I в. до н.э. Герон Александрийский уже различал основные элементы расхода воды: площадь поперечного сечения и скорость потока.

Представление о расходе воды вытекает непосредственно из принципа неразрывности. Его впервые сформулировал Леонардо да Винчи, который полагал, что «в реках может протекать равный объем воды в равные промежутки времени, несмотря на различие длины, ширины, глубины и уклонов русла.» Окончательное определение расхода воды сложилось в XVI—XVII вв. Вот архаичный, но принципиально строгий образчик формулы расхода: «квадрат речного профиля, умноженный на скорость известного реки в определенное время течения, показывает точно кубическое воды содержание или количество водяного истечения» (XVIII в.).

В современной гидрометрии различают определение понятия и модель измеренного расхода воды.

Кратко измеренный *расход воды* определяется как средний за время измерения объем воды, протекающий через поперечное сечение потока за одну секунду. Речь идет именно об измеренном расходе воды, который относят к фиксированному уровню, осредненному за время измерения¹). Взаимное соответствие расходов и уровней (кривые расходов или уравнения регрессии расходов по уровням) используются для непрерывного учета речного стока по данным отдельных измерений расхода воды.

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. 4.1).

Модель измеренного расхода воды является формой синтеза его элементов и зависит от применяемых методов измерения. Главнейшие из них следующие:

- 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 смешения с вводом в поток индикаторов и определением степени их разбавления;
- 3) гидравлические методы, осуществляемые с использованием специальных расходомерных устройств и характеристик пропускной способности гидротехнических сооружений и турбин ГЭС;

¹ В отличие от измеренного расхода, в гидрологии существуют понятия о расходах, осредненных за периоды различной длительности (сутки, декаду, месяц и т. д.); эти величины рассматриваются в качестве статистических характеристик водности рек.

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

5) физические методы — с применением ультразвука, электромагнитной индукции и др.

Каждый из методов может быть подразделен в зависимости от применяемых средств измерения скоростей — их основные типы описаны выше. Здесь специально не выделен способ «уклон—площадь», который является скорее расчетным, а не измерительным.

Наиболее трудоемкая операция при определении расхода

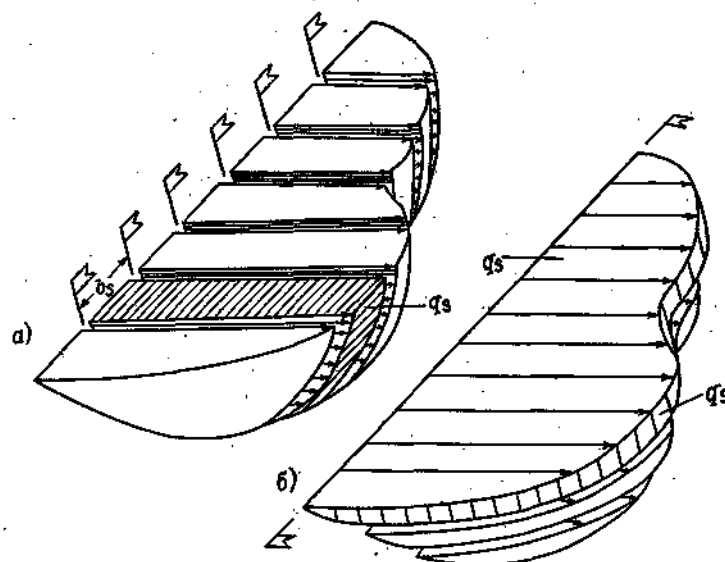


Рис. 4.1. Модели расхода воды при вертикальной (а) и горизонтальной (б) дискретизации их секундного объема.

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 или люлек и канатных переправ, а также ультразвуковыми установками.

В недавнем прошлом рекомендовалось применять интеграцию скоростей по живому сечению, но она, помимо технических трудностей, требует неравномерного движения интегратора с таким расчетом, чтобы он перемещался через равные элементы площади

за равные промежутки времени. Такое условие практически не удается выполнить, чем создается дополнительная неопределенность в переходе от результатов интегриации к средней скорости.

Метод «скорость—площадь» во всех его разновидностях составляет метрологическую базу современной речной гидрометрии.

Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены различным образом. В связи с этим вводится понятие о *математической модели* расхода воды как форме аналитического представления совокупности его элементов.

Одна из наиболее распространенных математических моделей расхода воды сводится к его расчленению на *частичные расходы* q_s , проходящие в отсеках живого сечения между скоростными вертикалями, т. е. вертикалями, на которых тем или иным способом измеряются средние по глубине скорости потока (на рис. 4.1 а вертикали обозначены флажками). Модель, построенная на вертикальном расчленении ее секундного объема, служит для вычисления расхода воды по данным точечных измерений скоростей или их интегриации по вертикали.

Применительно к интеграции скоростей вертушкой или их ультразвуковому зондированию по ширине потока математическая модель расхода воды представляется как совокупность элементов q_s , образованных в результате расчленения ее скоростными горизонталями (рис. 4.1 б).

В том и другом случае расходы воды выражаются суммой

$$Q = \sum_{s=1}^N q_s. \quad (4.1)$$

Более сложны модели расхода воды, составленные из элементов, которые выделяются на основе изоток (линий равных скоростей). В практике гидрометрии эти модели не применяются.

Обобщенное выражение (4.1) не указывает на то, каким образом осуществляется пространственная интерполяция измеренных скоростей течения в отсеках между скоростными вертикалями и горизонталями для определения частичных расходов q_s . Различием используемых при этом приемов объясняется многообразие существующих способов измерения и вычисления расходов воды.

Каждый из способов отличается характером используемых средств измерения и составом выполняемых операций.

4.1.2. Выбор местоположения и разбивка гидрометрического створа

Точность измерения расходов воды в значительной мере зависит от режима потока на участке наблюдений. Гидрометрический створ должен быть расположен на участке, где соблюдались бы следующие условия:

1) равномерное движение воды при скоростях не менее 0,15—0,25 м/с и не более 3,0—4,0 м/с;

2) направление течения в межень и паводок должно быть по возможности перпендикулярным створу и мало изменяющимся по ширине русла;

3) не должно быть мертвых пространств — зон со стоячей водой — и обратных течений;

4) в зимний период должен образовываться сплошной ледяной покров или река должна не замерзать вовсе, недопустимы скопления шуги;

5) желательно, чтобы участок был вне зоны неустановившегося движения воды и переменного подпора.

Чаще всего участок наблюдений за расходами воды совпадает с участком гидрологического поста, но в некоторых случаях для измерения расходов воды может быть выделен особый участок, если это требуется для соблюдения перечисленных выше условий.

Гидрометрический створ обычно располагают приблизительно по середине выбранного участка, по возможности совмещая его со створом поста, на котором ведутся наблюдения за уровнем воды, или назначая возможно ближе к нему. На участке, как правило, должен быть один створ, но оправданно устройство и нескольких створов, если это необходимо для удобства и надежности измерений. Так, один створ может служить для измерения расходов воды при высоких уровнях, а второй — при низких или в одном измеряются расходы воды при ледоставе, а в другом при открытом русле. Между гидрометрическими створами не должно наблюдаться приточности или потери воды. При наличии на участке проток и рукавов створы устраиваются как в основном русле, так и в его разветвлениях.

Понятно, что в реальных условиях не всегда можно найти участок, удовлетворяющий всем приведенным требованиям. В частности, условия пункта 5 не соблюдаются на зарегулированных участках рек (в зонах гидроузлов и водохранилищ), где как раз и бывает необходимо измерять расходы. В таких случаях несоблюдение условия 5 не может служить основанием для отказа от измерений, но для их выполнения должны быть привлечены наиболее эффективные для этого гидроствора методы и средства.

Очень важно обеспечить возможно меньшую косость потока в гидрометрическом створе: он должен быть расположен нормально к среднему направлению течения. В первом приближении его так и располагают, ориентируясь на направление берегов.

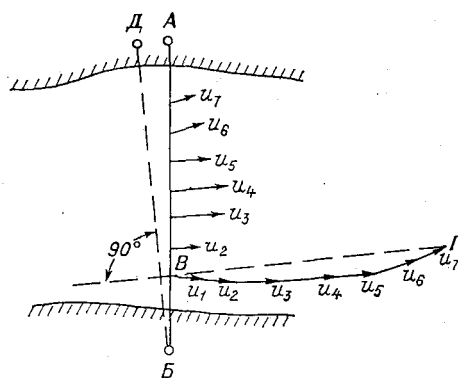
Для проверки положения гидрометрического створа выполняется следующее.

Производят промеры глубин и намечают 5—12 скоростных вертикалей в зависимости от ширины реки. Среднее направление течений на каждой вертикали измеряется бифилярным подвесом или прибором ГР-42. Для ускорения работы можно измерить направление течения лишь в точке 0,6h.

При отсутствии соответствующих приборов ограничиваются определением направлений поверхностных струй на основе поплавочных наблюдений.

Значения полученных скоростей наносятся в виде векторов под измеренными углами к линии гидрометрического створа AB (рис. 4.2). Затем к первому вектору от какого-нибудь берега последовательно пристраиваются все остальные по правилу графического сложения векторов. Соединив начало первого вектора и конец последнего, получают результирующее направление течения $B\Gamma$. Перпендикуляр к нему BD покажет правильное (уточненное) положение створа, которое и должно быть закреплено на местности.

Рис. 4.2. Определение направления гидрометрического створа.



Можно получить более точное решение задачи, если, вместо векторов направлений течений, производить графическое сложение векторов элементарных расходов на каждой вертикали $q_i = h_i v_i$. В этом случае будет получено результирующее направление основной массы воды, протекающей через гидрометрический створ.

В правильно выбранном створе направление течения на отдельных вертикалях не должно отклоняться от нормали к нему более чем на 30° (при измерении расходов должны измеряться и углы косоструйности). Если косоструйность превышает 30° , местоположение гидрометрического створа признается неудовлетворительным, и он выбирается на новом месте.

С изменением уровня воды изменяется и направление течения. Вот почему нередко приходится располагать меженный створ в одном, а паводочный — в другом месте.

Направление течений на пойме и в главном русле может не совпадать. Если их различие менее 30° , створ разбивается перпендикулярно течению в главном русле; когда же угол между течениями на пойме и в главном русле больше 30° , створ назначают в виде ломаной линии, каждый отрезок которой перпендикулярен к соответствующему направлению течения.

Установленное направление гидрометрического створа закрепляется на обоих берегах прочными столбами-реперами. Один из

реперов служит постоянным началом, от которого определяются расстояния до промерных и скоростных вертикалей. На больших реках, кроме реперов, устанавливаются створные вехи на обоих или на одном берегу в зависимости от рельефа местности и видимости, в пределах возможного затопления удаляется кустарниковая растительность. По линии створа разбивается пикетаж и производится нивелирование берегов до незатопляемых отметок, а в русле, старицах и действующих протоках измеряются глубины. По данным промеров и нивелирования берегов строится профиль поперечного сечения по гидрометрическому створу, на котором показывается расположение скоростных вертикалей, характер грунтов дна и угодий на пойме.

4.1.3. Оборудование гидрометрических створов

При измерении расходов воды используется то же подъемно-транспортное оборудование, что и при промерах глубин (см. табл. 2.1).

Гидрометрическая дистанционная установка ГР-64 применяется для измерений расходов воды на реках шириной до 100 м, глубиной до 12 м и скоростями течения до 5 м/с.

Она состоит из береговых опор (рис. 4.3), переброшенной между ними системы стальных канатов, лебедки с электроприводом, каретки, блок-счетчиков глубин и горизонтальных расстояний; на одной из опор (с кабиной) монтируется лебедка с электродвигателями, блок-счетчики, а также ряд блоков канатной системы. На другой опоре крепится береговой блок несущего каната.

Система оснастки состоит из несущего стального каната, который воспринимает нагрузку от подвешенного груза с прибором, и канатов перемещения каретки и подъемного с токопроводящей жилой. Оба каната намотаны на барабаны лебедки, причем канат перемещения перекинут от барабана лебедки через систему блоков на противоположный берег ко второй опоре, пропущен через блок и прикреплен к каретке.

Подъемный канат от барабана лебедки проходит через систему блоков и заканчивается подвешенным к нему гидрометрическим грузом.

Лебедка имеет два барабана (верхний и нижний), два электромотора, два редуктора и ручной привод. Верхний барабан служит для намотки каната перемещения каретки, а нижний — для намотки подъемного каната.

Вращение от моторов к барабанам передается через редукторы, которые обеспечивают две скорости подачи каната: 10 и 25 см/с. Первая скорость служит для вертикального перемещения груза при измерениях глубин русла, скоростей течения на вертикалях (в отдельных точках и интеграционным способом). Вторая скорость используется для холостых перемещений груза по створу.

Для точной установки груза на вертикали, а также для его подъема из воды в аварийных условиях (при прекращении подачи

электроэнергии) барабаны лебедки могут приводиться во вращение ручным приводом, причем как раздельно, так и одновременно.

Измерения горизонтальных перемещений гидрометрического груза и глубин производятся блок-счетчиком, состоящим из двух мерных роликов и двух счетчиков оборотов. Точность отсчета расстояний по счетчикам 1 см.

Для измерения угла отбоя подъемного каната (что необходимо при больших скоростях течения и работе на стрежневых вертикалях) установка снабжена специальным угломером.

Гидрометрический груз массой 100 кг (рис. 4.4) служит для промеров глубин и закрепления на нем приборов. Он состоит из тела груза, хвостового оперения с пенопластовым поплавком, кронштейна и штыря для крепления приборов, поверхностного и донного контактов делителя, закрепленного скобой.

Поверхностный контакт обеспечивает электрический сигнал при соприкосновении груза с водной поверхностью. Когда груз достигнет дна, срабатывает донный контакт и груз автоматически останавливается.

Сигналы от вертушки, донного и поверхностного контактов передаются по подъемному стальному канату с одной токопроводящей жилой. Питание сигнальных цепей осуществляется переменным током на-

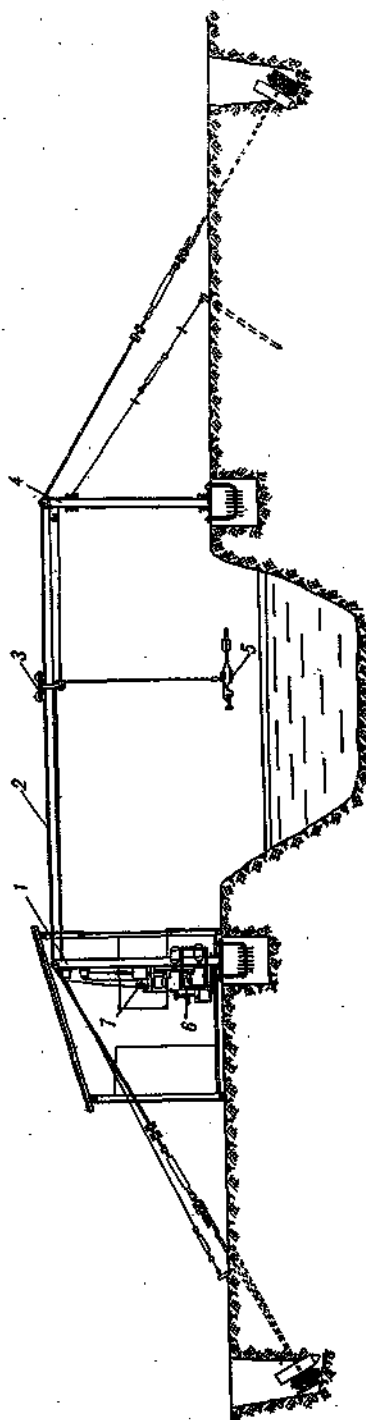


Рис. 4.3. Гидрометрическая дистанционная установка ГР-64.

1, 4 — береговые опоры, 2 — стальные канаты, 3 — канатка, 5 — вертушка с грузом, 6 — лебедка с электроприводом, 7 — блок-счетчик.

пряжением от 48 до 30 В, вырабатываемым генератором. Для разделения сигналов, поступающих от вертушки и от донного и поверхностного контактов, служит делитель, к которому по токопроводящей жиле поступает переменный ток от генератора, питаемого от аккумуляторной батареи.

Питание электромоторов, установленных на лебедке, а также блока для зарядки аккумуляторов осуществляется трехфазным переменным током напряжением 220 В.

Модернизированный вариант установки ГР-64М применяется на более широких реках (пролет между опорами достигает 200 м). Питание сигнальной цепи осуществляется непосредственно от сети

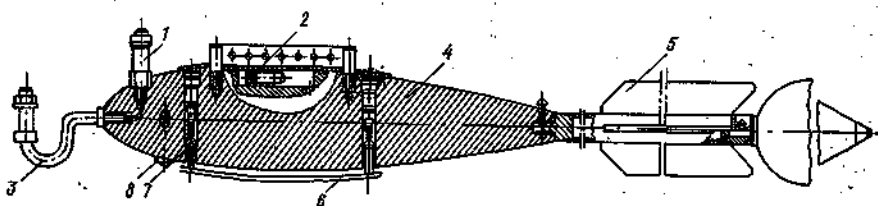


Рис. 4.4. Гидрометрический груз массой 100 кг.

1 — штырь, 2 — делитель, 3 — кронштейн, 4 — тело груза, 5 — поплавок, 6 — скоба, 7, 8 — донный и поверхностный контакты.

переменного тока через трансформатор и выпрямитель. Видоизменен также и пульт управления установкой.

Гидрометрическая установка ГР-70 близка по устройству к ГР-64 и ГР-64М, но в отличие от них, снабжена не электрофицированным, а ручным приводом грузовой лебедки. Это, конечно, повышает трудоемкость измерительных операций, но зато сама установка ГР-70 проста по конструкции и удобна в эксплуатации. Для питания сигнальной электрической цепи используется батарея гальванических элементов напряжением 12 В. Предназначена для измерения расходов при скоростях течения до 2,5 м/с на реках шириной до 100 м.

Как показывает опыт Дагестанской ЗГМО, дистанционные установки при правильной эксплуатации и уходе за ними безотказно действуют в течение длительного времени (более 15 лет) в самых разных условиях, в том числе на горных реках с бурным течением и в нижних бьефах гидроузлов. Повышению надежности установок способствовал ряд усовершенствований, внесенных в их отдельные узлы по предложениям А. К. Артемова (перевод ГР-70 на питание от сети переменного тока напряжением 220 В, дублирующая сигнализация зуммером на случай выхода из строя пульта управления, увеличение площади поддона и установка более мягкой контактной пружины гидрометрического груза при илистых грунтах и др.).

Для каждой установки после монтажа в гидростворе необходимо определить поправки к показаниям счетчика расстояний

и глубин в зависимости от провеса несущего каната. Значение поправок приводится в инструкциях по эксплуатации. Следует иметь в виду, что эти поправки не остаются постоянными и должны определяться в каждом конкретном гидростворе с учетом местных условий и особенностей монтажа установки.

Установки ГР-64 и ГР-70 могут быть применены для измерения расходов воды способом интеграции скоростей по вертикали и ширине потока, причем в первом случае используется прибор ГР-101. Порядок его подключения подробно описан в Наставлении вып. 2, ч. II.

Гидрометрические мосты и переправы. Обычные измерения расходов воды (без применения дистанционных установок) наиболее удобно производить с гидрометрических мостиков и люлочных переправ. Некоторые приемы работы с них пояснены в главе 2, когда шла речь о промерах глубин. Во многих случаях измерение расходов половодья и паводков удобно выполнять с железнодорожных и автодорожных мостов. При этом гидроствор предпочтительно располагать с низовой стороны мостов, где направление струй более упорядочено, чем с верховой, и легче измерять угол отбоя каната. Каждый пролет многопролетного моста должен рассматриваться как обособленная часть русла и в нем следует назначать не менее трех скоростных вертикалей. Одна из них располагается посредине пролета, а две других — вблизи стенок мостовых опор (не ближе чем 0,5—1,0 м) вне вихревых зон их обтекания потоком.

При измерении расходов воды с мостов необходимо иметь лебедки с увеличенным выносом стрелы для подъема приборов с грузом массой до 100 кг без задевания перил. Можно рекомендовать установку лебедки ГР-36 (с поворотной стрелой) на автоприцепе. Такой гидрометрический возок целесообразно использовать для измерений в нескольких гидростворах, закрепленных за разъездной гидрометрической бригадой (РГБ). Подобная организация наблюдений в порядке опыта была осуществлена в Белорусском УГКС, где одна РГБ обслуживала шесть-восемь гидрологических постов.

На реках шириной до 200 м измерение расходов воды производится с лодочных и паромных переправ. Каждая такая переправа (рис. 4.5) оснащается ездовым канатом, который натягивается посредством лебедки и служит для перемещения лодки или паромпантона. Для определения местоположения вертикалей служит разметочный канат, натягиваемый по линии створа. Паром оборудуется стрелой и лебедкой для подъема и опускания приборов. Рулевое весло позволяет использовать силу течения для поперечного перемещения парома.

Измерение расходов с лодки, устанавливаемой на якорях или ездовом канате, требует особых мер предосторожности против опрокидывания и повреждения ее корпуса плывущими корягами и льдом. Важно, чтобы лодка могла быстро отойти к берегу или вовсе освободиться от крепления к ездовому канату. Для этой цели применяется механизм гибкого крепления (рис. 4.6), разра-

ботанный Г. М. Риммаром (ГГИ). Механизм состоит из специального опрокидывающегося звена с роликом, подвешиваемого на створном канате, мгновенно открывающегося зажима, устанавливаемого на носовой части лодки, и системы оттяжек, на одной из которых лодка удерживается подвижно на ролике, а на второй — фиксированно. Для управления звеном и открывания зажима служат отдельные шнуры.

Специальное опрокидывающееся звено с роликом образовано из двух планок: основной, длинной и откидной, короткой. Откидная короткая планка служит для размыкания звена и надевания

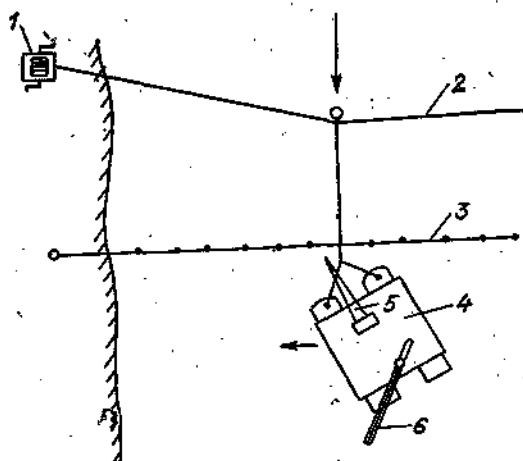


Рис. 4.5. Паромная переправа для гидрометрических работ.

1 — лебедка, 2 — створной канат, 3 — размерочный канат, 4 — паром-понтон, 5 — лебедка со стрелой, 6 — рулевое весло.

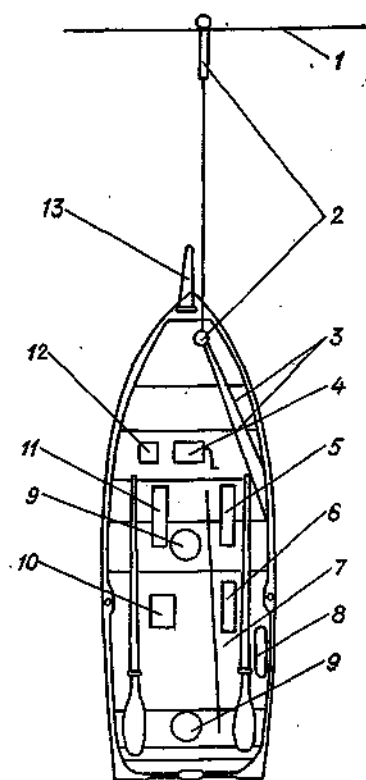
его на створный канат. Обе планки, образующие звено, в месте сочленения с роликом расположены параллельно друг другу, а далее сходятся под острым углом, образуя узкую щель, служащую для заклинивания в ней створного каната. Откидная планка крепится к основной винтовым соединением с барашковой гайкой. На концах длинной планки этого звена расположены кольца, к которым крепятся оттяжки. Свободные концы оттяжек связаны вместе и прикреплены к кольцу. Это кольцо зажимается мгновенно открывающимся зажимом, укрепленным на носовой части лодки. Лямки каждой из оттяжек имеют длину порядка 3 м. Необходимая длина оттяжек устанавливается на месте в зависимости от условий работ. При этом одна лямка делается длиннее другой на величину, несколько превышающую половину длины планки опрокидывающегося звена. К лямке на расстоянии 0,5 м от кольца привязывается шнур, управляющий опрокидывающимся звеном.

Описанный механизм может быть применен и при установке лодки на якорь. В этом случае вместо оттяжки служит якорный канат.

При выполнении гидрометрических работ необходимо обращать внимание на правильное размещение оборудования и приборов в лодках. Пример такого размещения в моторных

A technical drawing of a mechanical device, possibly a pump or a valve, with numbered parts 1 through 10. The device features a vertical shaft with a pulley at the top, a central valve mechanism, and a conical base. The drawing is a line drawing with dashed lines indicating internal or hidden components.

1, 6 — кольца, 2 — звено, 3, 5 — планки, 4 — барашковая гайка, 6 — оттяжка, 7 — кольцо, 8 — шнур для управления звеном 2, 9 — шнур для открывания зажима, 10 — оттяжка.



1 — язовой канат, 2 — механизм гибкого крепления, 3 — оттяжки механизма, 4 — лебедка, 5 — бачомет-бутылка в грузе; 6 — прибор для взятия проб донных отложений, 7 — гидрометрическая штанга, 8 — спасательный круг, 9 — рабочие места наблюдателей, 10 — ящики с бутылками для проб взвешенных наносов, 11 — груз вертушки, 12 — вертушка, 13 — рама откидная.

Из серийно выпускаемых в Советском Союзе судов для промеров русла и измерений расходов воды наиболее приспособлен катер КС-100 с водометным двигателем. Отсутствие открытых гребных винтов и малая осадка (до 0,6 м) позволяют подходить на нем к урезам воды даже при отмелях берегах, что очень удобно для промеров русла. Катер оснащен двумя буксирными лебедками, которые могут быть приспособлены для подъема носового и кормового якорей.

В Советском Союзе и за рубежом созданы различные варианты оборудования и приборов для измерения расходов воды с движущегося судна интеграционным способом. На рис. 4.8 представлена

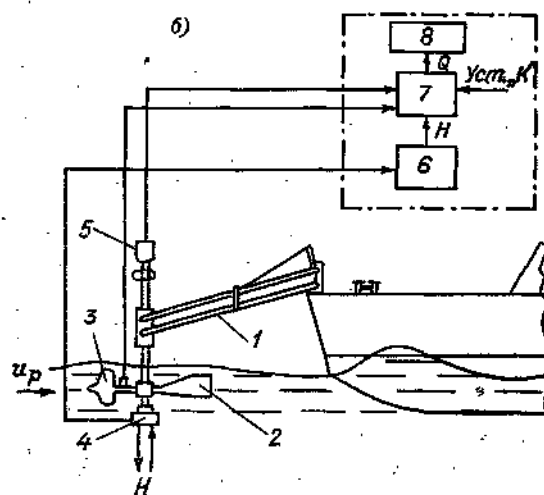
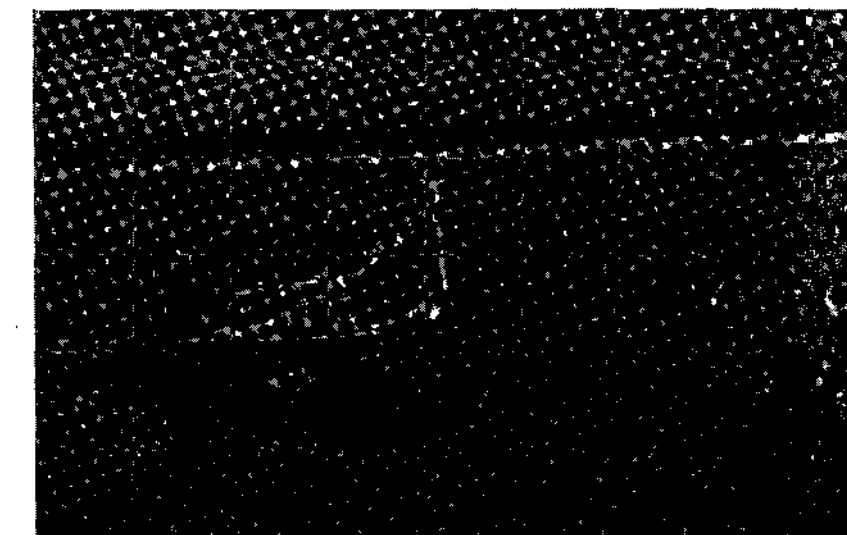


Рис. 4.8. Комплект оборудования и приборов для измерения расходов воды с движущегося судна.

а — общий вид, б — основные узлы установки в рабочем положении.

1 — выносная конструкция для опускания приборов в поток, 2 — гидрофлюгер, 3 — измеритель скорости течения (вертушка), 4 — гидрофон эхолота, 5 — индукционный датчик угла, 6 — аппаратура для регистрации глубин, 7 — вычислитель расхода воды, 8 — цифровой индикатор расхода.

установка «Створ», разработанная в ГГИ и ЦКБ Госкомгидромета. Она включает следующие основные узлы: вывесную конструкцию для опускания приборов в поток, гидрофлюгер с вертушкой или другим измерителем скорости, гидрофон эхолота, блок измерения углов, аппаратура для регистрации глубин, вычислитель расхода воды и цифровой индикатор.

4.2. Точечные способы измерения расходов воды методом «скорость—площадь»

Точечные способы измерения расходов воды выполняются гидрометрическими вертушками и широко применяются на реках и каналах. В зависимости от числа скоростных вертикалей и количества точек измерения скоростей течения различают следующие варианты способа:

- **многоточечный (детальный)**, при котором в гидростворе назначается 10—15 скоростных вертикалей, а скорости течения измеряются на каждой вертикали в пяти и более точках:

- **основной**, когда число скоростных вертикалей уменьшается в 1,5—2 раза по сравнению с детальным, а скорости потока измеряются в двух или трех точках каждой вертикали.

- **сокращенный** (см. п. 4.3).

Основными элементами расхода воды, измеряемого методом «скорость—площадь», как вытекает из самого этого определения, служат средняя скорость потока v и площадь живого сечения F . В соответствии с условием неразрывности средняя скорость потока определяется отношением $v=Q/F$.

Рассмотрим основные операции, выполняемые при точечных измерениях расхода воды.

4.2.1. Промеры глубин в створе измерения расхода воды

При устойчивом русле промеры глубин производятся одним ходом, обычно перед измерением скорости течения. На изученных створах при условии, что русло не деформируется, глубины можно измерять через три—пять определений расхода. В этом случае для промежуточных расходов используются данные предыдущего промера с учетом разности уровней при промере и при измерении расхода воды. Промерные вертикали назначаются через равные расстояния в количестве 20—35. При неровном, загроможденном валунами дне количество промерных вертикалей увеличивается.

При появлении шуги промеры глубин обязательны при каждом измерении расхода воды. При ледоставе измеряются расстояния от постоянного начала до уреза нижней поверхности льда (этот урез обнаруживается посредством пробных лунок или пробиваемой во льду траншеи). Урез поверхности воды устанавливается по профилю. На всех промерных вертикалях измеряется глубина погружения льда и слоя шуги с погрешностью 1 и 10 см. Рабочей

глубиной считается расстояние от нижней поверхности льда (шуги) до дна.

Обследование береговых участков производится для определения границ мертвых пространств и назначения дополнительных скоростных вертикалей. Границы мертвых пространств определяются глубинными поплавками. Расстояние между верхним и нижним поплавками делается равным 20—30 см. Поплавок несколько раз опускается в воду с постепенным приближением к берегу. Граница мертвого пространства принимается там, где поплавок стоит неподвижно или движется в обратную сторону.

В некоторых случаях мертвые пространства могут наблюдаться и посредине реки: тогда также определяются их границы и назначаются дополнительные скоростные вертикали.

4.2.2. Назначение скоростных вертикалей

Точность измерения расхода воды определяются количеством и размещением скоростных вертикалей. Одно из главных требований к их размещению состоит в том, чтобы отсеки между ними пропускали равные доли общего расхода воды. Для обеспечения этого условия скоростные вертикали должны размещаться на границах струй в плане течений.

Для определения положения вертикалей измеряют расходы при увеличенном их количестве, вычерчивают поперечный профиль русла и на нем строят интегральную кривую частичных расходов — в долях от общего расхода $\bar{q}_s = q_s/Q$ (рис. 4.9). При этом на первой

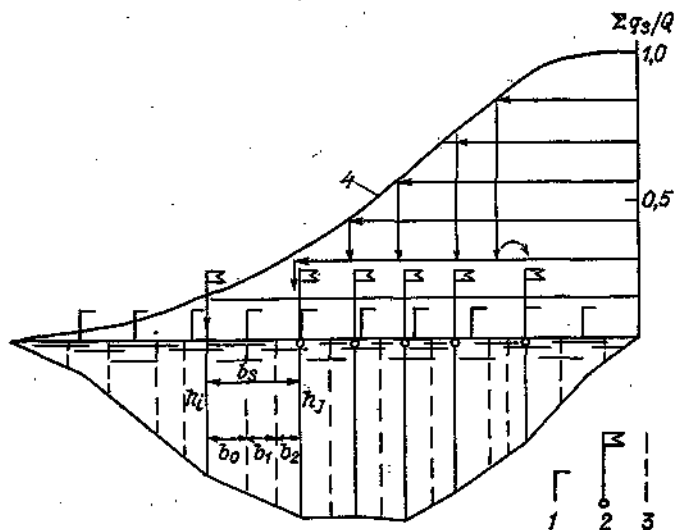


Рис. 4.9. Уточнение местоположения скоростных вертикалей с использованием интегрального графика расхода воды.

1 — равномерное расположение вертикалей по ширине, 2 — уточненное (оптимальное) положение вертикалей, 3 — произвольные вертикали, 4 — интегральный график частичных расходов воды.

слева вертикали откладывается частичный расход в первом (береговом отсеке $\tilde{q}_1$, на второй вертикали — сумма $(\tilde{q}_1 + \tilde{q}_2)$ и т. д.; замыкающую ординату делят на N частей (N равно числу отсеков между скоростными вертикалями). Проектируя отрезки равных долей расхода $1/N$ на интегральную кривую, получают точки расположения скоростных вертикалей. Затем их положение уточняют так, чтобы, во-первых, они по возможности совпадали с точками перелома поперечного профиля русла, а во-вторых, одна из вертикалей находилась на стрежне реки (динамической оси).

Местоположение скоростных вертикалей определяется расстоянием от постоянного начала. Это расстояние измеряют стальными лентами или рулетками и закрепляют метками на конструкциях гидрометрических мостиков или метками на разметочных канатах лодочных (паромных) переправ. На широких реках (более 300 м) положение скоростных вертикалей определяется инструментальными засечками теодолитами или мензулой с берега, либо секстантом с судна. Во всех случаях угол, образуемый направлением гидроствора и лучом визирования на любую вертикаль, должен быть не менее 30° .

При устойчивых руслах местоположение скоростных вертикалей остается постоянным. Однако при изменении условий движения потока на участке гидроствора оказывается необходимым назначать дополнительные скоростные вертикали.

При подъеме уровня воды, если расстояние между урезом и ближайшей скоростной вертикалью больше половины расстояния между двумя соседними вертикалями, назначается дополнительная прибрежная вертикаль в следующих местах: а) при пологом берегу — посредине между урезом и ближайшей постоянной вертикалью; б) при обрывистом берегу — вблизи уреза воды, но не ближе чем в 0,3 м от него.

При наличии мертвых пространств дополнительная скоростная вертикаль назначается на таком расстоянии от границы мертвого пространства, где скорость течения не менее 0,08—0,15 м/с.

В зашугованных и зарастающих руслах, где наблюдаются движения потока отдельными струями, следует назначать дополнительные вертикали как в струйных зонах, так и между ними.

В пойме и ее руслообразных понижениях скоростные вертикали назначаются через две промерных. В остальной части поймы вертикали располагают более редко, в переломных точках поперечного профиля.

В случае большого различия в ширине русла и структуре потока при высоких и низких уровнях назначение скоростных вертикалей производится отдельно для условий половодья (паводков) и межени. При этом две-три скоростные вертикали в стрежневой части потока должны оставаться на одних и тех же местах.

При легкодеформирующемся русле положение скоростных вертикалей приходится назначать заново при каждом измерении расхода воды. Это делается сразу же после промеров поперечного сечения русла.

Все постоянные вертикали обозначаются порядковыми номерами, причем № 1 получает вертикаль, ближайшая к постоянному началу. Дополнительным скоростным вертикалям придается номер ближайшей постоянной вертикали с указанием расстояния до нее (со знаком минус, если дополнительная вертикаль расположена ближе к постоянному началу, и со знаком плюс, если дальше).

Номера вертикалей подставляются на марках разметочных канатов и у меток (зарубок) на конструкциях гидрометрических мостиков.

4.2.3. Измерение скоростей течения

Прежде чем приступить к измерениям скоростей определяют рабочую глубину вертикали, относительно которой рассчитываются глубины погружения вертушки в точках. *Рабочей глубиной вертикали* при свободном ото льда русле считается расстояние от дна до поверхности воды, а при наличии льда (шуги) — расстояние от дна до нижней поверхности льда (шуги).

Измеренная рабочая глубина сравнивается с глубиной, полученной при промерах. Если русло устойчивое и высота уровня воды не изменяется, то разница в глубинах не должна превышать удвоенную погрешность измерения (4—10 см).

Если вертушка подвешена на канате, измерение глубины производится следующим образом: а) вертушку с грузом опускают так, чтобы ось лопастного винта находилась на поверхности воды, и при этом положении ставят показания счетчика на нули; б) опускают вертушку до соприкосновения груза с дном и по счетчику производят отсчет. Чтобы получить рабочую глубину вертикали, нужно к показанию счетчика прибавить расстояние от оси вертушки до низа груза. При отклонении троса от вертикального положения более чем на 10° измеряется угол отнoса каната течением.

После определения рабочей глубины намечают положение точек, в которых должна измеряться скорость течения, и вычисляют для них глубины погружения вертушки.

При многоточечном (детальном) способе измерения скоростей производят:

а) если русло свободно от водной растительности и льда, в пяти точках по глубине вертикали. Если глубина более 1,5 м: у поверхности воды, на 0,2; 0,6; 0,8 рабочей глубины и у дна, причем в положении «у поверхности» и «у дна» ось вертушки должна находиться на глубине от поверхности воды или расстоянии от дна не меньших 0,15 м, чтобы исключить искажения показаний прибора под влиянием ветра, волнения и плавающих тел, а также донных гряд и неровностей;

б) при наличии в русле водной растительности и под ледяным покровом к пяти указанным точкам прибавляется шестая — на 0,4 рабочей глубины. Точка у поверхности воды заменяется точкой у нижней поверхности льда, а расстояние оси лопастного винта от нее должно быть не менее 0,15 м.

При проведении научно-методических работ, когда глубина на вертикали превышает 1,5 м, оказывается целесообразным измерять скорости в 10 точках, располагая у поверхности, в 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 рабочей глубины и у дна.

При основном и сокращенном способах измерение скорости производится:

а) в свободном русле и при ледяном покрове: в двух точках 0,2 и 0,8 рабочей глубины, а если глубина недостаточна (менее 0,75 м) — в одной точке соответственно на 0,6 или 0,5 рабочей глубины;

б) при наличии в русле водной растительности в трех точках: 0,15; 0,50 и 0,85 рабочей глубины, а при недостаточной глубине — на 0,5 рабочей глубины.

Одноточечные измерения скорости производятся в точках: $0,6h$ — в свободном русле, $0,5h$ — при наличии льда и водной растительности.

Если измерения выполняются вертушкой, подвешенной на канате, глубина ее погружения в заданные точки вертикали определяется относительно поверхности воды и фиксируется по счетчику лебедки. При этом для основного способа измерения расхода воды допускается установка вертушки в заданную точку (0,2 и 0,8 рабочей глубины) по длине подводной части каната без введения поправки на его относ. Такая упрощенная операция неприемлема для детального способа. В этом случае необходимо учитывать относ. каната. Чтобы вертушка оказалась в заданной точке требуется вводить дополнительную притравку к длине смоченного троса (см. главу 2).

Если вертушка укреплена на штанге, положение скоростной точки берется относительно дна, так как штанга размечена от ее нижнего конца вверх. В этом случае глубины погружения вертушки рассчитываются следующим образом. Сначала вычисляется глубина опускания вертушки от поверхности, а затем вычисляется отсчет по штанге, т. е. расстояние от дна до оси вертушки, равное разности рабочей глубины и вычисленной глубины погружения прибора от поверхности.

Вертушку на штанге следует укреплять неподвижно и устанавливать перпендикулярно гидрометрическому створу. Для контроля правильности положения вертушки на надводном конце штанги укрепляется указатель, ориентируемый параллельно или перпендикулярно оси лопастного винта. Вертушка при этом может применяться без хвостового оперения.

При использовании вертушек на канатном подвесе определяется направление косоструйности потока, если угол превышает 10° . Когда направление течения постоянно по всей глубине (различие его в отдельных точках не превышает 5°), ограничиваются определением направления только поверхностных струй. Неучет косоструйности ведет к занижению измеренных скоростей потока. Поэтому при многоточечных измерениях, которые дают повышенную точность, косоструйность должна фиксироваться и при углах менее 10° .

Форма 1

Начало 10 час. 00 мин.

Прожееры

[illegible]

Форма 2

Измерения на скоростных вертикалях

Номер строки	Номер вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Рабочая глубина, м	Глубина погружения вертикали		Скорость, м/с	Средняя скорость, м/с	Отсчет по шпиглу или счетчику в точке	Число сигналов	Сумма оборотов	Продолжительность измерения, с	Число оборотов/с
				в долях глубины	в метрах							
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-150	5	56	0,94	0,2	1,06	1,10		4,24	28	560	102	5,49
-151				0,8	4,24	0,84	0,97	1,06	21	420	100	4,20

Форма 3

Вычисление расхода воды

№ скоростных вертикалей	Средняя скорость, м/с		Площадь живого сечения между скоростными вертикалями, м²	Расход между вертикалями, м³/с
	на скоростной вертикали	между вертикалями		
1	2	3	4	5
K-07				
1	0,48	0,34	1,50	0,51
2	0,66	0,57	13,7	7,81
		0,81	34,5	27,9
.....				
9	0,10	0,44	40,8	18,0
10	0,06	0,08	11,3	0,90
K-0,5		0,03	3,16	0,09
		Σ	408	340

Установив вертушку в нужную по глубине вертикали точку, пропускают один-два сигнала и по следующему включают секундомер. Включение и остановка секундомера, а также отсчеты времени производятся по концу сигнала. При малых скоростях течения (менее 0,5 м/с), когда сигнал может быть прерывистым и продолжительным, пускать секундомер и отсчитывать время следует по началу сигнала.

В процессе измерения скоростей течения необходимо контролировать их распределение по глубине вертикали. При открытом, незаросшем русле скорости должны увеличиваться от дна к поверхности. В точках, где наблюдается отклонение скоростей от их нормального распределения, измерение нужно повторить.

При одноточечном способе исходят из того, что скорость измеренная в точке, должна быть близка к средней скорости на вертикали

$$v = v_{\text{ср.}}$$

Положение этой точки устанавливается непосредственно из выражения (3.4) при условии подстановки средней скорости на вертикали v в его левую часть. Относительная высота точки над дном $z_{\text{ср.}}/h$, в которой скорость близка к средней скорости на вертикали, зависит от вида эпюры скоростей — параметра α_m в формуле (3.4). Обычно принимаемое заглубление средней скорости $0,6h$ от поверхности воды соответствует лишь одной из реализации профиля скоростей при $\alpha_m = 1,17$. В общем случае при ускоренных измерениях значение $z_{\text{ср.}}/h$ следует конкретизировать для каждого створа на основе предварительных многоточечных измерений.

Результаты вертушечных измерений расхода воды и его элементов заносятся в книжку КГ-3М(н). Если в гидростворе имеются протоки, то данные измерения расходов в них записываются в одной книжке при условии, что для всех них установлено общее постоянное начало. Расходы, измеряемые в разных мостовых пролетах, рассматриваются как расходы в протоках данного гидроствора. Если для протоков назначены разные постоянные начала или расходы, измеряемые в них, относятся к расчетным уровням, наблюдаемым на разных постах, записи должны вноситься в разные книжки. В случае расчленения потока при ледоставе на части (подо льдом и над льдом) запись расходов в каждой из них также ведется в отдельных книжках. Образец записи расходов воды в книжке КГ-3М(н), приведен в табл. 4.1.

При интеграционных измерениях скорости посредством установки ГР-101 или глубинных поплавков в книжку КГ-3М(н) записываются непосредственно значения средних скоростей на вертикалях.

4.2.4. Измерение уровней воды и уклонов водной поверхности

Из понятия о расходе воды как элементе водного режима (см. п. 4.1.1) следует, что каждому его измеренному значению соответствует уровень воды, при котором выполнялись измерения. Этот уровень называется *расчетным*.

Наблюдения за уровнем должны выполняться в течение всего времени измерения расходов воды. При устойчивом уровне наблюдения производятся не менее четырех раз: в начале и конце промеров глубин, перед началом и по окончании измерения скоростей течения.

Если за время определения расхода воды ожидается изменение уровня более чем на 10 см, то высота уровня измеряется дополнительно три-четыре раза. В этом случае отмечается время наблюдения за уровнем и время измерения скорости течения на каждой вертикали. По значениям наблюденных уровней строится график колебаний уровня за время измерения расхода воды, и с него снимаются значения уровня для моментов времени, когда производились измерения на каждой скоростной вертикали.

Наблюдения за уровнем воды производятся на основном посту, а при наличии поста на гидрометрическом створе — на обоих постах.

Продольный уклон водной поверхности определяется при характерных расходах воды посредством нивелирования урезных кольев или по наблюдениям на уклонных постах. Запись данных производится в соответствующих графах книжки КГ-3М(н).

4.2.5. Вычисление расходов воды аналитическим способом

Расход воды как результат косвенных измерений получается по данным обработанных измеренных значений элементов.

1. Прежде всего определяется площадь отсеков между скоростными вертикалями f_s посредством планиметрирования частей поперечного профиля или аналитически методом трапеций по формуле (см. рис. 4.9)

$$f_s = 0,5 (h_i + h_1) b_0 + 0,5 (h_1 + h_2) b_1 + \dots + 0,5 (h_{N_s} + h_f) b_{N_s}, \quad (4.2)$$

где N_s — количество промерных вертикалей в отсеке (на рис. 4.9. $N_s = 2$). При достаточно большом N_s , а тем более при использовании эхолота профиль дна фиксируется с большой точностью, какая-либо неопределенность в его очертаниях исключается. Результат вычисления записывается с точностью: при $f_s < 10 \text{ м}^2$ — до $0,01 \text{ м}^2$, при $10 \leq f_s < 100 \text{ м}^2$ — до $0,1 \text{ м}^2$, при $f_s \geq 100 \text{ м}^2$ — до 1 м^2 .

2. Средняя скорость на вертикалях v_i вычисляется по данным измерений скоростей течения в точках.

При одноточечных измерениях в качестве v_i , принимается непосредственно результат измерения в точке, где скорость течения близка к средней скорости на вертикали, обычно на глубине $0,6h$:

$$v_i = \bar{u}_{0,6h}.$$

При двухточечных измерениях на глубинах $0,2h$ и $0,8h$ средняя скорость на вертикали вычисляется по формуле

$$v = 0,5 (u_{0,2h} + u_{0,8h}), \quad (4.3)$$

т.е. принимаются равные весовые коэффициенты при измеренных скоростях. Исследования показали, что оптимальные значения весовых коэффициентов $0,5$ мало зависят от формы эпюры. Этим объясняется универсальность и широкое распространение формулы (4.3).

При измерениях скоростей течения в трех и более точках дискретные значения u уже достаточно полно фиксируют конкретную эпюру. Вычисление v при многоточечных измерениях аналитически сводятся к задаче приближенного интегрирования.

На основе метода Ньютона—Котеса получены формулы (для русла, свободного ото льда и водной растительности):

при измерении в трех точках

$$v = \frac{1}{36} (17u_{0,2h} + 3u_{0,6h} + 16u_{0,8h}), \quad (4.4)$$

при измерениях в пяти точках

$$v = 0,05u_n + 0,347 (u_{0,2h} + u_{0,6h}) + 0,174u_{0,8h} + 0,083u_d. \quad (4.5)$$

При зарастании русла и ледяном покрове — соответственно измерениям в шести, трех и двух точках:

$$v = 0,1 (u_n + 2u_{0,2h} + 2u_{0,4h} + 2u_{0,6h} + 2u_{0,8h} + u_d), \quad (4.6)$$

$$v = \frac{1}{3} (u_{0,15h} + u_{0,5h} + u_{0,85h}), \quad (4.7)$$

$$v = 0,5 (u_{0,2h} + u_{0,8h}). \quad (4.8)$$

Что касается измерения в одной точке ($0,5h$), то скорость в ней не равна средней на вертикали, и в этом случае

$$v = Ku_{0,5h}. \quad (4.9)$$

Переходный коэффициент должен определяться по данным предшествующих многоточечных измерений. Если они не проводились, можно принимать приближенное значение $K = 0,9$.

Точность измерения расхода воды во многом определяется надежностью определения скоростей течения, поэтому необходимо проанализировать, насколько закономерным для данного гидростроения оказалось полученное распределение средних скоростей на вертикалях по ширине потока. Рекомендуется вычертить их эпюру (см. рис. 3.3). В параболическом русле при равномерном движении квазиоднородного потока (в том смысле, как изложено в разделе 3.1.1) эпюра распределения скоростей по ширине потока зеркально отражает очертания дна. При несоблюдении условий однородности потока в нем образуются обособленные крупномасш-

табные струи и в связи с этим изменяется характер кривой распределения скоростей: она образует зоны максимума и минимума. Но переломы эпюры скоростей могут быть и результатом допущенных грубых погрешностей их измерения. Поэтому при наличии заметных отклонений очертаний эпюры от обычной ее формы измерения на вертикалях, которые дали эти отклонения, следует повторить, а при необходимости произвести измерение расхода заново.

В случае сложной морфологии русла и скоростной структуры потока необходимо назначить увеличенное количество скоростных вертикалей.

3. Средняя скорость v_s в отсеке между скоростными вертикалями вычисляется как полусумма полученных на них значений v_i и v_j :

$$v_s = 0,5 (v_i + v_j). \quad (4.10)$$

Для прибрежных отсеков водного сечения (от уреза воды до первой скоростной вертикали и от последней скоростной вертикали до уреза воды) средняя скорость принимается равной средней скорости на ближайшей к берегу скоростной вертикали, умноженной на коэффициент k , значения которого берутся в зависимости от характера берега следующими:

	k
Пологий берег с нулевой глубиной на урезе	0,7
Естественный обрывистый берег или неровная стенка	0,8
Гладкая бетонная или сплошь обшитая досками стенка	0,9
Наличие мертвых пространств	0,5

4. Частичные расходы q_s находят как произведение $v_s f_s$, а полный расход Q — как сумму частных расходов Σq_s .

Вычисленные значения скоростей течения округляются до 0,01 м/с, а расходов воды — до 10 м³/с при $Q \geq 1000$ м³/с, до трех значащих цифр при $0,1 \leq Q \leq 1000$ м³/с, до 0,01 м³/с при $0,1 \leq Q \leq 1$ м³/с, до 0,001 м³/с при $Q < 0,1$ м³/с.

Таким образом расчетная формула для полного расхода через все живое сечение приобретает вид

$$Q = k_1 v_1 f_1 + 0,5 (v_1 + v_2) f_2 + \dots + 0,5 (v_{N-2} + v_{N-1}) f_{N-1} + k_N v_{N-1} f_N. \quad (4.11)$$

4.2.6. Графическая и графо-аналитическая обработка расхода воды

В прошлом широко применялась графическая обработка расходов воды различными способами (Кульмана, Гарляхера, Жуковского и др.). Считалось, что при этом результаты по сравнению с аналитическими способами более точные. По современным представлениям эти способы не обладают каким-либо преимуществом

по сравнению с аналитическим, а при недостаточном количестве точек измерения скоростей и скоростных вертикалей построение эпюр распределения элементов расхода воды по ширине потока может оказаться гидравлически не обоснованным.

Рассмотрим графический способ обработки расхода воды, приведенный в Наставлении вып. 6, ч. 1. Сущность способа заключается в том, что большая часть работы выполняется при помощи графических построений (рис. 4.10) и все виды площадей (эпюры скоростей по вертикалям, эпюра распределения элементарных расходов воды по ширине реки и площадь водного сечения) определяются планиметрированием.

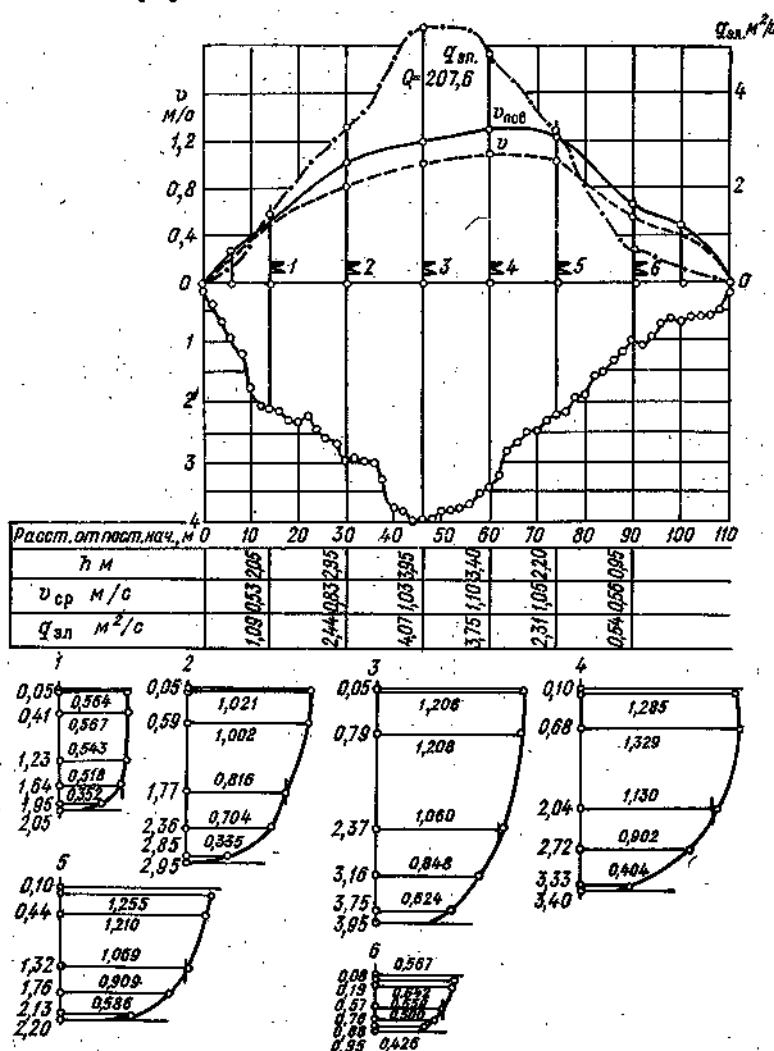


Рис. 4.10. Графическая обработка расхода воды. Р. Неман — г. Бирштонас.

Вычисление расхода воды заключается в выполнении следующих операций:

1) строится профиль водного сечения по глубинам, приведенным к расчетному уровню расхода;

2) вычерчиваются эпюры распределения скоростей течения по вертикалям (годографы) в масштабе глубин, принятом для профиля водного сечения;

3) для каждой вертикали определяется средняя скорость течения графическим способом посредством планиметрирования ее площади, численно равной элементарному расходу q_i . Средняя скорость на вертикали глубиной h_i выражается формулой

$$v = q_i / h_i;$$

4) строится эпюра распределения средних скоростей по ширине реки. Для этого на профиле по вертикальным линиям, обозначающим скоростные вертикали, вверх от уровня воды откладываются значения средних скоростей и через полученные точки проводится плавная кривая. С полученной эпюры снимаются значения средних скоростей для каждой промерной вертикали;

5) для всех промерных вертикалей вычисляются элементарные расходы воды q (м/с) путем умножения средней скорости v_i на рабочую глубину вертикали h_i : $q = v_i h_i$;

6) по вычисленным значениям элементарных расходов строится эпюра их распределения над поперечным профилем русла;

7) производится планиметрирование площади, ограниченной линией уровня воды и эпюрой распределения элементарных расходов. Значение этой площади численно равно расходу воды.

Графо-аналитический способ отличается от графического лишь тем, что в нем исключены операции планиметрирования построенных эпюр распределения скоростей по глубине вертикалей и элементарных расходов по ширине русла. Эти операции заменены вычислением по формулам приближенного интегрирования. Так, для вычисления средней скорости на вертикали годограф разбивается на N полосок, начиная от поверхности воды. На середине каждой из них снимается значение скорости v_i и на середине нижней полоски v_n (высота этой полоски a_n может быть меньше высоты всех остальных a). Тогда средняя скорость на вертикали может быть вычислена по формуле

$$v = \frac{a \sum_{i=1}^{N-1} v_i + a_n v_n}{a(N-1) + a_n}.$$

Общий расход воды выражается суммой элементарных расходов на всех, в том числе и промерных, вертикалях

$$Q = \frac{1}{3} q_1 b_1 + 0,5 (q_1 + q_2) b_2 + \dots + 0,5 (q_{n-1} + q_n) b_{n-1} + \\ + \frac{1}{3} q_n b_n.$$

Некоторое повышение точности определения расходов воды, достигаемое при его графической или графо-аналитической обработке, объясняется использованием достаточно корректного приема интерполяции измерений посредством проведения плавных кривых. Однако и тот и другой способ, как и аналитическая обработка расхода воды, основаны на интерполяции средних скоростей на вертикалях без учета распределения глубин по ширине русла, а именно в этом заключен один из основных источников погрешности измерений. Вот почему преимущества графического и графо-аналитического способов перед аналитическим не столь ощутимы, и последний как наиболее простой получил наибольшее распространение.

4.2.7. Расчетные уровни и принятые данные

После вычисления расхода воды заполняются разделы и таблицы книжки КГ-3М (н), характеризующие обстановку работ, рабочие и расчетные уровни воды, принятые данные и основные элементы расхода воды.

1. Обстановка работ характеризует состояние погоды (ветер, осадки) и реки (чисто, рябь, волнение, сплав и т. п.).

Особо указываются характеристики средств измерения (вертушки, секундомеры) и используемого постового оборудования.

2. Расчетный уровень воды на основном посту над нулем графика при незначительном изменении (2—3 см) за время определения расхода вычисляется как среднее арифметическое из высот уровня, наблюдаемых до и после измерения.

При быстром и значительном изменении уровней за время измерения расхода воды расчетный уровень вычисляется как среднее взвешенное из значений уровня H_i в момент измерения скоростей и глубин на вертикалях. Если скоростные вертикали по ширине реки распределены равномерно (расстояния между ними отличаются менее чем на 25 %), расчетный уровень определяется по формуле

$$H_p = (H_1 q_1 + H_2 q_2 + \dots + H_{N_s} q_{N_s}) / \sum q_i,$$

где $q_i = v_i h_i$ — элементарный расход на скоростных вертикалях; N_s — их число.

В общем же случае (при любом распределении скоростных вертикалей) целесообразно учитывать вес частичных расходов, т. е.

$$H_p = \sum_{s=1}^N H_s q_s / Q,$$

где H_s — средний уровень, наблюдавшийся в период измерения скоростей течения в s -м отсеке между скоростными вертикалями с частичным расходом q_s .

3. Принятые данные содержат, кроме расчетных уровней, ряд других сведений, в числе которых общие элементы расхода воды:

площадь водного сечения F в метрах, максимальные значения скорости $v_{\text{макс}}$ в м/с и глубины $h_{\text{макс}}$ в метрах, а также ширина реки по уровню воды B в метрах и уклон водной поверхности I в промиле ‰ — получают непосредственно по данным измерений (выписывают из соответствующих таблиц расходных книжек), а средние скорости и глубины вычисляют по формулам $V_{\text{ср}} = Q/F$, $h_{\text{ср}} = F/B$.

Принятые данные включают оценки относительных погрешностей измерения расхода воды, которые принимаются в соответствии с Методическими указаниями по ведению ГВК (разд. I, вып. 6, ч. I). Сведения о точности измерений — один из новых видов обработки данных, удовлетворяющий требованиям метрологического обоснования наблюдений.

4.2.8. Особенности измерения расходов воды в различных условиях

Остановимся на некоторых условиях, обеспечивающих повышение точности наблюдений. В общем случае эти условия изменяются по мере смены фаз режима реки. Между тем часто положение гидроствора остается одним и тем же во все сезоны: и в паводок, когда река становится мощным потоком, и в межень, с наступлением которой она все больше походит на ручей. Такой консерватизм не способствует улучшению измерений. Не надо бояться изменять положение гидроствора и, если потребуется, удалять его от места измерения уровня воды, лишь бы не допустить ухудшения условий измерения. В многорукавных руслах и на поймах рек при измерениях иногда пропускаются отдельные протоки и части живого сечения, а расход воды оказывается заниженным. Происходит это вовсе не потому, что бывает заранее не известна сложная ситуация на участке наблюдений, а из-за необорудованности гидроствора и недостатка соответствующих плавсредств.

Один из основных факторов, определяющих точность измерений, — положение скоростных вертикалей. Их следует перераспределять, приводя в соответствие с изменяющейся структурой потока.

На горных реках с блуждающим руслом целесообразно совмещать промерные и скоростные вертикали, чтобы всячески ускорить измерения. Это достигается интеграцией скорости на вертикали.

Правильное размещение скоростных вертикалей особенно важно при деформациях и зарастании русла, ледоставе и ледяных образованиях.

При ледоставе измерения расходов воды начинаются лишь с того момента, когда толщина льда достигнет 10 см. На каждой скоростной и промерной вертикали измеряется общая глубина, толщина погружения льда и шуги. На реках с устойчивым руслом и при отсутствии шуги промеры глубин можно производить не при

каждом измерении расхода воды. Толщина погруженного льда на промерных вертикалях в этом случае определяется интерполяцией между измеренными значениями ее на скоростных вертикалях. При каждом измерении расхода воды устанавливается расстояние от постоянного начала до урезов нижней поверхности льда, а расстояние до урезов воды определяется по профилю створа.

Расчет глубин точек для измерения скорости течения производится по рабочей глубине, которая вычисляется как разность общей глубины и толщины погруженного льда. В зашугованном русле рабочая глубина равна расстоянию от дна до нижней поверхности шуги.

При ярусном ледяном покрове отдельно измеряется расход воды в каждом потоке между прослойками льда. При малых ско-

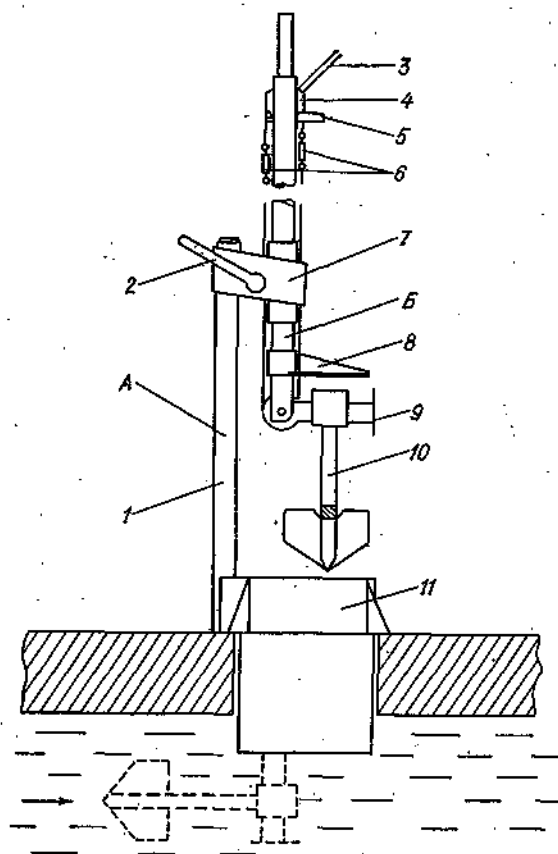


Рис. 4.11. Рычажно-поворотное устройство для опускания вертушки под лед.

А — штангодержатель для крепления подвесной штанги в скважине. Б — подвесная штанга с шарниром у поддона. 1 — отвесная стойка, 2 — рукоятка для развода щек штангодержателя, 3 — ручка перевода положения вертушки, 4 — верхний ролик, 5 — шпилька для фиксации (двух) положений верхнего ролика, 6 — талрепы, 7 — щеки штангодержателя, 8 — предохранительный щиток вертушки, 9 — поддон, 10 — гидрометрическая вертушка, 11 — горловина.

ростях течения, когда измерение вертушкой становится невозможным, гидроствор переносится на участок с большими скоростями. Чтобы избежать трудоемкой операции по пробивке лунок больших размеров, для опускания вертушки следует применять рычажно-поворотное устройство (рис. 4.11). Оно позволяет опускать вертушку в вертикальном положении в лунку диаметром всего 15 см.

На зашугованных реках измерение зимних расходов связано со значительными трудностями из-за скопления подледной шуги и малых скоростей течения.

Летний гидрометрический створ может оказаться не пригодным для измерения расходов воды зимой. Чтобы правильно выбрать место для зимнего створа, производится рекогносцировочное обследование участка реки протяженностью 7—10 B (где B — ширина реки) с нивелированием водной поверхности для определения продольного уклона. Гидрометрический створ следует устраивать на середине участка с большим уклоном, где обычно скапливается меньше шуги и скорости течения достаточны для их измерения с необходимой точностью. Следует учитывать форму залегания шуги. Не следует выбирать створ там, где из-за шуговых скоплений русло реки разбивается на несколько рукавов.

Форма залегания шуги в течение времени может изменяться, поэтому промерные работы производятся при каждом измерении расхода воды. Количество промерных и скоростных вертикалей назначается большим по сравнению с периодом свободного русла. Если русло реки разделено шугой на несколько частей (рукавов), то в каждой из них назначается не менее трех скоростных вертикалей.

В летнее время значительные помехи создает зарастание русла. Перед каждым измерением расхода воды должна выкашиваться водная растительность по всей ширине реки на протяжении 5—10 м выше и ниже створа.

На реках с неустойчивым руслом промеры глубин следует производить при каждом измерении расхода воды дважды — до и после измерения скоростей. При значительных изменениях в рельефе дна назначаются дополнительные вертикали или положение постоянных вертикалей изменяется так, чтобы была обеспечена необходимая точность измерений.

Весьма важно систематически следить за направлением течений в гидростворе, так как при деформации русла условия протекания воды могут измениться и появиться косина струй. Если она превышает 10° , направление гидроствора нужно изменить или перенести его на участок с более устойчивым руслом.

В период весеннего половодья измерение расходов воды представляет особую важность, так как от количества измеренных расходов и освещенности ими высших уровней будет зависеть точность вычисления стока воды за год.

При высоких уровнях измерения расходов воды обычно связаны со значительными трудностями, поэтому необходимо заранее подготовиться к ним. Прежде всего надо заблаговременно расчис-

тить створ в пойме от кустарниковой и луговой растительности, проверить надежность створного оборудования и плавсредств. Если возможны значительные трудности при промерах глубин, следует заранее проинвентаризировать пойму и незадолго до вскрытия произвести тщательные промеры в русле реки. Определение расходов в этом случае ограничивается только измерением скоростей течения.

Следует своевременно позаботиться о разбивке створов для измерения скоростей течения поплавками или по плывущим льдинам, когда применение вертушек в условиях ледохода станет невозможным.

Свою сложность имеют измерения минимальных расходов из-за малых скоростей и глубин потока. Радикальной мерой в таких случаях следует считать канализацию реки, т.е. сосредоточение потока в одном русле, что делается далеко не всегда. По этой причине, несмотря на кажущуюся легкость измерений малых расходов, они бывают не точны.

Значительное влияние на точность измерения расходов оказывают способы подвески грузов и вертушки при измерении скоростей течения. Все методисты сходятся в одном — штанга всегда предпочтительней каната с грузом, так как она не создает подпора, занижающего показания вертушки. Поэтому следует всячески расширять использования штанг, применяя оттяжки и другие приспособления, чтобы обеспечить возможность их удержания. Известно, что в Швейцарии предпочитают штанги даже при скоростях течения около 5 м/с.

Отсюда вовсе не следует, что вопреки многообразию гидравлического и руслового режима рек должны использоваться одни и те же средства измерений. В этом смысле весьма показательны сравнительные измерения меженных расходов с лодки и дистанционной установки ГР-70, проведенные А. К. Артемовым (Дагестанская ЗГМО), А. А. Дементьевым и А. М. Шулепиным (Мурманское УГКС). Обнаружилось, что при жестком креплении вертушки на грузе установка ГР-70 занижает расходы воды в среднем на 6—8 % против результатов измерения с люльки или лодки.

4.3. Измерение расходов воды поплавками

4.3.1. Измерения глубинными поплавками и поплавками-интеграторами

Устройство глубинных и интегрирующих поплавков описано в главе 3. Поплавки этого вида используются для измерения сравнительно малых скоростей течения (до 0,15—0,20 м/с), когда вертушечные измерения мало надежны. Глубинные поплавки применяются также для определения границ мертвого пространства.

Порядок выполнения промерных работ, операций по определению площади живого сечения и назначению скоростных вертикалей не отличается от их организации при вертушечных измерениях.

Что касается измерения скоростей течения, то они производятся в тех же точках, что и при основном способе определения расхода воды вертушкой, но, разумеется, измерительные операции имеют иной характер и становятся, пожалуй, сложнее.

Скорости течения измеряются с лодки, на которой устроены из трех горизонтальных реек створы: верхний, средний и нижний (базис измерений). Рейки располагаются на расстоянии 1 м одна от другой и для удобства работ связываются в жесткую раму. На 0,25—0,50 м выше верхнего створа при помощи шеста пускается глубинный поплавочек. По секундомеру определяется время прохождения поплавком расстояния от верхнего створа до нижнего. Если продолжительность хода поплавка от верхнего до среднего створа более 20 с, то секундомер останавливается в момент прохождения поплавком среднего створа. В каждой точке поплавочек пускается не менее трех раз. Если продолжительность хода какого-либо поплавка отличается от других более чем на 10 %, то наблюдения в этой точке повторяются еще два-три раза.

Скорость в точке вычисляется делением длины базиса — расстояния между створами (1 или 2 м) на среднюю продолжительность хода поплавка.

Расход воды вычисляется аналитическим способом аналогично расходу воды, измеренному вертушкой, записи ведутся в той же книжке КГ-3М (н).

4.3.2. Измерения поверхностными поплавками

Точность поплавочных измерений существенно ниже, чем вертушечных, поэтому поверхностные поплавки (они описаны в главе 3) применяются при рекогносцировочных обследованиях рек, выходе вертушек из строя. При интенсивном ледоходе, когда вертушечные измерения становятся невозможными, в качестве поплавочек служат отдельные льдины.

Чтобы избежать влияния ветра на точность измерения расхода воды, поплавочные наблюдения проводят при штиле или небольшом ветре — 2—3 м/с. На больших реках поплавочные измерения могут производиться при скорости ветра до 5 м/с при условии ее измерения анемометром для введения соответствующих поправок.

Для измерения расхода воды поверхностными поплавками выбирается прямолинейный участок реки с однообразными глубинами, шириной и продольным уклоном водной поверхности на протяжении трех — пятикратной ширины реки. По берегу параллельно основному направлению течения прокладываются магистраль и перпендикулярно к ней разбиваются три створа: верхний, средний и нижний. Расстояние между крайними створами назначается таким, чтобы продолжительность хода поплавков между ними была не менее 20 с. Если на участке имеется гидрометрический створ, то он обычно служит средним створом, а верхний и нижний створы разбиваются параллельно ему на равных расстояниях. В 5—10 м выше верхнего створа назначается пусковой створ, с которого

при измерении скорости течения пускаются поплавки с таким расчетом, чтобы при подходе к верхнему створу поплавков принял скорость той струи потока, которая его перемещает.

На реках шириной до 100 м в средних створах натягиваются как можно ниже над водой тонкие стальные канаты.

Положение верхнего и нижнего створов закрепляют вешками. Канат, натягиваемый через средний створ, размечается хорошо заметными с берега метками (например, свешивающимися с троса цветными полосками материи), которые служат для промера глубин и для определения мест прохождения поплавками створа. На широких реках, где пользоваться канатами неудобно или затруднительно, створы закрепляются вехами, а место пересечения поплавком среднего створа и положение промерных точек определяется засечками с берега угломерным инструментом.

Измерение скорости поверхностными поплавками состоит в определении времени прохождения ими расстояния от верхнего до нижнего створа и мест прохождения через средний створ.

В пусковом створе забрасывается с берега или пускается с лодки первый поплавок, и в момент прохождения им верхнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего в этом створе, техник пускает секундомер. В момент пересечения поплавком среднего створа отмечается место его прохождения от постоянного начала по размеченному канату или засечками с берега угломерным инструментом. Засечка поплавка производится в момент подачи сигнала наблюдателем, стоящим в среднем створе. На мензульном планшете техник ставит черточку на линии створа и около неё записывает номер поплавка. При прохождении поплавком нижнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего у этого створа, техник останавливает секундомер.

Следующий поплавок пускается на некотором расстоянии от первого, и вся работа по измерению скорости течения повторяется в том же порядке. Всего пускается 15—20 поплавков, равномерно распределенных по ширине реки.

Вместо визуальных засечек местоположения поплавков, может быть использована фотосъемка их специальным фотоаппаратом. Фотоаппарат размещается в этом случае в наиболее высоком месте берега или на специальной вышке с таким расчетом, чтобы снимком захватывалась вся ширина реки.

Если невозможно пустить поплавки по всей ширине реки, например на реках с быстрым течением, где поплавки сносят к середине потока, расходы воды определяются по наибольшей поверхностной скорости. В этом случае на стрежневую часть потока пускается 5—10 поплавков. Из всех пущенных поплавков выбираются три поплавка с наименьшей продолжительностью хода, отличающиеся друг от друга по времени не более чем на 10 %; при большем отклонении продолжительности хода пускается еще пять-шесть поплавков.

Запись результатов измерения расходов воды поплавками ведется в книжке КГ-7М (н). Для определения скорости течения

строится график продолжительности хода поплавков, на котором по горизонтальной оси откладываются расстояния от постоянного начала до места прохождения поплавками среднего створа, а по вертикальной оси — продолжительность хода поплавков между верхним и нижним створами. По нанесенным точкам проводится осредненная эпюра распределения продолжительности хода поплавков по ширине реки. В местах перегибов эпюры, а при плавной её форме через равные расстояния назначается не менее пяти-шести скоростных вертикалей, которые для удобства обработки совмещаются с промерными вертикалями. Для каждой скоростной вертикали вычисляется поверхностная скорость течения путем деления расстояния между верхним и нижним створами на продолжительность хода поплавка, снятую с эпюры.

Умножая площади отсеков между скоростными вертикалями на полусумму поверхностных скоростей на них, получают частичные фиктивные расходы воды $q_{\text{фз}}$. Их сумма, с учетом краевых коэффициентов, принятых в формуле (4.11), дает общий фиктивный расход воды $Q_{\text{ф}}$. Фиктивным он назван потому, что получен по данным о поверхностных скоростях и завышен по сравнению с действительным расходом Q :

$$Q = KQ_{\text{ф}}, \quad (4.12)$$

где K — переходный коэффициент, для которого рекомендована зависимость (3.6).

Наиболее точно переходный коэффициент K определяется по данным детальных измерений расхода воды в каждом конкретном створе. С этой целью результаты измерения обрабатываются в двух вариантах: по поверхностным скоростям на вертикалях и по средним скоростям. Соответственно в первом случае получается значение фиктивного расхода $Q_{\text{ф}}$, а во втором — действительный расход Q , что позволяет определить коэффициент K из соотношения: $K = Q/Q_{\text{ф}}$. Подобные измерения рекомендуется выполнять в характерные фазы режима по всей амплитуде колебания уровней, чтобы получить зависимость $K(H)$, которая затем должна использоваться при поплавоочных наблюдениях.

Если с помощью поплавков измерена наибольшая поверхностная скорость, то она используется для вычисления расхода воды

$$Q = K_{\text{наиб}} v_{\text{наиб}} F.$$

В качестве $v_{\text{наиб}}$ принимается среднее значение скоростей трех наиболее быстрых поплавков. Коэффициент перехода от наибольшей поверхностной скорости к средней для всего сечения определяется по данным вертушечных измерений, а при их отсутствии — по гидравлическим зависимостям, например формуле Г. В. Железнякова

$$K_{\text{наиб}} = 1 - 5,6 \sqrt{ghl}/v_{\text{наиб}},$$

где h — средняя глубина потока; g — ускорение свободного падения. Значения $K_{\text{наиб}}$ обычно находятся в пределах 0,43—0,80.

4.4. Ускоренные измерения расходов воды

Многоточечные измерения расходов воды вертушками требуют значительных затрат времени. При неустановившемся движении воды, которое свойственно как естественным паводкам, так и попускам из водохранилищ, большая продолжительность измерений порождает дополнительные погрешности, связанные с изменчивостью расходов воды во времени. В этих условиях ускорение измерений становится одним из факторов повышения их точности.

Способы ускоренных измерений весьма многообразны: наряду с точечными наблюдениями они включают такие сложные, как интеграционные, акустические и аэрогидрометрические. Рассмотрим основные виды ускоренных измерений, широко распространенные в настоящее время и предназначенные для внедрения в ближайшей перспективе.

4.4.1. Сокращенные способы измерения

При сокращенных измерениях уменьшается количество скоростных вертикалей до одной — трех при условии, что среднее квадратическое отклонение получаемых при этом расходов от результатов измерения основным способом не превышает 5 %. Существуют два варианта сокращенных измерений: 1) применение интерполяционно-гидравлической модели расхода воды, 2) использование его репрезентативных элементов.

Интерполяционно-гидравлическая модель расхода воды основывается на представлении измеренной средней скорости на вертикали в виде суммы двух составляющих

$$v_i = \bar{v}_i + w_i, \quad (4.13)$$

где $\bar{v}_i$ — компонента измеренной скорости, гидравлически обусловленная глубиной на вертикали. Если считать уклон свободной поверхности и коэффициент шероховатости неизменными по ширине потока, то

$$\bar{v}_i = ah_i^{2/3}, \quad (4.14)$$

причем

$$a = \sqrt{I}/n.$$

Вторая в общем случае знакпеременная компонента w зависит от особенностей кинематической структуры потока и поэтому названа структурной составляющей средней скорости на вертикали (она включает также случайные погрешности измерения).

Величины $w_{(i)}$ не следуют за изменением глубин. Поэтому для определения среднего по ширине отсека значения w , допустима их линейная интерполяция

$$w_s = 0,5 (w_i + w_j). \quad (4.15)$$

На основе приведенных предпосылок И. Ф. Карасевым и В. А. Ременюком синтезирована следующая модель расхода воды, названная интерполяционно-гидравлической:

$$Q = \sum_{s=1}^N \{a_0 h_s^{2/3} + P_s [v_i + v_f - a_0 (h_i^{2/3} + h_f^{2/3})]\} f_s, \quad (4.16)$$

где h_s — средняя глубина в отсеке между скоростными вертикалями; P_s — весовой коэффициент: $P_s = 0,7$ для прибрежных отсеков ($s = 1$; $s = N$), $P_s = 0,5$ для всех остальных отсеков ($1 < s < N$).

Значения a_0 устанавливаются по характерным фазам режима на основе специальных многоточечных (детальных) измерений. Вместе с тем величину a_0 вполне допустимо вычислять непосредственно по данным каждого конкретного измерения элементов расхода воды

$$a_0 = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \frac{v_i}{h_i^{2/3}}, \quad (4.17)$$

где N_B — количество скоростных вертикалей.

Достоинство интерполяционно-гидравлической модели расхода воды (4.16) по сравнению с моделью (4.11) состоит в том, что она практически исключает систематическую погрешность — занижение расхода воды при сокращении числа скоростных вертикалей. Такой эффект достигается тем, что интерполяция средних скоростей на вертикалях $v_{i(j)}$ по ширине отсека между ними ведется с учетом распределения глубин. Отметим, что этим интерполяционно-гидравлическая модель превосходит и графический способ обработки расхода воды, в котором средние скорости на вертикалях интерполируются линейно.

При использовании интерполяционно-гидравлической модели достаточно измерять скорости всего на трех-четырех вертикалях, размещенных на равных расстояниях. В табл. 4.2 приведен пример определения расхода при трех скоростных вертикалях в створе равнинной реки. Отклонение полученного значения от расхода воды, вычисленного по девяти скоростным вертикалям, составляло всего 1,6 %.

При устойчивом русле, когда площадь живого сечения F становится однозначной функцией уровня, все измерения расхода воды сводятся к определению средней скорости потока $v_{\text{ср}}$. Но давно замечено, что её значение тесно связано со скоростями течения в какой-либо точке или со средней скоростью на вертикали, которые и носят название репрезентативных.

В качестве репрезентативной скорости принимается максимальная скорость в поперечном сечении потока или в точке стрежневой вертикали на глубине $0,2 h$. При этом по данным предшествующих многоточечных измерений строится зависимость $v_{\text{ср}} = f(v_{\text{макс}})$

Таблица 4.2

Пример вычисления расхода воды на основе его интерполяционно-гидравлической модели

1. Определение гидравлического коэффициента a_0 и составляющих средних скоростей на вертикалях

№ скоростной вертикали	Рабочая глубина h_i м	Средняя скорость v_i м/с	$h_i^{2/3}$	$a_i = \frac{v_i}{h_i^{2/3}}$	$\bar{v}_i = a_0 h_i^{2/3}$	$\Delta v_i = v_i - \bar{v}_i$
1	2,44	0,78	1,81	0,43	0,63	0,15
2	3,39	0,89	2,26	0,39	0,79	0,10
3	3,81	0,56	2,44	0,23	0,85	-0,29

$$a_0 = \Sigma a_i / 3 = 1,05 : 3 = 0,35$$

2. Вычисление расхода воды

№ скоростной вертикали	Площадь отсека f_s м²	Ширина отсека b_s м	Средняя глубина h_s м	$h_s^{2/3}$	$\bar{v}_s = a_0 h_s^{2/3}$ м/с	$\Delta v_s = 0,5(\Delta v_i + \Delta v_j)$ м/с	$\bar{v}_s = \bar{v}_i + \Delta v_s$ м/с	$q_s = \bar{v}_s f_s$ м³/с
$K=0,7$								
1	15,4	11,4	1,35	1,22	0,43	0,10	0,53	8,12
2	63,2	20,0	3,16	2,15	0,75	0,12	0,87	55,0
3	69,7	20,0	3,48	2,30	0,81	-0,10	0,71	49,5
$K=0,7$	38,0	14,0	2,71	1,94	0,68	-0,20	0,48	18,2

$$Q = 131 \text{ м}^3/\text{с}$$

Примечание: при вычислении Δv_s в крайних отсеках вместо весового коэффициента $K=0,5$ применяется коэффициент $k=0,7$.

или $v_{cp} = f(v_{0,2h})$, которая аналитически может быть представлена в виде уравнения регрессии

$$v_{cp} = a_0 + a_1 u_{\max(0,2h)}. \quad (4.18)$$

Однако координата точки с максимальной скоростью течения не остается постоянной, а теснота связи (4.18) нередко оказывается недостаточной (рассеяние достигает $\pm 15\%$). Такая неопределенность не дает основания рассматривать $u_{\max}$ как заведомо репрезентативный элемент для определения средней скорости потока. В связи с этим заслуживает внимания предложение Е. П. Буравлева (Азербайджанское УГКС) использовать в качестве репрезентативных средние скорости на вертикалях в прибрежных частях потока, расположенных на расстояниях $0,2B$ и $0,8B$ (считая

от одного из урезов воды). Расчетное уравнение регрессии в таком случае приобретает вид

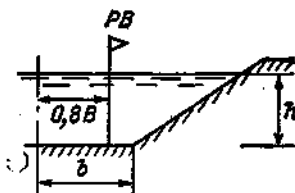
$$v_{\text{ср}} = a_0 + a_1 v_{0,2B} + a_2 v_{0,8B}. \quad (4.19)$$

Пример. Для поста р. Великая — дер. Гуйтово получены следующие параметры уравнения (4.19): $a_0 = 0,1040$, $a_1 = 0,4582$, $a_2 = 0,3787$. Вычислим расход воды при измеренных скоростях на вертикали: $v_{0,2B} = 1,20$ м/с, $v_{0,8B} = 1,16$ м/с. Значение площади живого сечения снимаем с кривой $F = f(H)$: $F = 437$ м².

$$Q = (0,1040 + 0,4582 \cdot 1,20 + 0,3787 \cdot 1,16) \cdot 437 = 477 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Точность определения расхода воды по его репрезентативным элементам неодинакова для различных фаз гидрологического режима. Если рассматривать отдельно взятый створ, то анализ показывает, что использование репрезентативных элементов при-

Рис. 4.12. Положение репрезентативной вертикали (РВ) в канале трапециевидального сечения.



водит к достаточно надежным результатам лишь при относительно больших расходах $Q/Q_{\text{макс}} > 0,25$, где $Q_{\text{макс}}$ — средний многолетний максимальный расход воды. Этим критериальным соотношением можно руководствоваться при организации измерений.

В каналах, где сохраняется призматичность и устойчивость формы русла, для определения $v_{\text{ср}}$ достаточно использовать одну репрезентативную вертикаль. По исследованиям А. А. Осиповича и В. П. Рагуновича (ЦНИИКИВР), эта вертикаль расположена на расстоянии от оси канала $0,8b$ (b — полуширина канала по дну — см. рис. 4.12). Отклонение местных скоростей течения на этой вертикали от средней для всего потока находится в пределах 2—3 %.

Таким образом, существует реальная возможность ускорения массовых измерений расходов воды даже при современном оснащении постов. Выбор лучшего варианта во многом определяют конкретные особенности объекта. На вновь открываемых створах следует использовать линейную интерполяционно-гидравлическую модель при трех-четырех скоростных вертикалях. Если уже имеется достаточный ряд наблюдений, расходы воды вполне допустимо определять по их связи с репрезентативными элементами. Объем измерений при этом может быть предельно сокращен.

4.4.2. Интеграционные измерения с движущегося судна

Интеграция скоростей течения с движущегося судна может производиться:

а) вертушкой (или другим преобразователем скорости), закрепленной на определенном (постоянном) горизонте (горизонтальная интеграция);

б) вертушкой, перемещаемой зигзагообразно от поверхности до дна потока и обратно в течение всего времени движения судна по створу.

Зигзагообразная интеграция в связи с техническими трудностями её реализации не получила распространения, поэтому ниже рассматривается только горизонтальная.

Горизонтальная интеграция скоростей обычно производится в поверхностном слое, так как коэффициенты перехода от поверхностной к средней скорости течения потока наиболее изучены. Принципиальная схема интеграционного измерения расхода воды показана на рис. 4.13, а один из вариантов приборного комплекса,

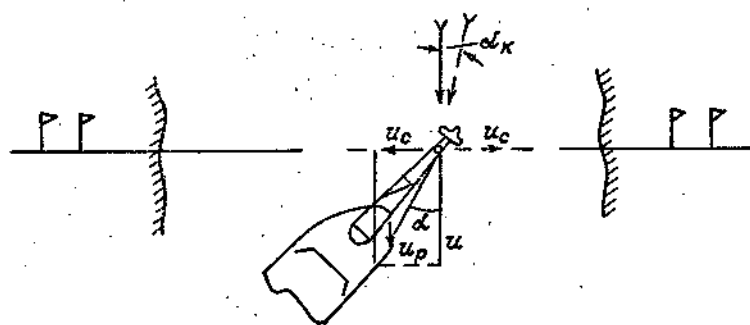


Рис. 4.13. Принципиальная схема интеграционного измерения расхода воды с движущегося судна.

разработанного в ГГИ, иллюстрирует рис. 4.8. Непосредственно измеряются: а) глубина h по створу (их регистрирует эхолот), б) результирующая скорость u_p — векторная сумма поверхностной скорости течения u_n и скорости движения судна u_s , в) угол α между осью вертушки и линией гидроствора. Если все эти элементы отнести к элементарному отсеку потока s шириной, равной расстоянию, которое судно проходит по створу за достаточно короткий интервал времени Δt :

$$b_s = u_p \sin \alpha_s \Delta t,$$

то можно получить фиктивный частичный расход в этом отсеке

$$q_{fs} = u_p^2 h_s \sin \alpha_s \cos \alpha_s \Delta t.$$

Затем значения q_{fs} умножаются на коэффициент K , обеспечивающий переход от фиктивного расхода к действительному. Этот коэффициент должен быть заранее известен для данного створа по результатам специальных наблюдений. При отсутствии таких данных K вычисляется по формуле (3.6). Действительные значения q_s в специальном вычислительном блоке последовательно суммируются (интегрируются) по мере движения судна вдоль гидро-

створа от одного берега к другому за время T , что позволяет получить полный расход воды.

$$Q = 0,5K \int_0^T u_p^2 h \sin 2\alpha dt. \quad (4.20)$$

При косоструйном течении расчет u_n и u_c становится более сложным и требует учета угла косоструйности α_k , который заранее не известен. Однако если угол косоструйности α_k не слишком велик (менее 20°), можно использовать ту же формулу (4.20). Для компенсации возникающих при этом погрешностей интеграцию скоростей рекомендуется производить дважды — от одного берега к другому и обратно, а в качестве результата измерений принимать полусумму полученных значений.

Одно из главных метрологических преимуществ горизонтальной интеграции скоростей течения состоит в том, что она устраняет погрешность интерполяции средних скоростей на вертикалях, а при вертикальной дискретизации модели расхода воды эта погрешность является основной.

Точность интеграционного измерения скорости течения существенно зависит от скорости перемещения судна по створу u_c : при ее увеличении возникают погрешности измерения не только из-за малости времени интеграции T , но также из-за уменьшения относительной величины u_n/u_c . Чтобы не допустить чрезмерного возрастания рассматриваемой погрешности, скорость перемещения судна u_c должна быть ограничена некоторым достаточно малым значением, при котором еще сохраняется устойчивость судна на курсе. Опыт показывает, что эта скорость близка к поверхностной скорости потока u_n .

4.4.3. Измерения с помощью гидроакустических установок

Использование ультразвука позволяет измерить мгновенный расход воды, т. е. получить значение, в наибольшей мере отвечающее физическому смыслу измеряемой величины. Ультразвуковое зондирование может производиться в различных направлениях в плане и поперечном сечении потока, но для определенности принимается горизонтальное положение ультразвукового луча. Преобразователи-приемники акустических (ультразвуковых) сигналов устанавливаются на свайных опорах или непосредственно на береговых откосах (рис. 4.14). Опорные конструкции должны допускать возможность перемещения преобразователей при колебаниях уровня без нарушения их взаимной ориентировки.

Угол между направлением ультразвукового луча и динамической осью потока должен составлять $30-60^\circ$. Для установки оборудования необходимо выбирать прямолинейный участок с устойчивым и свободным от растительности руслом. В потоке не должно содержаться пузырьков воздуха, рассеивающих ультра-

звук. Отсюда следует, что установка должна быть достаточно удалена от зон сопряжения бьефов и бурного течения, где происходит аэрация потока. Не пригодны также участки со значительной термической стратификацией, так как при значительных градиентах температуры воды может происходить преломление и рассеивание акустических сигналов.

Распространению ультразвука препятствуют взвешенные в потоке частицы. Акустические импульсы затухают пропорционально

увеличению их концентрации. Считается, что в нормальных условиях измерения мутность не должна превышать $100-150 \text{ г/м}^3$.

Принцип измерения скорости течения акустическим методом заключается в посылке импульсов ультразвука по косому галсу в направлении течения и против него с регистрацией двух временных интервалов — соответственно T_1 и T_2 . При

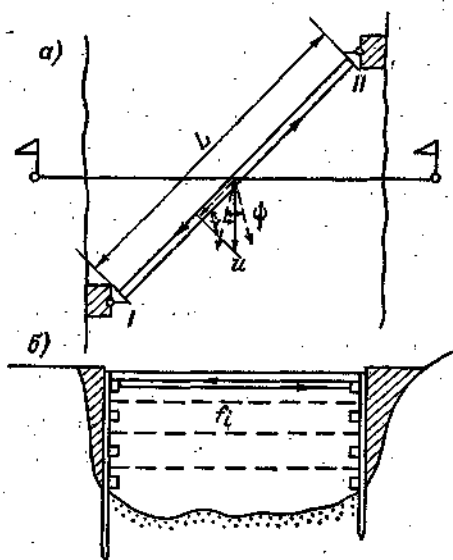


Рис. 4.14. Схема измерения расхода воды акустической установкой.

а — участок гидровтора, б — поперечное сечение русла и горизонтальная дискретизация потока.

этом значение скорости потока определяется по формуле (3.7). Ее достоинство состоит в том, что она не включает в явном виде скорость звука в воде и при этом отпадает необходимость в аппаратуре для ее измерения (как известно, скорость звука не остается постоянной и зависит от температуры и минерализации воды).

Ультразвуковые системы для измерения скорости течения делятся на кабельные или бескабельные соответственно тому, имеется или отсутствует кабель, связывающий приемо-передающие устройства на противоположных берегах.

На рис. 4.14 изображен кабельный вариант. Он функционирует следующим образом: одновременно производится излучение ультразвука передатчиками I—II и запуск измерителя времени. После приема импульсов на противоположных берегах этот измеритель останавливается, фиксируя разность временных интервалов $\Delta t = T_2 - T_1$.

Вычисление скорости v , согласно формуле (3.7), производится автоматически специальным электронным блоком. Результат показывается на световом табло.

Кабельный вариант экономически оправдан для применения при ширине русла 100—150 м. На более широких реках предпочтительнее бескабельный вариант, при котором не требуется прокладка кабельной линии между берегами, хотя и усложняется аппаратура. Один из таких вариантов предложен А. И. Затыльниковым (ГГИ).

Существуют две разновидности моделей расхода воды измеренного ультразвуковым методом.

При послойной интеграции скоростей осуществляется горизонтальная дискретизация модели расхода воды

$$Q = \sum_{s=1}^N \alpha_s v_s f_s \sin \gamma, \quad (4.21)$$

где α_s — коэффициент, учитывающий полноту зондирования и особенности скоростной структуры во фрагменте, к которому относится осредненная скорость v_s ; f_s — площадь фрагмента по направлению ультразвукового луча.

Из-за технических трудностей послойное измерение скоростей течения ультразвуком не получило распространения. В большинстве действующих установок зондирование потока производится на одном уровне. В этом случае для определенности должен зондироваться поверхностный слой и математическая модель воды приобретает вид

$$Q = K_b \sigma_n F_s \sin \gamma, \quad (4.22)$$

где F_s — площадь водного сечения в плоскости ультразвукового зондирования; K_b — коэффициент перехода от осредненной по ширине потока поверхностной скорости течения к средней.

Величина K_b не идентична коэффициенту перехода от осредненной по сечению поверхностной скорости к средней, о котором шла речь в главе 3, изучена мало и должна определяться в каждом створе по данным специальных методических исследований. Вместе с тем, физически ясно, что K_b зависит от тех же факторов, что и K , который достаточно исследован и может быть оценен, например, по формуле (3.6).

Связь коэффициентов K_b и K получена И. Ф. Карасевым

$$K_b = (2\varphi^2 + \varphi) K / (5\varphi - 2), \quad (4.23)$$

где $\varphi = h_{\max}/h_{\text{ср}}$ — коэффициент полноты формы поперечного сечения русла. Из формулы следует, что:

Сечение	прямоугольное	параболическое	треугольное
φ	1,0	1,5	2,0
K_b/K	1,0	1,10	1,25

При учете K_b по (4.23) расход воды, измеряемый с помощью ультразвука: вычисляется по формуле

$$Q = [(2\varphi^2 + \varphi) K L F_s \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \operatorname{tg} \gamma] / (10\varphi - 4). \quad (4.24)$$

Косоструйность потока создает систематические погрешности ультразвуковой интеграции скоростей. Но, в отличие от вертушечных измерений, эти погрешности получают разные знаки и скорость течения оказывается завышенной, если фактическое направление струй отклоняется на угол ψ внутрь острого γ , и заниженной — в обратном случае (см. рис. 4.14). Для компенсации этих погрешностей международный стандарт ИСО 748—73 рекомендует вводить поправочные коэффициенты $\alpha < 1$ в первом случае и $\alpha > 1$ — во втором. Значения этих коэффициентов определяются из простых тригонометрических соотношений и составляют $\alpha = 1 \pm (0,04 + 0,08)$ для ψ до 4° при $\gamma = 30 \div 50^\circ$.

Комплекс организованных ГГИ сравнительных измерений расходов воды р. Луги показал, что ультразвуковой метод дает ту же точность, что и непрерывная интеграция вертушкой, но он незаменим там, где вертушечные измерения не удастся выполнить. Ультразвуковые установки должны использоваться при резко выраженной нестационарности потока в каналах и бьефах гидрозлов, на участках переменного подпора и приливных устьях рек при наличии обратных течений. Зондирование скоростей необходимо осуществлять с достаточной частотой по глубине потока, чтобы обеспечить определение расхода воды как суммы частичных расходов по фрагментам живого сечения потока.

4.4.4. Аэрогидрометрический метод

Впервые в Советском Союзе комплекс аэрометодов определения расходов воды был применен при речных изысканиях для проектирования мостовых переходов (Б. К. Малявский и др.). В 1965—66 гг. в ГГИ под руководством В. А. Урываева разработаны методические основы и необходимые технические средства для поплавочных измерений скоростей течения на реках. Этим было положено начало широкому применению аэрометодов определения расходов воды на гидрологической сети.

Аэрогидрометрический способ определения расходов воды представляет собой вариант поплавочных измерений. Если применение поплавков в наземных условиях ограничивается реками шириной до 300—400 м, то аэрогидрометрический способ таких ограничений не имеет.

Авиаизмерения поверхностных скоростей включают операции по маркировке водной поверхности (сбросу поплавков) и аэрофотосъемке двух последовательных положений поплавков через заданные (фиксируемые) промежутки времени. Стандартный комплект аэрофотоаппарата представлен на рис. 4.15.

Для маркировки водной поверхности применяются специальные ураниновые поплавки, представляющие собой деревянные цилиндрики диаметром 4 см и высотой 11 см, утяжеленные у основания металлической шайбой. Вес балласта подобран таким, чтобы, приняв в воде вертикальное положение, поплавок выступал над ее поверхностью не более чем на 1,5—2 см. Его боковая поверхность

покрыта ураниновоклеевой пастой. В воде паста растворяется и вокруг поплавок образуется ярко-зеленое пятно, которое и изображается на аэроснимках. При хорошем качестве последних по оттенкам в тональности изображения пятна обычно удается непосредственно отдешифровать местоположение поплавка. В других случаях прибегают к косвенным методам дешифрирования. Время эффективного действия поплавка (растворения ураниновой пасты) около 15 мин.

Сбрасывание речных поплавков производится с самолета с помощью специального устройства — механического сбрасывателя

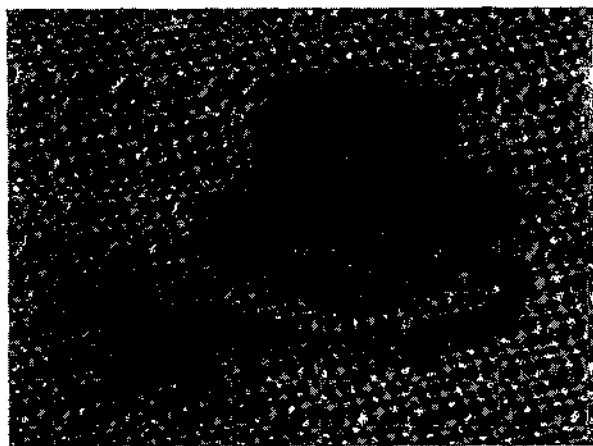


Рис. 4.15. Комплект аэрофотоаппарата.

1 — аэрофотоаппарат, 2 — аэрофотоустановка, 3 — командный прибор.

(рис. 4.16). Поплавки размещаются по периметру сбрасывателя в специальных ячейках цилиндрической формы, закрытых снизу металлическим диском, в котором имеется круглое отверстие диаметром несколько больше диаметра ячейки. При повороте диска на фиксированный угол отверстие смещается и освобождает поплавок из очередной ячейки. Одновременно в сбрасыватель заряжается 18 поплавков.

Сброс поплавков производится при заходе самолета поперек реки по сбросному створу, который располагается выше по течению от гидрометрического створа. Высота полета должна быть возможно меньшей, но такой, чтобы обеспечить, с одной стороны, точное проведение самолета по створу и соблюдение безопасности полета, а с другой — своевременный выход самолета на съемку первого положения поплавков.

Аэрофотосъемка поплавков выполняется в два захода самолета по линии гидроствора (рис. 4.17). Если позволяет ширина реки и метеорологические условия (облачность, видимость), съемка производится с захватом всей ширины реки одним аэроснимком.

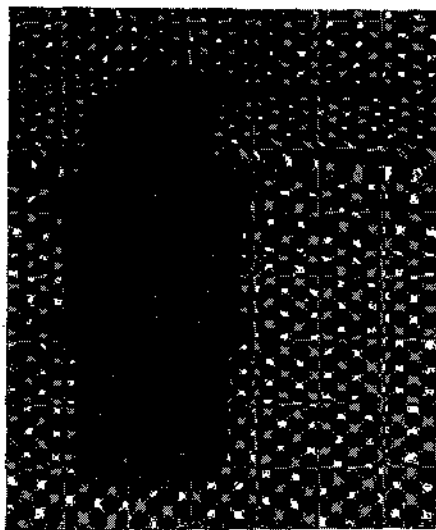


Рис. 4.16. Механический сбрасыватель поплавков.

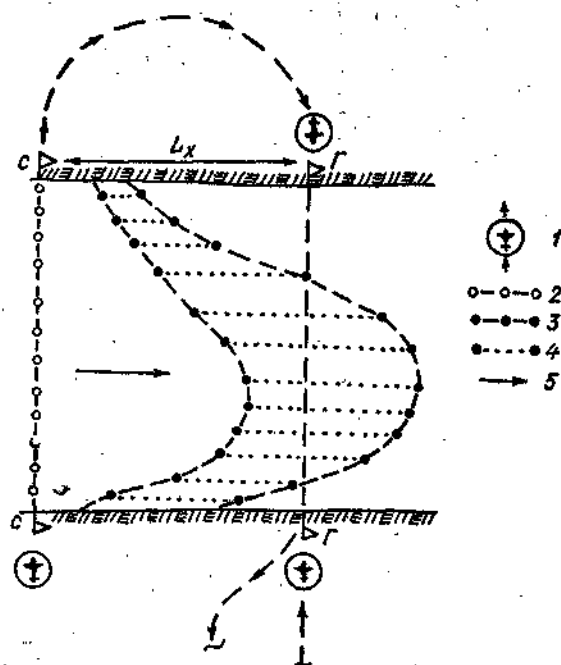


Рис. 4.17. Схема заходов самолета на сброс и аэрофотосъемку поплавков.

1 — маршрут полета самолета, 2 — линия положения поплавков в момент сброса, 3 — линия положения поплавков в моменты аэрофотосъемки, 4 — траектории поплавков, 5 — направленные течения.

При этом, однако, масштаб аэрофотосъемки не должен быть менее 1 : 15 000, так как в противном случае дешифрирование изображения ураниновых поплавков становится ненадежным. Высота аэрофотосъемки рассчитывается в этом случае по формуле

$$H_a \leq 1,5 f_k B / l_k, \quad (4.25)$$

где B — ширина реки; f_k — фокусное расстояние аэрофотоаппарата; l_k — размер кадра.

Съемка как первого, так и второго положения поплавков выполняется маршрутом максимально перекрывающихся аэроснимков (с минимальным интервалом $t_{\min}$ между съемками).

Если захватить всю ширину реки одним аэроснимком невозможно, то ее разбивают на отдельные отсеки путем установки на их границах неподвижных закоренных поплавков. Ширина отсеков назначается с расчетом захвата каждого из них одним аэроснимком. На пойме в качестве неподвижных точек, фиксирующих границы отсеков, могут быть естественные объекты (кусты, острова, деревья).

Фактическое время аэрофотосъемок фиксируется путем фотосъемки вмонтированных в фотоаппарат часов. Авианизмерения скоростей сопровождаются на-

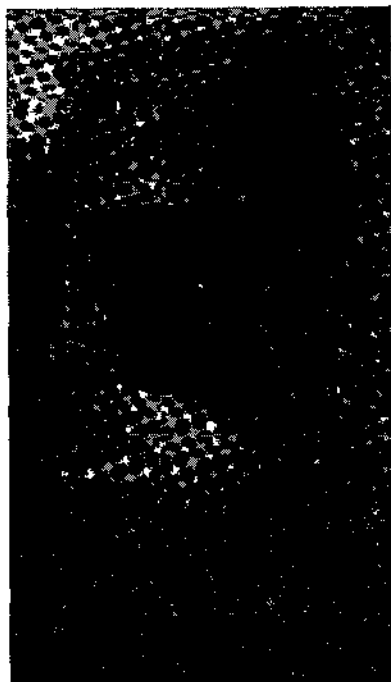


Рис. 4.18. Фототрансформатор ФТБ (общий вид).

блюдениями за скоростью и направлением ветра на наземных пунктах или сбросом специальных ветровых поплавков.

Обработка данных авианизмерения начинается с дешифрирования изображения поплавков, которое производится на негативах, и переноса их на планшет, на котором строится план участка гидроствора в заданном масштабе. При построении фотоплана производится трансформирование аэроснимков последовательных положений поплавков, чтобы устранить искажения, вносимые наклоном фотоаппарата и эффектами перспективности изображения. Эта операция выполняется с применением специальных приборов — фототрансформаторов (рис. 4.18), позволяющих преобразовать аэронегативы (аэроснимки), полученные при наклонном положении оптической оси объектива аэрофотоаппарата, в гори-

зонтальные аэроснимки с одновременным приведением изображения к заданному масштабу.

Рассмотрим порядок обработки траектории поплавков (рис. 4.19).

1. Соединив точки, соответствующие изображению первого и второго положения поплавка, получают его траекторию в масштабе планшета s_i и намечают ее центр c_i .

2. Измеряют проекцию s'_i траектории s_i на перпендикуляр к гидроствору.

3. Проектируют центр траектории c_i на линию гидроствора и измеряют расстояние между точкой c_i и постоянным началом

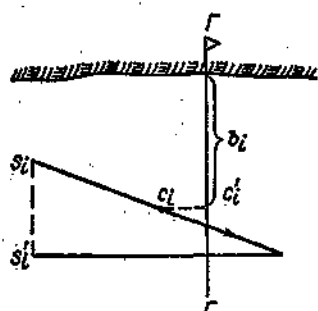


Рис. 4.19. К определению скорости перемещения поплавка аэрометодом.

(берегом) b_i . Точке c'_i приписывается скорость течения, измеренная i -м поплавком (скоростная вертикаль).

4. Вычисляют натурные значения проекции траектории поплавка s'_i и расстояния b_i . Для этого значения s'_i и b_i , измеренные на планшете, умножают на знаменатель численного масштаба планшета M_{Π} .

5. Поделив длину проекции траектории поплавка s'_i на время между аэрофотосъемками $(t_2 - t_1)$, получают проекцию скорости движения i -го поплавка u_{ni} .

6. Наконец, осуществляется переход к проекции поверхностной скорости течения u_i с учетом поправки на торможение поплавка от обтекания воздушным потоком (это торможение наблюдается даже при штиле)

$$u_i = u_{ni} - \varepsilon (\omega \cos \gamma - u'_{ni}), \quad (4.26)$$

где ω — скорость потока воздуха на высоте 1 м от поверхности воды; γ — угол, составленный вектором ω и направлением движения поплавка ox (рис. 4.20).

Отношение ε называется коэффициентом ветрового дрейфа поплавка и характеризуется постоянством значения для поплавков одного типа. Так, для речного уранинового поплавка $\varepsilon = 0,013$; для льдин размером до 2×2 м и толщиной 0,2 м $\varepsilon = 0,017$; для льдин такого же размера, но толщиной 0,6 м $\varepsilon = 0,009$.

Данные о проекциях поверхностных скоростей течения и расстояниях от постоянного начала до центров траекторий поплавков переносятся в соответствующие графы «Книжки для записи изме-

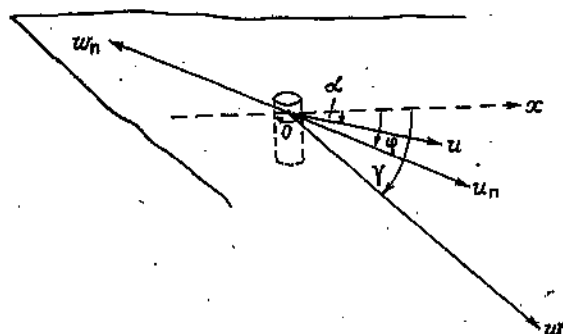


Рис. 4.20. Составляющие результирующей скорости перемещения поплавка.

рения расхода воды» КГ-7 М (н), где и подсчитывается фиктивный расход воды. Переход от фиктивного расхода к действительному осуществляется по формуле (4.12) с определением коэффициента K на основе зависимости (3.6) или по результатам предварительных наземных определений.

4.5. Метод смешения индикатора

4.5.1. Классификация вариантов метода

Измерение расходов воды методом «скорость—площадь» во многих случаях, в частности в валунно-каменистых руслах горных рек, встречает известные трудности. Стремление избежать многопозиционных измерений элементов потока и заменить их определением некоторых общих характеристик привело к созданию метода, основанного на измерении степени разбавления вещества индикатора. Так называемый метод смешения индикатора (или просто метод смешения) впервые был применен во Франции в 1861 г. Большой вклад в его развитие внесли русские инженеры А. М. Рундо (1912 г.), Н. М. Бернадский и О. А. Юрков (1913, 1914 гг.). Они впервые применили метод смешения для измерения больших расходов воды (до $60 \text{ м}^3/\text{с}$) с использованием электроизмерительной аппаратуры. Позже в этом направлении много работали О. К. Блумберг, В. М. Сокольников, К. И. Колондзян-Кудрявая, а также Н. В. Пикуш и Г. М. Риммар, создавшие аппаратуру и методику измерений для сети. Метод смешения получает все большее признание как в Советском Союзе, так и за рубежом.

Существующие варианты метода смешения обычно классифицируются по двум признакам: 1) по продолжительности введения индикатора в поток и 2) по способу анализа степени разбавления

концентрации индикатора в речной воде. В соответствии с первым признаком выделяют способы длительного и мгновенного пуска индикатора; по второму признаку различают методы молекулярной и атомной спектрофотометрии, спектрофлуориметрический, радиоактивный (изотопный), и электролитический (кондуктометрический). Причем каждому из них соответствуют индикаторы со специфическими свойствами, отвечающими принятой методике анализа: радиоактивность — изотопному способу, высокая степень диссоциации вещества-индикатора в воде — электролитическому способу и т. д.

4.5.2. Методика измерения расходов воды при полном перемешивании индикатора

Рассмотрим принципиальную схему метода смешения при длительном пуске индикатора.

Будем вводить в поток раствор индикатора известной концентрации S_p постоянным расходом q_p в течение некоторого промежутка времени T . Вследствие турбулентности течения облако вещества-индикатора, продвигаясь вниз по течению с массой воды, одновременно будет распространяться вглубь и по ширине потока. Это явление получило название *турбулентной диффузии*.

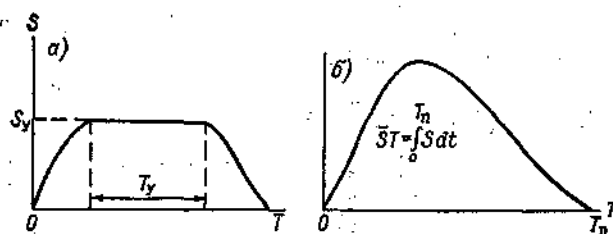


Рис. 4.21. Характер изменения концентрации индикатора в измерительном створе при длительном (а) и мгновенном (б) введении индикатора в поток.

В результате облако постепенно захватит все живое сечение, а значения концентрации индикатора в нем понизятся и выровняются. Причем по мере уменьшения различия в концентрации скорость выравнивания будет затухать.

Если в створе, расположенном ниже по течению от места пуска индикатора, в нескольких (N) точках живого сечения определять концентрацию индикатора, то по мере прохождения облака она будет сначала нарастать, пока не достигнет некоторого устойчивого и постоянного для каждой точки значения S_{yi} (рис. 4.21 а). Для установившегося режима концентрации в соответствии с условиями баланса вещества и неразрывности движения воды должно иметь место равенство между количеством индикатора, поступаю-

щего в поток и проходящего через измерительный створ в единицу времени (например, за 1 с):

$$Q = (S_p / \bar{S}_y - 1) q_p. \quad (4.27)$$

Это и есть математическая модель метода смешения при длительном пуске индикатора. В соответствии с ней расход воды может быть определен по известным S_p и q_p и значению $\bar{S}_y$, измеренному в одной (произвольной) точке живого сечения.

Условие, отвечающее равенству концентраций во всех точках живого сечения, называется условием полного перемешивания индикатора.

С практической точки зрения это условие можно считать удовлетворительно выполненным, когда различие в значениях S_y в центре и у берегов потока не превышает 5—10 %, что соответствует погрешности определения расхода воды 2—3 %. Расстояние, которое должен пройти индикатор, чтобы это условие оказалось выполненным, — путь полного (достаточного) перемешивания индикатора L_n . Следовательно, створ измерения концентраций индикатора должен выбираться ниже по течению от места пуска на расстоянии не менее L_n . С другой стороны, нельзя допускать, чтобы расстояние между створами пуска и измерения слишком превышало L_n , так как с его ростом повышается вероятность потерь индикатора в водоворотных и застойных зонах, а также его адсорбция грунтами русла.

Длина пути полного перемешивания индикатора зависит от гидравлических и морфометрических особенностей участка измерения. Представление о характере этой зависимости дает, например, формула Карасева

$$L_n = \frac{Y_s^2 C}{h \sqrt{g} \ln(1 - \varphi_s)},$$

где Y_s^2 — расстояние между точкой введения индикатора в поток и наиболее удаленным от нее берегом; C — коэффициент формулы Шези; h — средняя глубина потока на участке между створами пуска и измерения; g — ускорение свободного падения. Параметр φ_s выражает степень различия концентраций в створе полного (достаточного) перемешивания и определяется зависимостью

$$\varphi_s = 1 - S_{\min} / S_{\max},$$

где $S_{\min}$, $S_{\max}$ — минимальная и максимальная концентрация в створе. Если в качестве допустимого значения φ_s принять 0,1 (10 %), что, как указывалось выше, соответствует погрешности определения расхода воды 1—2 %, то для небольших горных рек шириной B действительна приближенная зависимость

$$L_n = 25B.$$

На практике расстояние L_n уточняется путем контрольных пусков индикатора или специальных красителей.

Практическая реализация метода смешения с помощью длительного пуска индикатора представляет определенные трудности. Важнейшие из них — большой расход индикатора и необходимость в довольно громоздком оборудовании для равномерного выпуска раствора индикатора в поток. Поэтому на практике чаще прибегают к измерениям расходов воды с мгновенным вводом индикатора в поток.

Если объем раствора индикатора равен V_p при концентрации S_p , то расход воды представляется выражением

$$Q = S_p V_p / \int_0^T S dt. \quad (4.28)$$

Хронограмма прохождения облака индикатора (ионов) изображена на рис. 4.21 б. Ее форма напоминает паводочный гидрограф, в связи с чем рассматриваемый вариант измерения расходов часто называют способом *ионного паводка*.

В нашей стране наибольшее распространение получила электролитическая разновидность метода смешения с мгновенным пуском индикатора-электролита, в качестве которого используется преимущественно хлористый натрий NaCl (поваренная соль). При этом концентрация индикатора в речном потоке определяется косвенно — по электрической проводимости воды. Использование этого принципа облегчается тем, что для сильно разбавленных электролитов имеет место линейный характер связи между концентрацией индикатора и электрической проводимостью воды (E)

$$S = k_S E, \quad (4.29)$$

где k_S — коэффициент пропорциональности. Для хлористого натрия, например, предельная концентрация, при которой еще сохраняется линейный характер этой зависимости ($k_S = \text{const}$), составляет 5,8 г/л.

Для определения расхода воды при мгновенном вводе индикатора служит формула

$$Q = \frac{V_p (E'_p - E_0)}{\varepsilon \int_0^T (E - E_0) dt}, \quad (4.30)$$

где E_0 — фоновая электрическая проводимость речной воды; E' — электрическая проводимость исходного раствора; ε — коэффициент разбавления исходного раствора.

Применявшиеся до недавнего времени приборы — измерители электрической проводимости речной воды ГР-54 и ГР-67 — обладают сравнительно низкой разрешающей способностью и требуют значительных затрат хлористого натрия. Этих недостатков лишен комплект «Поток», разработанный в ЦКБ ГМП по предложению В. А. Коробкова (САННИИ).

«Поток» представляет собой измеритель относительного приращения электрической проводимости в условных единицах (частотах). Кроме самого прибора, в комплект оборудования для измерения расходов воды входят: два мерных бака (бак № 1 вместимостью около 17 л и бак № 2 вместимостью около 10 л); бутылка вместимостью не менее 50—100 мл; пипетки мерные на 1 и 10 мл; секундомер и мешалка (рис. 4.22 а). Основными элементами конструкции прибора являются: а) два первичных измерительных преобразователя (ПИП), включенных в плечи измерительного поста переменного тока; б) интегратор частотой 2 кГц,

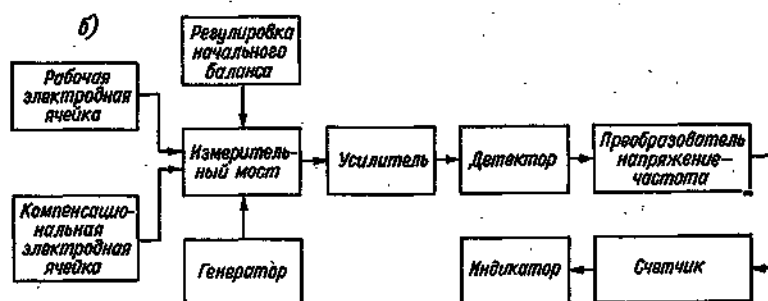
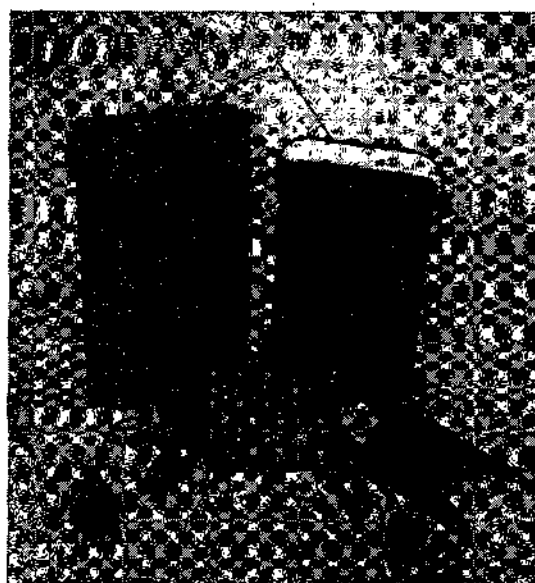


Рис. 4.22. Аппаратура «Поток» для измерения расходов воды электролитическим способом.

а — комплект аппаратуры: 1 — измеритель относительной электрической проводимости воды, 2 — первичные измерительные преобразователи (ПИПы), 3 — ведра; б — структурная схема измерителя приращения относительной электрической проводимости воды.

предназначенный для запитки моста; в) детектор; г) преобразователь напряжения в частоту; д) счетчик импульсов; е) цифровой индикатор числа импульсов (рис. 4.22 б). Питание автономное, осуществляется от девяти сухих батарей типа «Марс» (элемент 375).

Прибор работает в двух режимах: «Баланс» и «Измерение». В режиме «Баланс» определяются частоты N_p , соответствующие относительному приращению электрической проводимости разбавленного раствора (числитель формулы); в режиме «Измерение» производится измерение и автоматическое суммирование уменьшенных в 16 раз частот, т. е. определяется суммарная за время измерения частота N_{Σ} . Применительно к информации, получаемой с помощью прибора «Поток», формула (4.30) преобразуется к следующему рабочему виду:

$$Q = \frac{1}{16 \cdot 10^3} \frac{V_p}{\varepsilon} \frac{N_p'}{N_{\Sigma}}. \quad (4.31)$$

Объем исходного раствора электролита подставляется в формулу в литрах, а расход воды получают в м³/с.

При измерении расхода воды необходимо придерживаться описанной ниже последовательности операций.

1. Ориентировочно оценив расход воды в реке, приготавливают раствор поваренной соли в мерном баке № 1. Количество соли назначается из расчета 100—150 г на 1 м³/с расхода воды. Отбрав в бутылку 50—100 мл раствора для последующего определения его концентрации, фиксируют объем раствора в мерном баке V_p , выдавливая его излишки введением до упора в бак поршневой крышки.

2. Подключив ПИПы к прибору, забрасывают один из них на стрежень потока в створе измерения, а второй помещают в бак № 2, заполненный речной водой и установленный в прибрежной (но проточной) зоне потока так, чтобы в него не заплескивалась вода. ПИП, находящийся в потоке, называют рабочим (ППР), а помещенный в бак — контрольным (ППК). При этом безразлично, в каком качестве используется тот или иной ПИП в данном измерении.

Через 5—10 мин включают прибор и в режиме «Баланс» приступают к его балансировке, добиваясь вращением ручек потенциометра показаний частоты $f_{0\text{н}} = (1000 \pm 1)$ Гц.

3. В намеченное время (или по сигналу с измерительного створа) на пусковом растворе по возможности ближе к стрежню потока производится выпуск солевого раствора. Одновременно с этим включают прибор в режиме «Баланс», и едва начнется отклонение его показаний от балансовых значений, нажав кнопку «Измерение», переводят работу прибора в режим «Измерение» и включают секундомер. После того как показания на табло, достигнув некоторого значения, практически перестанут увеличиваться, делают отсчет суммарной частоты N_{Σ} , включают секундомер и вновь, переводя работу прибора в режим «Баланс», отсчи-

тывают значение частоты $f_{ок}$. Если разность балансовых отсчетов до измерения $f_{он}$ и после него $f_{ок}$ менее 8 Гц, суммарная частота $N_{и}$ определена надежно с учетом того, что в нее должна быть введена поправка

$$\Delta N = \frac{1000 - 0,5(f_{он} - f_{ок})}{16} T, \quad (4.32)$$

где T — отсчет по секундомеру (продолжительность работы прибора в режиме «Измерение»). При разности $f_{он} - f_{ок}$ более 8 Гц измерение должно быть забраковано и повторено.

4. Следующая операция — определение концентрации исходного раствора электролита. В мерный бак № 2 с точно фиксированным объемом речной воды $V_{в}$ помещают ППР, а ППК устанавливают в поток. После этого прибор балансируют, добиваясь показаний частоты (1000 ± 1) Гц. Из бутылки с пробой исходного раствора отбирают пипеткой необходимый для разбавления объем $\Delta V_{р}$ и вводят в мерный бак. Учитывая, что $V_{в} \gg \Delta V_{р}$, коэффициент разбавления подсчитывается как $\epsilon = \Delta V_{р}/V_{в}$. Разбавленный раствор тщательно перемешивается до тех пор, пока показания на табло прибора не стабилизируются. Частота, соответствующая относительному значению приращения электрической проводимости разбавленного раствора, подсчитывается по формуле $N'_{р} = f'_{р} - 1000$ (где $f'_{р}$ — показание прибора).

Учитывая, что от точности выполнения этой операции существенно зависит точность определения расхода воды, ее необходимо повторить дважды.

5. Расход воды вычисляют подстановкой в формулу (4.31) полученных значений ϵ , $V_{р}$, $N'_{р}$ и $N_{и}$ (с учетом поправки).

Чувствительность прибора «Поток» очень велика. Он реагирует на незначительные колебания естественной электрической проводимости и на изменения температуры воды даже на сотые доли градуса. Поэтому измерения желательно производить в первую половину дня, когда температурный градиент воды незначителен, а время измерения сокращать до минимума, не задерживая раствор после балансировки прибора. При определенном навыке на измерение расхода обычно затрачивается не более 20—30 мин.

4.6. Измерение расходов воды на малых реках

Применение метода «скорость—площадь» на малых водотоках сопряжено с рядом трудностей и помех, связанных с неустойчивостью дна и берегов, значительной косоуструйностью, малыми глубинами, а также большой изменчивостью расходов воды во времени, требующей повышенной частоты их измерений. В этих условиях наилучшие результаты дает применение контрольных русел и гидрологических расходомеров. На особо малых водотоках иногда прибегают к объемному способу измерения расходов воды.

4.6.1. Упорядоченные и контрольные русла

Упорядочение естественных русел включает простейшие виды работ по их спрямлению, планированию и закреплению берегов, расчистке дна от камней, топляков и мусора. Если же эти меры не дают эффекта, приходится создавать искусственные русла, чтобы сосредоточить поток в одном устойчивом ложе.

В реках, меженные расходы которых не превышают $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, следует производить канализацию русел путем придания

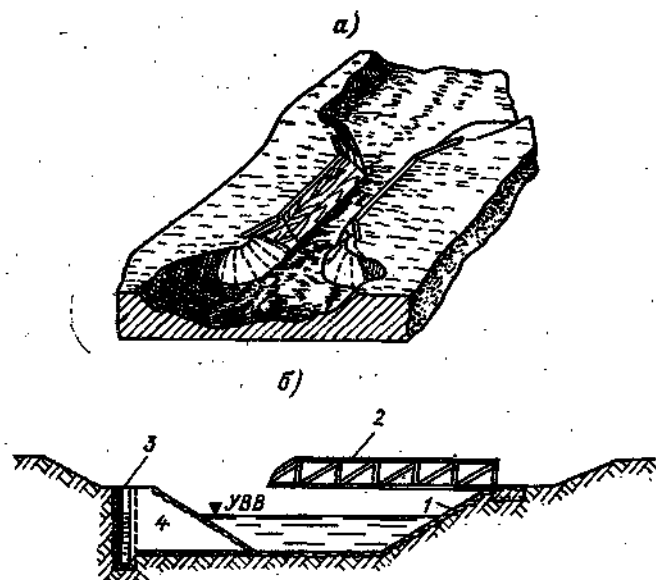


Рис. 4.23. Сужение русла (а) и контрольное русло (б).

1 — бетонный пояс, 2 — гидрометрический мостик, 3 — колодец самописца, 4 — соединительная труба колодца.

им трапецеидального сечения с крутизной откосов, близкой к естественной. Для контроля за заносимостью созданного канала в дно реки по оси потока забивается несколько сваек. В дальнейшем по ним производится периодическая расчистка дна.

Увеличение скоростей течения и глубин на участке гидроствора обеспечивается сужением русла (рис. 4.23 а). В паводок, однако, в этом месте может происходить размыв дна. В связи с этим здесь обычно располагается только меженный створ, паводочные же расходы воды измеряются выше или ниже суженного участка.

В качестве временного мероприятия, рассчитанного на увеличение глубин на участке, может служить создание подпора путем устройства ниже гидрометрического створа фильтрующей перемычки из каменной наброски. Во избежание быстрого

заиления верхнего бьефа к этому способу прибегают главным образом на реках с небольшим содержанием наносов.

Более совершенные условия для измерения расходов воды достигаются созданием искусственного контрольного русла путем закрепления каменной отмосткой или бетонированием (рис. 4.23 б). Ширина облицовочной полосы русла составляет обычно 0,2 ширины реки (но не менее 2 м). В наиболее пониженной части контрольного русла иногда устраивается небольшая треугольная или трапециевидная канавка. При малых расходах воды стекающую по ней воду легко учитывать объемным способом.

Контрольные русла оборудуются свайным или реечным постом и самописцем уровня воды. Расходы воды измеряются с гидрометрического мостика вертушкой, закрепленной на штанге. Количество измерений должно быть достаточным для обоснования кривой расходов $Q(H)$. На участках рек с большими уклонами (более 3—4 %) или в местах резкого перелома продольного профиля контрольное русло приобретает свойства гидрологического расходомера с устойчивой связью между расходом и уровнем воды. Поэтому получив для него зависимость $Q(H)$ в первые годы после сооружения, в дальнейшем можно ограничиться лишь периодическими (контрольными) измерениями расходов воды.

4.6.2. Гидрологические расходомеры

Гидрологическими расходомерами принято называть водосливы и лотки, применяемые на реках и каналах. Эти сооружения позволяют измерять расходы воды со средней квадратической погрешностью 2—5 %. Важное значение при этом имеет простота измерений; расход воды определяется по гидравлическим зависимостям на основании измерения только уровня (напора) воды. Последнее обстоятельство дает возможность использовать гидрологические расходомеры для автоматизации учета стока малых рек, так как в сочетании с самописцами уровня воды они обеспечивают непрерывную фиксацию расходов воды.

Водослив (рис. 4.24) представляет собой преграду для движения потока в виде вертикальной стенки или порога, через которые переливается вода. В зависимости от толщины этой преграды и формы ее продольного профиля выделяют водосливы с тонкой стенкой, широким порогом и порогом практического профиля. По очертаниям водосливного отверстия водосливы подразделяются на прямоугольные, треугольные, трапециевидные, радиальные, параболические и т. п.

Гидрометрический лоток (рис. 4.25) — сужающее устройство, в горловине которого устанавливается критический режим течения.

Области потока, расположенные непосредственно выше и ниже водосливов или лотков, называются соответственно верхним и нижним бьефами.



Рис. 4.24. Гидрологический пост, оборудованный водосливом с тонкой стенкой и гидрометрическим мостиком.

Мерой расхода воды через водослив или лоток служит напор воды: для водосливов и лотков с донным и донно-боковым сжатием он равен превышению уровня воды верхнего бьефа над гребнем водосливной стенки или порога; для лотков, у которых горловина образована сжатием боковых стенок, напором является глубина воды над горизонтальным дном лотка на подходе к горловине.

Пропускная способность расходомера определяется при незатопленном истечении. Для характеристики режима истечения служит коэффициент подтопления η , равный отношению превышения уровня нижнего бьефа над гребнем порога водослива или дном горловины лотка к напору воды. Водосливы и лотки как гидрометрические сооружения обязательно оборуду-



Рис. 4.25. Общий вид лотка Паршала на гидрологическом посту.

ются приборами для регистрации уровней воды (крючковой или игольчатой рейкой).

При выборе гидрологического расходомера рекомендуется отдавать предпочтение стандартным водосливам и лоткам, удовлетворяющим «Правилам измерения расходов жидкости при помощи стандартных водосливов и лотков. РДП—97» (Изд-во стандартов, Москва, 1977). Рассмотрим некоторые типы расходомеров.

Треугольный водослив с тонкой стенкой (рис. 4.26) рекомендуется применять при больших колебаниях расхода воды. Наибо-

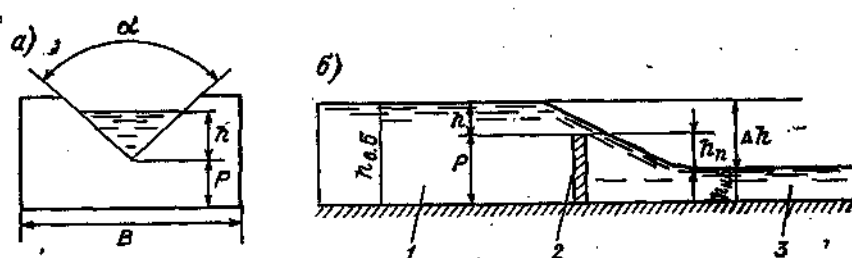


Рис. 4.26. Треугольный водослив с тонкой стенкой.

a — вид спереди, *b* — продольный разрез.

1 — подводящий канал (верхний бьеф); 2 — стенка водослива; 3 — нижний бьеф.

лее распространены водосливы с центральным углом $\alpha = 90^\circ$. Его биссектриса при установке должна оставаться вертикальной.

Рабочая формула водослива для расхода воды в $\text{м}^3/\text{с}$ имеет вид

$$Q = 2,361 c \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h_0^{3/2}, \quad (4.33)$$

где $h_0 = h + \Delta h$ — приведенный напор над вершиной центрального угла в створе измерения уровня; для $\alpha = 90^\circ$ поправка на вязкость жидкости $\Delta h = 0,85$ мм; c — коэффициент расхода, зависящий от угла α и соотношения высоты порога P , ширины подводящего канала B и напора h . При $P/B \leq 0,2$, $h/P \leq 0,8$ и $\alpha = 90^\circ$ коэффициент расхода принимает значение $c = 0,578$. Минимальный напор, ниже которого наблюдается прилипание струи к стенке водослива, $h_{\min} = 0,05$ м; максимальный напор следует принимать $h_{\max} = 0,6$ м.

Расстояние от стенки водослива до створа измерения напора должно составлять $l = 3h_{\max}$.

Диапазон измеряемых расходов — от 0,001 до 0,200 $\text{м}^3/\text{с}$.

Трапецидальный водослив с тонкой стенкой (рис. 4.27) удобен для установки в каналах с пологими откосами. Для земляных русел предназначен водослив с углом наклона боковых

граней $\alpha=45^\circ$, $\operatorname{tg} \alpha=1$ (водослив САНИИРИ). Расходы воды через такой водослив рассчитываются по формуле

$$Q = 1,86 c_f b_0 h^{3/2}, \quad (4.34)$$

где

$$c_f = (b_0 + h)/(b_0 + 0,25h).$$

С помощью больших трапецидальных водосливов (при ширине понизу до 2 м) могут быть измерены расходы до 10 м³/с.

Водосливы с тонкой стенкой обеспечивают достаточно высокую точность измерения расходов воды (средняя квадратическая погрешность составляет 1—2,5 %). Недостаток состоит в том, что они не приспособлены к пропуску влекомых наносов. Чтобы избежать занесения верхнего бьефа, иногда устраивают водосливы

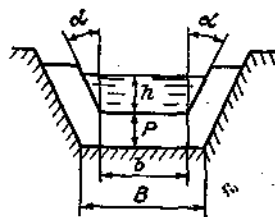


Рис. 4.27. Трапецидальный водослив с тонкой стенкой.

с подвижной стенкой, которая при подъеме образует донную щель для пропуска твердых частиц.

Занесение верхнего бьефа приводит к увеличению скорости подхода воды к водосливу, изменению превышения гребня над дном подводящего канала и в конечном итоге к нарушению однозначной связи между напором и расходами воды. В отличие от водосливов с тонкой стенкой, водосливы практического профиля и лотки не препятствуют транспорту наносов. Рассмотрим некоторые из этих типов расходомеров.

Водослив с порогом треугольного профиля конструкции Крампа образован пересечением двух граней — верховой с обратным уклоном 1:2 и низовой — с прямым уклоном 1:5 (рис. 4.28). Водослив применяется в относительно широких руслах ($B \geq 2h$) при сравнительно малом количестве наносов. Минимальные значения параметров водослива должны быть: $h_{\min}=0,05$ м; $P_{\min}=0,1$ м; $b_{\min}=0,3$ м; $h/P \leq 0,3$. Незатопленное истечение обеспечивается при $\eta \leq 0,75$. Расход воды в м³/с определяется по формуле

$$Q = 1,96 c_v b h^{3/4}. \quad (4.35)$$

Коэффициент скорости подхода c_v зависит от соотношения площади поперечного сечения подводящего канала и водосливного отверстия. Ориентировочно значения составляют:

c_v	1,003	1,010	1,020	1,039	1,057	1,098	1,146	1,217
$h/(h+P)$. .	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Водосливы Крампа в зависимости от размеров могут применяться для измерения расходов воды от 3 л/с до 50 м³/с и более.

Расходомерный порог САНИИРИ предназначен для применения в каналах трапецидального сечения с большим количеством взвешенных наносов (до 40—50 г/л). Размеры порога (рис. 4.29) должны составлять: $0,3 < b_0 < 3$ м, $P \geq 0,15$ м, $h_{\min} = 0,08$ м; $h/P \leq 2$, $b_0/P \geq 2$. Свободное истечение при $\eta \leq 0,8$.

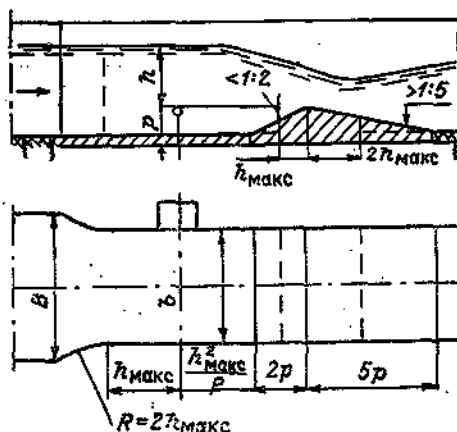


Рис. 4.28. Водослив Крампа с порогом треугольного профиля.

Расчетная формула для расхода воды через порог представляется выражением

$$Q = c[(b_0 + \operatorname{tg} \alpha) h] \sqrt{2gh^{3/2}}. \quad (4.36)$$

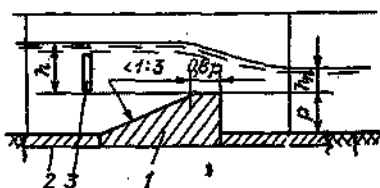


Рис. 4.29. Расходомерный порог САНИИРИ.

1 — порог, 2 — подводящий канал, 3 — щель для соединения подводящего канала с успокоительным колодцем СУВ

Коэффициент расхода c зависит от h/P ; его характерные значения:

h/P	0,1	0,25	0,50	0,75	0,85
c	0,374	0,380	0,390	0,400	0,404

Точность измерения водосливами практического профиля зависит от погрешности определения коэффициента расхода: ее среднее квадратическое значение составляет 2 % для треугольного профиля и 4 % для порога САНИИРИ.

Диапазон измерения расходов воды в зависимости от размеров порога составляет 0,1—30 м³/с.

Лоток Вентури выполняется двух типов: сжатие потока боковыми стенками при горизонтальном дне и сжатие потока вследствие

вие подъема дна при параллельных боковых стенках. Для измерения расходов взвесенесущих жидкостей применяются лотки первого типа (рис. 4.30).

Лоток Вентури состоит из входной части, конфузора (сужения), горловины и диффузора (расширения).

Длина горловины $l=1,5 h_{\text{макс}}$, причем максимальный напор над дном горловины должен быть не более 1,8 м, минимальный $h_{\text{мин}}=0,05$ м.

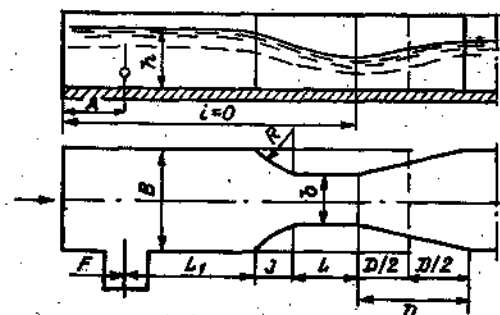


Рис. 4.30. Лоток Вентури.

Рабочая формула для определения расхода через лоток Вентури представляется в следующем виде:

$$Q = 1,705 c_e c_v b h^{3/2}, \quad (4.37)$$

где c_e — коэффициент истечения, зависящий от напора h и размеров горловины:

$$c_e = \left(\frac{h - 0,003l}{b + 0,004l} \frac{b}{h} \right)^{1/2}.$$

Коэффициент c_v , учитывающий влияние скорости подхода, зависит от степени сжатия потока горловиной лотка и определяется из уравнения

$$\left(\frac{2}{3\sqrt{3}} - \frac{b}{B} \right)^2 c_v^2 - c_v^{3,67} + 1 = 0.$$

В Правилах РДП 99—77 приведены таблицы для определения c_e и c_v .

Диапазон расходов воды, измеряемых лотками Вентури, при ширине горловины $b=0,25$ м, составляет 4—300 л/с, при $b=3,6$ составляет 0,08—15,0 м³/с. Средняя квадратическая погрешность измерения расхода воды 4—5 %.

Лоток Паршала — один из наиболее распространенных типов расходомеров, применяемых на мелиоративных каналах и естественных водотоках (рис. 4.31). Лоток состоит из приемной сужаю-

шей части, горловины с параллельными вертикальными стенками и дном, имеющим уклон 3:8 в сторону движения воды отводящего раструба.

Эмпирическая формула для вычисления расхода воды через лоток достаточно сложна, но зато она не требует обращения к таблице коэффициентов:

$$Q = 0,372b (3,278h)^n, \quad (4.38)$$

где $n = 1,569 b^{0,026}$.

Средняя квадратическая погрешность определения расхода воды составляет 4 %.

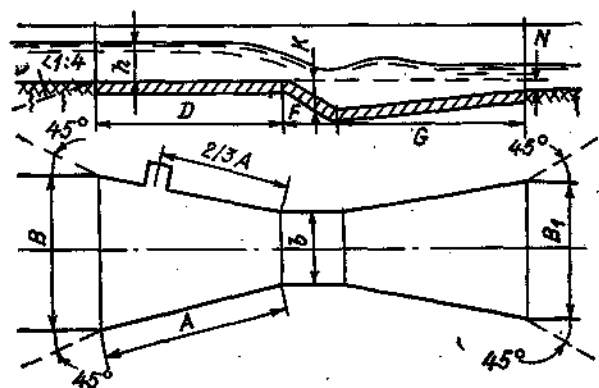


Рис. 4.31. Лоток Паршала.

Для надежного действия расходомеров и сохранения стандартной точности измерений необходимо соблюдать ряд условий.

1. Русло реки на участке установки расходомера канализируется таким образом, чтобы: а) ось канала строго совпадала с осью расходомера; б) длина прямолинейной части подводящего канала при его ширине B , равной ширине гребня водослива b , составляла не менее $10B$, а при $B > b$ — не менее $5B$; в) сопряжение подводящего канала с естественным руслом исключало сток воды в обход расходомера.

2. Режим течения в подводящем канале должен быть спокойным.

3. Режим истечения должен оставаться незатопленным.

4. Следует избегать несвободного истечения воды через водосливы, заключающегося в подсосе (прижиме) или даже «прилипанию» струи к водосливной стенке. Причиной этого могут служить: возникновение вакуума под струей воды, недостаточная высота порога или малые напоры воды. Первая из этих причин устраняется подведением атмосферного воздуха под струю воды путем создания отверстий в стенках отводящего канала, а две

другие — соответствующим подбором параметров конструкции.

5. При сооружении расходомеров должны тщательно соблюдаться заданные размеры и геометрические формы отдельных частей: стенки водосливов должны быть строго вертикальными, кромка водосливного выреза заостряется до толщины 1—2 мм путем снятия фаски со стороны нижнего бьефа; отклонения от проектных значений в размерах горловины лотков не должны превышать 0,2 %.

6. Напор воды должен измеряться вне зоны спада кривой свободной поверхности воды на подходе к участку сжатия. Для водосливов с тонкой стенкой, например, этому условию удовлетворяет размещение уровнемера на расстоянии от водосливной стенки, равном трем максимальным напорам. Измерять уровень необходимо в успокоительных колодцах или нишах, соединенных с подводящим каналом или проточной частью лотка специальными отверстиями или щелями.

4.6.3. Определение расходов воды объемным способом

Принцип определения расходов воды объемным способом весьма прост: если в какой-либо емкости, называемой мерным сосудом, за время t накапливается объем V , то расход воды выражается соотношением

$$Q = V/t.$$

Естественно, измеряемые расходы должны быть сравнительно малы, чтобы не потребовались слишком большие мерные сосуды. Их вместимость V должна подбираться в зависимости от времени наполнения t_0 , от которого главным образом зависит точность измерения. Для определения этого времени В. Д. Быковым и А. В. Васильевым рекомендована формула

$$t_0 = 100 \Delta t / (\tilde{\sigma}_Q - \delta V),$$

где Δt — погрешность отсчета времени, с; $\tilde{\sigma}_Q$ — требуемая погрешность измерения расхода воды; δV — относительная погрешность определения объема мерного сосуда, %.

При $\Delta t = 0,2$ с, $\delta V = 0,1$ %, $\tilde{\sigma}_Q = 2$ %, получим $t_0 = 100 \cdot 0,2 : (2 - 0,1) = 11$ с. И, следовательно, при ожидаемых значениях расхода Q_0 необходимый объем мерного сосуда должен составлять $V = 11Q_0$.

Объемный способ удобен для измерения дебита (расходов воды), ключей и родников. Этот способ играет роль рабочего эталона при градуировке лотков и водосливов, так как они позволяют обеспечить необходимый класс точности измерений, удовлетворяющий требованиям метрологической аттестации средств измерений.

4.7. Оценка погрешности, текущий контроль и оптимизация измерений расходов воды на гидрологических постах

4.7.1. Погрешность измерения расходов воды

Обратимся прежде всего к измерениям расходов воды вертушкой. Существуют противоречивые представления о возможной точности этого метода. Так, русский гидротехник Д. Д. Гнусин писал: «Как бы не были тщательно деланы измерения при самых даже благоприятных обстоятельствах никак нельзя поручиться за точность результата большую чем 5—10 % и даже 15 %». Наряду с этим многие исследователи погрешность измерений расходов воды вертушками оценивали долями процента.

Каким бы методом не определялся расход воды, он получается как результат косвенных измерений. И значит, его погрешность представляется совокупностью частных погрешностей в соответствии с принципами, изложенными во «Введении». Структура же самих формул для оценки средней квадратической погрешности зависит от аналитической формы модели расхода воды.

При вертикальной дискретизации модели в предположении о взаимной независимости частных погрешностей формула (7) конкретизируется следующим образом:

$$\tilde{\sigma}_Q = \left[\frac{\beta}{N} (\tilde{\sigma}_{f_s}^2 + \tilde{\sigma}_{v_s}^2) \right], \quad (4.39)$$

где $\tilde{\sigma}_{f_s}$ и $\tilde{\sigma}_{v_s}$ — относительные погрешности измерения соответственно площадей отсеков между скоростными вертикалями и средних скоростей потока в этих отсеках; β — метрологический параметр, зависящий от гидравлической структуры потока и степени дискретизации измерений:

$$\beta = N \sum_{s=1}^N q_s^2 / Q^2. \quad (4.40)$$

При равномерном размещении скоростных вертикалей по ширине потока в прямоугольном русле $\beta=1$, речном беспойменном $\beta=1,2 \div 1,8$, при наличии пойм $1,8 < \beta < 3,0$.

Если отсеки между скоростными вертикалями пропускают равные частичные расходы q_s , то из (4.13) устанавливается наименьшее значение $\beta=1$, которое соответствует и наименьшей погрешности $\tilde{\sigma}_Q$. Вот почему рекомендуется размещать скоростные вертикали так, чтобы отсеки между ними пропускали приблизительно равные доли расхода воды.

Средняя квадратическая погрешность определения площади отсеков зависит от инструментальных погрешностей, применяемых для промеров приборов (наметок, лотов, эхолотов), и надежности геодезической основы гидрометрических работ. Погрешности

в определении расстояний от постоянного начала и ширины отсеков, как правило, взаимно компенсируются по знаку и значению и поэтому не оказывают заметного влияния на точность измерения f_s . Определенную погрешность в значение f_s вносят отклонения промерного судна от гидроствора, составляющие источник так называемых морфометрических погрешностей. Основным же фактор, определяющий точность измерения площади поперечного сечения русла, — количество промерных вертикалей. Для оценки $\tilde{\sigma}_{f_s}$ служит формула (2.9).

Решающее влияние на точность определения расхода воды оказывают погрешности измерения средних скоростей на вертикалях $\tilde{\sigma}_v$ и осреднения по отсеку $\tilde{\sigma}_{v_s}$.

Оценка погрешности $\tilde{\sigma}_v$ производится по формуле (3.14) в зависимости от числа точек измерения скорости на вертикали с учетом пульсационной и инструментальной составляющих. В случае интегрирования скоростей по вертикали погрешность $\tilde{\sigma}_v$ оценивается выражением (3.15). Суммарная средняя квадратическая погрешность определения средней скорости в отсеке представляется следующим образом:

$$\tilde{\sigma}_{v_s} = \left[\frac{5}{3} \tilde{\sigma}_w^2 \left(1 - 10 \frac{h_s}{b_s} + 50 \frac{h_s^2}{b_s^2} \right) + 0,5 \tilde{\sigma}_v^2 \right]^{1/2}. \quad (4.41)$$

При измерениях редко удается избежать систематических погрешностей. Их источники известны: сложность распределения скоростей течения по ширине и глубине, косоструйность и турбулентность потока, деформации и сложная морфология русла, зарастание и зашугованность живого сечения. Систематические составляющие совокупной погрешности измерения расходов воды должны определяться для конкретных условий створов. Возможные подходы к изучению систематических погрешностей и оценке их значений были приведены при описании методов измерения площадей живых сечений и скоростей течения. По данным отдела гидрометрии ГГИ, даже при благоприятных условиях измерения *систематические погрешности* Δ_Q могут достигать тех же значений, что и случайные, а совокупная погрешность составит

$$\tilde{\sigma}_{Q_{сов}} = 1,4 \sigma_Q.$$

Именно из этой характеристики точности следует исходить во всех тех случаях, когда важно не переоценить точность измерений расхода воды.

Приведенные выше формулы дают возможность определить *основную погрешность* измерения расхода воды — так называемую погрешность в нормальных для данного створа условиях при соблюдении регламентированной для него методики измерения. По оценкам А. В. Савельевой и Н. К. Сибиряковой (ГГИ), основная средняя квадратическая погрешность измерения расхода воды в % при 10 скоростных вертикалях лежит в пределах (чис-

литель характеризует измерения в половодье и паводки, знаменатель — в межень):

Беспойменное русло	3,0/2,0
Русло с поймой	5,0/—
Зарастающее русло	3,0/6,0
Ледостав	—/4,5
Горные реки с бурным течением и валунным руслом	5,0/6,5
Реки с интенсивными деформациями русла	8,5/5,0

Погрешность измерения расходов воды поплавками зависит от многих факторов: надежности геодезического обоснования и засечек поплавков, данных о площади живого сечения русла и в наибольшей мере точности определения переходного коэффициента K . По результатам многочисленных наблюдений, погрешность поплавочных измерений в одних и тех же условиях в 2,5—3 раза выше, чем основным способом вертушкой.

Не менее сложной представляется оценка точности авиационных поплавочных измерений расходов. Опыт показывает, что для средних условий, характеризующихся масштабами аэрофото съемки 1:5000, скоростью ветра 2—3 м/с, симметричным распределением кинематических и морфометрических характеристик относительно центра аэроснимка, определением коэффициента K по данным предшествующих наземных многоточечных измерений, средняя квадратическая погрешность определения расходов воды в основных руслах рек (скорость течения 1—2 м/с) составляет 7—8 %, на поймах (скорость течения 0,1—0,5 м/с) — 12—15 %.

Погрешность интеграционных и акустических методов измерения расходов воды определяется главным образом тем, насколько надежно устанавливается значение переходных коэффициентов K и K_v . При использовании для их определения расчетных формул средняя квадратическая погрешность измерения расхода воды достигает 10—15 %. В тех же случаях, когда эти коэффициенты уточнены по данным предшествующих многоточечных измерений, погрешность определения расхода снижается в 2—3 раза и приближается к погрешности основного способа.

Погрешность определения расхода воды по его репрезентативным элементам оценивается по рассеянию регрессионной связи $\hat{\sigma}_p$. Эта величина получается на ЭВМ одновременно с параметрами уравнения регрессии. Значения $\hat{\sigma}_p$ обычно находятся в пределах 10—12 %.

Точность метода смещения индикатора существенно зависит от условий перемешивания индикатора и гидравлично-морфометрических особенностей участка измерения. Из погрешностей

технологии измерения заметное влияние может оказать погрешность, связанная с определением концентрации исходного раствора. Случайная средняя квадратическая погрешность измерения, обусловленная указанными причинами, обычно составляет около 15 %.

Высокую точность измерения расходов воды обеспечивают гидрологические расходомеры. При соблюдении требований, предъявляемых к их установке и эксплуатации, средняя квадратическая погрешность измерения обычно не превышает 3—5 %.

Приведенные оценки относятся к так называемым основным погрешностям, которые характерны для нормальных условий измерения и соблюдения установленных методических требований. Значения основных погрешностей должны быть установлены для каждого поста в зависимости от его оснащения и принятой методики измерений, о чем должны быть произведены записи в соответствующих разделах «Технического дела».

4.7.2. Текущий контроль измерений расхода воды

Оценки основных погрешностей служат в качестве метрологического показателя точности наблюдений на посту и для текущего контроля измерений расходов воды. Чтобы такой контроль был возможен, кроме установления основных погрешностей для каждого поста, должны быть построены кривые расходов $Q(H)$, а также его элементов $F(H)$ и $v_{cp}(H)$ по данным предшествующих наблюдений, если существуют такие достаточно тесные связи.

После каждого измерения расхода воды определяется, насколько (в %) его значение отклоняется от кривой $Q(H)$. Если это отклонение $\tilde{q}$ лежит в пределах доверительного интервала погрешности с вероятностью не превышения, например $P=95\%$, т. е.

$$|\tilde{q}| \leq 1,96\tilde{\sigma}_{Q_0},$$

(где $\tilde{\sigma}_{Q_0}$ — основная погрешность), то результат измерения признается достоверным. В противном случае необходимо попытаться установить причину отклонения: является ли оно результатом нарушения методики и правил измерения или следствием объективных изменений условий протекания потока. В первом случае измеренный расход должен быть отбракован, а во втором — принят во внимание как свидетельство происходящего изменения пропускной способности русла. Так, при размыве или намыве дна наблюдается резкое отклонение точек в поле $F=f(H)$, а при появлении переменного подпора увеличивается рассеяние связи $v_{cp}=f(H)$. В этом случае следует произвести внеочередное измерение расхода, чтобы уверенно зафиксировать наметившуюся тенденцию в динамике русловых и гидравлических условий.

4.7.3. Выбор рациональных методов и оптимизация измерений расходов воды

Как ни многообразны различные возможности определения расходов воды в открытых руслах, наиболее распространенными на гидрологической сети остаются вертушечные разновидности метода «скорость—площадь». Они достаточно точны, приспособлены к самым разнообразным условиям режима рек и каналов, экономичны и не требуют сложного оборудования. Комплекс измерений достаточно многообразен и наряду с многоточечным (детальным) включает ускоренные и сокращенные способы. Массовые измерения расходов воды на гидрологической сети производятся основным (двухточечным) способом. В соответствии с действующими Наставлениями переход от детального способа к основному допускается при условии, что получаемые значения расходов различаются не более чем на $\pm 3\%$.

Основной недостаток измерений вертушками — сравнительно большие затраты времени на их выполнение. В условиях изменяющегося гидравлического режима это приводит к увеличению погрешности измерения расходов воды. Следовательно, ускорение измерений уже заключают в себе возможность повышения их точности. Но, с другой стороны, при сокращении продолжительности измерения снижается эффект осреднения турбулентных пульсаций скорости и в результате увеличивается погрешность получаемых данных. Так, естественно, возникает необходимость оптимизировать время измерений расхода воды в каждом конкретном створе.

Очевидно, минимальная продолжительность измерения расхода воды не может быть меньше того времени, которое требуется для определения скоростей в точках при достаточной выдержке вертушки (60—100 с) или для интеграции скорости по ширине русла. Верхний предел времени измерения расходов воды устанавливается исходя из следующих соображений.

При монотонном изменении водности слишком большие затраты времени на измерения приводят к систематическим завышениям или занижениям расхода воды из-за перераспределения элементарных расходов соответственно изменяющимся глубинам на вертикали (рис. 4.32). Чтобы возникающая при этом

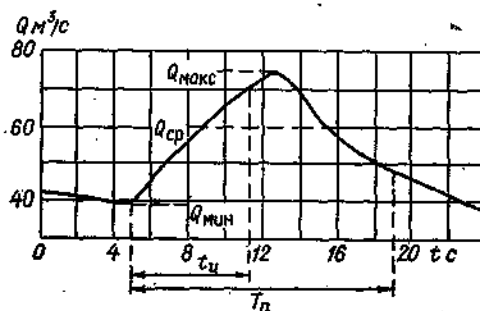


Рис. 4.32. Гидрограф попуска на р. Тверце, зафиксированный экспедицией ГГИ 15.08.59 г.

погрешность не превышает допустимой δ_d , продолжительность измерения должна составлять

$$T_n \leq 0,7 \delta_d h \varphi / H'_t (\varphi - 1), \quad (4.42)$$

где h — средняя глубина потока; φ — коэффициент полноты сечения; $H'_t = \Delta H / T_{nc}$ — интенсивность подъема (спада) уровня.

При немонотонном изменении уровня происходит занижение или завышение расхода воды в результате временного сглаживания гидрографа, при этом значения расходов занижаются на его пике и завышаются в нижнем положении. В этом случае продолжительность измерения ограничивается условием

$$T_n \leq 2,45 T_n \sqrt{\alpha \tilde{a}} / \pi, \quad (4.43)$$

где T_n — период волны паводка (попуска). Коэффициент α зависит от фазы режима: для пика $\alpha = (1 + \tilde{a}) / \tilde{a}$, для спада $\alpha = (1 - \tilde{a}) / \tilde{a}$. Здесь $\tilde{a}$ — относительная величина, характеризующая амплитуду колебания водности (см. рис. 4.32):

$$\tilde{a} = 0,5 (Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_{\text{ср.}}$$

Установив оптимальное время T_n , выбирают подходящий метод измерения расходов воды. Из главы 4 видно, что комплекс этих методов достаточно многообразен уже теперь, а в будущем получит значительное пополнение (в частности, разрабатываются устройства для измерения скоростей течения радиолокационным, электромагнитным и другими способами).

Прежде всего следует более широко применять интеграцию скоростей по вертикали: при достаточной для практики точности 5—6 % она обеспечивает ускорение измерений в 1,3—1,4 раза по сравнению с основным методом. В перспективе после разработки необходимых устройств наиболее эффективным представляется измерение расходов воды с движущегося судна (на больших и средних реках). В зарегулированных бьефах при неустановившемся движении воды должны применяться ультразвуковые установки.

Имеется опыт измерения расходов воды с автодорожных мостов. Он окажется особенно эффективным, если использовать для этой цели автомобиль, снабженный подъемным оборудованием и комплектом соответствующих приборов. При измерении расходов воды предпочтение отдается тому мосту, ось которого расположена нормально к течению реки. В тех же мостовых отверстиях, где наблюдается значительная косоуструйность и возмущения потока, измерения производить не следует. Более удобно измерять расходы воды с низовой стороны моста.

По мере поступления на гидрологическую сеть автотранспорта и судов окажется возможным перейти на маршрутное обслуживание постов разъездными гидрометрическими бригадами (РГБ). Такая форма организации наблюдений проверялась в условиях

БССР. В малообжитых районах, как показывает опыт Северного УГКС, может быть создана аэрогидрометрическая сеть для измерения расходов воды с самолета. Эти мероприятия в комплексе с автоматизацией уровней и других прямых измерений со временем позволят обойтись без наблюдателей постов и, следовательно, высвободить для народного хозяйства значительные трудовые ресурсы.

4.8. Измерение расходов воды на гидроузлах и каналах

4.8.1. Определение расходов воды на гидроэлектростанциях

Створы гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроузлов занимают ключевое положение в системе гидрологических наблюдений на реках. На ГЭС и гидроузлах существуют все необходимые технические предпосылки для непрерывных и высокоточных измерений расходов воды. Применяемые при этом методы и средства зависят от компоновки и конструктивных особенностей сооружений.

Гидроузлы представляют собой комплекс сооружений, образующих напорный фронт (плотины, сопрягающие дамбы), водосбросов, ГЭС, судо-

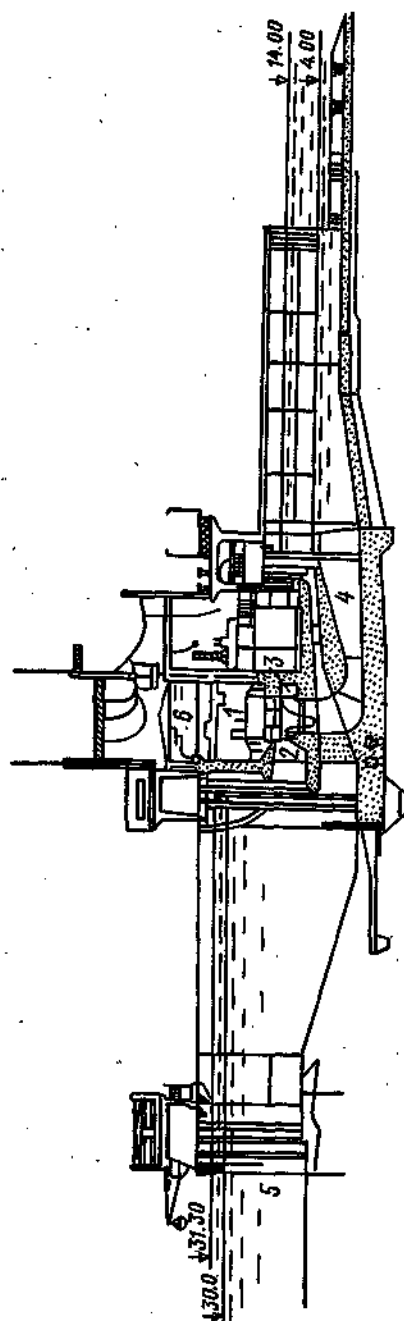


Рис. 4.33. Поперечный разрез здания и гидроагрегата низконапорной ГЭС.

1 — турбинный гидроагрегат, 2 — обратный клапан турбины, 3 — турбинная камера, 4 — всасывающая труба, 5 — сооружающее сооружение, 6 — машинный зал.

ходных шлюзов, водозаборов и каналов, бревнопусков и рыбоходов. Каждый гидроагрегат ГЭС состоит из расположенных на одном валу турбины и генератора (рис. 4.33). Вспомогательное оборудование включает приборы и приспособления для управления работой турбин, электроаппаратуру и водомерные устройства.

Возможности для надежного учета стока на ГЭС и гидроузлах значительно выше, чем в русловых створах, поскольку развиваемая гидроагрегатами мощность служит эквивалентом расхода воды.

Мощность (кВт), или нагрузка, связана с расходом Q и напором H зависимостью

$$N = 9,81 \eta_{\text{кплд}} Q H, \quad (4.44)$$

где $\eta_{\text{кплд}}$ — коэффициент полезного действия гидроагрегата; Q в $\text{м}^3/\text{с}$, H в метрах.

Для определения расходов воды через турбинные гидроагрегаты могут быть использованы:

- 1) эксплуатационные характеристики гидротурбин в сочетании с показаниями уровнемеров и счетчиков выработанной энергии;
- 2) специальные расходомерные устройства.

Расходные характеристики представляются в виде зависимости $Q = f(N, H)$, которая первоначально устанавливается по результатам испытания моделей гидротурбин, а затем, после строительства ГЭС, уточняется по натурным данным (рис. 4.34). На-

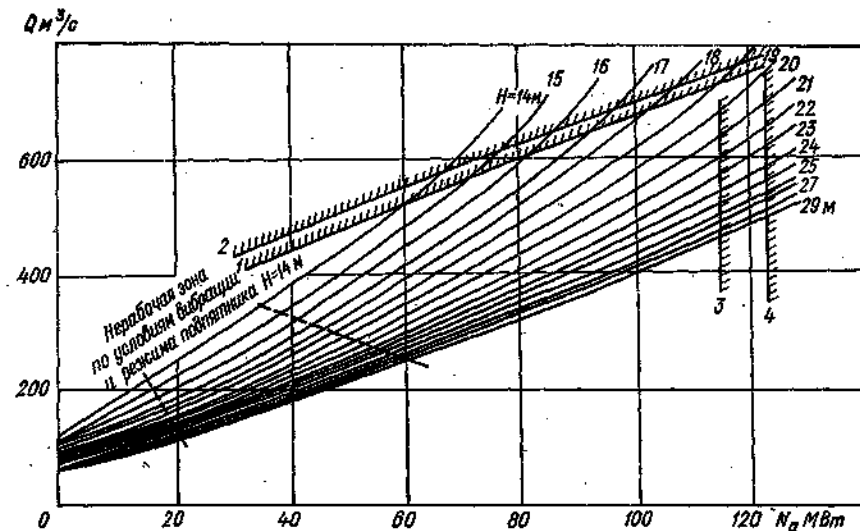


Рис. 4.34. Расходная характеристика гидроагрегатов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина.

1 — линия ограничения по турбине $a_0=100\%$ при закрытой водосливной плотине; 2 — линия фактической предельной мощности при значительных холостых сбросах через водосливную плотину (по данным опыта эксплуатации); 3 — линия ограничения по генератору; 4 — линия ограничения по максимальной мощности турбины.

пор H обычно указывается в метрах, а мощность N — в мегаваттах (МВт) ($1 \text{ МВт} = 1000 \text{ кВт}$).

Методика учета стока на ГЭС зависит от конструктивных особенностей гидроагрегатов и режима их работы. Сток в створе ГЭС характеризуется средним суточным расходом воды $\bar{Q}_c$. Схема его вычисления наиболее проста на ГЭС, где не наблюдается значительных колебаний напоров и КПД. В этом случае ЕРВ может быть получен:

— по удельному расходу воды на основе зависимости

$$\bar{Q}_c = A q_{уд} / 86\,400, \quad (4.45)$$

где A — суточная выработка электроэнергии, кВт·ч; $q_{уд}$ — удельный расход в м³/с, затрачиваемый на выработку 1 кВт·ч (величина $q_{уд}$ известна для каждого гидроагрегата);

— по коэффициенту перехода от мощности к расходу воды

$$Q = k_i N, \quad (4.46)$$

причем значения k_i устанавливаются по i -м интервалам напоров:

$$k_i = 102 / (H \eta_{акпд}).$$

Однако простые схемы учета стока совершенно неприменимы при использовании ГЭС в пиковых режимах. Возникает необходимость в детальных определениях расходов воды через каждый агрегат по значениям мощности и напоров, осредненных за время его работы в генераторном режиме T_j (в часах)

$$Q = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^s Q_{ij} T_{ij}, \quad (4.47)$$

где индекс i означает станционный номер гидроагрегата.

Таким образом, уточнение данных о стоке достигается в результате многопозиционных трудоемких операций с графиками расходных характеристик и расчетов по формуле (4.47). Поэтому стремятся упростить вычисления. Так, вместо поагрегатного учета времени T_{ij} и расходов Q_{ij} прибегают к определению среднего для всех агрегатов расхода Q за суммарное время их работы в генераторном режиме при осредненных значениях мощности $N_{ср}$ и напора $H_{ср}$. Такая схема допустима лишь в случае линейной зависимости $Q(N, H)$. Фактически же она имеет более сложную форму и по этой причине возможны погрешности до 6—8 %.

Большие удобства представляет аналитическая форма расходной характеристики $Q(N, H)$

$$Q = [N_{ср} / (a_0 H_{ср}^{a_2})]^{a_1}. \quad (4.48)$$

Аппроксимация (4.48) осуществляется на ЭВМ по совокупности значений Q , N и H , снятых с кривых расходной характеристики гидроагрегата.

Пример. Волжская ГЭС им. В. И. Ленина. Гидроагрегат № 1.

График нагрузки и рабочие характеристики

Характеристика	Часы суток						За сутки
	0—5	5—7	7—9	9—11	11—21	21—24	
N_i МВт	0	90	108	104	100	60	93
H_i м	20,08	19,88	18,88	18,21	18,07	18,42	18,40
T_i ч	5,08	1,92	2	2	10	3	18,92

1. Средний суточный расход воды как средняя взвешенная величина по интервалам T (значения находят по кривым расходной характеристики для N_i и H_i):

$$Q = \frac{1}{24} \sum Q_i T_i = 461 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Параметры уравнения (4.46), установленные В. Л. Виноградовым (ГГИ):

$$a_0 = 0,0074; \quad a_1 = 1,02; \quad a_2 = 1,102.$$

2. Средний суточный расход воды по формуле (4.46) ($H_{\text{ср}} = 18,4$ м; $N_{\text{ср}} = 93,0$ МВт)

$$Q = \left(\frac{93,0}{0,0074 \cdot 18,4^{1,102}} \right)^{1/0,976} = 464 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Как видим, расчет расходов воды аналитическим способом с использованием осредненных за сутки значений $H_{\text{ср}}$ и $N_{\text{ср}}$ дает те же результаты, что и на основе графических связей $Q = f(N, H)$, но требует значительно меньших затрат времени.

При оценке точности учета стока через турбинные агрегаты различают следующие основные источники погрешностей:

- 1) осреднение напора во времени и погрешности измерения уровней верхнего и нижнего бьефа;
- 2) осреднение мощности во времени и неточность ее регистрации по приборам;
- 3) приближенность перехода от модельных характеристик пропускной способности к натурным;
- 4) использование характеристик комбинаторного режима при его фактическом несоблюдении для поворотно-лопастных турбин.

Статистические свойства возникающих при этом погрешностей различны: создаваемые последними двумя источниками принимают систематический характер (для отдельного агрегата), а в двух первых случаях погрешности отличаются более сложным характером.

Для исчерпывающей оценки надежности учета стока каждой конкретной ГЭС необходимо проверить соответствие модельных и действительных характеристик гидроагрегатов. Эта сложная задача решается посредством натурной градуировки ГЭС.

Во время пропуска паводков поворотно-лопастные турбины нередко работают при наибольшем развороте лопастей рабочих колес с отключенным комбинаторным устройством. Для определения расходов в таком режиме должны использоваться пропеллерные характеристики. Если этого не сделать, возникает погрешность δQ_k — занижение стока, составляющее 5—8 %, а иногда 12—15 %.

На горных реках наблюдается интенсивный износ турбин и резкое снижение КПД гидроагрегатов (до 15—17 % в год). Таким же оказывается занижение стока при несвоевременной корректировке используемых расчетных характеристик.

Методы учета стока на ГЭС регламентируются инструкциями и положениями Минэнерго СССР. При соблюдении содержащихся в них требований средняя квадратическая погрешность определения средних суточных расходов воды через гидроагрегаты, по оценкам А. С. Воробьева и В. С. Серкова (Союзтехэнерго), составляет 2—3 %.

4.8.2. Измерение расходов воды на водозаборных и сбросных сооружениях

Посредством водозаборных и сбросных сооружений осуществляется регулирование расходов воды в створах гидроузлов или изъятие стока для орошения и водоснабжения.

Водозаборы из реки (водоема) могут быть самотечными и с насосным водоподъемом. Самотечный водозабор возможен как из реки в естественном состоянии, так и непосредственно из верхнего бьефа подпорного сооружения (плотины).

На магистральных оросительных каналах наиболее распространены поверхностные шлюзы-регуляторы с плоскими и сегментными затворами. На каналах-распределителях чаще всего применяются трубчатые закрытые водовыпуски.

Водосбросные сооружения предназначены для пропуска излишнего паводочного стока через водохранилища, пропуска льда и леса.

Как водозаборные, так и водосбросные сооружения могут быть поверхностными и глубинными (донными) или совмещенными (рис. 4.35 и 4.36).

Учет воды на водопропускных сооружениях осуществляется тремя основными методами:

- 1) по гидравлическим характеристикам пропускной способности водозаборных и сбросных отверстий,
- 2) с применением расходомерных устройств,
- 3) русловым методом по связи измеренных расходов и уровней в подводящем или отводящем каналах.

Пропускная способность сооружений определяется гидравлической схемой истечения, конструктивными особенностями затворов и водосливного порога.

При свободном переливе через гребень с вертикальными боковыми стенками пропускная способность сооружения определяется по зависимости для истечения через водослив (см. рис. 4.35 Ia).

$$Q = cb \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (4.49)$$

где b — ширина водосливного отверстия; g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с; c — коэффициент расхода, зави-

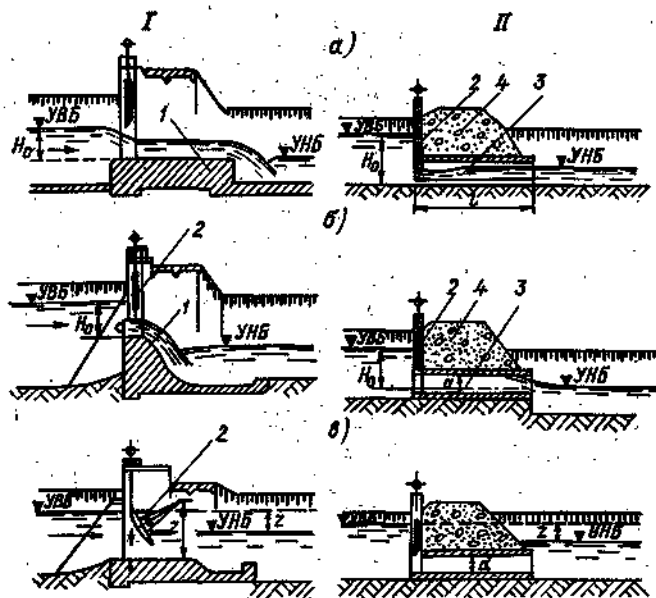


Рис. 4.35. Основные типы сооружений и схемы истечения.

I — открытые водовыпуски и шлюзы-регуляторы: а — свободный перелив через гребень (водослив); б — свободное истечение из-под затвора; в — затопленное истечение из-под затвора. II — трубчатые и глубинные водовыпуски: а — свободное истечение при неполном открытии отверстия; б — свободное истечение при полном открытии отверстия; в — затопленное истечение. 1 — водослив, 2 — регулирующее устройство (затвор), 3 — водопроводящая труба, 4 — насыпь. H_0 , Z — действующие напоры, a — высота открытия отверстия, d — высота (диаметр) трубы, R — радиус сегментного затвора, C — высота крепления опоры затвора над порогом, l — длина трубы.

сящий от конструкции водослива; H_0 — напор на пороге водослива с учетом скорости подхода

$$H_0 = H_n + \alpha v^2 / (2g)$$

(H_n — напор над порогом; $\alpha = 1,0 \div 1,1$).

Коэффициент c для каждого типа водослива устанавливается по таблице гидравлических справочников.

Истечение из-под затворов бывает:

— свободное, если уровень нижнего бьефа не влияет на пропуск расхода через отверстие (см. рис. 4.35 Ib и IIa, б);

— подтопленное, при котором уровень нижнего бьефа оказывает влияние на пропускную способность отверстия (см. рис. 4.35 Ia и IIa).

Расход воды при свободном истечении из-под затвора, находящегося над гребнем водослива практического профиля:

$$Q = \epsilon \varphi a b \sqrt{2g(H_0 - 0,5a)}, \quad (4.50)$$

где a — высота открытия отверстия; ϵ — коэффициент вертикального сжатия; φ — коэффициент скорости, зависящий от конструк-

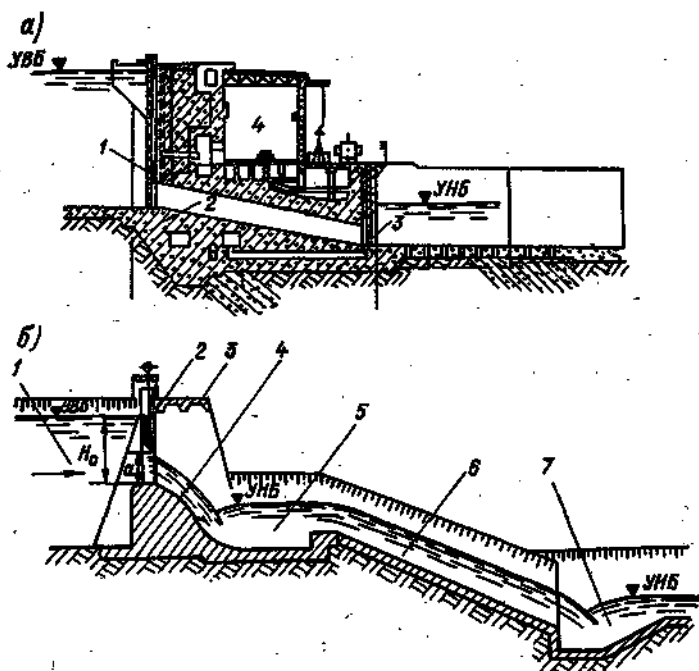


Рис. 4.36. Водосбросные сооружения.

a — глубокий водосброс: 1 — плоский затвор, 2 — галерея водосброса, 3 — выходное отверстие, 4 — машинный зал; b — поверхностный водосброс с быстотоком: 1 — подводящий канал, 2 — затвор, 3 — мостик, 4 — водослив, 5 — промежуточный водобойный колодец, 6 — быстроток, 7 — водобойный колодец; H_0 — действующий напор, a — высота открытия отверстия.

ции сооружения и условий истечения; его значения изменяются в пределах 0,85—0,95.

Произведение $\epsilon \varphi$ в формуле (4.50) в гидравлике рассматривается как один обобщенный коэффициент расхода s . Его значения для отверстий, перекрытых плоскими затворами, зависят от относительного открытия и обнаруживают тенденцию к возрастанию по мере его увеличения (рис. 4.37). Среднее значение s оказывается различным для пролетов разной ширины и колеб-

лется от 0,6 до 0,75. Для сооружений, оборудованных сегментными затворами, значение c , помимо относительного открытия, зависит также от отношения высоты опор над порогом к радиусу затвора (z/R). Коэффициент расхода становится функцией аргумента $\tilde{a} = a_0/H_0$ и z/R , при этом c с увеличением относительного открытия значение c уменьшается, что объясняется изменением условий обтекания затвора, которое становится менее плавным.

При затопленном истечении из-под затвора пропускная способность сооружения может быть определена по упрощенной, но достаточно надежной формуле

$$Q = cba \sqrt{2gz_0}, \quad (4.51)$$

где z_0 — разность уровней верхнего и нижнего бьефов с учетом напора от подходной скорости. Значения коэффициентов c для

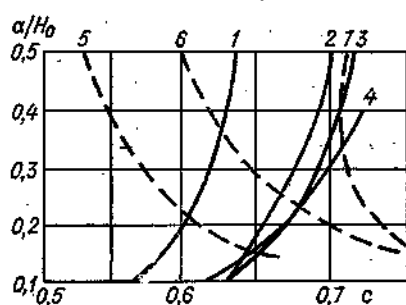


Рис. 4.37. Зависимость коэффициента расхода c от относительного открытия затвора.

Плоские затворы: 1 — сооружения Большого Ставропольского канала; 2, 3, 4 — водосливные плотины Каховской, Днепроградской им. В. И. Ленина и Дубоссарской ГЭС соответственно. Сегментные затворы при $c/R=0,7$: 5 — затвор над широким порогом (по данным Точа), 6 — затвор над порогом практического профиля (по данным Сегозерского гидроузла), 7 — Кегумская ГЭС, водослив практического профиля.

затопленных водопропускных отверстий площадью больше 2 м лежат в пределах 0,80—0,90 и при необходимости уточняются по гидравлическим справочникам.

Более сложны методы определения пропускной способности трубчатых сооружений. Коэффициенты расхода для трубопроводов определяются с учетом местных сопротивлений и трения по длине потока.

Расчет пропускной способности трубчатых сооружений производится в зависимости от режима потока, наполнения трубы и отводящего канала. Основные схемы истечения изображены на рис. 4.35 II. Соответствующие расчетные зависимости можно найти в справочных руководствах.

Для надежного учета стока через водопропускные сооружения необходимо фиксировать в рабочих журналах каждое изменение параметров истечения (открытия затворов a и напора H_0 или z_0) и соответствие их заданному расходу водозабора или сброса.

Порядок определения средних суточных расходов покажем на примере шлюза-регулятора при свободном истечении из-под сегментного затвора (относительная высота опор $z/R=0,7$, пролет $b=8,0$ м).

В течение расчетных суток зафиксированы следующие рабочие параметры:

позиция 1 с 0 до 8 ч — $a=1,0$ м, $H_0=4,0$ м, $a=0,25$;

позиция 2 с 8 до 24 ч — $a=1,5$ м, $H_0=3,5$ м, $a=0,427$.

По кривой 6 рис. 4.37 находим значения коэффициентов расхода $c=ef$ в формуле (4.50):

позиция 1 $c=0,585$, позиция 2 $c=0,540$.

Расходы воды соответственно позициям по формуле (4.50):

$$Q_1 = 0,585 \cdot 1,0 \cdot 8,0 \sqrt{2 \cdot 9,81 (4 - 0,5 \cdot 1,0)} = 38,8 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_2 = 0,540 \cdot 1,5 \cdot 8,0 \sqrt{2 \cdot 9,81 (3,5 - 0,5 \cdot 1,5)} = 47,0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Средний суточный расход как взвешенное среднее значение

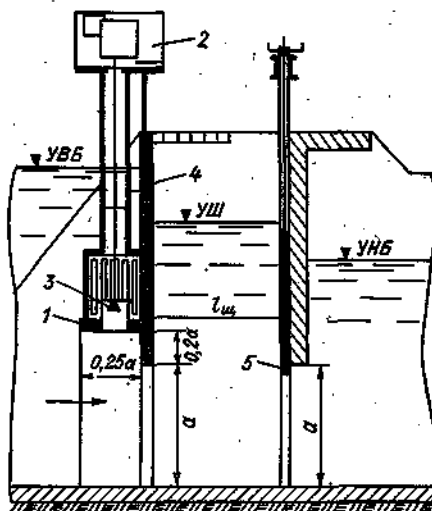
$$Q = (38,8 \cdot 8 + 47,0 \cdot 16) : 24 = 44,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Погрешности определения заборов и сбросов воды устанавливаются на основании сведений о способах их учета и средствах измерений расходов воды на объектах водопользования.

Если расходы воды определяются по гидравлическим формулам (из справочников), средняя квадратическая погрешность учета стока оказывается в пределах 10—20 % и зависит от степени соответствия расчетных характеристик пропускной способности фактическим условиям. Дело в том, что при строительстве сооружения в той или иной степени допу-

Рис. 4.38. Приставки-расходомеры на входной части шлюза-регулятора.

1 — тонкое ребро с патрубком для прибора, 2 — расходомер, 3 — патрубок и поршень, 4 — забальная стенка, 5 — затвор.



скаются отступления от проектных форм и размеров, поэтому для надежного учета стока требуется натурная градуировка сооружений, которая в конечном счете позволяет снизить погрешность определения расходов воды до 2—3 %.

Расходомеры, используемые для определения расходов воды через водопропускные сооружения, имеют различные модификации в зависимости от мест установки. На рис. 4.38 показана схема установки, а на рис. 4.39 — общий вид расходомера, разработанного В. Е. Красновым, типа ДРС-66. Прибор работает так. Через патрубок прибора проходит парциальный ток воды, и поршень, помещенный в патрубок, испытывает давление, которое определяется перепадом, образованным местным сопротивлением водомерной части сооружения. Поршень под действием перепада давлений перемещается вниз и растягивает рабочую пружину, поворачивая горизонтальную ось со стрелкой и самопишущим устройством. Таким образом, вертикальное перемещение поршня в патрубке под действием разности давлений преобразуется

в угол поворота стрелки, показывающей расход воды на циферблате прибора. Самопишущее устройство производит непрерывную запись значений расхода на ленту с помощью часового механизма. Общая погрешность определения расхода прибором ДРС-66 составляет $\pm 2\%$. Прибор позволяет учитывать наименьший расход воды, проходящий через сооружение, при минимальном перепаде 1,5—2,0 см.

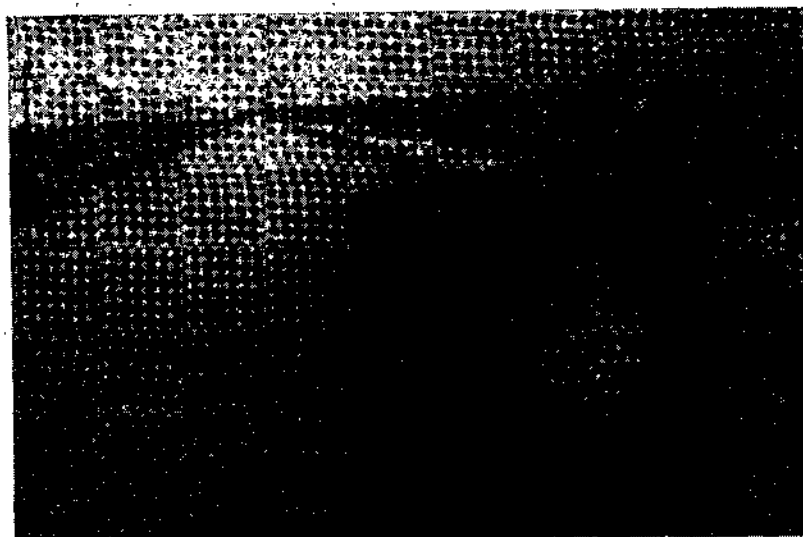


Рис. 4.39. Общий вид расходомера ДРС-66 на оросительном канале.

Счетчики-расходомеры для учета стока на ГЭС не имеют широкого применения из-за погрешности показаний, обусловленных главным образом неустойчивостью коэффициентов расхода. На ГЭС в основном применяются расходомеры двух типов: 1) гидравлические, в которых определяется перепад давлений в двух точках спиральной камеры, и 2) основанные на изменении угла разворота лопастей рабочего колеса (для поворотно-лопастных гидротурбин) или открытия направляющего аппарата (для радиально-осевых турбин).

4.8.3. Расходомеры гидротехнических сооружений и систем водоснабжения

В отличие от гидрологических расходомеров, представляющих собой самостоятельное сооружение, приборы-расходомеры относятся к одному из видов контрольно-измерительной аппаратуры на гидроэлектростанциях, водопропускных сооружениях, насосных станциях и технологических установках. Собственно расходомеры предназначены, как это вытекает из самого названия, для изме-

ния расхода жидкости, а для определения ее объема служат счетчики-приборы, снабженные интегрирующими устройствами.

Конструктивные типы и физические принципы расходомеров так же разнообразны, как и область их применения.

Гидродинамические расходомеры получили наибольшее распространение. Один из используемых в них принципов, основанный на измерении переменного перепада давлений, предложен Г. Б. Вентури еще в конце XVIII века.

Если каким-либо образом создать местное уменьшение площади сечения потока в трубе и измерить вызванный сужающим устройством перепад давления ΔP , то из уравнения Бернулли можно получить

$$Q = c F_0 \sqrt{2g \Delta P / \gamma}, \quad (4.52)$$

где F_0 — площадь отверстия сужающего устройства; c — коэффициент расхода, завися-

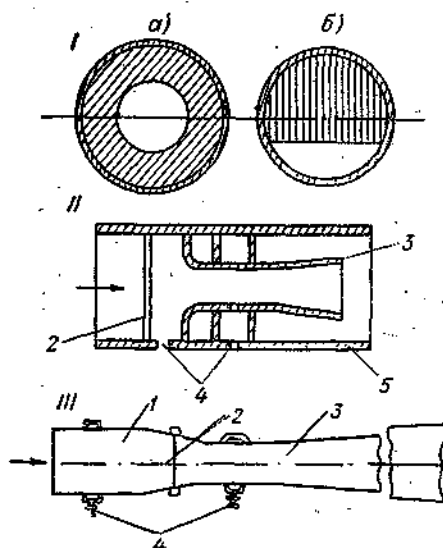


Рис. 4.40. Сужающие устройства.

I — диафрагмы: а — концентрическая, б — сегментная; II — сопло, III — труба Вентури; 1 — входной конус, 2 — предохранительная сетка, 3 — выходной конус, 4 — отверстие (край) для подключения манометра, 5 — трубопровод.

щий от отношения площадей полного и суженного сечения трубопровода.

Различают три основных типа сужающих устройств: диафрагмы, сопла и трубы Вентури (рис. 4.40). Наиболее проста конструкция диафрагмы. Сопла отличаются от труб Вентури укороченным выходным конусом и требуют меньше места для установки.

Гидравлические расходомеры широко применяются в системах водоснабжения. Их конструкции нормализованы и стандартизованы (ГОСТ 14321—73 и ГОСТ 14322—73). Они обладают 1—2 классом точности, что соответствует относительной погрешности для середины шкалы прибора 2—4 %.

Насосные станции, предназначенные для водоснабжения, размещаются непосредственно на источнике водозабора или вблизи него. Для подачи воды на орошаемые поля широко применяются плавучие насосные станции. Они представляют собой серийно выпускаемые суда, на которых размещается насосное оборудование.

Для учета воды на насосных станциях могут быть применены все типы расходомеров, пригодные для установки в трубопроводах

больших диаметров. Особенно практичны для применения гидрометрические трубки, интегрирующие и точечные, измеряющие соответственно осредненную по диаметру и локальную скорость потока.

Для определения подачи насосной станции — расхода воды в $\text{м}^3/\text{с}$ — может быть использована энергетическая зависимость

$$Q = 0,102 N_{\text{ср}} \eta_{\text{КПД}} / h_{\text{ср}}, \quad (4.53)$$

где $N_{\text{ср}}$ и $h_{\text{ср}}$ — соответственно средние суточные значения мощности (в кВт) и напора (в м). $N_{\text{ср}}$ вычисляется по разности показаний счетчика потребляемой энергии, а $h_{\text{ср}}$ — по сумме сред-

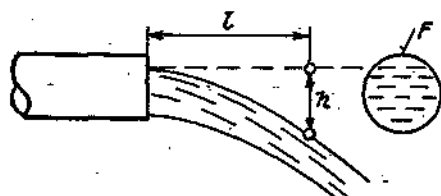


Рис. 4.41. Схема истечения воды из трубопровода.

них показаний манометра ($h_{\text{м}}$) и вакуумметра ($h_{\text{в}}$) в метрах водяного столба с учетом разности высоты точек отбора давления z_0

$$h_{\text{ср}} = h_{\text{м. ср}} + h_{\text{в. ср}} + z_0.$$

Точность определения расхода по (4.53) зависит главным образом от погрешности определения КПД системы, который изменяется в широких пределах при различных режимах работы насосной установки.

Погрешности измерения расхода воды по характеристикам насосов могут изменяться от $\pm 3\%$ (в благоприятных условиях работы насосов) до 20% (при изношенных насосных установках).

В случае свободного истечения струи из концевой сечения трубопровода расход воды может быть определен по формуле

$$Q = 0,705 F l \sqrt{g/h},$$

где g — ускорение свободного падения; l и h — геометрические параметры струи (см. рис. 4.41).

Счетчики употребляются для определения количества воды, пропущенной через сооружение, в дополнение к расходомерам являются интегрирующими устройствами, показывающими численное значение интеграла:

$$V = \int_0^T Q dt.$$

Существуют различные образцы промышленных счетчиков, разнообразных по конструкции и принципам действия. Для водопропускных сооружений мелиоративных систем и гидроузлов наиболее пригодны интеграторы часового типа.

В современных водохозяйственных системах измерения расходов совмещаются с процессами управления и оптимального регулирования водоподачи. Поэтому в настоящее время создаются такие водоучитывающие приборы, которые допускают установку различных сопряженных с ними преобразователей для дистанционной передачи показаний.

Глава **5** МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СТОКОМ И КРУПНОСТЬЮ НАНОСОВ

5.1. Состав, форма движения и сток речных наносов

Речные наносы — это твердые частицы минерального и органического происхождения, переносимые движущейся водой и формирующие русла и поймы рек, дно озер и водохранилищ.

В зависимости от крупности частиц наносы подразделяют на семь основных фракций, внутри которых выделяют еще две-три подфракции (табл. 5.1). При отнесении частицы к той или иной

Таблица 5.1

Классификация речных наносов по размеру частиц (мм)

Подфракция	Фракция						
	глина	ил	пыль	песок	гравий	галька	валуны
Мелкая	Меньше 0,001	0,001—0,005	0,01—0,05	0,1—0,2	1—2	10—20	100—200
Средняя		—	—	0,2—0,5	2—5	20—50	200—500
Крупная		0,005—0,010	0,05—0,1	0,5—1	5—10	50—100	500—1000

фракции определяющим является ее средний диаметр, т. е. диаметр равновеликого по объему шара.

В теории транспорта наносов и в практической работе часто оперируют не геометрическими размерами частиц, а характеристикой, называемой *гидравлической крупностью* u (м/с), под которой понимается скорость оседания (погружения) частицы в спокойной воде. Гидравлическая крупность существенно зависит также от формы частиц (для частиц диаметром более 0,05 мм) и температуры воды (для частиц диаметром менее 2 мм, табл. 5.2).

Таблица 5.2

Соотношение между диаметром и гидравлической крупностью частиц
наносов при температуре воды 15 °С

$$\Theta = 0,75$$

Диаметр, мм	Гидравлическая крупность, м/с	Диаметр, мм	Гидравлическая крупность, м/с
0,001	0,000 000 8	0,2	0,017 4
0,005	0,000 02	0,5	0,055 5
0,010	0,000 08	1,0	0,110
0,05	0,001 95	2,0	0,192
0,1	0,006 1	3,0	0,242

Форму частиц характеризуют коэффициентом Θ , вычисляемым по формуле

$$\Theta = d^2/(lb),$$

где d — средний диаметр частицы; l и b — соответственно длина и ширина частицы.

По характеру перемещения в потоке наносы подразделяют на взвешенные и влекомые (донные).

Взвешенные наносы — это частицы, перемещающиеся вместе с массой заключающей их воды во взвешенном состоянии. Формируются за счет наиболее мелких фракций, крупность которых постепенно увеличивается по мере приближения ко дну. Характеристикой количественного распределения взвешенных наносов в потоке является *мутность воды*, т. е. содержание массы наносов в единице объема смеси воды с наносами. Выражается в г/м³. Мутность воды увеличивается от поверхности ко дну потока. Характер этого изменения наиболее выражен при крупнофракционном составе наносов. Неравномерно распределяется мутность и по ширине реки. Особенно большие ее изменения наблюдаются на участках рек, подверженных интенсивному размыву.

К *влекомым (донным) наносам* относятся частицы, перемещаемые потоком в придонном слое путем скольжения, перекатывания и сальтации (скачкообразно). Характер движения существенно зависит от скорости течения и турбулентности потока, а также от формы, размеров и массы частиц. Движение скольжением наиболее характерно для частиц плоской формы при скоростях течения, незначительно превышающих скорость сдвига частицы. Увеличение скорости приводит к тому, что частицы независимо от формы начинают перекатываться, периодически поднимаясь и снова осаждаваясь на дно (сальтировать). Сальтируют обычно частицы с гидравлической крупностью, близкой к максимальным значениям вертикальной составляющей пульсации скорости течения в придонном слое. Считается, что сальтация — основной вид движения влекомых наносов. Поскольку перемещение сальтацией происходит путем периодического взвешивания

частиц, провести четкую границу между взвешенными и влекомыми наносами не представляется возможным. Из-за постоянного изменения характеристик пульсации скоростей течения период и высота взмыва частиц при сальтации может колебаться в широких пределах. Поэтому в пробах воды на мутность часто встречаются довольно крупные фракции, характерные при данной гидравлике потока для влекомых наносов, и, наоборот, влекомые наносы содержат мелкие частицы.

Наносы, формирующие ложе потока и находящиеся в данный момент в состоянии покоя, называются *донными отложениями*. Донные отложения подвергаются постоянной переработке потоком.

Количество наносов, проходящих через фиксированный створ водотока за тот или иной промежуток времени (сутки, декада, месяц, сезон, год), называется *стоком наносов* за этот период и вычисляется в тоннах массы. Распределение стока наносов в течение года очень неравномерно. Наибольшее количество наносов выносятся реками во время паводков и половодий. На некоторых реках доля наносов, приходящая на периоды весеннего половодья, достигает 95 %. В многоводные годы сток наносов может быть в 20—30 раз выше нормы. На малых равнинных и горных реках часто наблюдается внутрисуточное изменение стока наносов, связанное с внутрисуточным колебанием уровней и расходов воды.

Основным методом определения стока наносов служит измерение расходов взвешенных и влекомых наносов и последующее установление связи их количества с гидравлическими характеристиками потока и ежедневными мутностями воды. Качественная оценка наносов осуществляется на основании гранулометрического анализа и лабораторных исследований их физических свойств.

Сведения о количестве, составе и режиме наносов используются при решении многих практических задач, связанных с правильным размещением и эксплуатацией гидротехнических сооружений, прогнозом заиления прудов и водохранилищ, выбором оптимальных вариантов русловыправительных и дноуглубительных работ, использованием воды для водоснабжения и орошения и др.

5.2. Наблюдения за стоком взвешенных наносов

5.2.1. Элементы расхода взвешенных наносов и их вычисление

Расходом взвешенных наносов называется масса взвешенных наносов, проносимых потоком через живое сечение в одну секунду, обозначается P_s и выражается в кг/с.

Расход взвешенных наносов связан с расходом воды Q и мутностью S_{cp} зависимостью

$$P_s = 0,001 S_{cp} Q. \quad (5.1)$$

Характеристику $S_{\text{ср}}$ принято называть *средней расходной мутностью воды*, или *средней мутностью потока*. Она выражается в г/м^3 .

Единичным расходом взвешенных наносов α [$\text{г/с} \cdot \text{м}^2$] называется произведение мутности и скорости потока в точке

$$\alpha = Su, \quad (5.2)$$

а площадь эпюры единичных расходов выражает элементарный расход на вертикали $P_s [\text{г/с} \cdot \text{м}]$. Средняя мутность по вертикали определяется выражением

$$\bar{S} = P_s/q, \quad (5.3)$$

где q — элементарный расход воды на вертикали, $\text{м}^3/\text{с}$.

Частичный расход взвешенных наносов в отсеке живого сечения, ограниченный двумя вертикалями (рис. 5.1), вычисляется по одной из

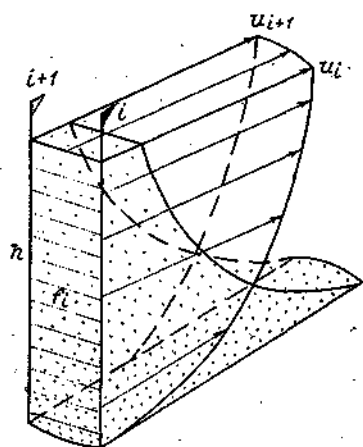


Рис. 5.1. Эпюра распределения скоростей течения и мутности на вертикали.

двух нижеприведенных формул:

$$P_{s_i} = 0,001 \frac{\bar{\alpha}_i + \bar{\alpha}_{i+1}}{2} f_i, \quad (5.4)$$

$$P_{s_i} = 0,001 \frac{\bar{S}_i + \bar{S}_{i+1}}{2} Q_i. \quad (5.5)$$

Здесь f_i и Q_i — соответственно площадь живого сечения и расход воды между i -й и $(i+1)$ -й вертикалями; $\bar{S}_i$ и $\bar{S}_{i+1}$ — средняя мутность на тех же вертикалях.

Полный расход взвешенных наносов вычисляется суммированием его частичных значений через отдельные отсеки живого сечения потока. При этом расчетная зависимость имеет вид:

а) при использовании формулы (5.4)

$$P_s = 0,001 \left(k_{\delta_1} \alpha_1 f_{\delta_1} + k_{\delta_N} \alpha_N f_{\delta_N} + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2} f_i \right), \quad (5.6)$$

б) при использовании формулы (5.5)

$$P_s = 0,001 \left(S_{\delta_1} Q_{\delta_1} + S_{\delta_N} Q_{\delta_N} + \sum_{i=1}^N \frac{\bar{S}_i + \bar{S}_{i+1}}{2} Q_i \right), \quad (5.7)$$

где f_{δ_1} (f_{δ_N}) и Q_{δ_1} (Q_{δ_N}) — соответственно площадь живого сечения между первой вертикалью и ближайшим к ней берегом (послед-

ней, N -й вертикалью и ближайшим к ней берегом) и частичные расходы воды через эти отсеки; k_{δ_1} , k_{δ_N} — коэффициенты, учитывающие характер распределения скоростей течения соответственно в отсеках f_{δ_1} и f_{δ_N} .

5.2.2. Методы измерения и вычисления расходов взвешенных наносов

Участок гидроствора для изучения естественного режима стока наносов выбирается таким образом, чтобы выше гидроствора отсутствовали сбросы сточных и промышленных вод.

В зависимости от методики измерения расходов воды, отбора проб воды на мутность и их обработки различают точечные (многоточечный, основной, однотоочечный), суммарный и интеграционный способы определения расходов взвешенных наносов. Широко используется также сокращенный способ, базирующийся на закономерностях связи средней мутности потока с мутностью на характерной вертикали.

Многоточечный (детальный) способ измерения расходов взвешенных наносов — наиболее точный, но и наиболее трудоемкий из перечисленных способов — применяется при средних мутностях потока более 100 г/м^3 в условиях, когда возможно измерение расхода воды и отбор проб на мутность на вертикалях многоточечным способом. Обычно, учитывая трудоемкость работ, к нему прибегают только в первые годы изучения стока наносов на вновь открытом гидрологическом посту с целью выяснения возможности перехода на более простые способы измерения.

Отбор проб воды для определения мутностей производится на всех скоростных вертикалях, как правило, в пяти точках по глубине ($h_{\text{пов}}$, $0,2h$, $0,6h$, $0,8h$ и дно). При аномальном распределении мутности и скоростей течения по вертикали и больших глубинах потока число точек может быть доведено до семи-восьми.

Необходимо выполнить минимум 10—15 измерений многоточечным детальным способом, осветив ими наиболее важные фазы гидрологического режима (весеннее половодье, дождевые паводки и т. д.).

К обработке расходов взвешенных наносов, измеренных детальным способом, также предъявляются повышенные требования. Поэтому обычно она выполняется графическим методом. При этом целесообразно совмещать этот процесс с обработкой расхода воды, выполняя все построения на одном графике (рис. 5.2). Порядок работ следующий.

1. По данным лабораторного анализа о массе наносов в пробах воды вычисляются мутности воды в отдельных точках по формуле

$$S = M \cdot 10^6 / A, \quad (5.8)$$

где M — масса наносов, содержащихся в пробе, г; A — объем пробы, мл.

Эпюры мутности совмещаются с эпюрами скоростей на соответствующих вертикалях. Отдельные точки, не согласующиеся с общим характером распределения мутности по глубине вертикали, выбраковываются.

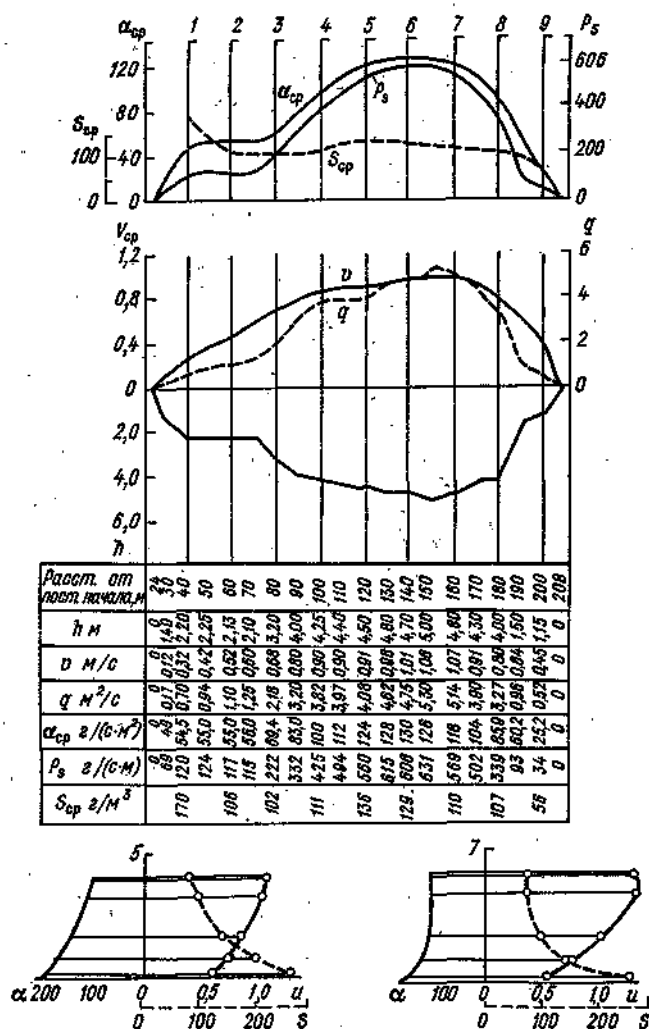


Рис. 5.2. Обработка расхода взвешенных наносов графическим способом.

Среднее квадратическое значение погрешности определения мутности воды в точке в весенний период и межень изменяется соответственно от 5 до 15 %.

2. Используя принятые значения мутностей в точках измерения скоростей течения, вычисляют для этих точек единичные рас-

ходы взвешенных наносов $\alpha = Su \text{ г/(с} \cdot \text{м}^2)$ и строят эпюры их распределения по глубине на соответствующих вертикалях.

3. Определив планиметрированием или палеткой площадь эпюры единичных расходов взвешенных наносов, вычисляют для каждой вертикали среднее значение этой характеристики.

4. Используя значения средних единичных расходов взвешенных наносов на отдельных вертикалях, строят над профилем сечения реки эпюру их распределения по ширине реки.

5. Строят эпюру распределения элементарных расходов взвешенных наносов, используя их значения не только на скоростных, но и на промерных вертикалях, для которых они предварительно подсчитываются по формуле

$$P_s = \bar{\alpha}' h$$

на основании $\bar{\alpha}'$, снятых с эпюры средних единичных расходов взвешенных наносов. Площадь эпюры элементарных расходов взвешенных наносов с учетом вертикального и горизонтального масштабов графика численно равняется расходу взвешенных наносов.

6. Для анализа распределения мутности по ширине реки на график наносятся также ее средние на скоростных вертикалях значения и соответствующие им точки соединяются плавной линией.

После проверки правильности вычислений и построений данные о расходе взвешенных наносов и средней мутности потока выписываются под графиком, а также заносятся в таблицу «Принятые данные» полевой книжки КГ-6М(н).

При аналитическом способе обработки расходов взвешенных наносов сначала вычисляются единичные расходы $\alpha \text{ г/(с} \cdot \text{м}^2)$ в отдельных точках посредством перемножения значений мутности и скорости течения. Затем для каждой скоростной вертикали определяются средние единичные расходы взвешенных наносов по соответствующим формулам в зависимости от количества и положения точек отбора проб мутности:

при одной точке на глубине $0,6h$

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{0,6}; \quad (5.9)$$

при двух точках $0,2h$ и $0,8h$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{(\alpha_{0,2} + \alpha_{0,8})}{2}; \quad (5.10)$$

при зарастающих руслах

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_{0,15} + \alpha_{0,5} + \alpha_{0,85}}{3}; \quad (5.11)$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{0,5}.$$

Аналитическим способом обработку расходов взвешенных наносов, измеренных пятиточечным способом, производить не

рекомендуется в связи с неопределенностью весовых коэффициентов для единичных расходов в отдельных точках вертикали.

Методический анализ результатов многоточечных измерений заключается в обработке этих данных с постепенным разрежением числа вертикалей и точек измерения мутности. В результате должен быть получен обоснованный вывод о допустимых сокращениях в методике измерения расходов взвешенных наносов на данном посту. Переход считается возможным на тот из более простых способов, максимальные отклонения по данным которого от детальных измерений не превышают 10 %. Может оказаться, что в разные фазы режима реки этому требованию отвечают разные варианты сокращения способа. Практически всегда этому условию отвечает основной способ измерения расходов взвешенных наносов.

Основной способ измерения расходов взвешенных наносов как в период открытого русла, так и во время ледостава заключается в отборе пробы на мутность в двух точках $0,2h$ и $0,8h$ на каждой скоростной вертикали. На малых реках из-за небольших глубин приходится переходить на одноточечный способ отбора проб в точке $0,6h$. На реках с водной растительностью в качестве основного применяется трехточечный способ измерения мутности воды: в точках $0,15h$, $0,5h$ и $0,85h$; при малых глубинах проба отбирается в точке $0,5h$.

При мутностях воды более 100 г/м^3 пробы воды обрабатываются раздельно.

К суммарным способам измерения расходов взвешенных наносов прибегают обычно, если мутность воды менее 100 г/м^3 . Своим названием этот способ обязан тому, что пробы воды, отобранные в точках измерения скоростей течения, суммируются (сливаются в один сосуд) либо поперек вертикали (при мутности $20\text{--}100 \text{ г/м}^3$), либо по всему живому сечению (при мутности менее 20 г/м^3). Во всех вариантах суммарного способа важным условием является равенство объемов суммируемых проб.

Причиной суммирования проб по живому сечению может послужить также отсутствие данных о глубинах и скоростях течения на вертикалях и в точках отбора воды на мутность, например, при измерении расходов воды гидрологическими расходомерами, методом смещения и т. д. Аналогичная ситуация складывается и при переносе створа для измерения расхода воды в межень на перекат, так как переносить при этом створ измерения расходов взвешенных наносов не рекомендуется.

Интеграционный способ отбора проб воды на мутность применяется обычно при необходимости сократить время измерения в связи с быстрым изменением гидравлических характеристик потока или по другим причинам. Пробы воды на вертикалях отбираются в этом случае прибором, равномерно перемещаемым от поверхности ко дну потока, а затем в обратном направлении. Скорость погружения и подъема прибора подбирается с таким расчетом, чтобы к моменту достижения прибором поверх-

ности воды он оказался на 50—100 мл незаполненным до полного своего объема. При полном заполнении прибора измерение необходимо повторить, увеличив скорость его погружения и подъема, так как в противном случае нет уверенности в правильности осреднения мутности по вертикали.

Вычисление расходов взвешенных наносов, измеренных однотоочечным, основным и трехточечным (в зарастающих руслах) способами производится по формуле (5.6).

При суммировании проб воды на вертикалях и интеграционным способом их отбора вычисление расхода взвешенных наносов производится по формуле (5.7). Если же суммирование проб воды произведено по всему живому сечению потока, расход взвешенных наносов рассчитывается на основании зависимости

$$P_s = 0,001 S'_{cp} Q, \quad (5.12)$$

где S'_{cp} — мутность суммарной пробы, г/м³; Q — расход воды, м³/с.

Во многих случаях (особенно на крупных и средних равнинных реках) наблюдаются устойчивые связи между значениями средней мутности потока и мутности в отдельной точке, на вертикали или отсеке потока. Такие зависимости широко применяются для определения расходов взвешенных наносов сокращенным способом.

В большинстве случаев наиболее устойчивы связи между средней мутностью потока и мутностью в его стрежневой зоне. Поэтому в качестве репрезентативной обычно назначается одна из строжневых вертикалей, а в качестве характерной мутности (S_p) средняя мутность на вертикали. Предпочтение отдается той из вертикалей, для которой теснота связи $S_{cp} = f(S_p)$ оказывается наибольшей. Связь считается пригодной для определения расхода взвешенных наносов по мутности на репрезентативной вертикали, если полоса рассеяния точек на графике не превышает 20 %. Для обоснования зависимости $S_{cp} = f(S_p)$ используются данные о расходах взвешенных наносов, измеренных многоточечным или основными способами. Обязательным условием является постоянный контроль за устойчивостью связи во времени, поэтому определять расходы взвешенных наносов только на основании связи $S_{cp} = f(S_p)$ в течение всего года не допустимо. Необходимо как минимум 7—10 раз в году измерять расходы взвешенных наносов основным способом.

Вычисление расхода взвешенных наносов при использовании связи $S_{cp} = f(S_p)$ производится по формуле

$$P_s = K_p S_p Q. \quad (5.13)$$

Поскольку связь $S_{cp} = f(S_p)$, как правило, линейна, коэффициент K_p постоянен и равен отношению S_{cp}/S_p . Для строжневой вертикали его значение обычно заключено в диапазоне 0,9—1,1. Расход воды в этом случае может быть определен как методом «скорость—площадь», так и любым другим способом.

Среднее квадратическое значение погрешности измерения расходов взвешенных наносов многоточечным и основным способами составляет соответственно 10 и 25 %.

Количество измерений расходов взвешенных наносов в течение года назначается в зависимости от режима и изученности стока наносов на данном участке реки. Тем не менее осветить все особенности режима только на основании измерения расходов взвешенных наносов не удается, поэтому для детальной характеристики режима мутности прибегают к отбору ежедневных проб воды на мутность.

5.2.3. Единичные и контрольные пробы воды на мутность

Единичные пробы воды на мутность отбираются ежедневно один, два или несколько раз в сутки в зависимости от изменения мутности. При назначении частоты и сроков наблюдений следует исходить из необходимости достаточно точного определения среднего суточного значения мутности. В связи с этим при неизменности мутности воды или ее плавном изменении (межень, половодье на крупных реках и т. п.) обычно ограничиваются однократным отбором единичной пробы в утренний срок наблюдения за уровнем воды, а при более выраженных изменениях — двухкратными наблюдениями (08 и 20 ч). При сложном внутрисуточном ходе мутности может потребоваться довести частоту отбора единичных проб до 6—8 раз в сутки.

Важное значение имеет правильный выбор места отбора единичных проб. Основным критерием при этом служит устойчивость связи между значениями мутности единичной пробы и средней мутности потока. В связи с этим лучше всего производить отбор проб на репрезентативной вертикали, по измерениям мутности на которой определяются расходы взвешенных наносов сокращенным способом. Отступление от этого возможно только при значительной удаленности гидрометрического створа от гидрологического поста. В этом случае вертикаль для отбора единичных проб назначается в стрежневой части потока в районе гидрологического поста. Необходимо строго соблюдать постоянство места отбора проб. Исключение из этого правила допускается только в случае, если выход на стрежневую вертикаль невозможен (ледоход, лесосплыв и т. п.).

Способ отбора проб обычно одноточечный (0,6*h*), двухточечный (0,2*h* и 0,8*h*) или интеграционный. Для надежного определения мутности необходимо, чтобы в пробе воды содержалось не менее 0,1 г наносов. Соблюдение этого условия — основной критерий при назначении объема пробы. В соответствии с этим объем пробы должен составлять при мутности 100 г/м³ не менее 1 л, при мутности 50 г/м³ не менее 2 л и т. д. При малых мутностях потока, чтобы не увеличивать объем проб, отбираемых в отдельных точках, часто их объединяют (суммируют). Так, например, если единичная проба воды отбирается в двух точках на вер-

тикали, то при мутности менее 100 г/м^3 рекомендуется обе пробы объединить и обрабатывать вместе. При мутности менее 50 г/м^3 и устойчивости во времени (меженный период) допускается ежедневные единичные пробы объединять попентадно и подекадно.

Контрольные единичные пробы воды на мутность отбираются во время измерения расходов взвешенных наносов в том же месте и тем же способом, которые установлены для отбора единичных проб. В начальный период изучения стока наносов на гидрологическом посту эти данные используются для установления связи между единичной мутностью и средней мутностью потока, а в дальнейшем для контроля и уточнения этой связи.

5.2.4. Батометры для отбора проб воды на мутность

Приборы для отбора проб воды на мутность называются батометрами. К ним относятся: батометр-бутылка на штанге (ГР-16, ГР-16М), батометр-бутылка в грузе (ГР-15) и вакуумный батометр (ГР-61). Все перечисленные приборы являются батометрами

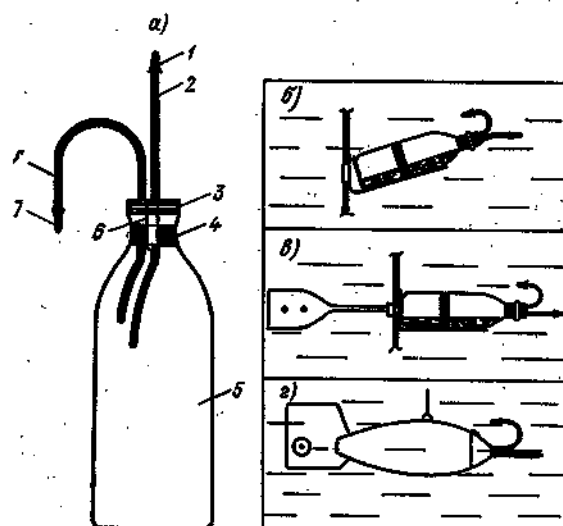


Рис. 5.3. Батометр-бутылка (а) и способы его доставки в точку отбора пробы воды (б, в, г).

1 — насадка водозаборной трубки, 2 — водозаборная трубка, 3 — головка металлическая, 4 — хомут, 5 — бутылка стеклянная емкостью 1 л, 6 — зажим головки, 7 — насадка воздухоотводной трубки, 8 — воздухоотводная трубка.

длительного наполнения, позволяющими получать осредненные значения мутности воды во времени. Существовавшие ранее батометры мгновенного наполнения в настоящее время не применяются.

Батометр-бутылка (рис. 5.3) предназначен для отбора проб на мутность в отдельных точках вертикали или интеграционным способом. Он представляет собой литровую бутылку с металлической

пробкой-головкой, в которую вмонтированы водозаборная и воздухоотводная трубки. При отборе проб воды батометр устанавливается на заданную глубину с помощью штанги или лебедки: в первом случае он вставляется в специальную обойму, закрепленную на штанге под углом 25° или горизонтально, во втором помещается в полый груз рыбовидной формы.

Крепление батометра на штанге под углом и горизонту дает возможность отбирать пробы воды в потоках глубиной от 0,5 до 2,5 м при скоростях течения до 1,5—2,5 м/с. Горизонтальное расположение батометра-бутылки в обойме позволяет отбирать пробы в 10 см ото дна; в связи с лучшей обтекаемостью и наличием хвостового оперения измерение можно выполнять при скоростях течения до 3,0 м/с. Надежнее выполняется в этом случае и ориентация водозаборной трубки против течения.

Грузы для батометра-бутылки выпускаются массой 15, 50 и 75 кг. При скорости течения до 1 м/с используется груз массой 15 кг, при скорости от 1 до 3 м/с — 50 кг, а при скорости свыше 3 м/с — 75 кг.

При горизонтальном расположении батометра (батометр-бутылка в грузе и батометр ГР-16М) в потоках со скоростями менее 0,5 м/с бутылка полностью водой не заполняется.

Точность определения мутности батометром-бутылкой существенно зависит от соотношения скорости течения в точке отбора пробы u и скорости движения воды в водозаборной трубке u_6 . Установлено, например, что при $u_6/u=0,5$ погрешность определения мутности, связанная с этим фактором, может достигать $+30\%$, а при $u_6/u=1,5$ — 10% . Для снижения этих погрешностей до допустимых значений скорость поступления воды в батометр регулируется специальными сменными насадками, навинчивающимися на водозаборную и воздухоотводную трубки. Рекомендуемые диаметры насадок в зависимости от скорости течения воды приведены в табл. 5.3.

Вакуумный батометр (рис. 5.4) применяется для взятия проб точечным способом. Прибор состоит из трех основных частей: вакуумной камеры, вакуумного ручного насоса и водозаборного накопника.

Вакуумная камера служит емкостью для пробы воды. Выпускаются батометры с вакуумными камерами рабочим объемом 1 и 3 л. С двумя другими узлами вакуумная камера соединяется резиновыми шлангами, вводы для которых находятся в верхней части камеры и оборудованы кранами. Верхняя часть камеры цилиндрической формы, нижняя — воронкообразной. В носике воронки имеется кран для слива пробы. Четвертый кран, расположенный в верхней части камеры, предназначен для компенсации вакуума воздухом после окончания отбора пробы. Смотровая щель, проходящая вдоль образующей цилиндрической части камеры, позволяет вести визуальный контроль за ее заполнением, отсчитывать объемы пробы по шкале, расположенной слева и справа от смотровой щели.

Откачка воздуха из вакуумной камеры производится ручным вакуумным насосом, а глубина вакуума определяется вакуумным манометром.

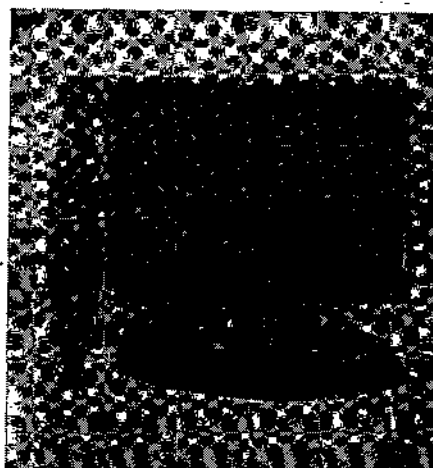


Рис. 5.4. Вакуумный батометр.

Назначение водозаборного наконечника ясно из его названия. Так же как и для батометра-бутылки, к водозаборному наконечнику вакуумного батометра прилагается комплект сменных насадок разного диаметра, использующихся в зависимости от скорости течения воды (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Диаметры насадок (мм) к батометру-бутылке и вакуумному батометру в зависимости от скорости течения

Скорость течения, м/с	Батометр-бутылка		Вакуумный батометр
	водозаборная трубка	воздуховодная трубка	
< 1,0	6	1,5	6
1,0—2,0	4	2	4
> 2,0	4	4	3

Необходимо придерживаться следующего порядка при отборе проб вакуумным батометром:

а) исходное положение перед началом отбора пробы — водозаборный наконечник, укрепленный на штанге или грузе помещен в точку отбора пробы; компенсационный, сливной и водозаборный краны перекрыты; в камере путем откачки воздуха создан необходимый вакуум, глубина которого в зависимости от скорости течения, длины шланга-водовода и высоты вакуумной камеры над поверхностью воды задается градуировочной таблицей прибора;

б) отбор пробы — открывается кран шланга-водовода, соединяющего вакуумную камеру с водозаборным наконечником; глубина вакуума поддерживается на заданном уровне путем откачки воздуха; за поступлением воды следят в смотровую щель;

в) окончание отбора и слив пробы воды — после заполнения камеры до нужного объема открывают компенсационный кран, а кран водовода перекрывают; определяют (отсчитывают по шкале) объем пробы и сливают ее в бутылку через сливной кран; опорожняют шланг-водовод от оставшейся в нем воды.

При отсутствии в комплекте батометра вакуумного манометра глубина вакуума при отборе пробы контролируется по расходу поступления воды в камеру (Q_k мл/с), который в зависимости от скорости течения (u м/с) рассчитывается по формуле $Q_k = 28,3 u$.

Вакуумный батометр применяется при скоростях течения от 0,2 до 3,5 м/с. Высота установки вакуумной камеры над поверхностью воды при отборе пробы не должна превышать 3—4 м. Не применим вакуумный батометр в высокогорных районах с высотой над уровнем моря более 2000 м.

При отсутствии или повреждении батометра для отбора проб воды на мутность может быть использована широкогорлая или узкогорлая литровая бутылка. Как на штанге, так и на грузе бутылка вставляется в наклонную обойму под углом в 25° к горизонту. К пробке бутылки крепится шнур, с помощью которого пробка выдергивается после установки бутылки в точку отбора пробы. Для определения объема пробы воды на верхней части бутылки (начиная с объема 800 мл) наносится шкала с ценой деления в 20 мл.

Переливая пробу из батометра или заменяющей его бутылки необходимо следить, чтобы на их стенках не оставалось твердых частиц. Бутылки, в которые переливаются пробы, должны быть пронумерованы и тщательно вымыты.

5.2.5. Определение массы взвешенных наносов в пробе воды

Количество взвешенных наносов в пробе воды определяется обычно по разнице между результатами взвешивания фильтра до и после выделения на него наносов. Для фильтрования применяются специальные среднефильтрующие беззольные фильтры диаметром 11—13 см. Использование самодельных фильтров не разрешается.

Взвешивание фильтров производится на аналитических весах с погрешностью 0,0001 г. Причем как чистые фильтры, так и фильтры с наносами предварительно тщательно высушиваются в термостате в течение нескольких часов при температуре 105—110 °С до полного удаления из них гигроскопической влаги.

При необходимости определения в наносах содержания органических веществ взвешенные фильтры с наносами сжигаются в специальных тиглях в муфельной печи. Разница массы тигля с золой

и пустого тигля равняется массе минеральной части наносов, а вычтя последнюю из массы наносов до сжигания, получим количество содержащихся в наносах органических веществ.

Фильтрация проб наносов выполняется на гидрологическом посту, все остальные операции — в лаборатории гидрологической станции или обсерватории.

Наиболее распространены следующие способы фильтрации: а) автоматическое фильтрация; б) фильтрация с предварительным отстаем наносов; в) ускоренное фильтрация под давлением. При наличии в пробе очень мелких наносов перед фильтрацией в нее рекомендуется добавлять хлористый кальций (из расчета 10 мл 20 %-го раствора хлористого кальция на 1 л пробы), под действием которого мелкие частицы коагулируют (образуют хлопья).

Автоматическое фильтрация выполняется в следующем порядке. На горлышко бутылки с пробой надевается резиновая трубка соответствующего диаметра. Зажав трубку зажимом, бутылку опрокидывают над воронкой с фильтром, вставленной в емкость для сбора отфильтрованной воды. В таком положении бутылку с пробой укрепляют (обычно в специальном гнезде деревянной полки). Ослабляя зажим трубки, заполняют воронку водой настолько, чтобы ее уровень достиг конца трубки и в то же время располагался ниже края фильтра приблизительно на 1 см. Это достигается подбором соответствующей длины трубки. После этого зажим снимается, так как далее в воронке уровень воды будет поддерживаться автоматически до тех пор, пока не профильтруется вся проба. Так обычно фильтруются пробы объемом до 1 л.

Фильтрация после предварительного отстаивания наносов применяется при малой мутности и пробах большого объема. Продолжительность отстаивания в сутках t определяется по формуле

$$t = 0,4h/K_t, \quad (5.14)$$

где h — высота слоя воды в сосуде, см; K_t — коэффициент, учитывающий изменение скорости осаждения частиц диаметром менее 0,05 мм в зависимости температуры. Добавление коагулятора уменьшает время отстаивания в 2—3 раза. После отстаивания осветленная вода отсифонивается, а остаток, объем которого должен составлять не более 1 л, подвергается автоматическому фильтрации.

Ускоренное фильтрация под давлением производится фильтровальным прибором В. С. Куприна ГР-60 (рис. 5.5). Прибор представляет собой цилиндрическую камеру емкостью 1 л, шарнирно соединенную при помощи зажима с воронкообразным основанием. Сверху воронка прикрыта мелкоячеистой сеткой, на которую укладывается фильтр. В верхнюю крышку камеры вмонтирован резиновый шланг, к другому концу которого присоединяется насос. На время заливки воды в камеру крышка снимается, а потом плотно закрывается. После того как фильтр установлен, а камера наполнена водой, в нее нагнетают



насосом воздух, под давлением которого вода фильтруется тем быстрее, чем меньше в ней глинистых и илистых частиц. Контроль за давлением ведется по манометру. Создавать в камере давление выше $3,03 \cdot 10^5$ Па (3 атм) запрещается. Отфильтрованная вода, стекающая через воронку, собирается в стеклянную банку. При заметной на глаз замутненности она подвергается повторному фильтрованию через тот же фильтр.

Рис. 5.5. Прибор для фильтрования проб воды под давлением.

1 — крышка, 2 — цилиндрическая емкость, 3 — зажим, 4 — воронка, 5 — манометр, 6 — шланг, 7 — насос.

Фильтры с наносами складываются так, чтобы из них не высыпались наносы, просушиваются, укладываются каждый в отдельный пакетик и отсылаются в лабораторию.

5.3. Изучение стока влекомых наносов

5.3.1. Общие сведения о методах учета стока

Измерение расходов влекомых наносов осложняется искажающим влиянием прибора на характер естественного движения частиц в придонном слое. В разное время был предложен ряд приборов (батометров) для измерения расходов влекомых наносов. В большинстве случаев они оказались ненадежными и в настоящее время не используются. Исключение составляют только сетчатые батометры, хотя и эти приборы нуждаются в усовершенствовании.

Более надежные результаты дают способы определения стока влекомых наносов по объему отложений в отстойниках и водохранилищах и по регистрации элементов донных гряд.

Представляется перспективным использование меченных частиц наносов, а также разработка приборов, основанных на принципе регистрации частоты и энергии удара частиц наносов.

5.3.2. Измерение расходов сетчатыми батометрами

Батометр-сетка применяется для измерения расходов влекомых наносов преимущественно на горных реках, представляет собой прямоугольную металлическую раму шириной 25—40 см и высотой 20 см, к которой крепится металлическая или капроновая сетка. Наиболее совершенной конструкцией батометра является батометр-сетка ПИ-29 (рис. 5.6), предназначенный для улавливания влекомых наносов крупностью от 5 до 100 мм при глубинах до 2 м и скорости течения до 4 м/с.

Измерение расхода влекомых наносов совмещается с измерениями расходов воды и взвешенных наносов. Пробы отбираются на всех скоростных вертикалях в пределах полосы активного движения влекомых наносов, т. е. полосы, где их движение регистрируется батометром. Время выдержки батометра в точке назначается с таким расчетом, чтобы он заполнился наносами приблизительно на $\frac{1}{3}$ своего объема. При медленном движении наносов батометр выдерживается в точке 10 мин.

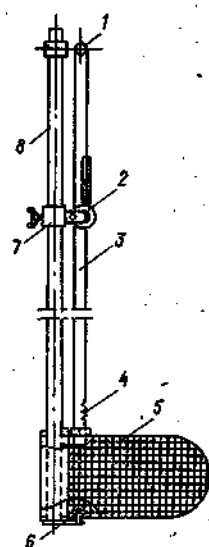


Рис. 5.6. Батометр-сетка ПИ-29.

1 — ролик, 2 — лебедка, 3 — стальной канат, 4 — пружина, 5 — сетка, 6 — ролик, 7 — муфта, 8 — штанга гидрометрическая.

Окончив измерение, пробы просушивают и взвешивают на весах или безмене, после чего для каждой вертикали вычисляется значение элементарного расхода влекомых наносов $P_{вл}$ по формуле

$$P_{вл} = M/(tl), \quad (5.15)$$

где M — масса наносов, кг; t — продолжительность отбора пробы, с; l — ширина входного отверстия батометра, м.

Полный расход влекомых наносов $P_{ва}$ (кг/с), очевидно, составляет

$$P_{ва} = 0,5P_{вл}b_0 + 0,5P_{вл}b_N + \sum_{i=1}^N 0,5(P_{вл_i} + P_{вл_{i+1}})b_i, \quad (5.16)$$

где b_0 и b_N — расстояния между границами полосы активного движения наносов и ближайшими к ним вертикалями, м; b_i — расстояние между i и $(i+1)$ -вертикалями, м; $P_{вл_i}$ — элементарный расход наносов на i -й вертикали, кг/(м·с).

5.3.3. Суммарный способ определения стока влекомых наносов

Суммарный способ определения стока влекомых наносов применяется преимущественно на горных реках, на участках, где наблюдается резкое увеличение площади живого сечения потока, связанное чаще всего с подпором от плотины. Торможение потока при входе в водохранилище сопровождается выпадением наносов крупных фракций и накоплением их в виде донных отложений. Если тем или иным способом определить их массу, то при наличии данных о поступлении и выносе из водохранилища взвешенных наносов можно рассчитать, какая доля наносов принесена во влекомом состоянии. Такой подход к решению задачи называется методом баланса наносов в водоеме.

Допустим, что требуется определить сток влекомых наносов за некоторый период времени T на входе потока в водохранилище. Обозначим сток влекомых наносов во входном створе $M_{вл1}$, а сток взвешенных наносов за этот же период $M_{взв1}$. Если в водохранилище не впадает других водотоков, сумма $M_{вл1} + M_{взв1}$ составит приходную часть баланса наносов. Учтем, что наносы частично оседают в водохранилище, образуя массу донных отложений $M_{отл}$, а частично выносятся из него в виде взвешенных наносов $M_{взв2}$ (расходная часть в балансе наносов).

Запишем уравнение баланса наносов в водохранилище, приравняв расходную и приходные части:

$$M_{взв1} + M_{вл1} = M_{отл} + M_{взв2}. \quad (5.17)$$

Решая его относительно $M_{вл1}$ (искомая величина), получаем

$$M_{вл1} = M_{отл} - (M_{взв1} - M_{взв2}). \quad (5.18)$$

Объем донных отложений определяется по данным промеров, одновременно с которыми отбираются их пробы для гранулометрического анализа и определения плотности. Последнее позволяет перейти в дальнейшем от объема к массе отложений $M_{отл}$. Учет стока взвешенных наносов $M_{взв1}$, $M_{взв2}$ осуществляется систематическими измерениями их расходов во входном и выходном створах.

Применение метода баланса для определения влекомых наносов допустимо только при отсутствии выноса из водохранилища крупных фракций, приносимых потоком в виде влекомых наносов.

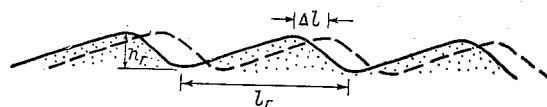
5.3.4. Определение расхода влекомых наносов по наблюдениям за элементами донных гряд

На равнинных реках, дно которых сложено несвязными грунтами (песок, гравий), движение влекомых наносов обычно сопровождается образованием донных гряд. В результате смыва с них частиц наносов наблюдается постепенное сползание гряд вниз по течению. Определив размеры и скорость перемещения гряд, можно оценить расход влекомых наносов.

Наблюдение за элементами гряд производится путем периодических промеров. Для этого в пределах полосы перемещения гряд назначается несколько продольников, длина которых должна равняться 20—30 длинам гряд. Промеры осуществляются с помощью эхолотов.

Совместив профили дна, полученные по одному и тому же продольнику двумя последующими промерами (рис. 5.7), определяют средние значения высоты h_r (разница отметок между гребнем и подошвой гряды), длины l_r гряд (расстояние между двумя соседними гребнями или подошвами), а также среднюю скорость их смещения $\bar{c}_r$. Последняя определяется как частное от деления

Рис. 5.7. Совмещенные профили донных гряд по данным двух последовательных промеров.



среднего смещения вершин и подошв гряд $\bar{l}_r$ на время между двумя промерами T :

$$\bar{c}_r = \bar{l}_r / T. \quad (5.19)$$

Средний элементарный расход влекомых наносов вдоль поперечника $\bar{P}_r$ на основании этих данных может быть подсчитан по формуле

$$\bar{P}_r = a \rho_{отл} \bar{h}_r \bar{c}_r. \quad (5.20)$$

Здесь a — коэффициент формы гряды, обычно принимаемый равным 0,5—0,6; $\rho_{отл}$ — плотность наносов, формирующих гряды, которая определяется на основе анализа проб донных наносов, отбираемых в процессе промеров. Формула для вычисления полного расхода влекомых наносов аналогична формуле (5.16).

По данным В. В. Романовского (ГГИ), точность определения расходов влекомых наносов существенно зависит от положения продольников и частоты измерения их профиля в течение фазы паводка. Так, для получения достаточно надежных результатов необходимо провести по два-три измерения на подъеме и спаде паводка.

5.4. Изучение гранулометрического состава и физических свойств наносов

5.4.1. Состав полевых и лабораторных работ

Гранулометрический состав наносов, т. е. содержание в них частиц разной крупности, определяется путем разделения проб наносов на фракции и оценки относительного содержания каждой из них от общей массы пробы

$$m_i = (M_i / M) \cdot 100 \%, \quad (5.21)$$

где m_i — относительное содержание наносов i -й фракции в пробе, %; M_i — масса наносов i -й фракции, г; M — масса пробы наносов, г.

Комплекс работ по определению гранулометрического состава называется *гранулометрическим анализом*. Анализ предшествует отбору проб наносов. На горных реках с валунно-галечным дном отбор проб может быть заменен обмером частиц на местности или крупномасштабной фотосъемкой обнаруженных или полуза-топленных участков русла.

Разделение валунно-галечных фракций производится на грохоте, обмером частиц в натуре и на фотоснимках. Для выделения подфракций гравия (диаметр частиц 1—10 мм) применяется ситовый метод. Частицы мельче 1 мм разделяются на фракции гидравлическими методами — на фракциометре и пипеточной установке.

Гранулометрический анализ крупных наносов (до 10 мм) выполняется на гидрологическом посту, а более мелких частиц — в лаборатории гидрологической станции или обсерватории. В лаборатории, кроме того, определяется плотность наносов, содержание в них органических веществ и гигроскопической влаги.

5.4.2. Отбор проб наносов на гранулометрический анализ

Отбор проб наносов на гранулометрический анализ производится 3—6 раз в год в наиболее характерные фазы гидрологического режима (подъем, пик, спад весеннего половодья, межень и т. д.). Пробы отбирают одновременно с измерением расхода взвешенных и влекомых наносов на всех или сокращенном числе скоростных вертикалей в зависимости от характера распределения скоростей течения и крупности наносов по ширине реки (обычно пять—семь вертикалей).

На сети Госкомгидромета принято оценивать средний гранулометрический состав наносов по ширине реки (для взвешенных наносов — по живому сечению). Только при специальных исследованиях распределения крупности наносов в потоке гранулометрический анализ выполняется отдельно для каждой пробы.

Суммарная (средняя) проба воды со взвешенными наносами составляется из равных объемов проб, отобранных в разных точках живого сечения теми же приборами (батометрами) и методами (точечный, интеграционный), которые используются при измерениях расходов взвешенных наносов. Объем суммарной пробы V (л) назначается в зависимости от мутности воды S (г/м³) таким, чтобы количество содержащихся в ней наносов M_V (г) было достаточно для гранулометрического анализа

$$V = 1000M_V/S. \quad (5.22)$$

В зависимости от методики гранулометрического анализа масса наносов, удовлетворяющая этому требованию, может меняться от 0,5 до 5 г.

В отличие от проб воды для определения мутности, пробы, отбираемые для гранулометрического анализа, на посту не фильтруются. После отстоя наносов и удаления осветленной воды остаток пробы пересылается в лабораторию. В зимний период во избежание замерзания пробы при пересылке отстой выпаривают, наносы собирают в пакетик и в таком виде переправляют в лабораторию. Применение коагулятора для ускорения отстоя проб, предназначенных для гранулометрического анализа взвешенных наносов, запрещается.

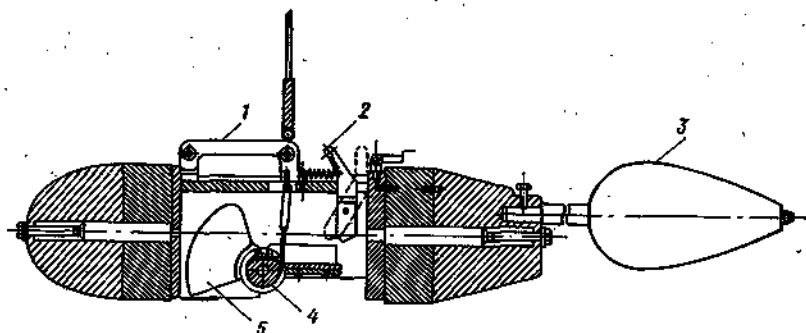
а)



Рис. 5.8. Отборник проб донных отложений ГР-86.

а — общий вид, б — разрез: 1 — поворотный рычаг, 2 — фиксатор, 3 — стабилизатор, 4 — гибкая тяга, 5 — заборный ковш.

б)



Для определения гранулометрического состава влекомых наносов используются образцы, полученные при измерении расхода влекомых наносов.

Отбор проб донных наносов на равнинных реках следует производить 4—6 раз в году в разные фазы водного режима. Извлечение проб осуществляется специальными приборами-грунтоотборниками. Различают приборы для отбора проб с нарушенной и ненарушенной структурой грунта. Наиболее совершенными приборами первой группы являются отборники проб донных отложений ГР-86 и штанговый дночерпатель ГР-91, а второй группы — донный шуп ГР-69.

Отборник проб донных отложений ГР-86 (рис. 5.8) предназначен для работы на крупных и средних реках, а также на водохранилищах при скоростях течения до 2 м/с и глубинах до 30 м, дно которых сложено несвязными или слабосвязными грунтами. Прибор рассчитан на работу с троса с использованием лебедок

или гидрометрических установок ГР-64, ГР-70. Прибору придана форма рыбовидного груза; его масса может изменяться от 35 до 43 кг за счет съемных дисков. Объем ковша для отбора пробы 300 см³.

Пробы отбираются ковшом, приводимым в действие натяжением несущего каната в момент начала подъема отборника. При отрыве отборника от дна ковш под действием натяжения троса поворачивается вокруг оси, захватывая грунт, после чего плотно

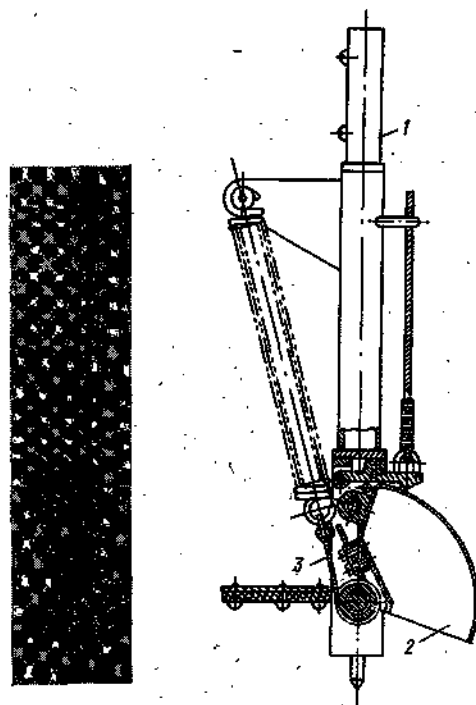


Рис. 5.9. Штанговый дночерпатель ГР-91.

Слева — общий вид, справа — разрез; 1 — штанга, 2 — заборный ковш, 3 — гибкая тяга.

прижимается режущими кромками к резиновой прокладке на основании отборника, предохраняя этим пробу от вымывания. После подвешивания отборника на тросе категорически запрещается вносить пальцы рук в сектор перемещения заборного ковша. Ранее применявшийся дночерпатель по сравнению с ГР-86 менее практичен и выходит из употребления.

Штанговый дночерпатель ГР-91 (рис. 5.9) предназначен для отбора проб илистых и песчано-гравелистых отложений при глубинах до 4,5 м и скоростях течения до 2 м/с. Крепится дночерпатель в основании штанги ПИ-13, ПИ-17. Установив прибор на дне, с помощью тросовой тяги срывают фиксатор и ковш под действием

пружины, врезавшись в дно, захватывает пробу, а затем прижимается режущими кромками к резиновой прокладке ограничивающей полки. При опорожнении ковша и других манипуляциях в его рабочем секторе необходимо предварительно зафиксировать его дополнительно предохранительной чекой.

Масса прибора 3,5 кг, объем ковша 300 см³.

Донный шуп ГР-69 (рис. 5.10) используется для отбора проб илистых, песчаных, гравелистых и мелкогалечных донных наносов в реках и водоемах глубиной до 6 м при скоростях течения до 1 м/с. Основные части прибора — заборный стакан и противовес — закреплены на станине с помощью цапф и могут вращаться на них в вертикальной плоскости. Внутри стакана расположен поршень, шток которого соединен с фиксирующим кольцом. Крепится прибор на штанге или шесте.

При взятии пробы поршень вдавливается грунтом в стакан и снимается фиксатора кольцо, в результате чего после выхода из грунта стакан под действием противовеса опрокидывается. Проба извлекается из стакана с помощью поршня.

Длина шупа 55 см, масса 3,8 кг, объем пробы 175 см³.

Среднюю пробу донных наносов получают путем объединения равных по массе частей



Рис. 5.10. Донный шуп ГР-69.

проб, отобранных на разных вертикалях. Выделение из каждой пробы нужного количества наносов осуществляется способом квартования, сущность которого заключается в следующем. Пробу тщательно перемешивают разравниванием наносов и собиранием их в конус. Повторив эту операцию 3—4 раза, конус делят ножом на четыре примерно равные части. В зависимости от необходимой массы навеска отбирается из одной, двух или более частей перемешанной пробы. Обычно масса средней пробы, требующаяся для анализа, составляет 0,5—1 кг.

Определение гранулометрического состава донных наносов на горных реках с валунно-галечным дном достаточно проводить 1—2 раза в год. При этом вместо отбора проб, который бывает весьма затруднен, рекомендуется использовать фотографический метод.

Фотосъемка производится на пяти—семи характерных площадках, которые в зависимости от ширины осушенной и малозатопленной полосы русла располагаются на ней вдоль, поперек или в шахматном порядке. Расстояние между площадками 3—5 м.

Перед фотографированием на площадку укладывается рама—сетка размером 1×1 м, разделенная на квадраты 10×10 см

шнуром или проволокой. Фотографирование производится любым любительским фотоаппаратом с расстояния (высоты), обеспечивающего захват сетки. Фокальная плоскость (плоскость, в которой располагается фотопленка) фотоаппарата в момент съемки должна быть приблизительно параллельна поверхности площадки. После фотографирования необходимо на площадке размером 0,25—0,5 м² обследовать характер залегания наносов, сняв их верхний слой на глубину самой крупной частицы. Если в русле содержатся донные наносы мельче 10 мм с каждой фотографируемой площадки отбирается их проба 300—500 г.

5.4.3. Методы разделения крупных фракций наносов

Гранулометрический анализ валуино-галечных наносов, а также выделение этих фракций из наносов разнородного по крупности состава производится на гидрологическом посту. Только в случае применения фотографического способа анализ фотоснимков выполняется в лаборатории.

Выделение и разделение на фракции частиц крупнее 10 мм может производиться на грохоте, непосредственным обмером частиц, а также их обмером на фотоснимке.

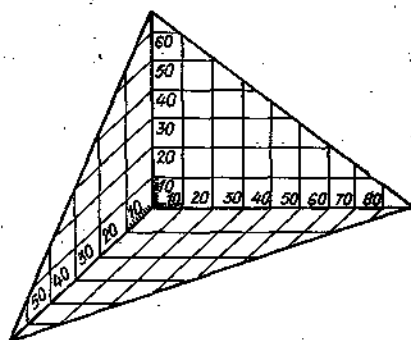


Рис. 5.11. Приспособление для обмера частиц наносов.

Анализ на грохоте (набор металлических сит с диаметрами отверстий 10, 20, 50 и 100 мм): проба разделяется на фракции крупнее 100 мм, 100—50, 50—20, 20—10 и мельче 10 мм.

При обмере частиц фиксируются три характерных размера: длина, ширина и высота. Группировка частиц по фракциям производится по двум меньшим размерам — ширине и высоте. Существенно упрощаются работы по обмеру частиц с применением несложного приспособления, изображенного на рис. 5.11.

Масса каждой фракции, выделенной на грохоте или обмером, определяется на технических весах, а затем вычисляется процентное содержание каждой фракции в пробе (в том числе и частиц мельче 10 мм). Разница между общей массой пробы и суммой масс отдельных фракций не должна превышать 1 %.

Разделение частиц на фракции по фотоснимкам выполняется с помощью специальных шаблонов, вычерченных на полоске целлулоида, оргстекла или кальки. Шаблон для конкретной фракции представляет собой пару концентрических окружностей, диаметры которых соответствуют верхней и нижней границам фракций. Размер диаметров шаблона зависит от масштаба фотоснимка и рассчитывается по формуле

$$d_{ш} = 0,001 l d_{ф}, \quad (5.23)$$

где $d_{ш}$ — диаметр окружности шаблона, соответствующей одному из граничных диаметров фракции ($d_{ф}$); l — длина стороны рамы на фотоснимке. Все параметры в миллиметрах.

Чтобы при обработке разных фотоснимков для выделения одной и той же фракции не прибегать к разным шаблонам, следует печатать фотоснимки в одинаковом масштабе, добиваясь при увеличении равенства изображения стороны масштабной рамы одной и той же величине. Если выбрать масштаб 1:10 (длина изображения стороны рамы 10 см), диаметры окружностей шаблона для соответствующих фракций составят:

Фракция, мм	200—100	100—50	50—20	20—10
Диаметр окружности, мм	20—10	10—5	5—2	2—1

К определенной фракции относятся те частицы, которые на фотографии занимают площадь, большую площади внутреннего шаблона и меньшую или равную площади наружного шаблона.

Для крупных частиц, расположенных на границе площадки и пересекаемых стороной рамы, высчитывается их доля, находящаяся внутри рамы. Сумма частиц диаметром более 100 мм подсчитывается с точностью до 0,1 частицы, для более мелких фракций — до одной частицы.

Процентное содержание частиц i -й фракции (m_i) рассчитывается по формулам:

а) при равномерном распределении крупности наносов по глубине

$$m_i = \left(f_i / \sum_{i=1}^N f_i \right) \cdot 100 \% \quad (5.24)$$

б) при наличии на поверхности отмостки из более крупных частиц

$$m_i = \left(n_i d_i^3 / \sum_{i=1}^N n_i d_i^3 \right) \cdot 100 \% \quad (5.25)$$

Здесь f_i — площадь, занятая частицами i -й фракции; n_i — число частиц i -й фракции; d_i — средний диаметр частиц i -й фракции, вычисляемый как среднее арифметическое из диаметров, определяющих границы фракций; N — число фракций (в том числе и

частицы менее 10 мм). Площадь f_i для фракций крупнее 10 мм рассчитывается по формуле

$$f_i = 0,25n_i\pi d_i, \quad (5.26)$$

а для частиц менее 10 мм по разности между площадью, ограниченной рамой F , и суммой площадей, занятых более крупными фракциями:

$$f_{<10} = 0,75 \left(F - \sum_{i=1}^{N-1} f_i \right). \quad (5.27)$$

Коэффициент 0,75 учитывает пористость мелких наносов.

При расчетах по формуле (5.25) среднее число частиц мельче 10 мм определяется как

$$n_{<10} = 4f_{<10}/(\pi d_{<10}), \quad (5.28)$$

где принимается $d_{<10} = 5$ мм.

В процессе выделения крупных фракций фотографическим методом определяется только общий процент частиц мельче 10 мм. Если количество последних превышает 10 %, их дальнейший гранулометрический анализ осуществляется в лаборатории другими методами.

5.4.4. Методы разделения средних и мелких фракций

Ситовый метод применяется для разделения на подфракции гравия и отделения от него частиц крупнее 10 мм и мельче 1 мм. Для анализа требуется: однородных по крупности песков 100—200 г, гравелистых песков 300—500 г, галечно-гравелистых песков 500—700 г. Навеска, предназначенная для анализа, отбирается из пробы способом квартования и проходит механическую подготовку, заключающуюся в растирании слипшихся комочков наносов.

Анализ проводится с помощью набора сит с диаметром ячеек 10, 5, 2 и 1 мм. Частицы, оставшиеся на сите (в том числе и застрявшие в его ячейках), относятся к фракции, нижней границей которой является диаметр ячеек этого сита, а верхней — диаметр отверстий следующего по номеру более крупного сита.

Сумма масс отдельных фракций (в том числе частиц более 10 мм и менее 1 мм) не должна отличаться от массы навески более чем на 0,5 %. Невязка разбрасывается по отдельным фракциям пропорционально их массам.

Гидравлические методы. Из частиц, просеянных сквозь сито с ячейками 1 мм, после тщательного перемешивания отбирается навеска для дальнейшего анализа. Масса навески определяется на аналитических весах и должна составлять 0,5—2,0 г для анализа на фракционном и 0,5—5,0 г, если анализ предполагается выполнять комбинированным способом «пипетка—фракциометр». Механическая подготовка образца к анализу в этом

случае различна для заиленных песчаных отложений и илисто-глинистых донных наносов.

Навеска заиленных песков в течение суток размачивается в дистиллированной воде, после чего тщательно растирается резиновым пестиком в фарфоровой ступке. Навеска илистых и глинистых донных отложений предварительно размачивается в небольшом количестве дистиллированной воды в течение двух суток. Тщательно растерев, ее сливают в колбу и, долив 300—500 мл воды (с добавкой 0,5—1,0 мл 25 %-ного раствора аммиака), кипятят в течение одного часа (при отсутствии аммиака кипячение продолжается 3 ч). После того, как проба остынет и примет комнатную температуру, она готова к анализу.

Несколько сложнее обстоит дело с подготовкой к анализу образцов засоленных глинистых наносов, чаще всего встречающихся на поймах рек. В этом случае анализу предшествует отмывка навески от водно-растворимых солей. Отмывка производится дистиллированной водой, фильтруемой методом автоматического фильтрования сквозь фильтр, на котором уложена навеска. Отмывка продолжается до тех пор, пока с фильтра не перестанут поступать ионы хлора и сульфата, что устанавливается специальными реагентами (азотнокислым серебром и хлористым барием). После окончания промывки количество со-

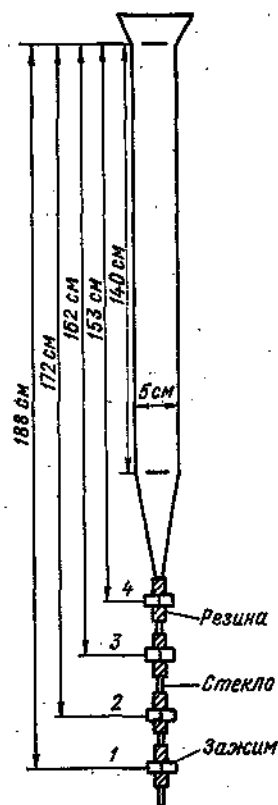


Рис. 5.12. Фракциометр ГР-82.

лей в навеске M_c определяется выпариванием части фильтрата ΔV с последующим пересчетом на весь его объем (V):

$$M_c = M'_c V / \Delta V, \quad (5.29)$$

где M'_c — масса солей, содержащихся в объеме фильтрата, подвергнутого выпариванию.

Как указывалось выше, в основе гидравлических методов разделения наносов на фракции лежит различие в скорости оседания частиц разного диаметра в спокойной воде. Наиболее просто этот принцип реализуется при использовании фракциометра.

Анализ на фракциометре. Фракциометр ГР-62 (рис. 5.12) представляет собой стеклянную трубку диаметром

5 см, к нижней части которой с помощью шлангов присоединены последовательно три стеклянные трубки и пробирка. Заполнив фракциометр чистой водой, в него вводят прошедшую механическую подготовку пробу и включают секундомер. Сначала основания фракциометра достигнут частицы наиболее крупной фракции. В момент времени t_i , когда наиболее мелкие частицы этой фракции окажутся на уровне нижнего зажима, он перекрывается и поступление частиц в пробирку прекращается. Аналогично поступают и со следующими зажимами в моменты достижения наиболее мелкими частицами других фракций соответствующих трубок. Время перекрытия трубки, предназначенной для сбора i -й фракции наносов, рассчитывается по формуле

$$t_i = l_i / (k_{ii} u_i), \quad (5.30)$$

где l_i — расстояние между поверхностью воды во фракциометре и зажимом i -й трубки (пробирки); u_i — гидравлическая крупность наиболее мелких частиц i -й фракции при температуре воды 15 °C; k_{ii} — коэффициент, зависящий от температуры воды во фракциометре.

Наносы, собранные в пробирке и трубочках, выделяются из воды выпариванием.

Так разделяются наносы на фракции 1,0—0,5; 0,5—0,2; 0,2—0,1 и 0,1—0,05 мм. Количество частиц размером менее 0,05 мм определяется по разности между массой навески и суммой масс выделенных фракций.

Если метод фракциометра является начальным звеном гранулометрического анализа, т. е. частицы крупнее 1 мм в наносах отсутствуют, необходимо установить дополнительно размеры наиболее крупной частицы в навеске путем определения ее гидравлической крупности по времени прохождения ею во фракциометре фиксированного расстояния (обычно 1400 мм).

Пипеточный метод разделения наносов на фракции 0,05—0,01, 0,01—0,005, 0,005—0,001 и менее 0,001 мм состоит в следующем. Введем навеску наносов массой M в цилиндр с дистиллированной водой и тщательно перемешаем суспензию. В результате этого частицы всех размеров, присутствующие в навеске, равномерно распределяется по всему цилиндру, т. е. в любой его части в одном и том же объеме пробы будет находиться одинаковое количество частиц одинаковых размеров. Следовательно, если в этот момент из любой точки цилиндра отобрать пробу воды объемом ΔV , то масса содержащихся в ней наносов ΔM составит

$$\Delta M = \Delta V M / V, \quad (5.31)$$

а масса частиц любой (i -й) фракции

$$\Delta M_i = \Delta V M_i / V, \quad (5.32)$$

где V — объем суспензии в цилиндре; M_i — масса i -й фракции в навеске.

После окончания перемешивания частицы начнут погружаться каждая в соответствии со своей гидравлической крупностью.

Отберем через некоторое время t_1 , отсчитываемое от момента окончания перемешивания, пробу с глубины h . Если это время меньше времени, которое необходимо для того, чтобы самые крупные частицы, содержащиеся в навеске, прошли расстояние h , то и концентрации частиц наносов всех размеров в пробе будут идентичны исходным. Если же время отбора пробы заведомо

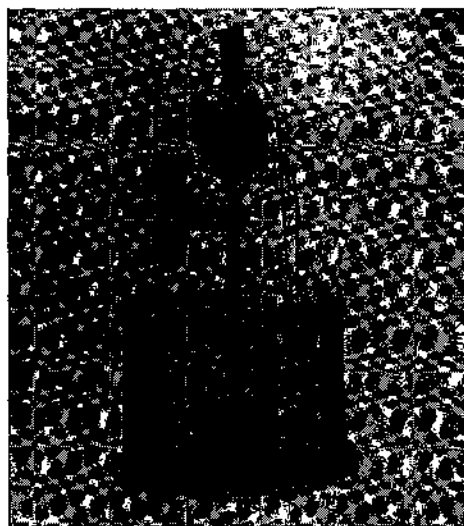


Рис. 5.13. Пипеточная установка ПИ-22.

1 — пипетка Мора, 2 — край переключения пипетки, 3 — аспираторные сосуды, 4 — цилиндры.

больше, то в ней не окажется частиц с гидравлической крупностью более u_1 , равной

$$u_1 = h/t_1, \quad (5.33)$$

так как даже те из них, которые в момент перемешивания оказались в самом поверхностном слое, к этому моменту пройдут сечение ss и будут находиться ниже него. Что касается частиц меньших размеров, их масса в сечении ss будет оставаться той же, что и в момент перемешивания. Это значит, что количество частиц размером менее d_1 (соответствующим гидравлической крупности u_1), содержащихся в навеске, может быть вычислена как

$$M_{d < d_1} = V \Delta M / \Delta V. \quad (5.34)$$

Аналогично могут быть получены массы частиц диаметром менее и других наперед заданных значений d_2 , d_3 и т. д.

Если время и глубина отбора проб назначаются не случайно, а рассчитываются в соответствии с гидравлической крупностью частиц, размеры которых соответствуют границам фракций,

подлежащих выделению, то массы отдельных фракций в навеске определяются по следующей таблице:

Фракция d мм . . .	$> 0,005$	$0,05-0,01$	$0,01-0,005$	$0,005-0,001$	$< 0,001$
Масса M г . . .	$< 0,05$	$0,05-0,01$	$0,01-0,005$	$0,005-0,001$	$> 0,001$

Анализ производится на установке ПИ-22 (рис. 5.13), состоящей из шести стеклянных цилиндров, позволяющих одновременно анализировать шесть проб, и пипетки Мора. Пипетка мягким шлангом подсоединена к крану, установкой которого в то или иное положение может последовательно подключаться к вакуумной камере аспиратора (при отборе пробы), к смывному сосуду (для промывки пипетки) или в нее будет поступать атмосферный воздух (при сливе пробы из пипетки). Время отбора проб корректируется с учетом температуры воды в цилиндре введением коэффициента, зависящего от вязкости воды. После отбора очередной пробы суспензия в цилиндре заново перемешивается. Наносы из проб выделяются выпариванием.

Подчеркнем, что, в отличие от более крупных наносов, масса которых определяется в воздушно-сухом состоянии, взвешивание илистых и глинистых фракций производится после удаления из них гигроскопической влаги, что достигается двух-трехчасовой сушкой в термостате при температуре $105-110^\circ\text{C}$. В этом случае и относительное содержание фракций вычисляется по отношению к массе абсолютно сухой навески, которая определяется как

$$M_{o.c} = M - M_{г.в}, \quad (5.35)$$

где M — масса навески в воздушно-сухом состоянии; $M_{г.в}$ — масса гигроскопической влаги в навеске.

Если навеска подвергалась промывке от водно-растворимых солей, то из ее массы дополнительно необходимо вычесть массу солей.

Невязка суммарной массы выделенных фракций не должна превышать 3 % массы навески. Разбрасывается невязка пропорционально массе фракций.

Если анализ осуществляется комбинированным способом «пипетка—фракциометр», то остатки суспензии, прошедшей анализ пипеточным способом, после отмучивания частиц размером менее 0,05 мм поступают на фракциометр.

5.4.5. Обработка и оформление результатов гранулометрического анализа

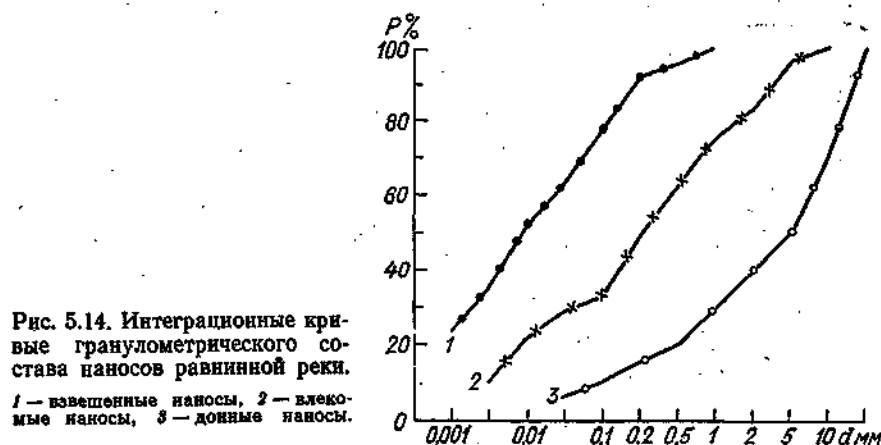
Данные гранулометрического анализа заносятся в таблицу, где и подсчитывается окончательно процентное содержание каждой фракции. Доля, приходящаяся на фракции, которые выделялись из навески исходной пробы, вычисляется по формуле (5.21). Если же навеска отобрана из пробы, из которой другими

методами уже выделена часть фракций d_i , то расчет ведется по формуле

$$m_i = M_i(100 - P_{кр})/M, \quad (5.36)$$

где $P_{кр}$ — процентное содержание крупных фракций, больших d_i ; M — масса навески.

Для наглядного представления гранулометрического состава прибегают к графической интерпретации результатов анализа. Наиболее широкое распространение получили интегральные кривые гранулометрического состава (рис. 5.14).



При построении интегральной кривой по оси абсцисс графика через равные интервалы откладываются границы фракций 0,001; 0,005; 0,01; 0,05 мм и т. д., а по оси ординат — процентное содержание частиц, меньших верхней границы фракции. Верхней границей самой крупной фракции служат наиболее крупная частица пробы (ей соответствует точка оси ординат 100 %). В нижней части интегральная кривая экстраполируется до нижней границы самой мелкой фракции.

Интегральные кривые позволяют быстро и просто определять обеспеченность частиц того или иного диаметра (процентное содержание частиц, меньших заданного диаметра). В свою очередь соотношения обеспеченностей частиц разного размера используются в качестве показателей степени неоднородности (сортированности) наносов.

5.4.6. Определение гигроскопической влажности и плотности наносов

Содержание гигроскопической влаги определяется только для донных отложений в естественном состоянии со значительным содержанием количества илесто-глинистых частиц. Эта операция выполняется путем просушивания пробы или ее навески

в термостате при температуре 105—110 °С в течение 5 ч. Разница в массе пробы в воздушно-сухом состоянии и после просушки равняется массе содержащейся в ней гигроскопической влаги.

Плотность наносов $\rho_{\text{ч}}$ представляет собой отношение массы частиц к их объему в твердом теле без пор.

Для частиц более 2 мм $\rho_{\text{ч}}$ определяется по объему вытесненной ими воды. Плотность частиц диаметром менее 2 мм определяется с помощью пикнометра. Для этого пикнометр сначала заполняется определенным объемом дистиллированной воды V и взвешивается. Затем, слив часть воды и всыпав в пикнометр 10—15 г наносов, пробу кипятят в течение 30 мин для удаления из пор наносов воздуха. Охладив пробу до комнатной температуры, в пикнометр доливают дистиллированной воды до метки, соответствующей объему V , и взвешивают. На основании этих данных плотность частиц наносов подсчитывается по формуле

$$\rho_{\text{ч}} = m\rho_0/(m + m_1 - m_2). \quad (5.37)$$

Здесь m — масса абсолютно сухих наносов, определенная непосредственно или пересчетом массы наносов в воздушно-сухом состоянии с учетом содержащейся в них гигроскопической влаги; m_1 — масса пикнометра с водой объемом V ; m_2 — масса пикнометра с водой и наносами общим объемом V ; ρ_0 — плотность воды (1 г/см³).

Средняя плотность частиц смешанных наносов определяется по формуле

$$\rho_{\text{ч}} = (\rho_{\text{ч}_1}\alpha_1 + \rho_{\text{ч}_2}\alpha_2)/100, \quad (5.38)$$

где $\rho_{\text{ч}_1}$, $\rho_{\text{ч}_2}$ — плотность частиц диаметром менее и более 2 мм; α_1 , α_2 — процентное содержание в наносах частиц диаметром менее и более 2 мм.

Плотность донных отложений (смеси наносов в естественном залегании) $\rho_{\text{с}}$ представляет собой отношение их массы к их объему вместе с порами. Для определения этой характеристики в лабораторных условиях навеску наносов вводят в цилиндр с дистиллированной водой и отстаивают в течение нескольких суток, давая наносам уплотниться. Для лучшего уплотнения по стенкам цилиндра периодически (1—2 раза в сутки) постукивают резиновым молоточком. Время уплотнения составляет: для песчано-гравелистых отложений 5—7 сут, для илисто-глинистых 10—12 сут. Масса наносов, содержащих илисто-глинистые частицы, определяется в абсолютно сухом состоянии.

На основании данных о плотности частиц и смеси наносов может быть рассчитана пористость наносов

$$n = 100 (1 - \rho_{\text{с}}/\rho_{\text{ч}}), \quad (5.39)$$

показывающая, какую долю (в %) объема наносов в их естественном залегании занимают пустоты между частицами (поры).

6.1. Зависимости расходов от уровней воды

Сток воды — одно из основных и наиболее широких понятий гидрологии суши. В общем случае под стоком понимают движение воды по поверхности земли, в речных руслах и песчано-грунтовой толще. Если же имеют в виду одну из характеристик водных ресурсов, *стоком воды* называют количество ее, протекающее в створе за некоторый период времени — сутки, декаду, месяц, год. Сток выражается в осредненных за эти периоды значениях расходов воды в $\text{м}^3/\text{с}$ или км^3 .

Расходы воды на гидрологических постах измеряются лишь дискретно — в отдельные моменты времени. Однако для характеристики водных ресурсов необходимы ежедневные, а иногда и ежечасные значения расходов. Задача гидрометрии состоит в том, чтобы воспроизвести *гидрограф* — последовательность ежедневных (средних суточных) расходов воды (ЕРВ) как непрерывную функцию времени по данным дискретных измерений. Выполняемые при этом графические и аналитические операции в совокупности составляют методы учета стока. Они достаточно многообразны и в определенной степени отражают историю развития речной гидрометрии.

По назначению получаемых данных различают два варианта учета стока:

- 1) режимный — для изучения водных ресурсов и гидрологического режима рек;
- 2) оперативный — для текущего контроля водности рек при гидролого-прогностическом обслуживании народного хозяйства.

В том и другом случае сток учитывается по гидрометрическим данным, но их интерпретация принимает разные формы. Режимные характеристики стока вычисляют по истечении годового цикла, так сказать «задним числом», имея в распоряжении всю совокупность выполненных измерений и сведений о характере совершившихся гидрологических процессов. Оперативный учет стока ведется в условиях изменяющейся гидрологической обстановки и пропускной способности русла, что приводит к необходимости прогнозировать (экстраполировать) эти изменения на интервал времени от состоявшегося до очередного измерения расходов воды.

6.1.1. Пропускная способность русла и кривые расходов воды

Пропускная способность русла характеризуется расходом воды, протекающей в нем при данном уровне. В условиях равномерного движения потока основные факторы, определяющие пропуск-

ную способность русла, непосредственно устанавливаются на основании формулы Шези—Маннинга. К ним относятся гидравлический радиус R (для широких рек — средняя глубина h), пьезометрический уклон I и коэффициент шероховатости n . Определить два последних элемента (I и n) достаточно сложно. Вместе с тем если рассматривать отдельно взятый гидрометрический створ, то его гидравлические и геометрические элементы в конечном счете зависят от уровня воды H , которому, следовательно, может быть поставлен в соответствие расход воды Q . Так речная гидрометрия пришла к своей важнейшей зависимости расходов воды от уровней, которая в графическом виде получила название *кривой расходов* (КР). Эти кривые строятся по данным наблюдений и позволяют с достаточной точностью определять расходы воды в устойчивых руслах при движении потока, близком к равномерному. Но вместе с тем нельзя переоценивать возможности графического представления пропускной способности русла. В настоящее время разработаны объективно-гидравлические методы ее интерпретации, которые должны заменить устаревшие геометрические схемы, субъективные (даже «эстетические») соображения, еще недавно служившие для построения КР.

Чтобы правильно установить характер связи между расходами и уровнями, необходимо тщательно проверять и анализировать исходные материалы. Этот анализ следует начинать с проверки измеренных расходов воды (ИРВ), при этом необходимо:

- проверить правильность вычисления средних скоростей и глубин потока;

- убедиться в близости уровня воды в день измерения расхода уровню того же дня по таблице ежедневных уровней воды (ЕУВ);

- сопоставить записи о состоянии реки при измерении расхода воды с теми же данными в таблице ЕУВ.

Важно выяснить, учитывался ли при измерении полный расход воды или только его часть (без расходов в пойме и протоках). Выяснение полноты измерения расхода производится по топографическому плану участка поста, поперечному профилю гидрометрического створа, построенному до высшего уровня, при этом определяется отметка уровня воды, при которой начинает затопливаться пойма и действуют протоки и рукава. Затем, сопоставляя зафиксированные при измерении расходов воды площади водного сечения и ширины реки с их значениями по профилю (при уровне выше выхода реки на пойму), выясняют, учитывался расход в пойме или нет.

При анализе материалов наблюдений во многом полезны совмещенные поперечные профили по гидрометрическому створу, построенные по промерам глубин, выполненным при измерении расхода воды. Анализ этих профилей дает возможность установить степень устойчивости русла и определить характер его деформации. Если глубины измерялись правильно и русло реки

устойчивое, то линии дна всех профилей должны совпасть. При деформации будет наблюдаться существенное несовпадение линии дна.

Порядок построения КР и связанных с нею кривых площадей поперечного сечения $F=f(H)$ и средних скоростей $v_{ср}=f(H)$ иллюстрируется рис. 6.1.

Кривая расходов воды $Q=f(H)$ строится на миллиметровой бумаге в прямоугольной системе координат совместно с кривыми

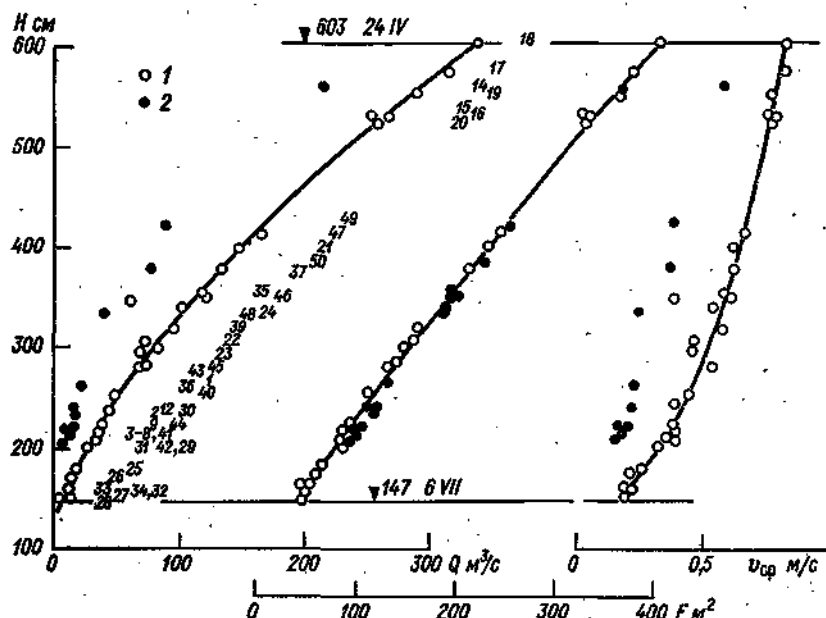


Рис. 6.1. Кривые $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $v_{ср}=f(H)$. Река Пола — д. Налючи, 1980 г. 1 — период, свободный ото льда, 2 — зимний период.

$F=f(H)$ и $v_{ср}=f(H)$. Масштабы для построения кривых подбираются в зависимости от амплитуды уровней, расходов, площадей и скоростей течения с таким расчетом, чтобы хорда кривой расходов располагалась примерно под углом 45° , а хорды кривых площадей и средних скоростей — под углом 60° к оси абсцисс. Чтобы кривые не пересекались, нули шкал площадей и скоростей сдвигаются вправо. Точки с координатами (Q, H) , (F, H) и $(v_{ср}, H)$ обводятся кружками диаметром 1,5—2,0 мм; против точек расходов на расстоянии 3—5 см от них (по горизонтали) выписываются даты измерения. Кривая расходов воды проводится по середине полосы рассеивания точек (Q, H) сначала от руки, а затем по лекалу. При наличии большого количества измеренных расходов кривая $Q=f(H)$ может быть проведена по центрам тяжести групп точек. Таким же образом проводятся кривые $F=f(H)$ и $v_{ср}=f(H)$.

Если на участке гидрометрического створа при определенном уровне начинают действовать пойма, протоки и рукава, то кривые $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $v_{\text{ср}}=f(H)$ для них строятся сначала отдельно, а затем вычерчивается суммарная кривая $Q=f(H)$. Значения расходов для этой кривой получаются суммированием расходов, снятых для основного русла, поймы, проток при одной высоте уровня для всех кривых.

При значительной амплитуде расходов, когда отношение наибольшего расхода к наименьшему составляет 20 и больше, нижняя часть кривой расходов в пределах 20—30 % амплитуды уровней вычерчивается в увеличенном масштабе (обычно в 5—10 раз крупнее). Это позволяет точнее определить расходы воды при низких уровнях.

Зависимость $Q=f(H)$ при однозначной связи между расходом воды и уровнем имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной к оси уровней. Наибольшая кривизна обычно наблюдается при средних уровнях. Пологость кривой в верхней части зависит от крутизны и шероховатости склонов берегов. Если крутизна склонов уменьшается, то кривая делается более пологой; увеличение шероховатости склонов, наоборот, вызывает рост крутизны кривой.

Зависимость $F=f(H)$ при правильной форме русла имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной также к оси уровней; в местах резкого изменения профиля направление кривой площади меняется. При прямоугольной форме русла кривая $F=f(H)$ превращается в прямую линию. Если расходы воды измерялись в нескольких гидрометрических створах, то на чертеже может быть несколько кривых $F=f(H)$.

Зависимость $v_{\text{ср}}=f(H)$ более сложна, так как на скорость оказывает влияние шероховатость русла, продольный уклон водной поверхности и гидравлический радиус. Лишь для устойчивых незаросших русел при отсутствии переменного подпора зависимость $v_{\text{ср}}=f(H)$ имеет вид плавной кривой с выпуклостью, обращенной к горизонтальной оси. При резком увеличении гидравлических сопротивлений, что особенно проявляется при выходе воды на пойму, средние скорости уменьшаются и могут принимать минимальные значения (это явление Г. В. Железняков назвал «кинематическим эффектом безнапорного потока»). При дальнейшем повышении уровня воды, когда влияние шероховатости поймы и массообмена на границе пойменного и руслового потоков будет уменьшаться, значение средней скорости постепенно начинает возрастать.

При устойчивом русле и мало изменяющемся гидравлическом режиме допускается построение одной *многолетней* КР. Для этого необходимо располагать 50—60 измерениями расходов воды в течение по крайней мере трех лет. Рассеяние измеренных расходов должно находиться в пределах 8—10 % в верхней части и 12 % в нижней части КР, а для площадей водного сечения — соответственно 5 и 6 %. Точки расходов, измеренных в различные годы,

наносятся разными знаками, например, пустым кружком, залитым кружком, пустым квадратом и т. д. Многолетняя КР используется для учета стока в течение ряда лет при условии, что она ежегодно проверяется и подтверждается контрольными измерениями расходов.

Взаимное соответствие кривых $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $v_{\text{ср}}=f(H)$ выражается равенством

$$Q = Fv_{\text{ср}}. \quad (6.1)$$

Чтобы произвести увязку этих трех кривых, через каждые 10 % амплитуды уровня, а на более изогнутых отрезках чаще с кривых снимаются значения расходов воды, площадей и скоростей и подставляются в формулу (6.1). Если расхождение между произведением $Fv_{\text{ср}}$ и расходом, снятым с кривой, не более 1 %, то кривые проведены правильно. В противном случае необходимо исправить те кривые, которые отклоняются от среднего положения. Обычно требуется несколько раз вводить исправления и увязывать кривые. Пример увязки кривых приведен в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Увязка кривых $Q=f(H)$, $F=f(H)$ и $v_{\text{ср}}=f(H)$

р. Пола — дер. Налючи

1980 г.

H см	Q м³/с с кривой	F м²	$v_{\text{ср}}$ м/с	$Q = Fv_{\text{ср}}$ м³/с	Расхождение ΔQ %
147	7,18	51,7	0,14	7,24	0,8
160	14,7	56,1	0,26	14,6	-0,7
170	20,5	60,6	0,34	20,6	0,5
590	325	402	0,81	326	0,2
603	336	407	0,82	334	-0,6

Для подсчета средних суточных расходов воды составляется таблица координат КР (табл. 6.2). Сначала в ее нулевую графу выписываются координаты опорных точек, за которые принимаются значения расходов, снятые с кривой $Q=f(H)$ при высшем и низшем уровнях, и значения расходов через 2,1 или 0,5 см на графике (в зависимости от кривизны отдельных участков кривой и масштаба уровня). Обычно значения расходов снимаются с кривой через интервалы уровня от 5 до 20 см, а при мелком масштабе и при пологой кривой эти интервалы можно увеличить до 50 см. Затем путем линейной интерполяции вычисляются промежуточные значения расходов для каждого сантиметра уровня. Расходы, вычисленные путем интерполяции, не должны отклоняться от кривой более чем на 1,5 % в верхней и средней частях и на 3 % в ее нижней части. При снятии координат опорных точек необходимо следить, чтобы приращение расхода для каждого

Таблица 6.2

Координаты кривой расходов воды
р. Пола — дер. Налючи

H см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
140								7,18	7,76	8,34
150	8,92	9,50	10,1	10,7	11,2	11,8	12,4	13,0	13,5	14,1
160	14,7	15,3	15,9	16,4	17,0	17,6	18,2	18,8	19,3	19,9
170	20,5	21,1	21,7	22,2	22,8	23,4	24,0	24,6	25,1	25,7
590	325	326	327	327	328	329	330	331	332	333
600	333	334	335	336						

последующего интервала уровня было больше предыдущего или оставалось без изменения.

Собственно учет стока сводится к вычислению ЕРВ. После того, как составлена таблица координат КР, ЕРВ определяются непосредственно по этой таблице как значения, отвечающие среднему суточному уровню, который принимается по таблице ЕУВ. При значительных суточных колебаниях уровня следует определять расход для каждого срочного уровня, а средний суточный расход вычислять как среднее взвешенное по времени из полученных значений расходов.

В искусственных контрольных руслах для вычисления ЕРВ используются КР $Q(H)$, которые в этом случае носят вполне устойчивый характер.

ЕРВ в створах, оборудованных гидрологическими расходомерами, вычисляются или по готовым таблицам и формулам в зависимости от уровней и других параметров истечения или непосредственно по кривой $Q(H)$, полученной в результате градуировки сооружений. Гидравлические расходомеры, как правило, снабжены СУВ. Поэтому вычисление ЕРВ начинается с обработки лент СУВ, с которых через интервалы 5 мин снимается уровень воды с точностью 0,2 см для водосливов и 0,5 см для гидрометрических установок других типов. Дальнейшая обработка таблицы стока производится следующим образом. Вычисляется напор, который представляет собой алгебраическую сумму значений уровня, снятых с ленты самописца, и приводки. По вычисленным напорам и градуировочным таблицам гидрометрического сооружения находятся расходы воды. Затем вычисляется полусумма двух смежных расходов и интервал времени между этими расходами. Произведение полусуммы расходов на интервал даст объем стока воды за данный интервал времени. Объем стока воды за сутки равен сумме объемов за число интервалов в сутках. Делением суммарного объема стока за сутки на число секунд в сутках (86 400) находится средний суточный расход воды. По вычисленным расходам за каждые сутки составляется таблица «Ежедневные расходы воды».

Описанные операции подготовки зависимости $Q(H)^1$ для учета стока достаточно просты. Однако в современных условиях широкого распространения ЭВМ, в том числе настольных калькуляторов, оказывается предпочтительной аналитическая форма связи расходов с уровнями воды. Одно из первых выражений для функции $Q(H)$ предложено В. Г. Глушковым в 1915 г.:

$$Q = a(H - H_0)^m, \quad (6.2)$$

где H_0 — уровень нулевого расхода, установление которого требует специального изучения участка гидроствора. Если же исходить только из совокупности измеренных расходов, то зависимость $Q(H)$ целесообразно представить на статистической основе — уравнением регрессии (УР) расходов по уровням

$$Q = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_n H^n. \quad (6.3)$$

Нецелесообразно заранее фиксировать порядок этого многочлена: он должен определяться в результате численных экспериментов по критерию минимального отклонения от аппроксимирующей функции. Чаще всего оптимальное значение показателя степени n составляет 2—3. Для вычисления ЕРВ в выражение (6.3) подставляется значение среднего суточного уровня H_c . При немонотонном суточном ходе уровня в уравнение (6.3) вводятся соответствующие дополнительные коэффициенты, учитывающие форму гидрографа:

$$Q = a_0 + a_1 H_c + \frac{(m+1)^2}{2m+1} a_2 H_c^2 + \dots + \frac{(m+1)^n}{nm+1} a_n H_c^n,$$

где $m = H_{\text{макс}}/H_c - 1$.

Как известно, УР дают наиболее точные результаты при значениях аргументов, находящихся в средней части общего диапазона их измерения. Поэтому для повышения точности этих уравнений важно охватить измерениями экстремальные расходы и основные фазы колебания уровней. Считают, что для каждой фазы практически требуется не менее пяти измерений.

6.1.2. Методы экстраполяции расходов воды за пределы диапазона их измерения

Известно, что по различным объективным причинам не всегда удается измерить расходы воды при наивысших, а нередко и при наинизших уровнях. В этих случаях возникает необходимость использовать КР и УР за пределами диапазона измерения расходов, т. е. экстраполировать их до максимальных и минимальных значений.

¹ В дальнейшем будет использоваться такая краткая форма записи связи $Q=f(H)$ и соответственно других функций.

Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона измерения — одна из достаточно сложных форм интерпретации гидрометрических данных. Однако еще до недавнего времени она сводилась к простой графической операции проведения кривых расходов в нижней или верхней части амплитуды колебания уровней по тенденции (точка 1 на рис. 6.2). Этот прием достаточно произволен: КР продолжается до высшего уровня «на глаз» соответственно направлению обоснованной части. Естественно, что

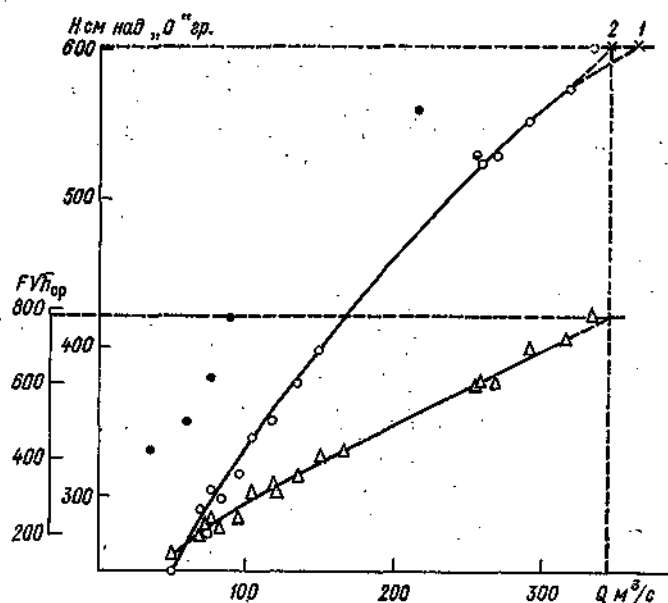


Рис. 6.2. Методы экстраполяции кривых расходов воды.
1 — проведение по «тенденции», 2 — по способу Стивенса.

для получения сколько-нибудь надежных результатов следует учитывать ряд дополнительных условий, позволяющих предугадать положение КР в зоне экстраполяции. Так, если крутизна берегов в этой зоне уменьшается, то пологость КР должна быть соответственно увеличена. Напротив, при увеличении крутизны береговых склонов и шероховатости их поверхности, например при затоплении кустарниковой растительности, следует экстраполировать КР в менее пологом направлении.

Верхнюю часть обоснованного измерениями участка кривой, как правило, нецелесообразно проводить через точку наивысшего из измеренных расходов, а придавать КР осредненное положение по отношению по всем точкам наибольших измеренных расходов.

Как видим, описанный способ экстраполяции не свободен от элементов субъективизма и ухищрений. Поэтому в гидрометрии никогда не прекращался поиск более объективных приемов. Од-

ним из исторически наиболее ранних является способ Стивенса (1907 г.). Он основан на почти линейной связи расхода воды с морфометрическим комплексом, вытекающим из формулы Шези (точка 2 на рис. 6.2):

$$Q = f(F \sqrt{h_{\text{ср}}}) \quad (6.4)$$

при $C \sqrt{I} = \text{const.}$

Линейный характер этой связи обычно наиболее выражен на сравнительно крупных реках.

Для построения графика функции (6.4) по данным измерений расходов вычисляют значения $F \sqrt{h_{\text{ср}}}$ и откладывают их по дополнительной оси ординат на том же чертеже, на котором построена КР. Масштаб шкалы $F \sqrt{h_{\text{ср}}}$ выбирается так, чтобы наибольшее значение этой величины находилось ниже наивысшего уровня $H_{\text{макс}}$. По наложенным точкам проводят прямую или небольшой кривизны линию $Q = f(F \sqrt{h_{\text{ср}}})$, которая экстраполируется до наибольшего значения $F \sqrt{h_{\text{ср}}}$, отвечающего высшему уровню. Значения площади водного сечения и средней глубины при этом уровне определяются по поперечному профилю гидроствора. По величине $F \sqrt{h_{\text{ср}}}$, соответствующей высшему уровню, с графика $Q = f(F \sqrt{h_{\text{ср}}})$ снимается значение расхода и на полученную точку экстраполируется кривая $Q = f(H)$.

При наличии резких переломов в поперечном профиле русла зависимость $Q = f(F \sqrt{h_{\text{ср}}})$ выражается ломаной линией, что снижает точность данного способа.

Из рис. 6.2 можно заключить, насколько различаются результаты экстраполяции КР двумя описанными методами: расхождение полученных величин Q составляет 6,9 %.

Известны различные модификации метода Стивенса и другие приемы графо-аналитической интерпретации формулы Шези (предложения М. А. Великанова, Д. Е. Скородумова и др.). В условиях широкого применения ЭВМ для обработки гидрологических данных следует ориентироваться на гидравлические методы экстраполяции непосредственно расходов воды на последовательной аналитической основе.

Существуют по крайней мере две группы гидравлических зависимостей, составляющих основу экстраполяции расходов воды:

1) выражения, представляющие собой решения уравнений неустановившегося движения воды;

2) формулы для квазиравномерного движения потока, включающие различные расчетные выражения для коэффициента Шези.

К числу формул первой группы относятся приближенные решения уравнений неустановившегося движения, происходящего в форме так называемой кинематической волны (при таком движении КР не образуют отчетливых петель). Так, И. Ф. Ка-

расевым получена связь текущих значений расходов воды Q и площади живого сечения F

$$Q = Q_0 (F/F_0)^m, \quad (6.5)$$

где Q_0 и F_0 — соответственно расход воды и площадь живого сечения, принятые в качестве начальных условий расчета. Показатель степени m служит основной характеристикой рассматриваемой формы движения потока.

Зависимостью второй группы является формула Шези, в которой коэффициент C рассматривается не только как функция гидравлического радиуса R (средней глубины $h_{\text{ср}}$ для речных русел) и коэффициента шероховатости n_0 , но и относительной ширины русла $\delta = B/h_{\text{ср}}$. Для достаточно широких русел ($\delta > 30$). Коэффициент Шези выражается формулой

$$C = \left(1 + \frac{0,042 h^{1/3}}{g \delta n_0^2} \right)^{-0,5} \frac{h^{1/6}}{n_0}. \quad (6.6)$$

Сущность экстраполяционных вычислений заключается в определении опорных значений параметров уравнений связи расходов воды с уровнями и гидравлическими элементами потока на основе одного или двух предшествующих измерений расходов.

1. Рассмотрим вариант экстраполяции зависимости (6.5). В ней экстраполируемым параметром будет являться величина m , определяемая в интервале между двумя предшествующими измерениями расходов Q_{i-1} и Q_i , которым соответствуют площади живых сечений F_{i-1} и F_i :

$$m_i = (\lg Q_i - \lg Q_{i-1}) / (\lg F_i - \lg F_{i-1}). \quad (6.7)$$

Чтобы исключить некорректность расчета по выражению (6.7), модуль разности $|Q_i - Q_{i-1}|$ должен существенно, по крайней мере в 2 раза, превосходить погрешность измерения расходов σ_Q . Экстраполированный расход определяется по формуле

$$Q_s = Q_i (F_s/F_i)^{m_i}, \quad (6.8)$$

где F_s — площадь живого сечения при уровне H_s , отвечающему расходу Q_s .

2. При использовании формулы Шези предварительно определяемой величиной является коэффициент шероховатости n_{0i} . Если по данным последнего измерения вычислить коэффициент

$$C_i = Q_i / (F_i \sqrt{h_i I}),$$

то величина n_{0i} определяется по формуле, получаемой из выражения (6.6):

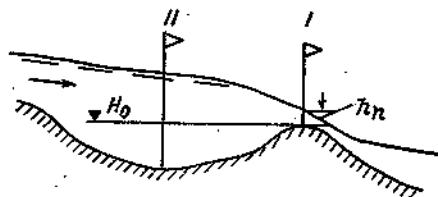
$$n_{0i} = h_i^{1/6} \left(\frac{1}{C_i^2} - \frac{0,042 h_i^{1/3}}{g \delta} \right)^{1/2}. \quad (6.9)$$

Значение Q_0 рассчитывается по формуле Шези в сочетании с выражением (6.9) при уточненном значении n_{01} и соответствующих морфометрических данных F_0 , R_0 и b_0 .

$$Q_0 = \left[1 + \frac{0,042 h_0^{1/3}}{g n_{01}^2 b_0} \right]^{-0,5} \frac{h_0^{1/3}}{n_{01}} F_0 \sqrt{h_0 I}. \quad (6.10)$$

Пример экстраполяции расходов воды приведен в табл. 6.3. Излагаемая методика аналитической экстраполяции расчетов применима и для пойменных створов при условии, что пойма затоплена на достаточную глубину: $h_{п} \geq 0,8 h_{рс}$, где $h_{рс}$ — глубина русла в пойменных бровках.

Рис. 6.3. Схема расположения постов на перекате (I) и плесовом участке (II) реки.



3. Экстраполяция минимальных расходов воды оказывается сравнительно простой задачей, если аналитическая зависимость $Q(H)$ представлена формулой В. Г. Глушкова (6.2), действительной вплоть до уровня нулевого расхода H_0 (рис. 6.3). Но на непересыхающих реках такой уровень не наступает, а на лимитирующем перекате наблюдается глубина $h_{п}$, близкая к критической h_k . Иными словами, поток движется в условиях, сходных с теми, которые наблюдаются в лотках-расходомерах с подъемом дна (створ I на рис. 6.3). На этом основании при наличии временного перепада уровней на перекате с глубиной $h_{п}$, что чаще всего наблюдается на горных и полугорных реках, для определения минимальных расходов воды может быть использована формула для расхода воды через водосливы практического профиля

$$Q \approx 0,35 F_{п} \sqrt{g h_{п}},$$

где $F_{п}$ — площадь водного сечения на перекате.

При расположении гидроствора на плесовом участке (II на рис. 6.3), как это обычно бывает, экстраполяция минимальных расходов должна производиться гидравлическими методами на основе зависимостей (6.9) и (6.10).

Точность экстраполяции существенно зависит от ее шага Δ , т. е. доли от полного диапазона изменения расходов воды от $Q_{мин}$ до $Q_{макс}$. Для часто встречающихся в практике случаев, когда величина Δ остается в пределах 15—20 %, погрешность значений, экстраполированных гидравлическими методами, не превосходит 10 % для максимальных и 25 % для минимальных расходов.

Таблица 6.3

Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерений
р. Пола — дер. Налючи, 1980 г.

Исходные данные	Расчетные операции	Результат вычисления
ВАРИАНТ I		
22.04.80		
$Q_{t-1} = 254 \text{ м}^3/\text{с}$	$m_1 = \frac{\lg \frac{318}{254}}{\lg \frac{381}{333}} =$	1,67
$F_{t-1} = 333 \text{ м}^2$		
25.04.80	Расчетная дата: 27.04.80	
$Q_t = 318 \text{ м}^3/\text{с}$	$F = 407 \text{ м}^2$	
$F_t = 381 \text{ м}^2$	Формула (6.8):	
	$Q_s = 318 \left(\frac{407}{381} \right)^{1,67} =$	355 м ³ /с
ВАРИАНТ II		
25.04.80	Определение базисных характери- стик:	
$Q_t = 318 \text{ м}^3/\text{с}$	$C_t = \frac{0,83}{\sqrt{3,63 \cdot 0,0001}} =$	43,2 м ^{0,5} /с
$v = 0,83 \text{ м/с}$	Формула (6.9):	
$F = 381 \text{ м}^2$	$n_{0,t} = 3,63^{1/6} \left(\frac{1}{43,2^2} - \frac{66,7 \cdot 0,000628}{9,81 \cdot 28,9} \right)^{1/2} =$	0,025
$h_{cp} = 3,63 \text{ м}$	Расчетная дата: 27.04.80	
$B = 105 \text{ м}$	$F = 404 \text{ м}^2; B = 109 \text{ м}; h_{cp} = 3,73 \text{ м}$	
$b = 28,9$	$I = 0,0001; \delta = 29,2$	
$I = 0,0001$	Формула (6.10):	
	$Q_s = \left(1 + \frac{66,7 \cdot 0,000628}{9,81 \cdot 0,025^2 \cdot 29,2} \right)^{-0,5} \times$	
	$\times \frac{3,73^{1/6}}{0,025} \sqrt{3,73 \cdot 0,0001 \cdot 407} =$	390 м ³ /с

Расхождение экстраполированных расходов по вариантам I и II менее
10 %.

6.1.3. Определение максимальных расходов воды по меткам уровней

Расходы особо выдающихся паводков и половодий часто приходится определять не только в оборудованных гидростворах, но и на реках и временных водотоках, где отсутствуют гидрологические посты. При этом используются метки уровня, остающиеся на берегах и прибрежных сооружениях.

Если полевой комплекс необходимых наблюдений проведен своевременно, то результаты геодезических измерений оказываются достаточно надежными. Наибольшую неопределенность заключает коэффициент шероховатости n , необходимый для вычисления расхода воды по формуле Шези. Существует ряд детально разработанных шкал для определения n . В табл. 6.4 представлен один из последних вариантов унифицированной шкалы коэффициентов шероховатости, в которой приняты значения n по данным известных таблиц Срибного, Чоу и Бредли. Используются также результаты полевых наблюдений ГГИ. В отличие от других таблиц, в приведенной шкале принято 10 единых для русел и пойм интервалов неперекрывающихся значений n . Эти интервалы достаточно крупны и составляют 20—30 % от среднего в каждом из них, что приблизительно равно удвоенной, средней квадратической погрешности определения n на основе измеренных расходов воды и уклонов водной поверхности.

Унифицированная шкала шероховатости соответствует относительно широким и прямолинейным руслам. Отклонение от этих условий вызывает увеличение гидравлических сопротивлений и соответственно коэффициентов шероховатости n . К основным факторам, создающим дополнительные сопротивления, относятся форма поперечного сечения и плановые очертания русла (наличие гряд учитывается табличными значениями n).

В качестве параметра формы русла принимается относительная ширина русла $\bar{b} = B/h_{\text{ср}}$. Параметр $\bar{b}$ отражает влияние берегов и пространственного режима течения на гидравлические сопротивления. Применительно к логам и временным водотокам при $\bar{b} < 30$ и $n_0 > 0,025$ с учетом этого влияния коэффициент шероховатости должен определяться по формуле

$$n = n_0 [1 + 0,0026h^{1/3}/(g\bar{b}n_0^2)]^{1/2}. \quad (6.11)$$

Влияние изгибов потока и меандрирования русла может быть учтено умножением n на коэффициент $K_M > 1$:

$$n_{\text{изг}} = K_M n.$$

Для K_M рекомендованы значения: 1,15 — ощутимая степень меандрирования, 1,30 — значительное меандрирование.

При вычислении расходов воды по меткам уровня важно правильно определить площадь водного сечения. Следует иметь в виду, что линия замочки береговых откосов соответствует гребням

Таблица 6.4

Унифицированная шкала коэффициентов шероховатости речных русел и пойм

	Характеристика русел и пойм			
	А. Равнинные реки	Б. Полугорные и горные реки	В. Поймы	
1	2	3	4	
0,020	Прямолинейные русла канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	—	—	
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования.	
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые) $I = 0,8 \div 1,0 \%$	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищем с низкой травой	
0,040	Сравнительные чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлении струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. Правильные хорошо разработанные галечные русла в наименее течении $I = 3 \div 7 \%$	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество старореки и мелких проток	

0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые с неспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические водотоки с крупногалечным покрытием ложа $I = 7 \div 15 \%$	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листьев), изрезанная старорецьями
0,065	Скалистые русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно-валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки $I = 15 \div 20 \%$	Пойма под редким кустарником и деревьями с лиственной или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промывными и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью $I = 50 \div 90 \%$	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной без листьев)
0,100	Русла рек, сильно заросшие, заросшие стволами деревьев и валунами	Русла водонадного типа преимущественно в верховьях с крупно-валунным ложем и бурным течением $I = 90 \div 200 \%$	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с лиственной
0,140	Речи болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла водонадного типа, заросшие обломками скал и валунами. $I = 90 \div 200 \%$	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей и густым нивным
0,200	—	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, труднопроходимые поймы таежного типа

наиболее высоких волн, которые образуются на поверхности стремительных потоков (рис. 6.4). Для высоты этих волн над спокойным уровнем (в м) получена зависимость

$$h_b = 0,356 h^{1,65} l^{0,4}$$

Таким образом, расчетная площадь водного сечения окажется равной: $F_p = F - h_b B$. Формула для определения расхода воды с учетом дополнительных сопротивлений имеет вид

$$Q = \frac{F_p}{K_m} (h - h_b)^{3/2} \left[\frac{g B l}{g B n_0^2 + 0,0026 (h - h_b)^{1/2}} \right]^{1/2}. \quad (6.12)$$

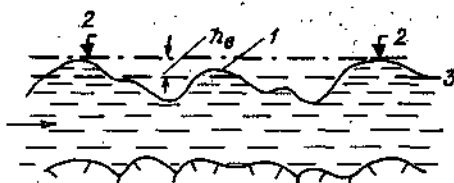


Рис. 6.4. Водная поверхность и метка уровня при движении бурных потоков.

Пример. Определение расходов воды ливневого паводка на полугорной реке, относящейся к типу периодических водотоков.

Исходные данные: $B = 25,6$ м; $h_{sp} = 1,95$; $l = 0,0015$; $n_0 = 0,04$. Участок — прямой, $K_m = 1,0$.

Найдем динамическое превышение уровня над его спокойной поверхностью

$$h_b = 0,356 \cdot 1,95^{1,65} \cdot 0,0015^{0,4} = 0,08 \text{ м.}$$

Следовательно, расчетная площадь живого сечения равна

$$F_p = 25,6 (1,95 - 0,08) = 47,9 \text{ м}^2.$$

Расход воды определяется по формуле (6.12) после подстановки всех исходных данных:

$$Q = \frac{47,9}{1} (1,95 - 0,08)^{3/2} \times \left[\frac{9,81 \cdot 25,6 \cdot 0,0015}{9,81 \cdot 25,6 \cdot 0,04^2 + 0,0026 (1,95 - 0,08)^{1/2}} \right]^{1/2} = 70,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Отметим, что без срезки динамического уровня на величину h_b расход воды составил бы $75,0 \text{ м}^3/\text{с}$ и был бы завышен на 7 %.

6.1.4. Оценка рассеяния и условия однозначности многолетних связей между расходами и уровнями воды

Рассеяние связи $Q(H)$ создается прежде всего погрешностями измерения расходов. Если эти погрешности носят случайный характер, то кривая $Q(H)$, осредняющая поле точек ИРВ, может считаться практически однозначной. В тех же случаях, когда пропускная способность русла изменяется под влиянием различных гидравлических и морфологических факторов, осреднение

поля точек ИРВ становится неправомерным, а зависимость $Q(H)$ должна считаться неоднозначной.

Каковы же количественные критерии однозначности связи $Q(H)$?

Рассеяние зависимости расходов от уровней характеризуется средним квадратическим значением относительных отклонений $\bar{q}$ измеренных расходов Q_i от величин $\bar{Q}_i$, вычисленных по связи $Q(H)$ при одном и том же уровне H_i :

$$\bar{q} = \left[\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (6.13)$$

где N — число измеренных расходов воды, k — число параметров уравнений регрессии (6.3).

В рассеянии поля $Q(H)$ выделяются две составляющие:

- 1) разброс, обусловленный погрешностями измерения расходов и соответствующих им уровней $\bar{q}_q$;
- 2) результат влияния гидравлико-морфологических факторов $\bar{q}_{гм}$.

Погрешность $\bar{q}_q$ определяется на независимой статистической основе — по формулам главы 4.

Связь $Q(H)$ можно считать практически однозначной, если

$$\bar{q}_Q \geq \bar{q}_q. \quad (6.14)$$

Однозначная зависимость $Q(H)$ сглаживает погрешности измерений. Получаемые по ней значения противопоставляются измеренным расходам как более точные.

Нередко зависимость $Q(H)$ сохраняет устойчивость в течение многих лет. Многолетняя кривая расходов может считаться установленной, если:

- а) обоснована 50—60 измерениями расходов в течение не менее трех лет в периоды свободного русла;
- б) экстраполяция КР не превышает вверх 15 %, вниз 5 % от полной амплитуды уровней за прошлые годы;
- в) отклонения точек измеренных расходов не превосходят ± 12 % в нижней и ± 6 % в верхней части кривой;
- г) точки ИРВ в пределах указанной полосы рассеяния не образуют паводочных петель и систематических отклонений, образующих хронологически обособленные группы.

Когда имеет место неравенство

$$\bar{q}_Q < \bar{q}_q, \quad (6.15)$$

кривая расходов изменяет свое положение под влиянием физических факторов и поэтому должна рассматриваться как неоднозначная. В этом случае отклонения $\bar{q}$, кроме погрешностей измерения, содержат «остаток» регрессии, а уравнение (6.3) дает лишь первое приближение для расхода воды. Дальнейшее уточнение вычисляемых величин может быть достигнуто, если тем

или иным способом определить поправку к расходу, обусловленную совместным влиянием факторов, не учтенных зависимостью (6.3).

Пример. Для створа р. Пола — дер. Налючи за 1980 г. (см. рис. 6.1) получены следующие характеристики точности измерений расходов воды и тесноты связи $Q(H)$:

Период	Количество измерений	σ_Q %	σ_H %	Характер связи
Летний	32	4,5	4,1	Однозначная
Зимний	18	6,0	35,8	Неоднозначная

Таким образом, в период открытого русла для вычисления стока в рассматриваемом примере должна быть принята однозначная кривая расходов. В зимний период, как и следовало ожидать, однозначность связи $Q(H)$ оказалась нарушенной. Учет стока в этом случае производится одним из методов, учитывающих изменение пропускной способности русла при образовании ледостава, например с использованием переходных коэффициентов $K_{\text{лим}}$.

Однозначная связь $Q(H)$ наблюдается лишь на одной четверти постов основной гидрологической сети. Для рек более характерны неоднозначные зависимости $Q(H)$, при которых, кроме уровней воды, приходится учитывать другие факторы (деформации русла, появление ледяных образований, зарастания, переменного подпора и т. п.). Множественностью этих факторов объясняется и многообразие существующих методов учета стока (их более 20). По мере начавшегося перехода на механизированную обработку данных с применением ЭВМ производятся унификация и математическая формализация способов вычисления ЕРВ. Все более широкое применение находят различные формы интерполяции характеристик пропускной способности русла как основы для восстановления гидрографа стока в интервале между измерениями расходов воды.

Ниже рассмотрены основные методы режимного и оперативного учета стока применительно к факторам, создающим неоднозначность связи расходов и уровней воды. При этом нам придется касаться как графических схем, все более выходящих из употребления, так и аналитических решений, реализуемых на ЭВМ. Представляется, что осведомленность в традиционных построениях будет содействовать пониманию физической сущности математических моделей учета стока.

6.2. Учет стока при неустойчивых руслах

Деформации русла — достаточно распространенная причина изменения его пропускной способности, а значит, и неоднозначности связи $Q(H)$. При этом одной и той же высоте уровня

в разные моменты времени могут соответствовать разные площади водного сечения.

С точки зрения влияния на пропускную способность русла следует различать:

- направленные деформации, приуроченные к годовым изменениям водности или достаточно длительным фазам режима реки, при которых измеренные расходы воды (ИРВ) образуют обособленные ветви связи $Q(H)$;

- периодические деформации по глубине и ширине русла, когда отклонения ИРВ от осредненной КР или зависимости $Q(H)$ сбалансированы по знакам и значению.

Соответственно характеру русловых деформаций применяются различные методы учета стока.

6.2.1. Годовые и сезонные зависимости расходов от уровней воды

Одна из основных операций, которая выполняется при построении годовых и сезонных зависимостей $Q(H)$, сводится к выявлению обособленных групп ИРВ в координатном поле (Q, H) , сохраняющих хронологическую последовательность. Соответственно определяются отрезки времени, к которым должны быть отнесены обособленные ветви зависимости $Q(H)$, которые носят название временных КР (сокращенно ВКР). ИРВ нумеруют в хронологическом порядке, а их группировку по фазам режима (сезонам и годам) обозначают различными значками (пустыми и залитыми квадратами и треугольниками) соответственно для периодов открытого русла и при ледоставе.

ВКР могут быть:

- однозначные, соответствующие временно устойчивому состоянию русла; они должны иметь вид плавных кривых с выпуклостью, обращенной к оси уровней;

- переходные, выражающие неустойчивую связь между расходом и уровнем и соответствующие периодам деформации русла; переходные кривые могут иметь произвольный вид — вогнутость, обращенную в любую сторону, и перегибы.

Для построения временных кривых значения измеренных расходов наносятся на график различными обозначениями, соответствующими определенной фазе уровня, например: для низких уровней и незначительных паводков — зачерченными кружками, для подъема уровня — треугольниками, для спада уровня — незачерченными кружками. Около каждого расхода выписывается его номер и выделяются хронологические группы точек (Q, H) .

По выделенным группам точек проводятся ВКР, по ним и устанавливается срок действия каждой из них.

Для анализа расположения точек (Q, H) и установления сроков действия каждой кривой на одном чертеже полезно построить график колебания уровня воды. Переходы с одной кривой на другую назначаются в переломных точках графика уровня: на

максимумах и минимумах. Поскольку наивысшие и наинизшие отметки деформирующегося дна приурочены к экстремальным расходам воды, ВКР для спада и подъема уровней имеют общие точки при высоких и низких уровнях. Но так бывает лишь при сбалансированных в течение года деформациях русла (рис. 6.5, 1968 г.).

В тех же случаях, когда наблюдаются выдающиеся паводки, положение КР на его подъеме и спаде окажется различным. Русловые переформирования при максимальных расходах воды могут

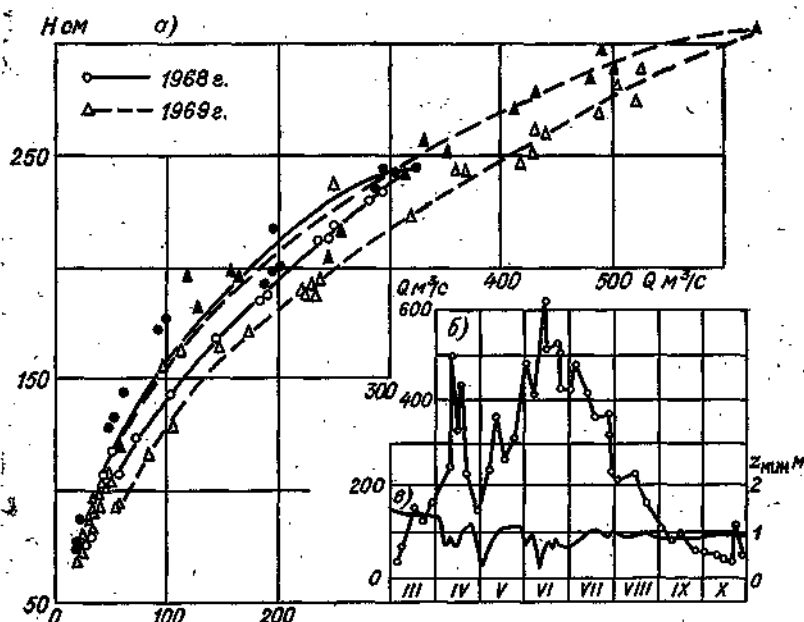


Рис. 6.5. а — точки измеренных расходов воды р. Кафирниган — кишл. Чинар и временные кривые расходов.

б — гидрограф, в — график колебания отметок дна за март—октябрь 1969 г.

быть столь значительны, что первоначальное положение дна к концу паводочного периода не восстанавливается, а значит, и не произойдет смыкания ВКР спада и подъема (все это можно видеть на рис. 6.5 по данным наблюдений за 1969 г.).

При сезонных колебаниях отметок дна в поле точек $Q(H)$ проводятся две ВКР — левого и правого положения и одна — две сопрягающие кривые кратковременного действия. Высотные изменения русла, как правило, бывают связаны с прохождением через гидроствор крупных грядовых скоплений наносов. Период их движения на горных и полугорных реках обычно составляет 7—15 сут. Этой периодичности смещения гряд должны отвечать и периоды использования той или иной ВКР для вычисления стока: каждый раз, когда в гидростворе наблюдается понижение

дна, переходят на правую ВКР, а с появлением гребня гряды наступает время действия ВКР левого положения. Несвоевременный переход с одной ВКР на другую может послужить причиной значительных систематических погрешностей, которые достигают 15—20 %.

На реках с пилообразным гидрографом, когда паводки следуют один за другим, строится система ВКР. При этом особое внимание обращается на правильное проведение сопрягающих кривых. Они, как правило, имеют ограниченный срок действия и отвечают одной кратковременной фазе водного режима. Выделяя хронологически связанные группы точек (Q, H), необходимо учитывать возможные погрешности измерений и по возможности осреднять их при проведении ВКР. Но чтобы это стало возможным, каждая из них должна быть основана не менее чем на четырех-пяти измерениях расхода воды.

Разновидностью метода ВКР является вариант, предложенный Р. Больстером (1907 г.): параллельный перенос опорной КР вслед за смещением точек ИРВ в поле $Q(H)$. Попытку реализации этого метода на ЭВМ предпринял Ю. Н. Иванов (САНИИ). Вообще же основной недостаток метода ВКР — затруднения в аналитической интерпретации расчетных приемов, что сдерживает применение ЭВМ. В этом смысле значительно перспективней интерполяционные методы учета стока.

6.2.2. Учет стока в легкодеформирующихся руслах

На многих горных и предгорных реках с большой мутностью потока и легкоразмываемыми берегами и дном деформации русла в гидростворах совершаются непрерывно и в больших масштабах, так что выделение временных, но достаточно устойчивых связей $Q(H)$ не представляется возможным. В этих условиях естественно использовать интегральные характеристики пропускной способности русла. Так возникли интерполяционные методы учета стока. Рассмотрим некоторые из них.

Одним из характерных способов учета стока в деформирующихся руслах является приведение КР к основному сечению. В традиционных руководствах этот способ рекомендуется применять в случае, когда наблюдаются высотные деформации русла без существенных изменений уклонов водной поверхности. Вычисление ЕРВ состоит из ряда операций (рис. 6.6), в которых используются не только данные измерений расходов воды, но и промежуточные промеры площадей водных сечений:

- 1) наносят на один чертеж совмещенные профили поперечных сечений. Из них выбирают один средний по глубинам, который и принимается в качестве основного сечения;

- 2) для различных наполнений основного сечения строят кривую площадей $F(H)$. На тот же график наносятся точки измеренных площадей водного сечения по данным измерений расходов и промежуточных промеров;

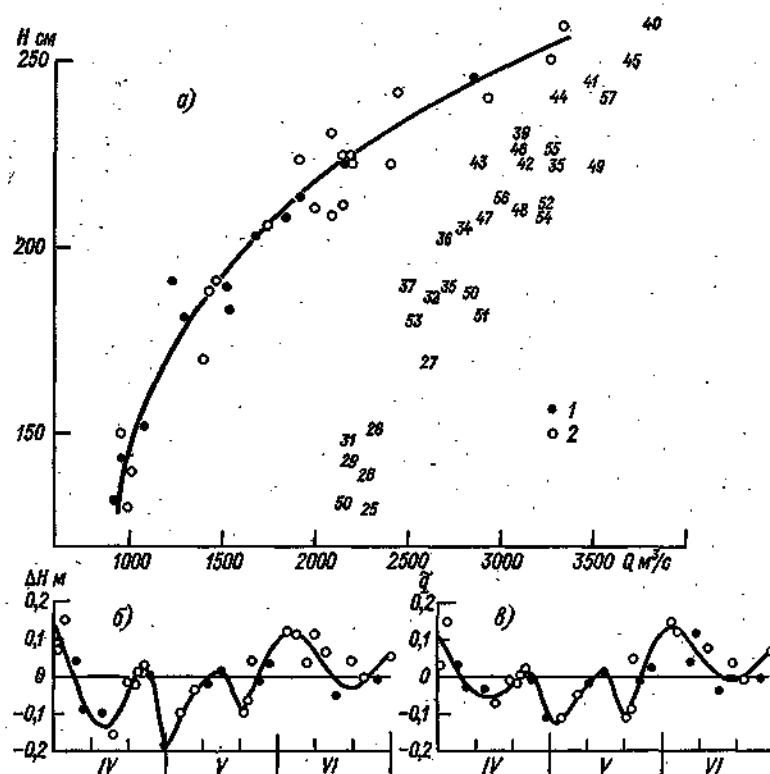
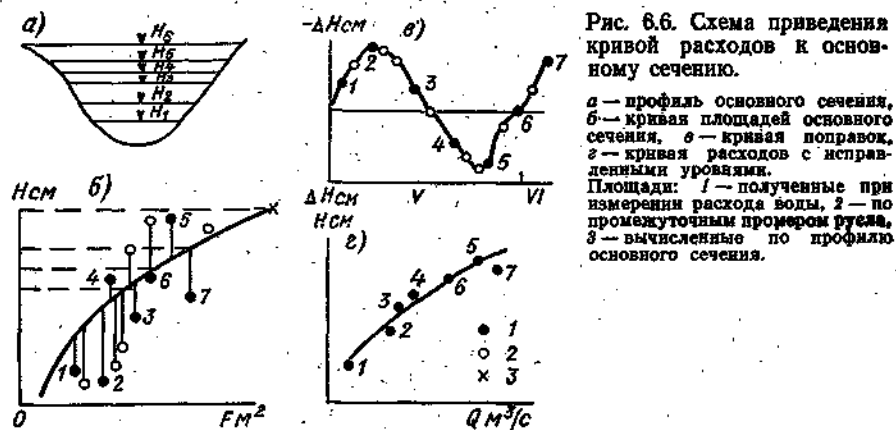


Рис. 6.7. а — стандартная кривая расходов воды р. Амударья — г. Керки, 1981 г. 1 — измеренные расходы на подъеме, 2 — на спаде; б — график поправок к уровням по Стауту; в — график относительных отклонений измеренных расходов воды.

- 3) определяют поправки уровня ΔH по нанесенным точкам относительно кривой $F(H)$ для основного сечения;
- 4) переносят поправки ΔH на хронологический график, откладывая их от оси времени в сторону, противоположную отклонению точек от кривой площадей основного сечения;
- 5) на основе исправленных уровней

$$H_{\text{испр}} = H \pm \Delta H$$

по измеренным расходам строится приведенная кривая расходов;

6) определяя на каждый день исправленные уровни $H_{\text{испр}}$ с учетом интерполированных поправок ΔH , находят ЕРВ, снимая их с приведенной кривой расходов.

Громоздкость и усложненность рассмотренного способа очевидна, поэтому он не получил широкого применения. Более распространен способ О. Стаута, появившийся в 1898 г. Он основан на следующих построениях (рис. 6.7 а):

1) строится стандартная кривая расходов, осредняющая поле результатов измерения уровней и расходов воды;

2) определяют отклонения уровней ΔH_i как разность ординат измеренного расхода $Q_{\text{из}}$ и того же значения по стандартной кривой $Q_{\text{кр}}$;

3) последовательность поправок ΔH_i представляют на хронологическом графике, откладывая их вниз (со знаком минус), если измеренный расход был выше стандартной кривой, и вверх (со знаком плюс)—в противоположном случае. Нанесенные точки соединяются плавной осредняющей кривой так, чтобы по обе ее стороны оказывалось одинаковое количество точек (рис. 6.7 б);

4) расходы воды вычисляются на основе стандартной кривой по исправленным значениям уровня с учетом поправок ΔH , полученных в результате графической интерполяции последовательности их измеренных значений.

Интерполяция характеристик пропускной способности русла в последнее время становится основой общих аналитических приемов учета стока, выходящих за рамки схемы Стаута. Так, Т. Ф. Эйпре (Эстонское УГКС) для учета разнообразия протекания потока использовал интерполяцию поправочных коэффициентов относительно значений, определяемых на основе опорной КР. Вариант, который формально связан со способом Стаута, но отличается от него последовательно гидравлично-статистической основой, разработан И. Ф. Карасевым.

Вопреки предпосылке Стаута о том, что стандартная кривая не выражает какой-либо реальный смысл связи между расходом и уровнем и носит вспомогательный характер, в статистическом смысле эта кривая рассматривается как осредненная характеристика пропускной способности русла. На рис. 6.7 стандартная

кривая проведена так, чтобы она осредняла поле точек (Q, H) . Ей соответствует УР:

$$Q = -253 + 15,94H - 0,1114H^2 + 0,000415H^3 \quad (6.16)$$

(здесь расходы даны в $\text{м}^3/\text{с}$, уровни — в см).

Стандартная КР и соответствующие УР дают первое приближение к значению расхода при фиксированном уровне. Его можно существенно уточнить, если учесть изменения пропускной способности русла, нарушающие однозначность связи $Q(H)$. Эти изменения характеризуются относительными отклонениями $\tilde{q}_i$ расходов Q_{ni} , измеренных при уровнях H_i , от значений $\bar{Q}_i$, определяемых для тех же уровней на основе КР или УР:

$$\tilde{q}_i = (Q_{ni} - \bar{Q}_i) / \bar{Q}_i. \quad (6.17)$$

Ряд ИРВ позволяет получить хронологическую последовательность отклонений $\tilde{q}_i$ (рис. 6.7 в), которые тем или иным способом должны интерполироваться в интервале между измерениями, чтобы получить значения $\tilde{q}$ на каждый день. Одновременно, используя значения ЕУВ, находят ежедневные расходы $\bar{Q}$ по КР или УР и после этого вычисляют значения ЕРВ на дату t

$$Q_t = \bar{Q}(1 + \tilde{q}_t). \quad (6.18)$$

Для определения $\tilde{q}_t$ в простейшем случае применяется линейная интерполяция отклонений $\tilde{q}_i$ и $\tilde{q}_j$, получаемых по данным смежных измерений расходов воды, разделенных промежутком времени τ_{ij} :

$$\tilde{q}_t = (1 - \tau/\tau_{ij}) \tilde{q}_i + \tau/\tau_{ij} \tilde{q}_j, \quad (6.19)$$

где τ — время в сутках, истекшее со дня последнего измерения до расчетной даты.

В качестве примера в табл. 6.5 приведена последовательность вычисления стока р. Амударьи. В день измерения расходов воды ЕРВ вычисляется по величине Q_i , соответствующей среднему суточному уровню воды H_i , согласно формуле (6.18), причем в качестве поправки q принимается то ее значение, которое устанавливается по (6.17) для измеренного расхода воды (в табл. 6.5 пример такой операции приведен для 29.06.81 г.).

Следует отметить, что правомерность линейной интерполяции поправок $\tilde{q}$ обусловлена тем, что они так или иначе связаны с колебаниями отметок дна, т. е. до некоторой степени носят закономерный характер. В том случае, если промежуток времени между измерениями расходов превышает продолжительность фазы направленной деформации (намыва или размыва дна),

Таблица 6.5

Вычисление ЕРВ р. Амударья — г. Керки, 1981 г.
(вариант режимного учета стока)

Исходные данные	Расчетные операции	Результаты вычислений
26.06.81 г. $H = 214$ см $Q_n = 1910$ м³/с $\bar{Q} = 2060$ м³/с $\bar{q} = -0,082$	Расчетная дата: 28.06.81 г. $H = 240$ см Уравнение (6.16) $Q_t = -253 + 15,94 \cdot 240 -$ $- 0,1114 \cdot 240^2 + 0,000415 \cdot 240^3 =$ Формула (6.19) $\tilde{q}_t = \left(1 - \frac{2}{3}\right) \cdot (-0,082) + \frac{2}{3}(-0,010) =$ Зависимость (6.18)	2920 м³/с -0,034
29.06.81 г. $H = 241$ см $Q_n = 2920$ м³/с $Q = 2950$ м³/с $\bar{q} = -0,010$	$Q_t = (1 - 0,034) \cdot 2920 =$ Расчетная дата: 29.06.81 г. $H = 238$ см $Q_t = -253 + 15,94 \cdot 238 -$ $- 0,1114 \cdot 238^2 + 0,000415 \cdot 238^3 =$ $\tilde{q}_t = \frac{2950 - 2830}{2830} =$ $Q_t = (1 - 0,402) \cdot 2830 =$	2820 м³/с 2830 м³/с 0,042 2710 м³/с

ЕРВ лучше определять непосредственно по стандартной КР или УР без поправок $\tilde{q}$.

На реках с интенсивно деформирующимся и блуждающим руслом связь расходов с уровнями воды оказывается утраченной и единственно возможным способом учета стока становится интерполяция между измеренными расходами. Разумеется, количество этих измерений должно быть достаточным, чтобы зафиксировать все изменения водности реки.

Для вычисления ЕРВ все точки измеренных расходов наносятся на хронологический график $Q=f(T)$ и по ним проводится кривая — гидрограф, с которой снимаются расходы воды за каждый день.

При недостаточном числе измерений расходов, но при равномерном распределении их во времени сток за периоды деформации русла может быть представлен в виде средних декадных или средних месячных расходов, вычисленных как среднее арифметическое из всех расходов, измеренных за декаду или месяц.

6.3. Учет стока при изменяющихся гидравлических условиях

6.3.1. Переменный подпор в зонах водохранилищ, на устьевых и приточных участках рек

Наряду с деформациями русла переменный подпор свободной поверхности потока — одна из наиболее распространенных причин неоднозначности связи расходов и уровней воды. Зоны переменного подпора формируются в хвостовых частях водохранилищ и выше узлов слияния рек. В зависимости от наполнения водо-

хранилищ и фаз водного режима на притоке и главной реке верхняя граница зоны подпора меняет свое положение и, более того, при определенных условиях может наблюдаться кривая спада водной поверхности. Причинами переменного подпора могут также быть намывы гребней нижележащих перекатов, нагонные подъемы уровня, скопления (заломы) сплавляемого леса, заторы и зажоры льда. Подпор может иметь различ-

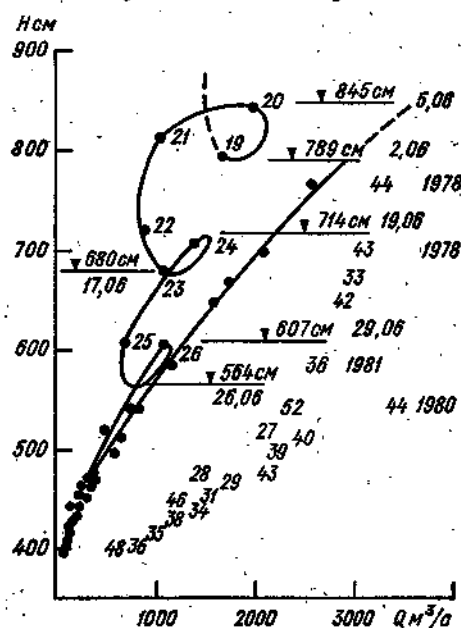


Рис. 6.8. Кривая расходов воды в зоне подпора на р. Большой Анюй — пост ГМС Константиновская выше слияния с р. Колымой, 1982 г.

ную продолжительность. Он бывает кратковременным (при нагонах—стонах и колебаниях уровня на водохранилищах с суточным регулированием расходов) и продолжительным, если причины его возникновения действуют длительное время.

В любом случае переменного подпора КР становится неоднозначной. Разброс точек (Q , H) объясняется тем, что при подпорных уровнях изменяются уклоны водной поверхности I , а значит расход воды в этом случае становится функцией не только уровня, но и уклона $Q(H, I)$. Кривые расходов при этом могут приобретать сложнопетлеобразные очертания. На рис. 6.8 приведен пример такой КР, построенной М. Р. Чернышевой (Колымское УГКС).

Вычисления ЕРВ при переменном подпоре выполняются различными способами.

1. В случае медленно изменяющегося подпора (в период паводков на реке-водоприемнике или наполнении водохранилища) используются временные кривые расходов. Построение этих кривых во многом аналогично схемам, применяемым для неустойчивого русла. Более того, часто сами русловые деформации (намыв нижерасположенного порога) проявляются как подпор уровня в гидростворе.

2. Если подпор проявляется в виде кратковременного резкого подъема уровня без значительного изменения водности реки, то для вычисления ЕРВ производится срезка или восстановление уровней за подпорный период (рис. 6.9). Эта опера-

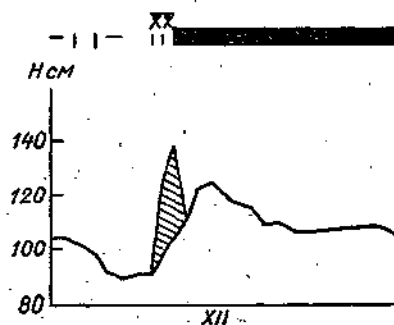


Рис. 6.9. Срезка уровней в период осеннего зазора. Река Велеса — д. Рудня, 1981 г.

ция очень проста при устойчивой водности реки: вычерчивается график колебаний уровня воды; начало и конец подпорного периода на графике соединяются плавной кривой или прямой линией. Таким образом, фактически измеренные в подпорный период уровни заменяются фиктивными («срезанными») уровнями.

При значительных колебаниях водности уровни за подпорный период восстанавливаются по графику связи уровней подпорного поста с соседним постом, находящимся вне подпора. График связи строится по параллельным наблюдениям за период, когда подпор на данном посту отсутствовал.

3. При наличии надежных измерений уклонов водной поверхности применяются кривые модулей расходов.

Модулем расхода называется величина $K = Q\sqrt{I}$.

В большинстве случаев при одной и той же высоте уровня значение модуля расхода остается постоянным при изменениях уклона. Поэтому, если вместо точек (Q, H) нанести на график значения модуля расхода, точки (K, H) расположатся узкой полосой и по ним можно провести вполне определенную кривую $K = f(H)$, называемую *кривой модулей расходов*.

Вычисление ежедневных расходов производится следующим образом. Для каждого измеренного расхода вычисляется значение модуля расхода и по полученным данным строится кривая модулей расходов $K = f(H)$. Затем по наблюдаемым уровням

с кривой $K=f(H)$ снимаются значения модуля для каждого дня и ежедневные расходы воды вычисляются по формуле

$$Q = K \sqrt{I}.$$

Ежедневные значения уклона могут быть получены по данным непосредственных ежедневных измерений, по кривой зависимости уклона от уровня воды и интерполяции между значениями уклонов, определенных при измерении расхода воды. В рассматриваемом варианте учета стока вместо модуля расхода можно использовать величину

$$K_n = Q / \sqrt{\Delta H},$$

где ΔH — падение уровня на участке гидроствора.

4. В традиционных руководствах по речной гидрометрии описывался способ учета стока на основе семейства КР с учетом уклонов, т. е. по зависимости $Q(H, I)$. Чтобы получить такие связи, необходимо большое количество измерений расходов воды для разных интервалов изменения I . В практике такие наблюдения удается осуществить далеко не всегда. Вообще надежность вычисления стока с учетом зависимостей $Q(H, I)$ оказывается пониженной из-за невозможности достаточно точной регистрации малых падений уровня в зоне переменных подпоров.

5. В последнее время в ГГИ разработана модель учета стока, в которой влияние переменного подпора учитывается как один из факторов, включаемых в уравнения регрессии.

В самом деле пропускная способность русла может быть поставлена в зависимость от положения уровня в двух смежных створах — верхнем (H_v) и нижнем (H_n). Уровни H_v и H_n принимаются в качестве аргументов функции — расхода воды, которая может быть представлена в виде семейства кривых $Q(H_v, H_n)$ или в аналитической форме

$$Q = a_0 + a_1 H_v + a_2 H_v^2 + a_3 H_n. \quad (6.20)$$

Уравнение (6.20) целесообразно использовать прежде всего для учета стока во входных створах водохранилищ и в устьях рек.

Надежность уравнения регрессии во многом зависит от положения входного створа и пунктов наблюдений за уровнями воды. С точки зрения полноты охвата измерениями притока воды в водохранилища входные створы предпочтительно располагать возможно ниже по течению, но при этом должны соблюдаться два условия: отсутствие обратных течений и достаточные скорости потока, превышающие по крайней мере в 2 раза начальную скорость вертушки, т. е. скорость течения должна быть не менее 0,10 м/с.

Что касается нижнего (сопряженного) створа, то он по возможности должен находиться вне зоны влияния сгонов и нагонов, волн перемещения при увеличении и сокращении попусков ГЭС и др.

Параметры уравнения (6.20) рассчитываются по всей совокупности измеренных расходов воды за период открытого русла. Расчеты выполняются на ЭВМ методом наименьших квадратов.

В качестве примера приведем створ р. Кама — г. Брежнев, который является одним из входных створов для Куйбышевского водохранилища.

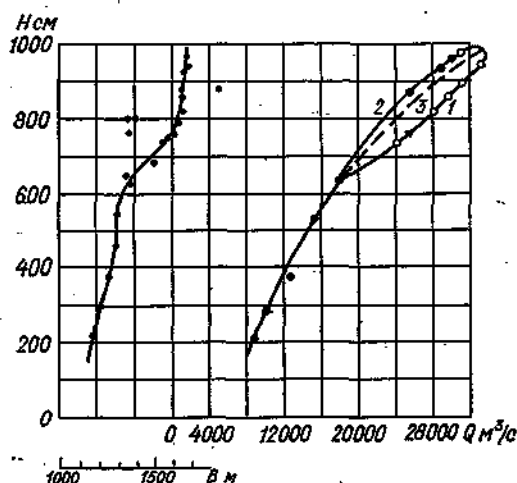


Рис. 6.10. Кривые $Q=f(H)$ и $B=f(H)$. Река Обь — с. Белогорье.

1 — подъем, 2 — спад половодья, 3 — кривая расходов для стационарного режима.

Нижний урвненный пост расположен в г. Чистополе. В результате обработки данных на ЭВМ было получено следующее уравнение

$$Q = 4777 + 10,94H_{\text{в}} + 0,006H_{\text{в}}^2 - 9,11H_{\text{н}}. \quad (6.21)$$

Порядок вычисления стока представлен в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Вычисление ЕРВ
р. Кама — г. Брежнев, 1968 г.
(вариант режимного учета стока)

Исходные данные	Расчетные операции	Результаты вычислений
$H_{\text{в}} = 550$ см $H_{\text{н}} = 846$ см	Расчетная дата: 30.04.68 г. Уравнение (6.21) $Q = 4777 + 10,94 \cdot 550 + 0,006 \cdot 550^2 - 9,11 \cdot 846 =$	4900 м³/с

Уровни воды в приведенном уравнении выражаются в см над нулем графика. Отрицательные значения коэффициента регрессии при $H_{\text{н}}$ указывают на обратную зависимость расхода воды от уровня в нижнем створе.

6.3.2. Неустановившееся движение потока

Движение волн паводков сопровождается изменением уклонов свободной поверхности во времени. Влияние нестационарности потока на пропускную способность русла может быть учтено непосредственно по результатам измерения уклонов водной поверхности в окрестности гидроствора. Известно, что инерционные эффекты проявляются наиболее остро лишь при сравнительно малых уклонах водной поверхности I_0 при установившемся движении потока. Но именно такие уклоны трудно измерить достаточно надежно. В гидрометрической практике прибегают к построению петлеобразных КР непосредственно по точкам измеренных расходов воды. Ясно, что их количество должно быть достаточным, чтобы зафиксировать действительные очертания ветвей КР. В слу-

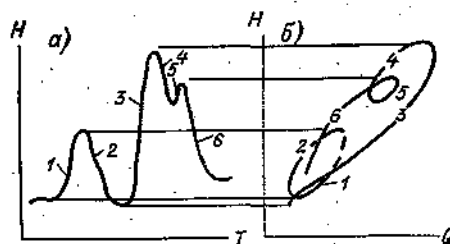


Рис. 6.11. График колебания уровней (а) и соответствующих им ветвей петлеобразных кривых расходов (б) при неоднократных паводках.

чае одиночной петли (рис. 6.10) можно успеть выполнить необходимое количество измерений.

Петлеобразная кривая расходов имеет следующие особенности, которые необходимо учитывать при ее построении и экстраполяции:

а) при низких уровнях ветви подъема и спада смыкаются в одну кривую установившегося режима, выражающую однозначную зависимость между расходами и уровнями;

б) точки ответвления кривых подъема и спада от кривой установившегося режима обычно соответствуют началу подъема и концу спада паводка;

в) в верхней части кривые подъема и спада сопрягаются плавным закруглением; точка сопряжения ветвей располагается на кривой установившегося режима. Наибольший расход наступает раньше высшего уровня, и точка этого расхода, как правило, лежит на ветви подъема несколько ниже высшего уровня;

г) кривая установившегося режима проходит обычно не по середине петли, а располагается ближе к ветви спада. Отклонение ветви подъема от кривой установившегося режима тем больше, чем интенсивней подъем уровня.

При прохождении нескольких волн паводков и попусков каждому пику должна соответствовать своя петля (рис. 6.11). Чтобы правильно построить систему петель, требуется достаточно большое количество измерений расходов воды. Но при сравнительно

интенсивном изменении водности часто нет времени для выполнения измерений. Рациональный подход возможен и в этом случае. Он состоит в применении расчетных методов построения петлеобразных КР, при которых измеренные расходы воды используются для так называемой идентификации (уточнения) параметров используемых уравнений неустановившегося движения потока. Практика таких расчетов позволила установить, что далеко не во всех случаях влияние инерционных членов этих уравнений вызывает неоднозначность КР. Напротив, на незарегулированных реках при прохождении естественных волн половодий и паводков наблюдается неустановившееся движение потока в форме так называемой *кинематической волны*, при которой КР не теряет однозначности, т. е. не образует выраженных петель. Этот эффект наблюдается, если интенсивность изменения уровня в м/сут ограничена значением

$$(\Delta H / \Delta t) \leq 0,40 v I_0, \quad (6.22)$$

где v — скорость течения в м/сут при установившемся движении.

Критериальное условие (6.22), как правило, не удовлетворяется в нижних бьефах гидроузлов при движении волн пусков. И здесь действительно возникает необходимость расчета и построения петлеобразных КР. На незарегулированных реках такие кривые наблюдаются лишь при весьма малых уклонах водной поверхности, как, например, на р. Оби (рис. 6.10), для которой $I_0 \approx 0,00002$.

Следует иметь в виду, что рассмотренные закономерности относятся к движению потока в недеформирующихся руслах. В естественных условиях часто можно наблюдать появление петель КР, обусловленное деформациями дна и различием гидравлических сопротивлений для движения потока на подъеме и спаде паводка. Подобная неоднозначность КР должна учитываться методами, изложенными выше.

6.4. Учет стока при ледообразованиях и зарастании русла

Рассматриваемые состояния русла наблюдаются в разные сезоны, но у них есть гидравлическая общность: как при ледоставе, так и при развитии водной растительности происходит стеснение водных сечений, снижающее пропускную способность русла. Отсюда вытекает и некоторая общность методических подходов к учету стока, хотя, конечно, в каждом случае необходимо принимать во внимание и своеобразие летних и зимних условий на реках.

6.4.1. Ледостав и ледяные образования

Учет стока в зимний и переходный периоды осложняется изменчивостью и многообразием факторов, определяющих пропускную способность русла. Появление льда и ледяных образований

на реках всегда сопровождается уменьшением пропускной способности русла. Большое значение имеют такие особенности зимнего режима рек, как характер процессов замерзания и вскрытия, устойчивость ледостава, возможность образования заторов и зажоров, закономерности изменения водности зимой.

Применительно к учету стока выделяют три периода: собственно зимний — с момента наступления устойчивого ледостава до начала весеннего вскрытия и два переходных — осенне-зимний и зимне-весенний.

Типизация и характеристика зимнего режима рек приведена в гл. 1. Они должны приниматься во внимание как при организации измерений расходов, так и при построении гидрографа в зимний период.

Рассмотрим основные варианты учета зимнего стока.

1. Прежде всего проверяется возможность построения зимних КР. При наличии таких кривых задача вычисления средних суточных расходов воды решалась бы так же просто, как и при открытом устойчивом русле.

Для зимнего периода может быть получено несколько самостоятельных кривых, соответствующих: 1) переходному периоду осеннего замерзания, 2) периоду сплошного ледостава, 3) весеннему предледоходному периоду, 4) переходному периоду весеннего вскрытия.

Однозначная связь между расходом и уровнем в период сплошного ледостава возможна для крупных рек с устойчивым ледяным покровом, толщина которого мала по сравнению с глубиной, а явления переменного подпора отсутствуют (I тип зимнего режима). Кривые для переходных периодов могут быть построены при отсутствии переменного подпора от заторов и зажоров льда и при заметном изменении уровня в зависимости от изменения расхода.

При наличии подпора от ледяных образований наблюдается резкое повышение уровня без увеличения водности, поэтому для вычисления ЕРВ за подпорный период необходимо исправить значения наблюдаемых уровней на высоту подпора. Это исправление может быть произведено путем срезки уровней за подпорный период (см. рис. 6.9).

В тех случаях, когда на данной реке в непосредственной близости от рассматриваемого поста расположен другой пост, не испытывающий подпора, и имеется устойчивая кривая связи соответственных уровней, исправление (срезка) подпорных уровней может быть произведено по графику связи обоих постов, пользуясь показаниями поста, на который подпор не распространяется.

2. При невозможности построения зимних КР наиболее простым решением задачи вычисления стока является интерполяция расходов воды в интервале между их измерениями.

3. Для построения зимних КР, а тем более для интерполяции измеренных расходов воды надо располагать достаточно большим количеством этих измерений, но их выполнение в холодное

время года — нелегкий труд. Поэтому в практике учета зимнего стока всегда стремились опираться не только на измерения расходов, но и на некоторые дополнительные физические предпосылки. К числу таких предпосылок относится предложенная С. Колупайло относительная характеристика пропускной способности русла — *переходный коэффициент*:

$$K_{\text{зим}} = Q_{\text{з}} / Q_{\text{св}},$$

где $Q_{\text{з}}$ — измеренный зимний расход при уровне $H_{\text{зим}}$; $Q_{\text{св}}$ — расход воды по КР для свободного русла при том же уровне. Таким образом, чтобы вычислить ЕРВ, достаточно знать значение $K_{\text{зим}}$ на расчетную дату

$$Q = Q_{\text{св}} K_{\text{зим}},$$

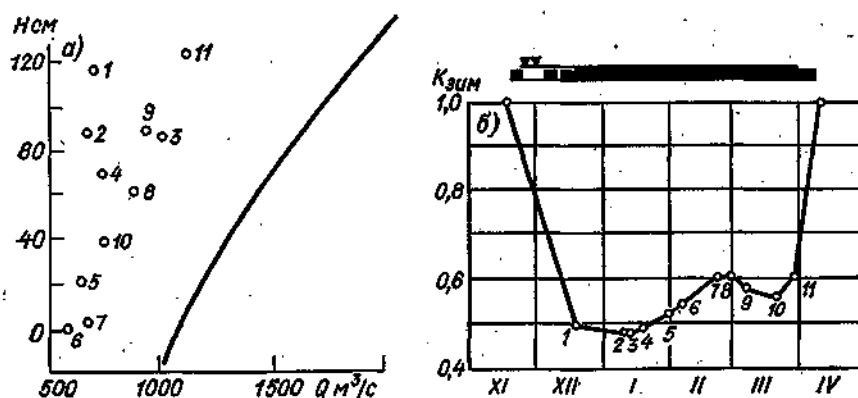


Рис. 6.12. Кривая расходов для свободного русла (а) и хронологический график изменения переходного коэффициента $K_{\text{зим}}$ (б). Река Ока — г. Горбатов, зима 1975-76 гг.

т. е. зимний расход можно определить по наблюдаемому зимнему уровню, пользуясь кривой $Q_{\text{св}}(H)$, если известно значение коэффициента $K_{\text{зим}}$. Вычисление стока воды производится следующим образом.

На график $Q_{\text{св}}(H)$ наносятся точки зимних расходов, которые, как правило, ложатся влево от кривой (рис. 6.12 а). Для каждого зимнего расхода вычисляется значение переходного коэффициента $K_{\text{зим}}$. Обычно $K_{\text{зим}}$ колеблется от 0,15 до 1,00; при $K_{\text{зим}} = 1,0$ зимний расход ложится на кривую расходов свободного русла, что возможно или при отсутствии ледяных образований, или при незначительном их влиянии на режим расходов и уровней. Как правило, сало, редкий ледоход и забереги, занимающие 10—15 % ширины реки, практически не нарушают однозначность связи между расходом и уровнем.

По вычисленным значениям строится хронологический график переходных коэффициентов $K_{\text{зим}} = f(T)$ (рис. 6.12 б). При построении графика значение $K_{\text{зим}} = 1,00$ принимается на границах

переходных периодов осеннего замерзания и весеннего вскрытия. При наличии частых измерений расходов за указанную границу принимается осенью последний день, а весной первый день, когда значение $K_{\text{зим}}$, вычисленное по измеренному расходу, равно единице. При недостаточном количестве измеренных расходов график $K_{\text{зим}} = f(T)$ экстраполируется на концах с учетом характера ледяных образований, принимая $K_{\text{зим}} = 1,00$ в первый день редкого ледохода весной и в последний день редкого ледохода осенью. В некоторых случаях на зарастающих реках в силу влияния остатков водной растительности на режим расходов значение $K_{\text{зим}}$ на границе периода осеннего замерзания может быть меньше единицы.

В первые дни ледостава значения $K_{\text{зим}}$ обычно наименьшие, затем по мере сглаживания нижней поверхности льда и рассасывания шуги увеличиваются. В дальнейшем при увеличении толщины льда они постепенно уменьшаются, с началом весеннего подъема уровня более или менее резко возрастают до предельного значения, равного единице. Плавный ход зависимости $K_{\text{зим}} = f(T)$ может быть нарушен прохождением зимних паводков. В этом случае $K_{\text{зим}}$ повторяет ход уровней и расходов, и для вычисления зимнего стока с необходимой точностью требуются частые измерения расходов воды.

Для вычисления ЕРВ составляется вспомогательная таблица, в которую для каждого зимнего месяца выписываются значения средних суточных уровней. Затем по этим уровням из таблицы координат $Q_{\text{св}} = f(H)$ выбираются значения расходов воды $Q_{\text{св}}$ и для каждого дня с графика $K_{\text{зим}} = f(T)$ снимаются значения $K_{\text{зим}}$ с погрешностью до 0,01.

При недостаточном числе измерений расходов в период ледостава график $K_{\text{зим}} = f(T)$ можно уточнить по предложению Л. М. Ковалева с использованием зависимости между коэффициентом $K_{\text{зим}}$ и коэффициентом α , учитывающим степень стеснения живого сечения ледяными образованиями:

$$\alpha = (F_{\text{полн}} - F_{\text{пл}}) / F_{\text{полн}},$$

где $F_{\text{полн}}$ — площадь поперечного сечения; $F_{\text{пл}}$ — площадь погруженного льда.

При отсутствии переменного подпора между $K_{\text{зим}}$ и α существует однозначная зависимость в виде кривой, обращенной выпуклостью к оси α .

Имея кривую $K_{\text{зим}} = f(\alpha)$ и сведения о толщине погруженного льда, можно вычислить значения α для любого дня, и тогда промежуточные значения $K_{\text{зим}}$ могут быть определены по указанной кривой.

4. И. Ф. Карасевым и В. С. Рязановым предложена модель учета стока, учитывающая изменение $K_{\text{зим}}$ в зависимости от толщины и шероховатости льда. В свою очередь их определяет ход отрицательной температуры воздуха. Кроме того, имеет значение и время T , истекшее от начала ледовых явлений: известно, что нижняя поверхность льда постепенно становится менее шерохова-

той и пропускная способность русла увеличивается, хотя толщина льда может оставаться неизменной или слабо нарастать. Модель учета зимнего стока включает:

— фактор шероховатости, представленный как фактор времени:

$$x_1 = T e^{-5T/T_{\text{л}}/T_{\text{л}}};$$

— фактор, отражающий стеснение русла льдом, выраженный переменными, в которые входит температура воды:

$$x_2 = B_{\text{св}} \sqrt{|\sum t|/F_{\text{св}}}.$$

где $T_{\text{л}}$ — продолжительность (в сутках) зимнего периода (от появления ледяных образований); $e = 2,72$ — основание натуральных логарифмов. Прямые скобки означают суммирование модулей (без учета знака) отрицательных значений температуры от начала зимнего периода.

5. В условиях неустойчивого ледостава и ледохода (II тип зимнего режима) характеристика $K_{\text{зим}}$ теряет определенность, а значение $F_{\text{зим}}$ при вычислении расходов принимается как для свободного русла без учета его стеснения. В связи с этим гидравлические условия движения потока не в полной мере соответствуют формуле Шези. В таком случае целесообразно в качестве одного из факторов принять модуль суммы отрицательных значений температуры воздуха $|\sum t|$, который будет интегрально учитывать степень стеснения и шероховатость русла, обусловленные ледяными образованиями. При этих предпосылках после логарифмирования формулы Шези—Маннинга можно получить следующее уравнение регрессии:

$$\lg Q = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3, \quad (6.23)$$

где $x_1 = \lg F_{\text{зим}}$; $x_2 = \lg R_{\text{зим}}$; $x_3 = \sqrt{|\sum t|}$.

Особое преимущество этой модели — ее универсальность и пригодность для всех условий устойчивого и неустойчивого ледостава, в том числе для случаев, когда зимние уровни выше уровней воды в открытом русле, что делает невозможным определение $K_{\text{зим}}$. Это явление наблюдается во многих западных и южных районах ЕТС. Так, для р. Венты у г. Кулдиги параметры УР зимой 1965-66 гг. имели следующие значения: $a_0 = -1,1546$; $a_1 = 1,441$; $a_2 = -0,317$; $a_3 = 0,0078$. Последовательность вычислений ЕРВ представлена в табл. 6.7.

Для построения моделей учета стока рек, которые характеризуются I и IV типами зимнего режима может быть использована одна из особенностей гидрографа в устойчивые зимы без оттепелей — спад расходов воды по мере истощения запасов влаги в бассейне. С учетом этой закономерности Карасевым получено следующее уравнение регрессии:

$$Q_0/Q = a_0 + a_1 T + a_2 T^2, \quad (6.24)$$

Вычисление ЕРВ в зимний и переходный периоды

Таблица 6.7

(режимный вариант)

Исходные данные	Расчетные операции	Результаты вычислений
$H = 61$ см $ \Sigma t = 704,9$	р. Вента — г. Кулдяга Расчетная дата: 25.02.66 г. Уравнение (6.23) $a_0 =$ $a_1 x_1 = 1,441 \cdot 1,538$ $a_2 x_2 = -0,317 (-0,328) =$ $a_3 x_3 = 0,0078 \cdot 26,55 =$ $\lg Q_{\text{зим}} = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i =$ $Q_{\text{зим}} =$	 -1,1546 2,2167 0,1038 0,2070 1,3729 23,6

где Q_0 — расход воды непосредственно перед началом ледовых явлений и ледоставом, измеренный или определенный по КР для свободного русла; T — время от начала ледообразования.

Модель (6.24) распространяется на реки, где потери стока на ледообразование относительно малы, а также на незамерзающие горные реки, когда шуга движется вместе с водой.

На реках с мощным ледоставом и на ледяях необходимо дополнительно учитывать потери стока на их образование. В этом случае в правой части уравнения (6.24) появится отрицательный член и модель учета стока усложнится. Подробное описание математических моделей учета зимнего стока дано в «Методических рекомендациях по учету стока в зимний и переходный периоды», изданным ГГИ в 1980 г.

6.4.2. Заращение русла

Заращение речных русел наблюдается в самых разнообразных климатических зонах. Особенно сильно зарастают реки на юге страны. Менее подвержены заращению горные и предгорные реки. При заращении русла однозначная связь между расходом и уровнем нарушается; точки измеренных расходов и средних скоростей располагаются влево от кривых $Q(H)$.

Наибольшее влияние на режим расходов и уровней растительность оказывает в период полного ее развития (примерно в середине лета), когда шероховатость становится наибольшей. В периоды роста и отмирания водной растительности влияние ее на условия протекания воды сказываются в меньшей степени. При прохождении значительных дождевых паводков степень нарушения

связи между расходами и уровнями уменьшается, так как с увеличением скорости течения растительность пригибается или ложится на дно и в ряде случаев может быть частично сорвана.

Начало и конец вегетационного периода зависят в основном от температуры воды и воздуха. Обычно водная растительность начинает появляться в начале лета или в конце весны, после спада весеннего половодья, и отмирает при появлениях первых ледяных образований, а в некоторых случаях остатки ее сохраняются и при ледоставе. Вычисление ЕРВ за периоды зарастания русла может быть произведено различными способами.

При сравнительно малых колебаниях расхода воды применяется способ переходных коэффициентов. Для его ис-

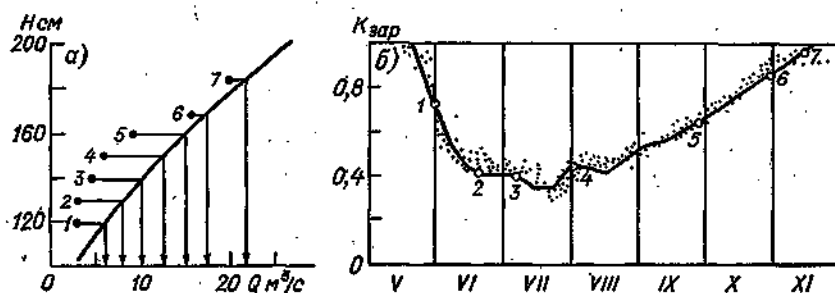


Рис. 6.13. Кривая расходов для свободного русла (а) и хронологический график переходного коэффициента $K_{зар}$ (б). Река Исса — д. Вязки, 1953 г.

пользования необходимо располагать КР для периода, когда русло свободно от водной растительности. Эта кривая может быть построена по расходам, измеренным ранней весной и поздней осенью при свободном от растительности русле. На кривую $Q(H)$ наносятся точки расходов, измеренных при заросшем русле (рис. 6.13), и для каждого из них вычисляется переходный коэффициент

$$K_{зар} = Q_{зар} / Q_{св.}$$

где $Q_{зар}$ — расход, измеренный при уровне $H_{зар}$; $Q_{св.}$ — расход, снятый с кривой свободного русла при этом же уровне.

Значения $K_{зар}$ изменяются обычно от 0,15 до 1,00. Наименьшее значение коэффициента зарастания соответствует максимуму развития водной растительности, а наибольшее — началу и концу вегетационного периода, при повышении уровня обычно увеличивается.

По вычисленным значениям строится хронологический график переходных коэффициентов $K_{зар} = f(T)$ (рис. 6.13 б). Этот график ограничивается датами, для которых $K_{зар} = 1,00$, что устанавливается по расположению точек расходов на кривой $Q_{св.}(H)$ и по наблюдениям за водной растительностью. При отсутствии этих данных за начало зарастания принимается дата повышения

температуры воды до 10°C . В осенний период не всегда происходит полное отмирание растительности, остатки ее влияют на шероховатость русла и $K_{\text{зар}}$, не достигая единицы, переходит в $K_{\text{зим}}$.

Для вычисления ЕРВ, имея наблюдаемые уровни за период зарастания, по таблице координат кривой $Q_{\text{св}}(H)$ берут значения $Q_{\text{св}}$, а с графика $K_{\text{зар}} = f(T)$ снимаются соответствующие значения $K_{\text{зар}}$. Расход воды для заросшего русла, очевидно, равен

$$Q = K_{\text{зар}} Q_{\text{св}}$$

Более совершенная модель учета стока опирается на закономерности развития водной растительности.

Как показывают наблюдения, заметные признаки зарастания русла появляются при определенной температуре воды. В средней полосе ЕТС это пороговое значение температуры составляет около 10°C на малых и 15°C на средних реках. Как оказалось, рост биомассы пропорционален корню из суммы средних суточных значений температуры воды $\sqrt{\sum t_{\text{в}}}$ после перехода их через пороговое значение. Наряду с этим с течением времени происходит отмирание сначала части, а затем и всей массы водолубивой растительности. Поэтому, кроме влияния температуры воды, должен быть учтен и фактор времени.

Все эти закономерности отражает разработанная Карасевым модель учета стока, основанная на уравнении регрессии, которое в качестве независимых переменных включает функции времени и нарастающих сумм температуры воды.

Ситуация становится особенно сложной при зарастании русла в зоне влияния переменного подпора, что часто наблюдается на устьевых участках средних и малых равнинных рек, впадающих в моря и озера. В этом случае основу модели учета стока составляет непосредственно формула Шези—Маннинга, записанная в логарифмической форме. При этом расходы воды ставятся в зависимость как от суммы значений температуры воды, так и от уровней на двух постах — в створе измерений и в нижерасположенном водоеме или реке, принимающей приток. Описание математических моделей учета стока при зарастании русел можно найти в специальной литературе.

6.5. Оперативный учет стока воды

6.5.1. Методические основы оперативного учета стока

Если режимный учет стока обращен в прошлое и отвечает на вопрос, сколько воды утекло в реке или канале, то оперативные данные о расходах воды позволяют оценить, сколько ее течет в каждый момент времени или короткие интервалы — часы, сутки.

Вся сложность оперативного учета стока заключается в том, что значения срочных или средних суточных расходов воды

должны определяться при отсутствии всей совокупности измерений за год или, по крайней мере, отдельные фазы гидрологического режима. Поэтому в качестве основы для определения расходов воды в любой момент времени принимаются КР и УР предшествующего года или многолетия. Когда эти связи устойчивы и однозначны, оперативный и режимный варианты учета стока теряют различие и дают практически совпадающие результаты. Иначе обстоит дело, если условия протекания потока в створе изменяются от года к году. В этом случае многолетние КР и УР дают лишь первое приближение к оценке текущих значений расходов воды с точностью, близкой к точности расчета по гидрологическим зависимостям, например формуле Шези. Но задача гидрометрии заключается в получении данных, непосредственно основанных на измерениях расходов и уровней воды. Отсюда возникает необходимость в качестве второго приближения использовать текущие измерения расходов воды, что позволяет «привязать» расчетные зависимости к конкретным условиям данного момента времени. Выполнение этой операции, которая называется *идентификацией* уравнений или расчетных зависимостей, достигается уточнением параметров многолетних регрессионных связей, например свободного члена

$$a_{0к} = Y_k - \sum_{i=1}^N a_i x_{ik}, \quad (6.25)$$

где Y_k — результат последнего измерения расхода воды или характеристики пропускной способности русла ($K_{зим}$, $K_{зар}$ и т. п.); x_{ik} — значения аргументов, наблюдаемые при измерении Y_k ; a_i — коэффициенты уравнения регрессии за многолетие.

Опираясь на уточненное значение $a_{0к}$ впредь до следующего измерения расхода воды, оперативные данные о водности реки или канала получают из уравнения

$$Y = a_{0к} + \sum_{i=1}^N a_i x_i, \quad (6.26)$$

где x_i — текущие значения аргументов на каждые сутки или фиксированные моменты времени. Предполагается, что наблюдения непосредственно за величинами x_i или входящими в них элементами, например уровнями и температурой воды, производятся непрерывно, и мы всегда располагаем данными, которые требуются подставить в уравнение (6.26).

Таким образом, оперативные данные о стоке рассчитываются на основе УР за многолетие в сочетании с экстраполяцией последних измерений расхода воды или зависящих от него характеристик. Благодаря этому устраняется разрыв между режимным и оперативным учетом стока, так как вычисление расходов базируется на общей измерительно-гидравлической основе. Различие между ними заключается лишь в том, что первый основан на

интерполяции характеристик пропускной способности русла, а второй — на экстраполяции их измеренных значений.

Порядок оперативного учета стока покажем на ряде характерных примеров.

6.5.2. Примеры вычисления оперативных значений расходов воды

Основные процедуры оперативного учета стока выполняются, как и в режимном варианте, применительно к факторам, создающим неоднозначность КР. В табл. 6.8—6.10 приведены примеры вычисления текущих значений расходов воды в деформирующихся руслах, при переменном подпоре и ледообразовании в тех же створах, для которых рассмотрена последовательность операций режимного учета стока. Несмотря на простоту использованного приема, он дает вполне приемлемые для практики оперативные данные, близкие к режимным.

Таблица 6.8

Вычисление ЕРВ в деформирующихся руслах
(оперативный вариант)

Исходные данные	Расчетные операции	Результат вычисления
29.06.81 $H = 241$ см $Q_n = 2920$ м³/с	р. Амударья — г. Керки уравнение (6.16) $\bar{Q}_t = -253 + 15,94 \cdot 241 - 0,1114 \cdot 241^2 +$ $+ 0,000415 \cdot 241^3 =$ формула (6.10) $\tilde{q}_t = \frac{2920 - 2950}{2950} =$	2950 м³/с — 0,01
	Расчетная дата: 01.07.81 $H = 246$ см $Q_t = -253 + 15,94 \cdot 246 - 0,1114 \cdot 246^2 +$ $+ 0,000415 \cdot 246^3 =$ $Q = (1 - 0,01) \cdot 3140$	3140 м³/с 3110 м³/с

Сделаем одно важное замечание. В каждом случае при определении оперативных значений ЕРВ мы исходили из предположения о неизменности свободных членов УР или других характеристик в интервале от состоявшегося до последующего измерения расхода воды. Но эта предпосылка действительна лишь в том случае, когда в промежутке между измерениями не наблюдается деформаций русла и резкой смены гидравлических характеристик

Вычисление ЕРВ при переменном подпоре

(оперативный вариант)

Исходные данные	Расчетные операции	Результат вычисления
11.06.68 $H_B = 540$ см $H_H = 779$ см $Q_H = 5320$ м³/с	Корректировка свободного члена уравнения (6.21): $a_0 = 5320 - 10,94 \cdot 540 - 0,006 \cdot 540^2 + 9,11 \cdot 779 =$ Расчетная дата: 02.07.68 $H_B = 345$ см, $H_H = 760$ см $Q_t = 4760 + 10,94 \cdot 345 + 0,006 \times$ $\times 345^2 - 9,11 \cdot 760 =$	4760 м³/с 2320 м³/с

Вычисление ЕРВ в зимний и переходный периоды

(оперативный вариант)

Исходные данные	Расчетные данные	Результат вычисления
28.02.55 $Q_{\text{зим}} = 34,3 \text{ м}^3/\text{с}$ $\lg Q_{\text{зим}} = 1,535$ $F_{\text{зим}} = 66,1 \text{ м}^2$ $\lg F_{\text{зим}} = 1,820$ $R_{\text{зим}} = \frac{h}{2} = 1,12 \text{ м}$ $\lg R_{\text{зим}} = 0,049$ $\Sigma t = 278,9$ $\sqrt{ \Sigma t } = 16,7 \text{ }^\circ\text{C}$	р. Вента — г. Кулдига Корректировка свободного члена уравнения (6.23) $a_0 = 1,535 - 1,325 \cdot 1,820 - (-270) \times$ $\times 0,049 - (-0,002) \cdot 16,7 =$ Расчетная дата: 10.03.55 $H = 178 \text{ см}; R_{\text{зим}} = 0,96 \text{ м}$ $F_{\text{зим}} = 53,6 \text{ м}^2; \lg R_{\text{зим}} = -0,018$ $\lg F_{\text{зим}} = 1,729; \Sigma t = 319,7 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sqrt{ \Sigma t } = 17,88 \text{ }^\circ\text{C}$ Уравнение (6.23) $\lg Q_{\text{зим}} = -0,830 + 1,325 \cdot 1,729 -$ $- 0,270 (-0,018) - 0,002 \cdot 17,88 =$ $Q_{\text{зим}} =$	— 0,830 1,430 26,9 м³/с

в гидростворе. Следовательно, для повышения точности оперативных данных измеренные расходы должны быть по возможности приурочены к характерным моментам времени, когда изменяются условия протекания потока. В остальном измерения расходов могут выполняться через равные промежутки времени с частотой, задаваемой в зависимости от требуемой точности учета стока.

6.6. Вычисление стока наносов

6.6.1. Сток взвешенных наносов

В зависимости от характера и полноты исходных данных определение средних суточных (ежедневных) расходов взвешенных наносов может быть осуществлено:

а) по данным о ежедневной мутности и расходах воды (основной способ),

б) на основании зависимости между расходами воды и взвешенных наносов.

На реках, режим наносов которых хорошо изучен, сток наносов за период междени иногда может оцениваться приближенно — по доле, которую он составляет в годовом стоке (в многолетнем разрезе). Чаще всего к этому способу прибегают, если указанная доля не превышает 5 %.

Вычисление средних суточных (ежедневных) расходов взвешенных наносов по мутностям единичных проб воды возможно при наличии следующих данных:

- ежедневных значений мутности единичных проб воды;
- ежедневных расходов воды;
- связи между средней мутностью потока и мутностью воды на вертикали отбора единичных проб ($S_{\text{ср}} = f(S_{\text{ед}})$).

Сначала вычисляются средние суточные значения единичных мутностей воды. При односрочных наблюдениях она принимается равной фактической мутности единичной пробы, а при двухсрочных — среднему арифметическому из значений мутности в сроки наблюдений. Средняя суточная мутность по данным многосрочных наблюдений вычисляется как среднее взвешенное из их результатов

$$\bar{S}_{\text{ед}} = \frac{1}{24} \left[\frac{S_0 + S_1}{2} t_1 + \frac{S_1 + S_2}{2} (t_2 - t_1) + \dots + \frac{S_n + S_{24}}{2} (24 - t_n) \right], \quad (6.27)$$

где $S_0, S_1, \dots, S_{24}$ — значения единичной мутности в 0, 1, 2, ..., 24 ч.

Если в 0 и 24 ч пробы не отбирались, используются расчетные значения единичной мутности для этих сроков, которые находятся по интерполяции мутности в крайние сроки наблюдений за данные и смежные с ними сутки.

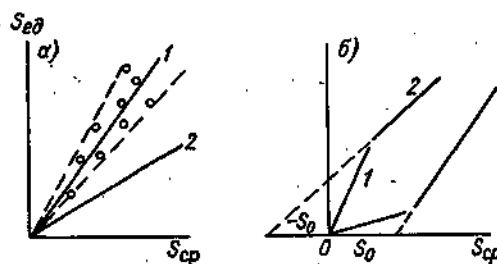
По значениям средних суточных единичных мутностей, используя зависимость $S = f(S_{ед})$ (рис. 6.14), определяют так называемую *ежедневную мутность потока* S , на основе которой вычисляется ежедневный расход взвешенных наносов

$$P_s = SQ,$$

где Q — ежедневный (средний суточный) расход воды.

Рис. 6.14. Типичные графики связи средней мутности потока с мутностью единичных проб.

а — линейная зависимость $S_{ср} = f(S_{ед})$ за время измерения в основном (1) и дополнительном (2) гидростворах; б — зависимость $S_{ср} = f(S_{ед})$ в виде двух прямых для одного гидроствора при изменяющемся режиме мутности. Штриховой линией показаны границы 20 %-ной полосы рассеяния точек $S_{ед}$.



Вычисление средних суточных расходов взвешенных наносов с использованием зависимости между расходами воды и взвешенных наносов ($P_s = f(Q)$) возможно только при достаточно подробном освещении измерениями всех фаз режима реки.

При построении графика $P_s = f(Q)$ по оси абсцисс откладываются измеренные значения расхода взвешенных наносов, а по оси ординат — соответствующие им расходы воды (рис. 6.15). Для равнинных рек с явно выраженным весенним половодьем зави-

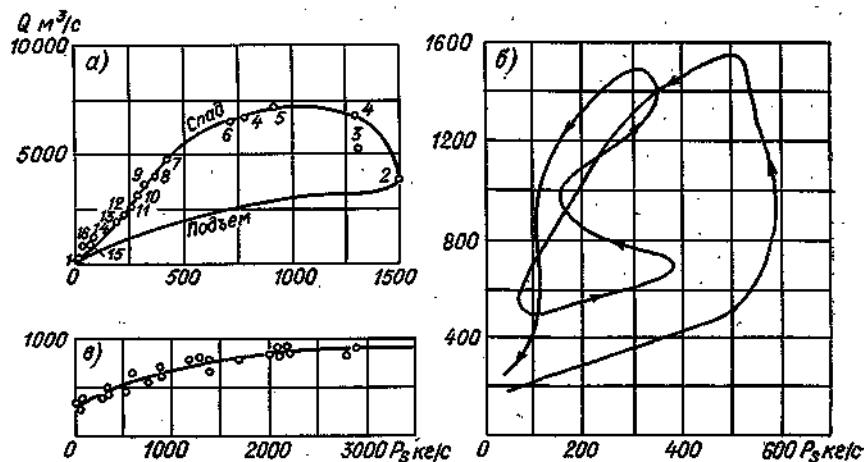


Рис. 6.15. Примеры зависимостей $P_s = f(Q)$.

а — р. Белая — г. Уфа, б — р. Сев. Донец — г. Белая Калитва, в — р. Сырдарья — г. Казань.

симость $P_s = f(Q)$ имеет обычно форму петли, правая ветвь которой соответствует подъему уровня, а левая — спаду. Для рек с частыми дождевыми паводками зависимость $P_s = f(Q)$ приобретает более сложный характер, так как каждому паводку соответствует своя петля.

Значения средних суточных расходов взвешенных наносов снимают с графика $P_s = f(Q)$, используя для этого подсчитанные ранее средние суточные значения расходов воды.

6.6.2. Вычисление стока влекомых наносов

При наличии данных об измеренных расходах влекомых наносов ($P_{вл}$) их ежедневные (средние суточные) значения вычисляются с использованием зависимости $P_{вл} = f(Q)$ или интерполяцией между их измеренными значениями.

При построении графика $P_{вл} = f(Q)$ может оказаться, что точки $(P_{вл}, Q)$ располагаются беспорядочно и провести по ним одну осредненную кривую не представляется возможным. В этом случае необходимо ввести в зависимость еще по крайней мере один аргумент X из числа гидравлических характеристик, оказывающих влияние на сток наносов (уровень, среднюю скорость течения, уклон) и наметить серию кривых $P_{вл} = f(Q, X)$, каждой из которых соответствовало бы то или иное постоянное значение дополнительного аргумента X_i . Такую зависимость лучше искать в форме уравнения регрессии $P_{вл}$ по Q и X , используя ЭВМ для вычисления его параметров.

Ежедневный расход влекомых наносов вычисляется соответственно средним суточным значениям Q и X .

Там, где для измерения стока наносов применяется суммарно-объемный способ, сток влекомых наносов может быть получен непосредственно, если последовательные промеры глубин приурочивать к началу и концу расчетного периода. В этом случае при подсчете стока влекомых наносов используется указанная выше зависимость $P_{вл} = f(Q)$, с той лишь разницей, что при ее построении на график наносятся значения расходов влекомых наносов и воды, осредненные за период между последовательными сериями промеров глубин. Сток влекомых наносов для неосвещенных измерениями периодов вычисляют в этом случае с использованием не средних суточных расходов влекомых наносов, а их значений, осредненных за более длительные периоды (декада, месяц и т. д.).

Принимая во внимание низкую точность измерения расходов влекомых наносов, иногда прибегают к ориентировочным оценкам по соотношению их стока со стоком взвешенных наносов. При этом, однако, необходимо иметь в виду, что отношение $W_{вл}/W_{P_s}$, во-первых, существенно зависит от физико-географических условий и, следовательно, различно для разных рек, а во-вторых, даже для одного и того же створа реки может меняться в 2—3 раза в зависимости от водности года, снижаясь в многоводные и увеличиваясь в маловодные годы.

6.7. Выбор методов и оценка точности учета стока воды и наносов

6.7.1. Комплексный график результатов наблюдений как объективная основа для выбора методов их обработки

Комплексный график результатов наблюдений (рис. 6.16) составляется для каждого гидрологического поста и отражает изменение во времени различных характеристик гидрологического режима реки, осадков, температуры воды и воздуха. График охватывает текущий календарный год и для преемственности — последнюю декаду предшествующего и первую декаду последующего года. Подразделение гидрометеорологических процессов на календарные периоды — это, конечно, условный прием, но он удобен тем, что соответствует периодам осреднения характеристик стока воды и наносов. Комплексный график строится на гидрологических станциях в течение всего года по мере поступления результатов наблюдения. Графики по постам одной реки рекомендуется наносить на один лист с общей шкалой времени. В верхнем правом углу листа помещается схема расположения постов. Кроме результатов наблюдения за гидрологическими и метеорологическими элементами (на рис. 6.16 они представлены в достаточно полном составе), на графике фиксируются условными знаками даты измерений расходов воды, взвешенных и донных наносов, промеров, нивелировок, взятия проб воды на химанализ и т. п. Особое внимание уделяется измерениям расходов: они отмечаются флажками, основание которых располагается на высоте расчетного уровня, к которому отнесен расход. На графике указываются порядковые номера всех измеренных расходов. Порядок всех построений детально описан в Наставлении вып. 6, часть I.

Эффективность комплексного графика заключается в том, что он дает возможность проследить во взаимосвязи развитие гидрологических, гидрофизических и метеорологических явлений (прохождение паводков, наступление межени, ход осадков и температуры воздуха, охлаждение воды, развитие ледообразования и т. п.). В конечном счете оказывается возможным установить смену фаз водного и руслового режима, их согласованность с ходом гидрометеорологического режима. На основе комплексного графика могут быть выявлены недостатки в организации наблюдений и осуществлен контроль достоверности их результатов.

Для обоснованного выбора метода учета стока на комплексном графике должны быть выделены фазооднородные периоды применительно к факторам, влияющим на пропускную способность русла: ледостав, переходный период, половодье, меженное зарастание русла, периоды действия переменных подпоров и т. п. Для каждого из таких периодов должна быть выбрана наилучшая математическая модель или расчетная схема для вычисления ЕРВ. Совокупность этих моделей и схем реализуется при составлении таблиц Государственного водного кадастра.

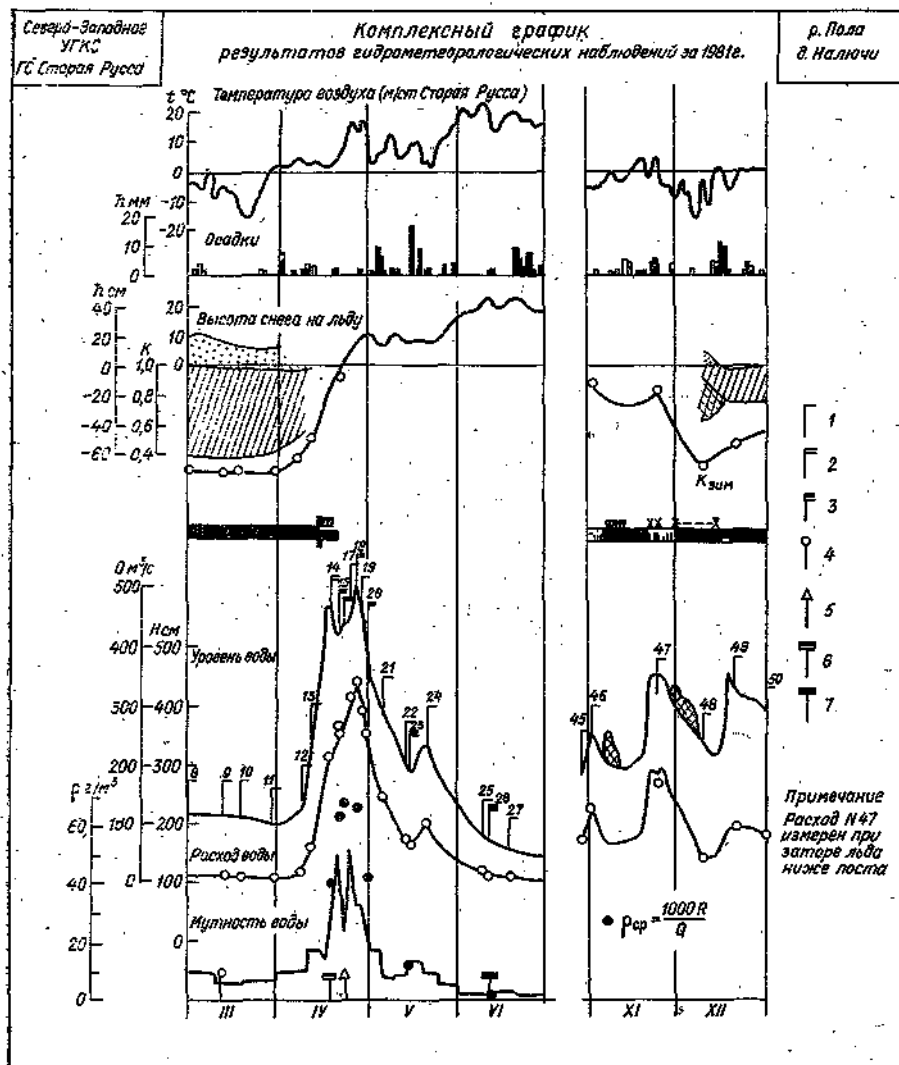


Рис. 6.16. Комплексный график гидрометеорологических наблюдений. Река Пола — д. Налючи, 1980 г.

Даты измерений: 1 — расход воды, 2 — расход воды и взвешенных наносов, 3 — расход воды, взвешенных и донных наносов, 4 — контрольная нивелировка поста, 5 — отбор проб на химический анализ, 6 — отбор проб на гранулометрический анализ донных наносов, 7 — отбор проб на гранулометрический анализ донных и взвешенных наносов.

6.7.2. Погрешности гидрометрического учета стока воды и стока наносов

Гидрограф, получаемый по данным дискретных измерений расходов воды, лишь приближенно воспроизводит изменение водности реки во времени. Даже в устойчивых руслах однозначность связи $Q(H)$ нарушают погрешности измерения расходов и определения средних суточных уровней.

Остановимся на некоторых методических положениях оценки точности осредненных характеристик стока в зависимости от погрешностей и частоты измерения расхода воды.

При устойчивой кривой расходов ЕРВ определяются наиболее просто: они снимаются с КР или вычисляются по УР. Поскольку КР осредняет поле точек $Q(H)$, случайная погрешность ЕРВ, вообще говоря, оказывается значительно меньше, чем рассеяние связи σ_p . Но этот эффект достигается лишь при сравнительно большом количестве измерений, равномерно распределенных по амплитуде колебания уровня, так что в каждом их интервале оказывается достаточно данных для надежного определения среднего положения КР. Практически это требование трудно соблюсти, особенно в области максимума непродолжительных паводков, в переходные периоды и т. п. Поэтому построенные или аппроксимированные КР так или иначе отклоняются от действительного положения, которое можно было бы установить по большому числу измерений. Отсюда возникают квазисистематические погрешности учета стока, т. е. такие, что их статистическое сглаживание происходит менее интенсивно, чем случайных. Строгая оценка квазисистематических погрешностей учета стока в этих условиях возможна лишь в каждом конкретном случае с учетом количества измерений расходов воды N . Если они достаточно равномерно распределяются по N_ϕ фазам режима, то для их оценки можно рекомендовать зависимость

$$\bar{\sigma}_k = \bar{\sigma}_p \sqrt{N_\phi / N}. \quad (6.28)$$

При устойчивых КР обычно в среднем производится два-три измерения в месяц (20—25 за период открытого русла). Считается, что для достаточного освещения фазы водного режима необходимо по крайней мере пять измерений. Таким образом, вся совокупность измерений на равнинных реках с устойчивыми кривыми расходов, как правило, должна распределяться по четырем гидрологическим фазам.

При неоднозначной зависимости расходов от уровней или других факторов погрешность ЕРВ оценивается в долях α от рассеяния $\bar{\sigma}_p$, т. е. $\bar{\sigma}_k \approx \alpha \bar{\sigma}_p$.

Точность определения расходов воды, осредненных за декаду, месяц, год, существенно выше, чем ЕРВ, и зависит как от погрешности измерения расходов воды σ_q , так и значения σ_p .

При достаточной дискретности наблюдений во времени и пространстве значение осредненных характеристик мало зависит от

метода их вычисления. Совершенство расчетно-измерительных моделей выявляется лишь при сокращении числа измерений во времени или разрежении пунктов наблюдений в пространстве. При этом за действительную или, как говорят, *эталонную* величину принимается значение характеристики, соответствующее полной совокупности измерений. Основой для сравнения могут служить также величины, полученные посредством надежно проградированных расходомеров и водопропускных сооружений, к которым

относятся водосливы, турбинные агрегаты ГЭС, шлюзы-регуляторы и т. п.

На рис. 6.17 приведены кривые, характеризующие точность определения осредненных значений расходов воды, полученные:

1) при устойчивых (однозначных) кривых расходов;

2) при неоднозначных зависимостях $Q(H)$ в створах равнинных рек, где наблюдаются сезонные деформации русла и переменный подпор;

3) при неоднозначных КР в неустойчивых руслах полугорных и горных рек.

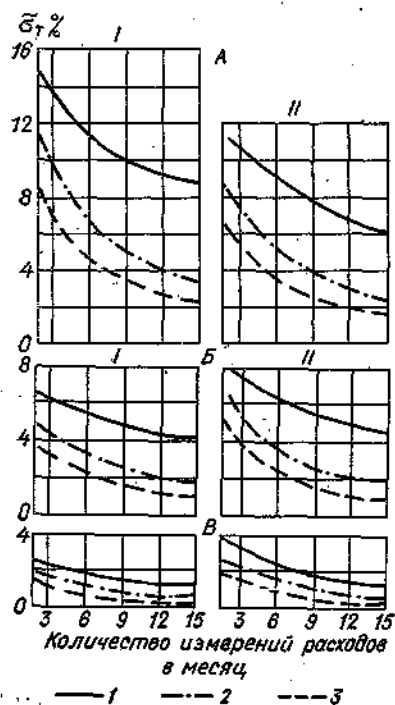


Рис. 6.17. Зависимость средних квадратических погрешностей вычисления ежедневных (1), среднедекадных (2) и средних месячных (3) расходов воды на реках и каналах.

А — легко деформирующиеся русла, Б — русла, претерпевающие сезонные деформации, В — устойчивые русла.
I — половодье (паводки), II — межень.

Из рис. 6.17 видно, что на реках первой и второй группы точность определения осредненных характеристик стока в межень ниже, чем в половодье. Это объясняется увеличением относительного рассеяния точек измеренных расходов в поле (Q, H) по мере их снижения. На реках третьей группы наблюдается обратное: точность вычисления стока растет с уменьшением водности реки.

Кривые (рис. 6.17) характеризуют точность режимного учета стока в открытых руслах. При появлении в русле препятствий для движения потока (ледообразование, зарастание) погрешность вычисления ЕРВ и осредненных значений стока возрастает в 1,4—1,6 раза.

Что касается оперативных значений, то для оценки их точности можно принять соотношение

$$(\sigma_k)_{оп} = 2 (\sigma_k)_{реж.}$$

Общие характеристики точности учета стока используются при оценке достоверности данных о водных ресурсах.

Существенно выше совокупная *погрешность вычисления стока наносов*, так как наряду с рассмотренными погрешностями вычисления стока воды она включает также погрешности вычисления средних значений мутности потока. По данным лаборатории наносов и качества вод ГГИ, подсчет стока взвешенных наносов за различные периоды характеризуется следующими значениями средних квадратических погрешностей: за сутки — 20—25 %, за месяц — 10—20 %, за год — 8—10 %.

Глава

7

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

7.1. Гидрометеорологическая сеть на озерах и водохранилищах

7.1.1. Состав и задачи гидрометеорологической сети

Сеть гидрометеорологических пунктов наблюдений на озерах и водохранилищах — наиболее развитая из специальных гидрологических сетей. Это не удивительно. На территории Советского Союза насчитывается около 3 млн. различных внутренних водоемов — озер и водохранилищ, концентрирующих значительные запасы воды — 28 600 км³. Внутренние водоемы широко используются для народнохозяйственных целей: гидроэнергетики, рыбного хозяйства, водного транспорта, промышленного и питьевого водоснабжения, отдыха и туризма.

По своему режиму, размерам, конфигурации водоемы обладают большим разнообразием и подразделяются следующим образом:

а) по площади водной поверхности (F) на самые малые ($F < 10$ км²), малые ($F = 250 \div 1000$ км²), средние ($F = 50 \div 250$ км²), большие ($F = 250 \div 1000$ км²), крупнейшие ($F > 1000$ км²);

б) по средней глубине (h) на мелководные ($h < 10$ м), средние по глубине ($h = 10 \div 20$ м), глубоководные ($h > 20$ м).

По строению котловины водохранилища различаются:

а) речного типа (длина в направлении речной долины в 20 раз более наибольшей ширины),

б) озерного типа (отношение длины к максимальной ширине менее 20).

В состав гидрометеорологической сети на озерах и водохранилищах входят гидрометеорологические обсерватории, озерные

станций, плавучие гидрометеорологические станции и озерные посты.

Гидрометеорологические обсерватории (ГМО) создаются обычно на крупнейших озерах и водохранилищах. На больших водоемах они организуются только в исключительных случаях, связанных особенно большой хозяйственной значимостью водоема.

Озерные станции создаются преимущественно для изучения больших озер (водохранилищ), части крупного водоема или группы средних и малых озер.

Плавучие гидрометеорологические станции открываются, как правило, на крупнейших водоемах на наиболее сложных в гидрометеорологическом отношении и напряженных участках водных трасс.

Озерные посты (ОГП) организуются для систематического наблюдения за основными режимными характеристиками водоема.

На крупнейших водоемах обычно развивается довольно обширная сеть постов; на среднем по площади озере (водохранилище), как правило, ограничиваются одним постом. На самых малых водоемах посты обычно не организуются: их изучение ведется экспедиционным путем.

Задачами системы гидрологических наблюдений на озерах и водохранилищах являются: изучение их режима, водного баланса и качества воды, информационное обеспечение службы прогнозов и народного хозяйства. Все перечисленные задачи решаются озерными станциями и постами путем проведения стандартных и специальных наблюдений и работ.

Стандартные наблюдения проводятся как в прибрежной, непосредственно примыкающей к посту зоне, так и в открытой части водоема.

В прибрежной зоне ведутся систематические наблюдения за уровнями, температурой поверхностного слоя воды, толщины льда, высотой и плотностью снега на льду, волнением и ледовой обстановкой.

В открытой части водоема наблюдения осуществляются на постоянных одной или нескольких рейдовых вертикалях. Выполняются они не чаще 1 раза в пятидневку и включают наблюдения за температурой и влажностью воздуха, скоростью и направлением ветра, температурой воды и в поверхностном слое и на глубинах, волнением, прозрачностью, цветом и химическим составом воды. Кроме того, на специальных термических профилях производят наблюдения за температурой в поверхностном слое.

В программах специальных наблюдений обычно предусматривается производство термических съемок, изучение испарения с водной поверхности, сгонно-нагонных явлений, переформирования берегов и заиления водохранилищ, авиаразведки ледовой обстановки и некоторые другие виды работ.

7.1.2. Организация и размещение озерных станций и постов

При выборе месторасположения озерных станций и постов учитывается ряд научно-методических и организационных требований. Главные из них относятся к соблюдению репрезентативности пунктов наблюдений за основными характеристиками режима водоема. Для оперативной передачи информации заинтересованным народнохозяйственным организациям и органам службы прогнозов посты должны быть размещены возможно ближе к пунктам связи. Принципы и порядок размещения озерных станций и постов приводятся в соответствующих разделах по производству основных видов гидрологических наблюдений.

Правильное решение этих вопросов требует предварительного изучения предполагаемого района размещения станции (поста) на основании имеющихся материалов по гидрологической изученности водоема и путем проведения его рекогносцировочного обследования. Составленная на основании этих работ характеристика района расположения станции (поста) (а для средних и малых озер и водохранилищ — всего водоема) должна содержать: а) сведения о характере рельефа, облесенности, распаханности и заболоченности водосбора озера (водохранилища); б) данные о реках, вытекающих из водоема и впадающих в него; в) характеристику берегов по форме, составу слагающих их пород и укрытости растительностью; г) краткие сведения о наличии и степени развития береговой отмели (ширина отмели, степень зарастания водной растительностью); д) сведения о химическом составе и физических свойствах воды, а также о типах грунтов, слагающих дно водоема.

На водоемах, по которым отсутствуют сведения о глубинах и объеме воды, необходимо приближенно оценить их в процессе рекогносцировочного обследования путем не слишком подробной батиметрической съемки. В дальнейшем морфометрические характеристики водоема должны быть уточнены.

После того, как место расположения станции (поста) окончательно определилось, проводится гидрографическая съемка побережья и рельефа дна водоема (части водоема, примыкающей к станции), а также плано-высотной привязки пунктов наблюдений (уровнемерных постов, рейдовых вертикалей, волномерных вех и т. п.). Топографические работы на берегу выполняются в соответствии с общими правилами топографической (мензурной, тахиометрической и т. п.) съемки; промерные работы проводятся в соответствии с Наставлением вып. 7, ч. 1 приложение 1.

В результате гидрографической съемки составляется батиметрическая карта водоема, по которой вычисляют основные морфометрические характеристики: площадь водоема F — площадь его водной поверхности (без островов); длина водоема L — кратчайшее расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга точками его берегов; средняя ширина $B_{\text{ср}}$ вычисляется путем

деления площади водоема на его длину; объем воды в водоеме V определяется как сумма объемов отдельных слоев, заключенных между изобатами (горизонталями):

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (h_{i+1} - h_i) + \Delta V,$$

где F_i и F_{i+1} — поверхности, ограниченные смежными изобатами (горизонталями) с глубинами (отметками) h_i и h_{i+1} (z_i и z_{i+1}); ΔV — объем придонной призмы водоема, ограниченной сверху поверхностью, огибаемой последней (N -й) изобатой (горизонталью), значение которого вычисляется по формуле $\Delta V = \frac{1}{3} F_N (h_{\max} - h_N)$.

7.2. Наблюдения за уровнем воды

На озерах и водохранилищах наблюдаются два вида колебаний уровня — статические и динамические.

Статические колебания уровня связаны с изменением общих запасов воды в водоеме. На озерах они определяются в основном сезонными и многолетними колебаниями водности. В весенний период обычно наблюдается повышение уровня озер, а затем его постепенное снижение в связи с относительным ростом потерь воды на инфильтрацию, испарение летом, ледообразование зимой и т. п. Амплитуда колебания уровня при прочих равных условиях обычно уменьшается с увеличением размеров озера. В водохранилищах наряду с указанными естественными причинами на статические колебания уровня оказывает также влияние режим работы расположенных на них ГЭС.

Динамические колебания уровня могут быть связаны с перераспределением водной массы между отдельными частями водоема под действием ветра или различием в атмосферном давлении над ними, приливными явлениями, прохождением паводочных волн или волн попусков, вышерасположенной ГЭС, отраженных волн, возникающих при внезапной остановке агрегатов ГЭС или других водосбросных сооружений, и т. п.

В связи с изложенным выбор числа и месторасположения уровнемерных постов в конечном итоге существенно зависит от задачи наблюдений за уровнем, т. е. от того, какие режимные характеристики (статические или динамические) требуется выявить.

Если такой задачей (как это чаще всего бывает) является определение запасов воды в водоеме, на первый план выступают статические колебания уровня, а его динамические изменения рассматриваются при этом как помехи, затрудняющие и снижающие точность измерения главной характеристики. Важнейшей предпосылкой в этом случае при назначении общего количества и расположения постов является надежность определения среднего статического уровня водоема. Для этого в первую очередь необхо-

димо позаботиться о снижении влияния динамических колебаний уровня, обусловленных ветровыми сгоно-нагонами (ветровая денивеляция). Рекомендуется располагать посты на концах так называемых осей равновесия сгонно-нагонной денивеляции, т. е. на участках, где перекосы уровня минимальны или вовсе отсутствуют. Расчет местоположения осей равновесия выполняется для господствующих ветров по методике, изложенной в «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 7, ч. 1.

На водохранилищах речного типа посты обычно располагаются по противоположным берегам так, чтобы наблюдениями были освещены все наиболее характерные участки водоема. В зоне выклинивания подпора расстояние между постами назначается равным 20—30 км, если ее емкость составляет 20—25 % общей емкости водохранилища, и 40—60 км при относительной емкости этой зоны 5—10 %. В зоне малых уклонов (менее 0,001‰) пункты наблюдений размещаются так же, как на озерах и водохранилищах озерного типа, с учетом положения осей рав-

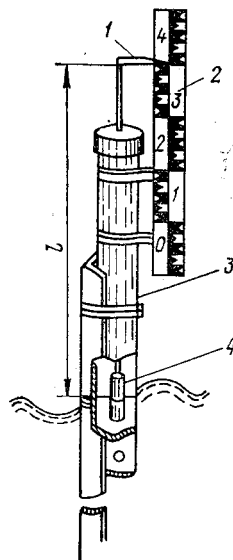


Рис. 7.1. Постоянная урвнемерная рейка с успокоителем.

1 — шток-указатель, 2 — рейка, 3 — резервуар (труба) успокоителя, 4 — поплавок.

новесия сгонно-нагонной денивеляции, но во всех случаях на удалении от водозаборных сооружений и шлюзов не менее 5—10 км.

При необходимости исследования режима динамических колебаний уровня, например в связи с решением вопроса о рациональном размещении водозаборов или сбросов сточных вод, посты должны располагаться в зонах максимальных колебаний уровня («пучностях»). Дополнительные посты создаются также в местах, где всестороннее освещение уровня необходимо для удовлетворения запросов народнохозяйственных организаций.

Во всех случаях участок поста должен быть защищен от ветрового волнения. Поэтому лучше располагать посты в естественных бухтах, заливах или в специально вырытых ковшах, свободно сообщаящихся с водоемом. При использовании для наблюдений самописцев уровня диаметр трубы, соединяющей колодец с водоемом, должен рассчитываться таким образом, чтобы было обеспечено гашение мелкопериодических колебаний уровня, связанных с волнением. На речных постах для этой цели может быть использован простейший успокоитель, представляющий собой стеклянную или плексигласовую трубку, укрепленную вдоль лицевой стороны рейки (рис. 7.1). В нижней части трубы (забитой заглушкой)

имеются одно-два отверстия общей площадью не более $1/50$ части от поперечного сечения трубы. Внутри трубы свободно перемещается поплавков со штоком, верхний Г-образный конец которого, служащий указателем уровня, скользит вдоль лицевой стороны рейки. Для получения фактической отметки уровня воды отсчет уровня, снятый напротив указателя по рейке, должен быть уменьшен на длину l вертикальной части штока (включая и высоту выступающей над поверхностью воды части поплавка).

На свайных постах наблюдения при волнении выполняются только переносной рейкой с успокоителем (см. п. 1.2.4).

Средства измерения уровня, требования к точности наблюдений и оборудованию постов с точки зрения безопасности выполнения работ аналогичны средствам измерения и требованиям, подробно описанным в гл. 1.

Регулярные наблюдения за уровнем воды производятся 2 раза в сутки в 8 и 20 ч местного времени, а в период устойчивой межени один раз — в 8 ч. Запись результатов наблюдений за уровнями воды производится в книжках КГ-1МО.

Специальные наблюдения за уровнем связаны обычно с выполнением водного нивелирования или исследованиями сгонно-нагонной денивеляции.

Целью водного нивелирования является определение или уточнение высотных отметок нулей постов, расположенных на водоеме. Поэтому выполнять эту работу следует тогда, когда водная поверхность может быть принята практически горизонтальной, чему лучше всего отвечают штилевые условия в периоды летней или зимней межени. Работы включают непрерывную регистрацию уровня с помощью самописцев, а при их отсутствии — проведение учащенных синхронных наблюдений на всех привлекаемых к работе постах.

При изучении сгонно-нагонных денивеляций также выполняется непрерывная регистрация уровня, а на постах, где отсутствуют самописцы, проводятся учащенные наблюдения. Наблюдения за уровнями сопровождаются измерениями скорости ветра. Учащенные наблюдения производятся через каждый час начиная с момента достижения ветром скорости 8 м/с и прекращаются через 2 часа после того, как она станет меньше 8 м/с.

Запись учащенных наблюдений за уровнем воды производится в прилагаемом к книжке КГ-1МО вкладыше ТГ-1МО-1в, а результаты наблюдений по самописцу — в ТГ-1МО-2в.

7.3. Изучение термического режима озер и водохранилищ

7.3.1. Основные закономерности термического режима

Температурный режим озер и водохранилищ формируется под воздействием большого числа гидрометеорологических факторов. Даже на водоемах, расположенных в одинаковых физико-геогра-

фических условиях, характер распределения температуры по глубине и акватории может существенно отличаться в зависимости от площади водной поверхности, средней глубины, конфигурации и изрезанности берегов, степени проточности, особенностей волнения и некоторых других факторов. Тем не менее в температурном режиме озер и водохранилищ можно проследить некоторые общие закономерности, связанные преимущественно с сезонными изменениями количества солнечной энергии, поступающей в водоем.

Водоемы умеренной зоны наименьшее количество тепла содержат зимой. В этот период для распределения температуры по их глубине обычно характерна *обратная стратификация* (рост температуры с глубиной). При этом температура воды у поверхности, примыкающей ко льду, около 0°C , а у дна — в пределах $1,5\text{—}3^{\circ}\text{C}$.

Весной, через некоторое время после схода льда, на неглубоких водоемах температура воды, достигнув 4°C , становится одинаковой по глубине (*гомотермия весенняя*). Для глубоководных водоемов в этот период характерно более сложное распределение температуры, при котором она сначала убывает с ростом глубины, а затем, достигнув на некотором горизонте $2\text{—}3^{\circ}\text{C}$, снова увеличивается до 4°C . Такое распределение температуры называется *дихотермией*.

Дальнейший прогрев воды приводит в летний период к *прямой температурной стратификации* в водоемах, характеризующейся понижением температуры с глубиной. При этом на некоторой глубине образуется обычно *слой температурного скачка* мощностью $2\text{—}5$ м, в пределах которого наблюдается особенно интенсивное (часто достигающее 1°C на 1 м глубины) изменение температуры.

Максимум температуры воды достигает обычно в июле — августе, после чего начинается охлаждение водоема, в результате чего температура по глубине сначала постепенно выравнивается, а ближе к зиме приобретает обратную стратификацию.

Наблюдения за термическим режимом на озерах и водохранилищах ведутся по двум программам (стандартной и специальной) в зависимости от степени их полноты и точности.

7.3.2. Наблюдения за температурой воды в прибрежной зоне и на рейдовых вертикалях

Регулярные наблюдения за температурой воды производятся в прибрежных пунктах и в открытой части водоема на рейдовых вертикалях. Количество пунктов наблюдений и их размещение должно обеспечивать надежное освещение главных особенностей термического режима водоема, в том числе и тех из них, которые имеют искусственное происхождение, т. е. обусловлены сбросами в водоем подогретых промышленных вод. Вопрос о размещении пунктов решается на стадии рекогносцировочного обследования водоема. Положение рейдовых вертикалей уточняется окончательно на основании детальных температурных исследований

в первые два-три года после организации гидрометеорологической обсерватории или озерной станции. Наряду с наземными термическими разрезами и съемками исключительно ценные материалы для правильного решения этого вопроса могут дать тепловые съемки водоема с самолета с помощью ИК (инфракрасного) радиометра или тепловизоров.

Прибрежные пункты наблюдений по мере возможности следует располагать в районе озерной станции или поста, следя, однако, чтобы между пунктом и открытой частью водоема имелся свободный водообмен, а глубина в месте наблюдения была не менее 1 м.

Наблюдения в прибрежных пунктах осуществляется два раза в сутки (8 и 20 ч местного времени) в течение всего безледоставного периода, а при наличии полыньи и в зимний период. Температура измеряется в поверхностном слое на глубине 0,1 м от поверхности воды, а при волнении — ниже впадины волны теми же типами термометров, которые используются на речных постах (см. п. 1.4.1). Запись и первичная обработка наблюдений за температурой воды производится в книжке КГ-1МО и заключается во введении в отсчеты к термометру инструментальных поправок и вычислении среднего суточного значения из измерений в 8 и 20 ч.

Наблюдения на рейдовых (гидрологических) вертикалях осуществляется круглогодично: в безледоставный период — один раз в пятидневку (5, 10, 15, 20, 25-го числа и в последний день месяца), а при ледоставе — дважды в месяц (15-го числа и в последний день месяца). Измерения производятся на нескольких горизонтах, количество и относительное заглубление которых зависит от глубины вертикали и характера распределения температуры по глубине. Во всех случаях оно должно обеспечивать надежное определение среднего значения температуры на вертикали. Наблюдения заносятся в книжку для записи наблюдений на гидрологических вертикалях (КГ-26М). В книжке предусмотрено несколько разделов: в разделе 1 указываются сведения о приборах, в разделе 2 записываются метеорологические наблюдения (температура воздуха, скорость ветра, упругость водяного пара и др. элементы); в разделе 3 фиксируются наблюдения за температурой воды на глубинах и в разделе 4 — наблюдения за ледяным и снежным покровами.

В поверхностном слое измерения производятся ртутным термометром в оправе, а на других горизонтах — глубоководными опрокидывающимися термометрами. При наличии электротермометра температура может измеряться на всех горизонтах. На глубоководных водоемах в периоды значительной изменчивости температура воды по глубине для более обоснованного выбора горизонтов измерений в качестве разведывательного прибора может быть использован батитермограф.

Глубоководный опрокидывающийся термометр ТГ (рис. 7.2) состоит из двух скрепленных друг с другом ртутных термометров (основного и вспомогательного), заключенных в общую стек-

лянную оболочку. Основной термометр служит для измерения температуры внутри стеклянной оболочки.

Главная конструктивная особенность основного термометра заключается в том, что для сохранения информации о температуре воды на горизонте измерения в нем использован принцип отрыва столбика ртути, соответствующего этой температуре, путем опрокидывания на 180° рамы с глубоководным термометром сразу после окончания измерения. Небольшие изменения объема оторвавшегося столбика ртути, связанные с влиянием температуры окружающего воздуха после извлечения термометра из воды, устраняются редуциционной поправкой, рассчитываемой на основании показаний вспомогательного термометра.

Основные термометры выпускаются со стандартными шкалами следующих диапазонов: $-2 \dots 8^\circ\text{C}$ (с ценой деления $0,05^\circ$); $-2 \dots 18^\circ$ и $-2 \dots 32^\circ\text{C}$ (с ценой деления $0,1^\circ$). Вспомогательный термометр позволяет измерять температуру от -20 до 45°C с точностью $0,1^\circ$ (цена деления $0,5^\circ$).

Для опускания термометра на горизонт измерения он помещается в специальную раму, которая крепится к стальному канату лебедки. Если одновременно с измерениями температуры производится отбор проб воды на химический анализ, термо-

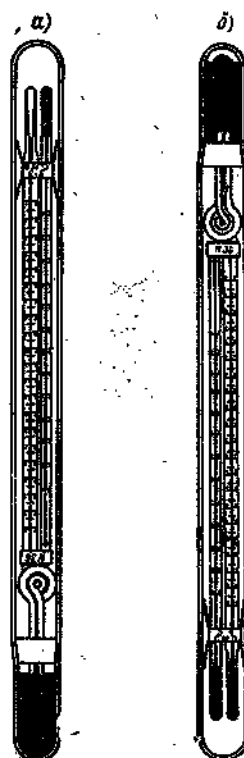


Рис. 7.2. Глубоководный опрокидывающийся термометр.

а — положение при измерении температуры, б — положение при отсчете температуры.

метр может быть укреплен на опрокидывающемся батометре. Стандартные рамы РОТ-48 и международного образца рассчитаны на размещение одновременно двух глубоководных термометров, что позволяет избежать значительных случайных погрешностей измерений. При нескольких горизонтах измерений на несущем канате может быть одновременно закреплено соответствующее им число рам с термометрами.

Рама РОТ-48 (рис. 7.3) крепится к стальному канату верхним основанием с помощью защелки, а нижним — с помощью зажимного устройства. Опрокидывание рамы происходит после размыкания верхней защелки, что достигается ударом по ее плунжеру специального (посыльного) грузика, скользящего по стальному канату. После опрокидывания рамы грузик продолжает падение и, достигнув основания рамы, заставляет сработать специальный

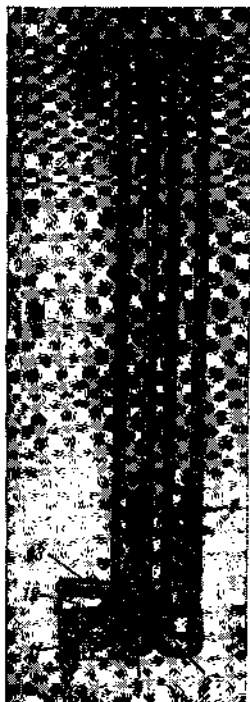


Рис. 7.3. Рама для глубоководных термометров РОТ-48.

1 — цилиндр спускового устройства, 2 — стержень спускового устройства, 3 — штифт спускового устройства, 4 — соединительная планка, 5, 6 — гильзы для термометров, 7 — отверстие, 8 — пробка, 9 — пластинка прижима стального каната, 10 — крючок для подвешивания посыльного грузика, 11 — барашек зажима стального каната, 12 — пластинка с канавкой для троса, 13 — рычаг.

рычаг, высвобождающий следующий посыльный груз. Тот в свою очередь в том же порядке приводит в действие ниже расположенную раму и т. д.

Отличительной особенностью рамы международного образца является опрокидывание термометров не путем отцепления от каната верхней части рамы, а поворотом на 180° гильз с термометрами, закрепленными на общей вертикальной оси. Поворот производится с помощью специального пружинного механизма, срабатывающего в момент удара посыльного грузика по спусковому рычагу.

Для получения истинной температуры по данным глубоководного термометра в его показания необходимо ввести инструментальную и редукционную поправки.

Значения инструментальных поправок приводятся в «Свидетельстве о поверке» термометра. Редукционная поправка $\Delta T_{\text{ред}}$ рассчитывается по формуле

$$\Delta T_{\text{ред}} = \frac{(T + \text{vol}) (T - t)}{n} \left(1 + \frac{T + \text{vol}}{n} \right),$$

где T — отсчет по основному термометру после его извлечения из воды; vol — объем отрывающегося столбика ртути при 0°C (указывается в «Свидетельстве о поверке» термометра; $1/n$ — относительный объемный коэффициент расширения ртути и стекла термометра (для глубоководных термометров, выпускаемых в СССР, он обычно равен 1/6200).

Батитермограф ГМ-9 III (рис. 7.4) предназначен для непрерывного измерения температуры воды на глубинах до 200 м (с погрешностью 0,2—0,3°C) с одновременной фиксацией глубины погружения. Конструкция прибора позволяет использовать его для измерений на ходу судна.

Прибор состоит из первичных преобразователей температуры и глубины (термо- и батиблока), заключенных в общий корпус. В основу конструкции термоблока положен принцип изменения объема воспринимающей жидкости (в данном случае толуола) при изменении температуры окружающей среды. Действие бати-

блока основано на изменении гидростатического давления с глубиной.

Конструктивно прибор оформлен таким образом, что по мере его погружения в воду на стекле, покрытом специальной смазкой, прочерчивается кривая изменения температуры с глубиной. Это достигается одновременным перемещением стрелки-пера в двух взаимно перпендикулярных направлениях: в одном — под действием батиблока, а в другом — под действием термоблока. Расшифровка батитермограмм производится с помощью специальной градуировочной сетки, которой снабжается каждый прибор.

Результаты наблюдений на рейдовой вертикали оформляются в виде графиков распределения температуры по глубине на дату измерения и термоизоплант воды за год. При одновременных наблюдениях на нескольких вертикалях, расположенных в одном створе (гидрологический разрез), дополнительно строятся графики изотерм на даты измерений в сечении разреза.

График распределения температуры воды по глубине вертикали строится в прямоугольной системе координат, по оси ординат которой откладываются глубины измерений, а по оси абсцисс — соответствующие им значения температуры воды. Среднее значение температуры на вертикали определяется делением площади эпюры температуры (с учетом горизонтального и вертикального масштабов) на глубину вертикали.

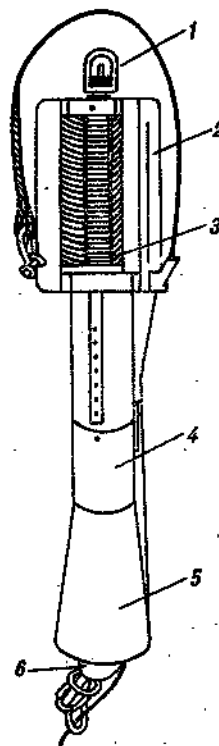


Рис. 7.4. Батитермограф ГМ-9-III.

1 — наконечник головки, 2 — ребра термоблока, 3 — капиллярная трубка, 4 — защитная муфта, 5 — утяжеляющая муфта, 6 — рым.

Термоизоплеты, характеризующие изменение распределения температуры воды по глубине рейдовой вертикали во времени, строятся в поле графика, по оси абсцисс которого откладывается время, а по оси ординат — глубины (рис. 7.5). При построении графика на него наносятся точки, абсциссы которых соответствуют датам измерения, а ординаты — горизонтам измерения. Против каждой точки выписывается зафиксированное в данную дату на данной глубине значение температуры. Изоплеты (изолинии) температуры наводят, интерполируя их значения между точками.

Вместо точек, соответствующих измеренным значениям температуры, на график сразу могут быть нанесены точки, отвечающие значениям температуры наведения изоплет. В этом случае

глубина, которой должно быть приписано то или иное из этих значений температуры, снимается с эпюр распределения температуры по глубине вертикали на соответствующую дату. Соединяя точки с одинаковыми значениями температуры, получают соответствующую ей изоплету. Даты, когда значения температуры, соответствующие тем или иным изоплетам, наблюдаются у поверхности или дна, могут быть уточнены путем снятия их с хронологических графиков, поверхностной и донной температуры.

График изотерм по створу гидрологического разреза строится следующим образом. На профиль разреза наносятся рейдовые вер-

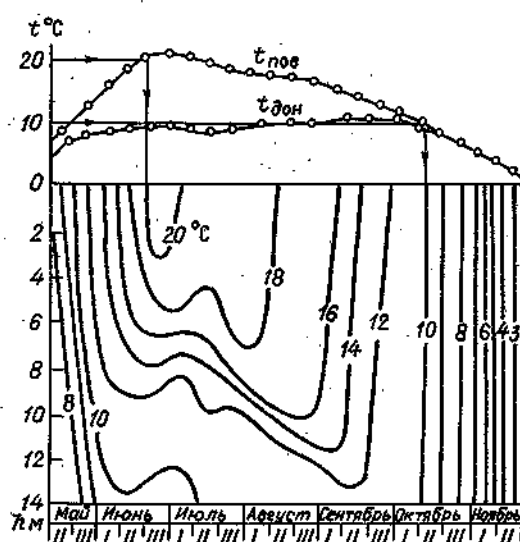


Рис. 7.5. Термозоплеты и хронологический график температуры воды в поверхностном и придонном слоях.

тикали и на каждой из них у точек, соответствующих горизонтам измерения, выписываются значения температуры. Измеренные значения поверхностной температуры предварительно приводятся к одному моменту времени (с учетом характера изменения поверхностной температуры за время проведения работ по данным учащенных наблюдений у берега). Интерполируя значения температуры между соседними точками на вертикали и соседними вертикалями, проводят линии равных значений (*изотермы*). Чтобы точнее определить места их выхода на поверхность и пересечения с линией дна, целесообразно построить хронологические графики распределения температуры по створу у поверхности и у дна (точки выхода на поверхность и пересечения с линией дна). Изотерме t_i соответствует абсцисса вспомогательного графика поверхностных (донных) значений температуры, которой отвечает температура t_i .

7.3.3. Термические профили и съемки

Наблюдения на рейдовых вертикалях сопровождаются измерениями температуры поверхностного слоя воды на термических профилях, которые прокладываются обычно по створу гидрологического разреза, а на озерах с одиночными рейдовыми вертикалями — по кратчайшему расстоянию между вертикалью и берегом.

Термические съемки, т. е. наблюдения на большом количестве термических профилей, охватывающих весь водоем или его значительную зону, производятся обычно 4 раза в безледоставный период. Запись наблюдений за температурой производится в книжке КГ-29 М, в которой фиксируются сведения о приборах, местоположений профилей, периоде работы.

Данные наблюдений за температурой воды на береговых и островных пунктах, рейдовых вертикалях, термических профилях и гидрологических разрезах служат исходным материалом при вычислении средних значений температуры воды поверхностного слоя для акватории водоема в целом или отдельных ее участков (районов).

7.4. Наблюдения за ледовой обстановкой

Пункты наблюдений за ледовой обстановкой приурочиваются обычно к районам расположения озерных станций и постов. Дополнительно ледемерные пункты организуются в местах с характерной ледовой обстановкой, а также там, где это настоятельно диктуется интересами народнохозяйственных организаций (нижние бьефы гидроузлов, районы крупных гидротехнических сооружений, ледовые переправы и т. п.).

Изучение ледового режима озер и водохранилищ производится на основе стандартных и специальных наблюдений.

7.4.1. Стандартные наблюдения

В состав стандартных наблюдений входят: а) визуальные наблюдения и картирование ледовой обстановки; б) наблюдения за образованием внутриводного льда; в) измерение толщины льда и снежного покрова на нем.

Визуальные наблюдения производятся ежедневно в утренний срок и включают оценку ледовой обстановки в зоне видимости, а при необходимости и ее картирование. Терминология и условные обозначения ледяных образований и ледовых явлений сохраняются те же, что и на реках.

Для лучшего обзора береговой пункт наблюдений должен размещаться на высоком берегу. Если это условие выполнить невозможно, следует соорудить специальную вышку. Кроме того, пункт оборудуется ориентирным столбом с указателем направлений основных румбов, угло-дальномерным прибором (теодолит, волномер-

перспектомер или др.) и столиком для удобства зарисовок ледовой обстановки.

Картирование ледовой обстановки выполняется в периоды замерзания и вскрытия один раз в 3—5 дней, а при быстрой смене обстановки ежедневно. Для зарисовки обстановки используются заранее заготовленные карты-бланки части водоема, видимой с пункта наблюдения. Ориентирование бланка производится по бусоли или компасу, а расстояние до границ отдельных ледовых образований при наличии на акватории ориентиров определяется «на глаз», а при их отсутствии — с помощью углодальномерных инструментов.

Наблюдения за образованием внутриводного льда начинаются с момента снижения температуры воды до $+0,5^{\circ}\text{C}$. Наиболее просто наличие этого процесса устанавливается по нарастанию льда на металлических предметах, погруженных на несколько часов в воду. Обычно для этого используют стальной канат с привязанными к нему пучками проволоки.

Более совершенное устройство для определения начала интенсивного образования внутриводного льда — шугосигнализатор АСШ-3. Принцип действия этого прибора основан на изменении сопротивления между электродами погруженного в воду датчика в случае образования на них кристаллов льда.

Измерение толщины льда производится в период ледостава на двух участках. Один из них выбирается в прибрежной зоне, где глубина составляет 1,5—2 м, а второй — в открытой части водоема, но не далее 700 м от берега.

В начале ледостава и в период таяния льда измерения производятся один раз в пятидневку, а после того как толщина льда превысит 30 см — один раз в декаду. Наблюдения за толщиной льда выполняются в лунках, пробиваемых каждый раз заново в новом месте, и сопровождаются измерениями высоты снега у лунки и описанием характера ледяного и снежного покрова. Кроме того, один раз в месяц определяется плотность снега на льду и строение льда.

Данные визуальных наблюдений за ледовой обстановкой записываются в книжке КГ-1МО в разделе 5 — ледовые явления и состояние водного объекта. Запись результатов наблюдений за ледяным и снежным покровом производится в той же книжке, причем данные измерений в прибрежной лунке и лунке, удаленной от берега, заносятся на разных страницах книжки, в разделе 6.1 и 6.2.

7.4.2. Специальные наблюдения

Программами специальных работ и наблюдений могут быть предусмотрены: а) маршрутные обследования значительных участков или всей акватории водоема с картированием ледовой обстановки, б) авианаблюдения за ледовой обстановкой, в) ледомерные

съемки на значительной площади водоема или по заданному маршруту (профильные наблюдения), г) наблюдения за переносом (дрейфом) льда и шуги с определением их расходов, д) исследования физико-механических свойств льда и др.

Маршрутные обследования производятся преимущественно на больших и средних водоемах в периоды их вскрытия и замерзания. В период ледостава к ним прибегают только в случаях сложной ледовой обстановки. Результаты обследования оформляются в виде картограммы ледовой обстановки.

Профильные ледовые наблюдения выполняются с целью систематического изучения состояния ледовых переправ. Профиль прокладывается с помощью теодолита параллельно ледовой трассе и закрепляется вехами. Сроки наблюдения устанавливаются УГКС в зависимости от состояния ледовой переправы. Наблюдения заключаются в периодическом (1—2 раза в месяц) измерении толщины льда, а также высоты и плотности снега. На отдельных участках со слабым ледяным покровом (особенно при оттепелях) частота наблюдений может быть увеличена.

Количество точек измерений толщины ледяного покрова зависит от протяженности профиля (трассы). Ориентировочно расстояние между точками измерения должно составлять при длине профиля до 3 км 50 м, до 10 км — 100 м, свыше 10 км — 200 м. Плотность снега определяется соответственно через 100, 500, 1000 м.

Запись результатов профильных ледовых наблюдений производится в книжке КГ-28М.

Ледомерные съемки производятся для характеристики ледяного покрова на значительной части водоема, а также для оценки репрезентативности прибрежных ледомерных пунктов. Порядок выполнения работ и оформления материалов аналогичен тому, которого придерживаются при ледомерных съемках на реках (см. п. 1.4).

Авианаблюдения за ледовыми явлениями (авиаразведки) проводятся на крупнейших озерах и водохранилищах, а также на больших и средних водоемах, имеющих важное народнохозяйственное значение, и приурочиваются обычно к максимально сложной ледовой обстановке в периоды замерзания и вскрытия водоема. Картирование ледовой обстановки с выборочной аэрофотосъемкой производится, как правило, по сетке квадратов или по косым галсам. На крупных водоемах удаление от берега определяется по времени полета и скорости самолета.

В последние годы для оценки ледового состояния озер и водохранилищ все шире используется космическая информация. В частности телевизионные снимки с искусственных спутников Земли позволяют:

а) устанавливать ориентировочные сроки исчезновения ледового покрова на малых и средних водоемах;

б) давать генерализованную оценку ледовой обстановки на озерах и водохранилищах средних и больших размеров (наличие или отсутствие ледяного покрова, частичный ледостав);

в) картировать ледовую обстановку на крупнейших водоемах с выделением участков чистой воды и малозаснеженного ледяного покрова, сплоченных и разряженных ледяных полей.

Используя последовательные телевизионные снимки, можно, кроме того, оценивать скорость дрейфа крупных ледяных полей.

7.5. Изучение ветрового волнения водоемов

7.5.1. Характеристики ветрового волнения

Волнение — один из важнейших элементов гидрологического режима озер и водохранилищ — оказывает существенное влияние на их хозяйственное освоение. С ним связаны, например, такие негативные процессы и явления, как разрушение берегов и объектов, расположенных в открытом водоеме и береговой полосе, занесением наносами подводных частей гидротехнических сооружений и т.п. На крупных водоемах особенности волнового режима определяют организацию судоходства (выбор наиболее подходящих типов судов, расположение судоходных трасс и т. д.). Волнение

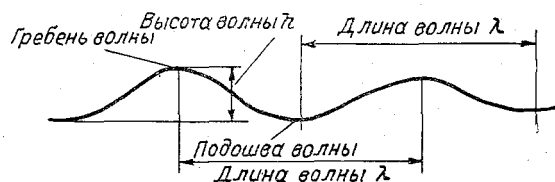


Рис. 7.6. Элементы ветровой волны.

усиливает перемешивание водных масс, что способствует выравниванию температурных контрастов, ускорению разбавления промстоков и обогащению глубинных слоев водоема кислородом.

Волновой режим внутренних водоемов определяется главным образом ветровым волнением, возникающим в результате воздействия ветра на водную поверхность. Степень развития волнения зависит не только от скорости ветра, но и от его направления и продолжительности действия, длины разгона волн, глубины и конфигурации водоема.

Для характеристики степени (силы) ветрового волнения используют качественные и количественные оценки. Качественная характеристика в баллах или условных единицах, принятых в разработанных для этой цели шкалах, дается на основании визуальных наблюдений за общим состоянием поверхности водоема. Более объективная, количественная оценка требует постановки специальных наблюдений за размерами основных элементов волн: высоты, длины, периода, скорости распространения, крутизны (рис. 7.6). Принимая во внимание, что даже при установившемся волнении размеры волн изменяются в широких пределах, их основные эле-

менты характеризуются максимальными, средними статистическими значениями или значениями определенной обеспеченности.

Высота волны h — это разность отметок соседних гребня (вершины) и ложбины (подошвы) волны. В качестве ее характеристики часто используют разность волновых горизонтов 1 %-ной обеспеченности, хотя фактически она может быть несколько больше, так как самый высокий гребень и наиболее глубокая ложбина не всегда располагаются рядом, т. е. могут принадлежать разным волнам.

Длина волны λ — кратчайшее расстояние между гребнями или ложбинами двух соседних волн.

Период волны τ , т. е. время прохождения волны через фиксированный створ, характеризуется обычно его средним значением, которое определяется по времени T прохождения следующих друг за другом нескольких N гребней (или ложбин) волн через точку наблюдения

$$\tau = T/N. \quad (7.1)$$

Скорость распространения волны c — расстояние, которое волна проходит за 1 с, определяется по времени прохождения гребнем фиксированного расстояния в направлении, совпадающем с направлением распространения волнения. Скорость распространения волн связана с длиной и периодом зависимостью

$$c = \lambda/\tau, \quad (7.2)$$

что дает возможность ограничиваться при наблюдениях определением только двух (любых) из этих элементов.

Крутизна волны m — угол наклона к горизонту линии, соединяющей вершину волны с ее подошвой, непосредственно при визуальных наблюдениях определена быть не может. Обычно она характеризуется связанным с нею параметром, представляющим отношение высоты волны к ее длине.

$$m = h/\lambda. \quad (7.3)$$

Важной характеристикой волнения является также *направление его распространения*, которое характеризуется румбом, от которого идет видимое перемещение волн.

Изучение режима волнения производится в прибрежной зоне и в открытой части водоема путем проведения стандартных и специальных наблюдений.

7.5.2. Размещение волномерных пунктов и их оборудование

Систематические наблюдения за волнением по стандартным программам в прибрежной зоне производятся на береговых волномерных пунктах, а в открытой части водоема — с плавучих станций и по отдельным максимально-минимальным вехам. Эпизоди-

ческие наблюдения могут производиться с судов, выполняющих другие работы в водоеме.

Береговые волномерные пункты располагаются на участках, где при господствующих ветрах волны достигают наибольших для данного водоема размеров. На больших и крупнейших озерах и водохранилищах озерного типа, как правило, оборудуется три-четыре пункта, на водохранилищах речного типа — один пункт на 40—80 км длины. На малых и средних водоемах обычно ограничиваются одним волномерным пунктом, приурочивая его к району расположения озерного поста. Участок побережья в месте расположения волномерного пункта должен быть открыт со стороны озера (водохранилища) для господствующих ветров, а на подходах к нему не должно быть препятствий в виде островов, мелей и т. п.

Плавучие станции и автономно действующие максимально-минимальные вехи размещаются в местах, представляющих наибольший интерес для народнохозяйственных организаций (на сложных участках судовых трасс, на участках интенсивного рыболовства и т. п.).

Береговой волномерный пункт оснащается волномерной и максимально-минимальными вехами. Вехи устанавливаются не далее 150—200 м от берега, а друг от друга на расстоянии не более 20—30 м. Если из-за очень больших глубин установка вех невыполнима, разрешается использовать для наблюдений за элементами волн волномер-перспектометр ГМ-12. Для наблюдения за скоростью и направлением ветра на волномерном пункте обязательно устанавливается самописец или флюгер.

Вблизи плавучей станции обычно размещаются две-три волномерные и одна максимально-минимальная веха. Относительно судна, на котором располагается станция, волномерные вехи устанавливаются так, чтобы при любом направлении ветра хотя бы одна из них находилась в зоне, где волнение не искажено влиянием судна.

Дополнительно отдельные волномерные пункты, привлекаемые к наблюдениям по специальным программам, могут быть оборудованы самописцем волнения.

Волномерная веха представляет собой деревянный шест, размеченный на дециметровые деления. При глубинах до 5—7 м веха может быть укреплена на свае, забитой в грунт, или установлена на дне с помощью прикрепленного к ее основанию балласта (рис. 7.7 а, б). При глубинах более 7 м волномерная веха устанавливается наплаву.

Плавучая веха (рис. 7.7 в) представляет собой деревянный шест, размеченный на дециметровые деления, укрепленный на верхнем основании цилиндрического поплавка достаточной плавучести. Для увеличения устойчивости вехи такой же шест укрепляется и у нижнего его основания. В точке наблюдения веха удерживается грузом-якорем, с которым соединена стальным канатом. Канат закрепляется на выступающей из воды части верхнего шеста и

уходит в воду к грузу-якорю почти вертикально через сквозную трубку в поплавке и направляющий хомут на основании нижнего шеста. Такой способ крепления позволяет периодически устранять слабинку каната, возникающую в связи с падением уровня, без снятия вехи с якоря.

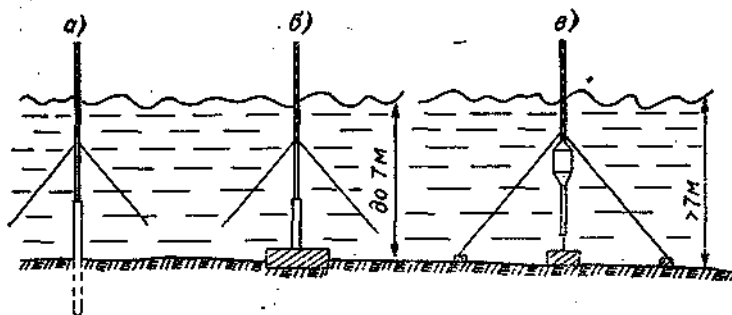


Рис. 7.7. Способы установки волномерных вех.

а — на свае, забитой в дно; б — на свае с пригруженным основанием; в — наплаву с помощью крепления стальным канатом к якорю-грузу (плавающая вежа).

Для устойчивости волномерные вехи дополнительно расчаливаются тремя-четырьмя растяжками.

Максимально-минимальные вехи предназначены для автоматической регистрации максимальной разности волновых горизонтов за время наблюдений по ним. Простейшее устройство, которое используется для этой цели, представляет собой отрезок металлической штанги с кронштейнами на концах, между которыми натянуты две струны с надетым

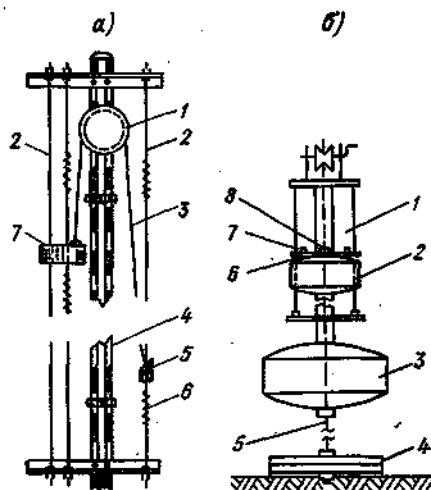


Рис. 7.8. Максимально-минимальные вехи.

а — струнно-поплавкового типа: 1 — блок, 2 — направляющие струны, 3 — доска, соединяющая поплавок и грузик-противовес, 4 — вежа, 5 — грузик-противовес, 6 — индексы-указатели, 7 — поплавок.
б — ГР-24: 1 — штанга, 2 — поплавок, 3 — затопляемый буй, 4 — груз-якорь, 5 — стальной канат, 6 — лимб, 7 — индексы-указатели, 8 — движок.

на них поплавком и двумя подвижными индексами-указателями (рис. 7.8 а). Устройство крепится к волномерной вехе с помощью хомутов. В исходном положении индексы-указатели непосредственно прилегают к поплавку. При волнении поплавок следуя за колебаниями водной поверхности перемещается по струне, передвигая соответствующий индекс-указатель вверх или вниз каждый

раз, когда гребень или ложбина оказываются соответственно выше или ниже, чем у всех ранее прошедших волн. Необходимость производить отсчет, соответствующий ложбине волны, под водой создает определенные неудобства при наблюдениях по этой вехе. Для устранения этого недостатка А. С. Судольский (ГГИ) предложил дополнительно снабжать веху еще одной струной с индексами и грузиком-противовесом, соединенным с поплавком капроновой нитью, переброшенной через блок, укрепленный в верхней части вехи. Глубина ложбины волны будет равна в этом случае разности между отсчетами по вехе, соответствующими положению верхнего индекса и грузика-противовеса.

Максимально-минимальная веха ГР-24 рассчитана на определение разности волновых горизонтов до 4,5 м (рис. 7.8 б). Конструктивно веха оформлена в виде штанги с перемещающимся по ней поплавком, которая закрепляется на притопленном бугре. Установка вехи в водоеме производится наплаву с помощью якоря-груза и стального каната. Механизм измерения высоты волновых горизонтов основан на преобразовании вертикальных перемещений поплавка во вращательные движения расположенного на нем движка. Для этого на штанге по винтовой линии закреплен направляющий прут, который входит в паз движка. Шаг винтовой линии рассчитан таким образом, чтобы при вертикальном перемещении поплавка на 4,5 м движок поворачивался на 300°. Для определения амплитуды волновых горизонтов на поплавке закреплен лимб с двумя индексами-указателями, которые раздвигаются при вращении движка. Цена деления лимба равна 10 см.

После каждого наблюдения по максимально-минимальным вехам индексы-указатели приводятся в исходное положение, т. е. сводятся к поплавку на устройстве струнно-поплавкового типа и к движку на вехе ГР-24.

Отметка нуля обычных и максимально-минимальных волномерных вех определяется сразу после их установки и в последующем периодически контролируется. Эта операция обычно приурочивается к штилю и заключается в одномерном наблюдении за горизонтом воды по вехе и на уровнемерном посту. Отметка нуля вехи вычисляется как разность между отметкой уровня и отсчетом по вехе.

Волномер-перспектометр ГМ-12 предназначается для определения высоты, длины, периода, скорости и направления распространения волнения. Он может быть использован и как обычный оптический дальномер при выполнении других видов наблюдений.

Прибор представляет собой бинокль, в фокальной плоскости правого монокуляра которого установлена стеклянная сетка со шкалами дальности, высоты и вспомогательными (наклонными) линиями, служащими для измерения расстояний по направлению, перпендикулярному лучу зрения (рис. 7.9). Разметка шкал производится в расчете на определенную высоту установки прибора над водной поверхностью (обычно 10 или 40 м). Если высота установки прибора H_y не совпадает с расчетной H_p , переход к фак-

тической цене деления шкал осуществляется с помощью коэффициента-сомножителя k , равного отношению H_y/H_p . Прибор может быть установлен на треноге от любого геодезического инструмента, однако на стационарных волномерных пунктах лучше оборудовать для этой цели постоянное устойчивое основание (деревянный столб, каменная кладка). Установив прибор на основание, выводят его вертикальную ось с помощью подъемных винтов строго в вертикальное положение и, ориентируя лимб по направлению север—юг, закрепляют его в этом положении. Перемещением головки прибора в горизонтальной и вертикальной плоскости добиваются такого положения, чтобы верхняя горизонтальная линия сетки совпала с линией видимого горизонта и одновременно была

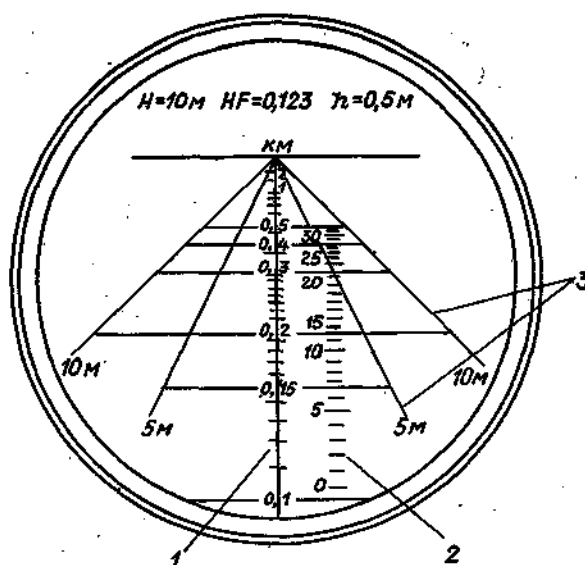


Рис. 7.9. Измерительная сетка волномера-перспектометра ГМ-42.

1 — шкала дальности; 2 — шкала высоты волн; 3 — линии шкалы для измерения расстояний, перпендикулярных лучу зрения.

параллельна гребням волн. Длина волны определяется по шкале дальности (центральная линия) по разности расстояний до двух следующих друг за другом гребней волн. При этом необходимо иметь в виду, что цена делений на разных участках шкалы дальности неодинакова и между каждой парой соседних оцифрованных меток должна вычисляться как отношение разности между ними к числу делений на этом участке шкалы. Так, в диапазоне от 0,1 до 0,15 км цена деления (с учетом фактической высоты установки прибора) составляет $k \times 0,01$ км (пять делений), а на участке от 0,3 до 0,4 км — $k \times 0,05$ (2 деления) и т. д.

С помощью шкалы дальности определяется и скорость распространения волн. Для этого фиксируют время между моментами

пересечения гребнем одной и той же волны двух оцифрованных меток шкалы и делят полученное расстояние на время.

Средний период волн вычисляется по формуле (7.1) на основании измерения времени T , за которое через фиксированную точку сетки пройдет определенное N число волн.

Шкала высот волн располагается справа от шкалы длин. Высота волны измеряется по числу делений, уместающихся между гребнем и подошвой волны.

Азимут направления распространения волн определяется в градусах по лимбу.

Наклонные линии на сетке волномера-перспектометра служат для измерения расстояний на поверхности водоема, перпендикулярных лучу зрения. С их помощью, в частности, могут определяться скорости перемещения поплавков, льдин и т. п.

7.5.3. Состав и порядок стандартных наблюдений

Стандартные наблюдения на береговых волномерных пунктах производятся в течение всего безледоставного периода и включают определение следующих характеристик: а) среднего периода волн, б) разности волновых горизонтов 1 %-ной обеспеченности в момент наблюдения, в) наибольшей разности волновых горизонтов за время шторма или другой длительный период, г) направления распространения волнения, д) скорости и направления ветра, е) уровня воды. При ветре до 10 м/с наблюдения производятся дважды в сутки в общепринятые сроки гидрологических наблюдений. Сдвигка сроков допускается только в случаях, когда они совпадают с темным временем суток. При ветре более 10 м/с наблюдения производятся через каждые 3 ч в стандартные сроки метеорологических наблюдений.

Средний период волн определяется по береговому прибою или по частоте прохождения гребней волн через волномерную вежу. И в том и в другом случае наблюдения включает двукратное определение времени прохождения 50 следующих друг за другом волн. Если полученные результаты различаются менее чем на 5%, средний период определяется в соответствии с формулой 7.1) как $\tau_{\text{ср}} = (T_1 + T_2) : 100$ (T_1 и T_2 — продолжительность первой и второй серий наблюдения). Если различие в результатах превышает 5%, измерение должно быть повторено.

Разность волновых горизонтов 1 %-ной обеспеченности определяется по волномерной веже наблюдениями за отметками гребней и подошв 100 (или близкого к этому числа) волн. Наблюдения выполняются в следующем порядке. В течение промежутка времени, равного среднему времени прохождения через вежу 50 волн, следят за отметками гребней и записывают наивысший зафиксированный уровень. Затем в течение такого же периода наблюдают за отметками подошв волн и записывают минимальный из отсчетов. Такой цикл наблюдений повторяется дважды. Из двух пар полученных отсчетов, выбирают наименьший

и наибольший, разность между которыми и соответствует разности волновых горизонтов 1 %-ной обеспеченности.

Наибольшая разность волновых горизонтов за время шторма определяется по максимально-минимальной вехе. Наблюдения производятся сразу после ослабления волнения, когда становится безопасным подход к вехе, и сводятся к снятию отсчетов по вехе или лимбу (для вехи ГР-24), соответствующих положению индексов-указателей. В промежутках между штормами наблюдения по максимально-минимальной вехе производятся 1 раз в три дня. Фактическое время снятия отсчетов фиксируется в книжке для записи наблюдений.

Направление распространения волнения определяется при помощи буссоли, волномера-перспектометра или по береговым ориентирам, положение которых относительно частей света заранее определено и нанесено на схему.

Скорость и направление ветра измеряются до начала наблюдений за элементами волн, а уровень воды — сразу после их окончания.

Стандартные наблюдения на плавучих станциях производятся в те же сроки в том же объеме, что и на береговых пунктах (за исключением уровня воды, который здесь не измеряется). Аналогичен и порядок определения основных характеристик волнения.

Наблюдения по автономным максимально-минимальным вехам производятся после всех штормов, а в промежутках между ними через 3—5 дней.

Стандартные программы эпизодических наблюдений с судов включают качественную оценку степени волнения на основе визуальных наблюдений за состоянием водной поверхности.

Результаты стандартных наблюдений заносятся в «Книжку наблюдений за высотой и периодом волн» ($KГ=27\text{ М}$) и обрабатываются в основном непосредственно во время наблюдения. Первичная обработка включает вычисление среднего периода волн, разности волновых горизонтов 1 %-ной обеспеченности, наибольшей разности волновых горизонтов по максимально-минимальным вехам, отметок волновых горизонтов над нулем поста, скорости ветра, если он определяется анемометром, и отметки уровня воды.

7.5.4. Специальные наблюдения за волнением

Специальные наблюдения проводятся с целью более детального изучения режима волнения по специальным программам, разрабатываемым гидрометеорологическими обсерваториями. Особое место при этом занимают инструментальные наблюдения за элементами волн с помощью самописцев волнения (волнографов).

Из довольно большого числа существующих типов волнографов, на озерах и водохранилищах наибольшее распространение получили электроконтактная веха и судовой волнограф ГМ-16.

Электроконтактная веха (рис. 7.10 а) предназначена для непрерывной (в течение определенного промежутка времени) реги-

страции высоты и периода волн. Она представляет собой латунный стержень, изолированный от воды резиновой трубкой. На стержне через каждые 5—10 см расположены контакты. При прохождении волны через вежу вода сначала последовательно замыкает, а затем также последовательно размыкает столько контактов, сколько их располагается в пределах высоты волны. При замыкании и размыкании каждого очередного контакта сила тока в токопроводящей цепи, изменяется скачкообразно что и регистрируется на ленте

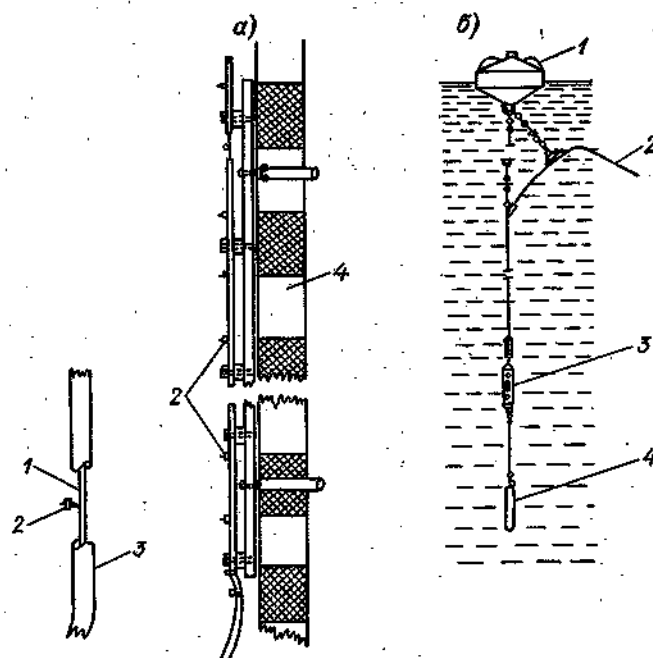


Рис. 7.10. Самописцы волнения.

а — электроконтактная вежа: 1 — латунный стержень, 2 — контакты, 3 — резиновая изоляция, 4 — волномерная вежа; *б* — заборная часть судового волномера ГМ-16: 1 — буй, 2 — кабель к регистрирующей аппаратуре, 3 — преобразователь гидростатического давления, 4 — груз.

записывающего устройства (осциллографа) в виде очередной ступеньки, по числу которых при обработке ленты определяется высота волны. Засечки времени на ленте осуществляются подключением к сети специальным отметчиком времени.

Установка электроконтактной вежи в водоеме осуществляется путем крепления ее к волномерной веже. Удаление электроконтактной вежи от берега ограничивается 1—2 км из-за необходимости создания кабельной линии, соединяющей вежу с пунктом регистрации и источником питания.

Регистрация высоты и период волн с помощью электроконтактной вежи производится включением самописца на период времени, необходимый для записи заданного числа волн (обычно 100 волн).

Судовой волнограф ГМ-16 предназначен для регистрации высот и периодов волн с медленно дрейфующего или стоящего на якоре судна. Приемной частью волнографа является первичный преобразователь гидростатического давления, который подвешивается на стальном канате к бую и соединяется с регистрирующим устройством кабелем (рис. 7.10 б).

Принцип действия прибора основан на том факте, что на глубинах более половины волны гидростатическое давление не зависит от колебаний водной поверхности, а определяется только средним ее положением. Если первичный преобразователь поместить на глубину, заведомо большую указанной, то, следуя за колебаниями буя, он будет регистрировать изменения гидростатического давления, пропорциональные высоте волн.

Изменения гидростатического давления воспринимаются в датчике специальной мембраной, а затем преобразуются соединенными с нею тензометрами в соответствующие изменения напряжения электрического тока, которые регистрируются электронным автоматическим потенциометром на ленту.

Так как преобразователь при работе погружается на большие глубины, необходимо исключить большую часть давления столба воды над ним, чтобы измерять только изменения гидростатического давления, связанные с вертикальными колебаниями буя. Это достигается подключением к камере преобразователя компенсатора, создающего избыточное давление в камере.

Высота волны на ленте волнографа определяется по разности ординат вершины и подошвы с учетом масштаба записи, а период волны вычисляется как частное от деления расстояния между двумя следующими друг за другом гребнями на скорость протяжки ленты регистратора.

Последующая обработка заключается в определении элементов волн разной обеспеченности. Для этого значения каждого элемента ранжируются, т. е. располагаются в убывающем порядке, и для каждого члена ряда вычисляется его обеспеченность P в % по формуле

$$p = [(n - 0,3)/(N + 0,4)] 100 \%,$$

где n — порядковый номер члена ряда; N — общее число членов (волн) в данной серии наблюдений. На основании этих данных строят кривую обеспеченности, откладывая по оси ординат значения элемента волны, а по оси абсцисс — его обеспеченность. С кривой снимаются значения элементов волн, имеющих обеспеченность 1, 5, 10, 25, 50, 60, 70, 80 и 90 %.

7.5.5. Аэрофотосъемка волнения

Важные сведения об особенностях режима волнения одновременно на значительных площадях акватории водоема могут быть получены с помощью аэрофотосъемки. В частности, только с привлечением аэрофотосъемочных материалов наиболее надежно

решаются такие задачи, как: а) выделение основных и второстепенных систем волн, б) оценка протяженности волн по фронту, в) определение областей разгона, забурунивания и разрушения волн.

При этом полнота получаемой информации существенно зависит от вида аэрофотосъемки.

По одиночным плановым аэроснимкам могут быть определены длины волн и их протяженность по гребню, общий характер взволнованной поверхности и направление распространения волн. При маршрутной аэрофотосъемке измерениями в зонах перекрытия аэроснимков дополнительно устанавливается скорость распространения, а следовательно, и их период. Для увязки аэроснимков в маршруте в открытой части водоема в этом случае могут быть использованы заякоренные или даже находящиеся на плаву буи, поплавки и другие не обладающие заметной подвижностью предметы, так как скорость их перемещения, как правило, по крайней мере на порядок меньше, чем скорость распространения волн.

Еще более полная информация может быть получена с помощью стереофотосъемки взволнованной поверхности, выполняемой с двух самолетов синхронно работающими аэрофотоаппаратами. По синхронно снятым парам перекрывающихся аэроснимков (стереопарам) удастся с помощью специальных приборов (стереопланиграфов, стереокомпараторов) воссоздавать в заданном масштабе модель взволнованной поверхности и определять в дополнение ко всем перечисленным выше характеристикам и высоты волн.

При выполнении всех видов аэрофотосъемки съемочные маршруты должны прокладываться таким образом, чтобы были выявлены все наиболее характерные особенности волнения, а маршруты надежно привязаны к береговым ориентирам.

7.6. Наблюдения за течениями

7.6.1. Виды течений и организации наблюдений

Наблюдения за течениями проводят для выявления закономерностей перемещения водных масс в озерах и водохранилищах при различных гидрометеорологических условиях. Эти данные необходимы: а) для рационального размещения водозаборов и водовыпусков; б) при решении задач, связанных с регулированием уровня загрязнения водоемов; в) при создании и совершенствовании методов расчета и прогноза перемещения водных масс.

Возникновение течений в озерах и водохранилищах может быть связано с различными причинами, среди которых чаще всего главная роль принадлежит притоку воды в водоем или оттоку из него и ветру. Течения, обусловленные первым из этих факторов, называются стоковыми (сточными), а вторым — ветровыми (дрейфовыми).

Стоковые течения наиболее выражены на водохранилищах речного типа: в паводочный период их скорости здесь иногда достигают 1,0—1,5 м/с. На озерах скорости стоковых течений обычно наиболее значительны в зонах, примыкающих к устьям притоков и истокам вытекающих из озера рек.

Ветровые течения, возникающие под действием ветра сначала в поверхностном слое, постепенно проникают в глубь водоема, перемещая массы воды к наветренному берегу. В связи с этим создается перекося уровня воды с уклоном от наветренного берега в сторону водоема. Это в свою очередь приводит к возникновению компенсационных течений, которые в основном приурочены к донным слоям, но в отдельные моменты на небольших участках прибрежной зоны могут захватывать и всю толщу воды, вынося за короткие промежутки времени в открытую часть водоема большие массы воды. Скорости этих, так называемых *разрывных компенсационных течений* могут достигать 2—3 м/с.

Кроме того, в прибрежной зоне наветренного берега развиваются вдольбереговые течения, особенно заметные при косом подходе волн к берегу.

Несмотря на то что в отдельных случаях в озерах и водохранилищах наблюдаются значительные скорости течений, в общем для них свойственны небольшие скорости, как правило, на порядок меньше скоростей потоков. Другой характерной чертой течений в водоемах является их неустойчивость во времени как по величине, так и по направлению.

С этим обстоятельством связаны некоторые особые требования к методике наблюдений за течениями на озерах и водохранилищах. Наиболее важные из них — повышенная чувствительность вертушек (или других приборов для измерения скорости) в области малых скоростей, а также значительное увеличение продолжительности измерения скорости и направления течения в точке с целью получения их осредненных значений с необходимой точностью.

Большое разнообразие режима течений водоемов требует индивидуального подхода к их изучению. Поэтому наблюдения за течениями проводятся обычно по специальным программам, а стандартные наблюдения выполняются в небольших объемах на рейдовых вертикалях в сроки наблюдений за другими гидрометеорологическими элементами. Скорость и направление течения измеряются в этом случае на постоянных (стандартных) горизонтах, число и заглубление которых назначаются в зависимости от глубины вертикали и характера распределения скоростей по глубине.

Специальные программы включают изучение всех наиболее важных аспектов режима течений на водоеме посредством систематических и эпизодических наблюдений, приуроченных к характерным гидрологическим фазам или метеорологическим ситуациям.

Стационарные пункты наблюдений размещаются, как правило, в местах, где сведения о течениях представляют непосредственный интерес для народнохозяйственных организаций.

В прибрежной зоне создание пунктов связано чаще всего с изучением вдольбереговых перемещений наносов или процессов разбавления и распространения сбрасываемых в водоем промышленных вод. В этих случаях пункт оборудуется несколькими створами, ориентированными перпендикулярно берегу, а при необходимости — и створом, параллельным берегу. На каждом створе измерения изучаемых характеристик (мутности воды, влекомых наносов, химического состава и т. п.) выполняются на нескольких вертикалях и сопровождаются измерениями скоростей течения.

В открытой части водоема систематические наблюдения за течениями производятся на постоянных вертикалях (в их число обязательно включается несколько рейдовых вертикалей, где наблюдения производятся по стандартной программе). Некоторые вертикали могут оборудоваться работающими автономно самописцами течения (буквопечатающими вертушками). Вертикали размещаются таким образом, чтобы наблюдения на них дали возможность составить представление об общей картине интенсивности водообмена отдельными частями водоема.

Эпизодические наблюдения могут включать измерения скоростей течения или расходов воды по створам, пересекающим весь водоем или часть его, съемки течений с судов или самолетов и т. п.

Для измерения течений в водоемах используют два основных метода:

- вертушечный, когда направление и скорость течения определяются в фиксированных точках с помощью приборов;

- поплавочный, когда направление и скорость определяются по траектории предметов, перемещающихся с течением. На озерах и водохранилищах применяются три типа вертушек: морская вертушка ВММ, измеритель течений ГР-42 и буквопечатающая вертушка БПВ (самописец течений). Речные вертушки могут быть использованы в зонах выклинивания подпора водохранилищ при достаточных скоростях течения.

Что касается поплавочных измерений, то при работе в прибрежной зоне для засечек последовательных положений свободно перемещающихся поплавков обычно используются геодезические методы (засечка с берега двумя инструментами, засечка секстантом с судна, сопровождающего поплавков и т. п.). В последнее время для измерений на обширных частях акваторий водоемов поплавочный способ все чаще применяется в сочетании с аэрофотосъемкой (авиаизмерения течений).

Существуют также косвенные методы регистрации течений, при которых перемещение водных масс определяется по изменению их физико-химических характеристик: температуры, концентрации растворенных веществ, мутности, прозрачности и электрической проводимости и т. п. Для изучения стоковых течений, его мощности и области распространения широко используется измерение электрической проводимости речных и озерных вод, которая для них, как правило, существенно различна.

7.6.2. Приборы для измерения скорости и направления течения

Морская вертушка (модернизированная) ВММ (рис. 7.11) предназначена для определения скорости и направления течения на глубинах до 200 м. Основными частями вертушки являются: корпус, лопастный винт, счетчик числа оборотов, компасная коробка, переключающий механизм и хвостовое оперение (руль). В комплект вертушки входит два лопастных винта с начальной скоростью 3,5—4,5 и 2 см/с.

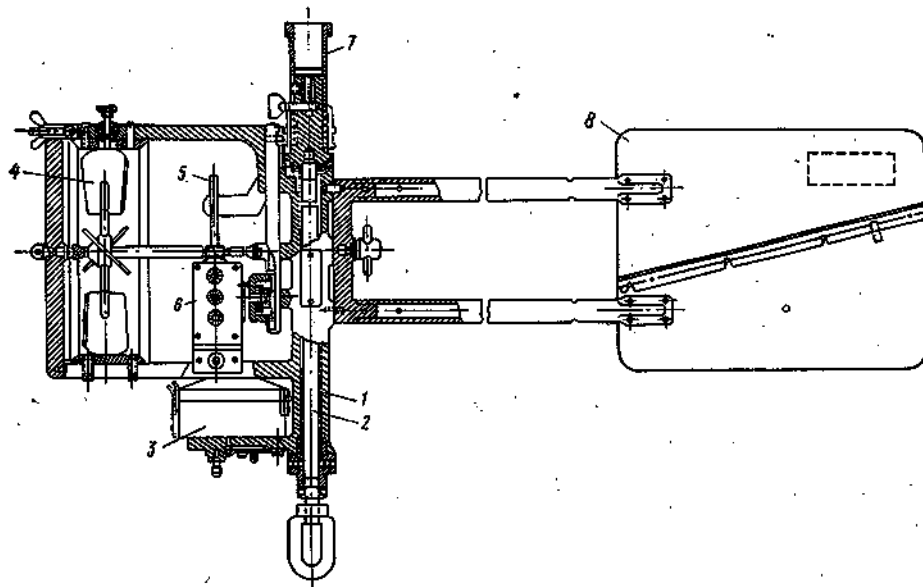


Рис. 7.11. Морская вертушка ВММ.

1 — латунная рама, 2 — вертикальная ось, 3 — компасная коробка, 4 — лопастный винт, 5 — трубка-магазин, 6 — коробка счетчика оборотов, 7 — втулка переключающего (спускового) механизма счетчика, 8 — хвостовое оперение (руль).

Корпус вертушки представляет собой литую раму, которая свободно вращается на вертикальной оси. Скорость течения определяется по скорости вращения лопастного винта, регистрация числа оборотов которого производится механическим счетчиком. Для этого на оси лопастного винта имеется червячная нарезка, которая может соединяться с зубчатым колесиком механизма счетчика. Их соединение и разъединение (включение и выключение счетчика) производится специальным механизмом, срабатывающим при ударе посыльного грузика по втулке на вертикальной оси вертушки. Механизм счетчика заключен в специальную коробку, на лицевой стороне которой расположены три циферблата для фиксации соответственно десятков, сотен и тысяч оборотов (единицы отсчитываются на глаз) лопастного винта. Регистрация направления

течения производится компасом, в сектора коробки которого через каждые $33\frac{1}{3}$ оборота лопастного винта выпадают шарики, сделанные из немагнитного металла. Для этого в верхней части коробки счетчика имеется трубка-магазин, в которую закладывается 20—23 шарика диаметром 3 мм. Перенос шариков к отверстию в крышке компасной коробки осуществляется с помощью диска, насаженного на ось одной из шестеренок счетчика. Попадая в компасную коробку шарик по желобку на северном конце стрелки скатывается на дно коробки, разделенной перегородками на 36 секторов (через 10°).

Опускание вертушки на горизонт измерения производится на стальном канате с помощью лебедки. Перед опусканием вертушки со счетчика снимают начальные показания, закладывают в трубку-магазин шарики и взводят переключающий механизм. Через 1—2 мин после установки вертушки на заданной глубине с помощью посыльного грузика включают счетчик оборотов. Время выдержки вертушки в точке измерения назначается с учетом пульсации скорости и направления течения, однако во всех случаях его минимальное значение не должно быть меньше промежутка времени, соответствующего при данной скорости течения выпадению в компасную коробку пяти шариков. По истечении времени измерения счетчик выключается посылкой по тросу очередного грузика. Промежуток времени между моментами включения и выключения счетчика фиксируется по секундомеру.

После подъема вертушки на поверхность снимают показания счетчика оборотов и подсчитывают число шариков в различных секторах компасной коробки. Произведение общего числа выпавших в компасную коробку шариков на $33\frac{1}{3}$ должно быть равно числу оборотов, зафиксированному счетчиком, или отличаться от него в сторону занижения не более чем на 33 единицы. В книжку для записи наблюдений за направлением и скоростью течения (КГ-26МА) номера секторов записываются большими цифрами, у основания которых указывается число шариков (например, запись $17_2 19_3$ означает, что из пяти шариков, выпавших за время измерения в компасную коробку, два оказалось в семнадцатом, а три в девятнадцатом секторах).

Необходимость извлекать вертушку из воды после измерения на каждом горизонте для снятия отсчетов создает неудобства при работе с нею и ведет к дополнительным затратам времени.

Измеритель течений ГР-42, разработанный в Государственном гидрологическом институте, лишен указанных недостатков.

Измеритель течений состоит из двух самостоятельных узлов: вертушки и прибора для измерения направления течения,—скомпанованных на общей раме, снабженной хвостовым оперением (рис. 7.12а).

При скоростях течения до 0,5—0,7 м/с для измерения скорости течения используется обычно входящая в комплект измерителя однооборотная вертушка с облегченным четырехлопастным винтом, с начальной скоростью вращения около 0,02 м/с. При скоростях

течения более указанных пределов рекомендуется использовать речные вертушки ГР-21М и др.

Узел измерения направления течения выполнен на базе потенциометрического дистанционного компаса ПДК-3, представляющего собой магнитный компас, в котором положение катушки, на-

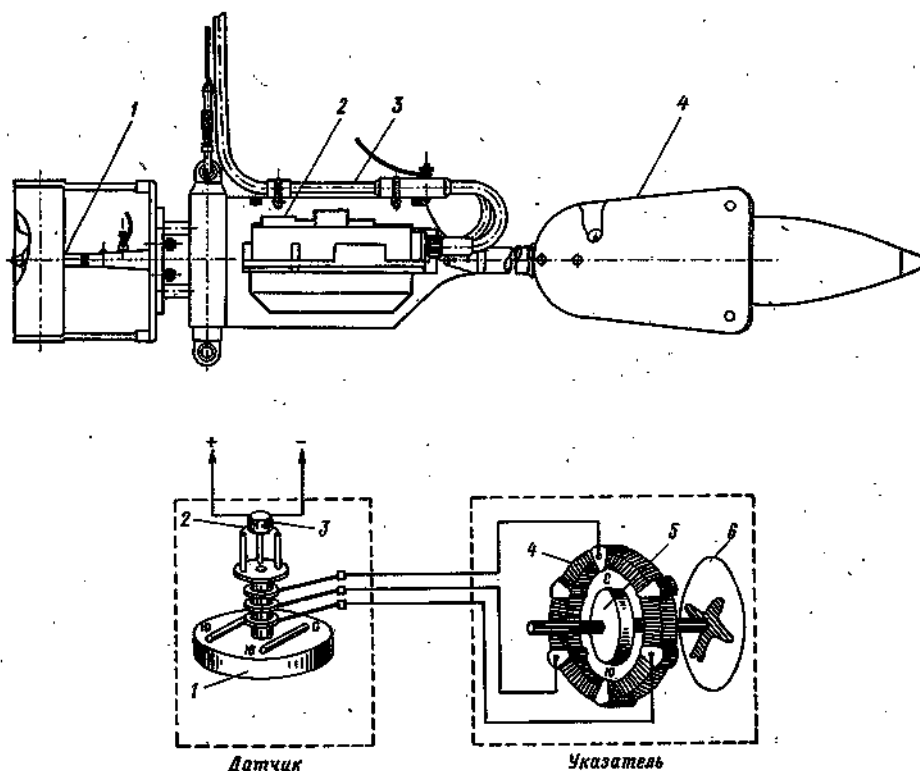


Рис. 7.12. Измеритель течения ГР-42.

Вверху — основные узлы: 1 — вертушка, 2 — потенциометрический дистанционный компас ПДК-3, 3 — кабель, соединяющий ПДК-3 с указателем направлений (логометром), а вертушку — с сигнальным устройством, 4 — хвостовое оперение; внизу — принципиальная схема указателя направлений ПДК-3: 1 — катушка, 2 — контактные щетки, 3 — кольцевой потенциометр, 4 — статор, 5 — подвижный магнит, 6 — стрелка-указатель.

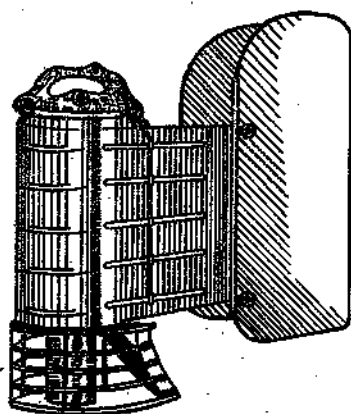
ходящейся в датчике компаса, дистанционно передается на указатель направления при помощи потенциометрической системы.

Принципиальная схема компаса ПДК-3 показана на рис. 7.12б. На катушке компаса имеются три контактные щетки, скользящие по кольцевому потенциометру, укрепленному в компасной коробке. Щетки потенциометра с помощью электрического кабеля связаны с указателем — магнитно-электрическим логометром, состоящим из статора и подвижного магнита, положение которого всегда соответствует определенному положению щеток на

потенциометре. На оси с магнитом укреплена стрелка (обычно в виде самолетика) для отсчета направления.

При измерении направления течения погруженный в воду на стальном канате прибор ориентируется по направлению обтекающих его струй. Направление, соответствующее продольной оси прибора, зафиксированное датчиком, передается в виде электрического сигнала по дистанционной линии связи на указатель направления (логометр), отклоняя его стрелку от северного направления на соответствующий угол.

Хвостовое оперение прибора состоит из трубки, двух вогнутых обтекаемых пластин и поплавка.



Источником питания преобразователя направления течения служит батарея сухих гальванических элементов общим напряжением 27 В, преобразователя скорости — гальванические элементы напряжением 3 В. Дистанционной линией связи является шестижильный кабель.

Основной недостаток прибора — искажение показаний компаса вблизи металлических предметов.

Рис. 7.13. Общий вид самописца течения (буквопечатающей вертушки) БПВ-2р.

Самописец течений (буквопечатающая вертушка) БПВ — автоматический прибор, в котором скорость и направление течения отпечатываются на бумажной ленте через каждые 5, 10, 15, 20, 30 или 60 мин. При регистрации элементов течения через 5 мин автономность работы прибора составляет 5 сут, а при регистрации через 60 мин — два месяца. Для определения скорости течения в приборе имеется лопастный винт, а для измерения направления — магнитный компас.

Существует несколько моделей самописца, из которых наиболее приемлемой для озер и водохранилищ является модель БПВ-2р, рассчитанная на погружения до 250 м и отличающаяся от других модификаций меньшим весом и лучшей обтекаемостью (рис. 7.13).

Самописец состоит из трех основных частей: корпуса с рулевым устройством, лопастного винта и регистрирующего механизма.

Корпус прибора представляет собой цилиндр с герметически закрывающейся крышкой, ручкой и вертлюгом для крепления прибора к стальному канату. Лопастный винт в виде четырех прямоугольных пластин из органического стекла размещается в нижней части корпуса.

Регистрирующий механизм самописца размещается в корпусе и состоит из следующих основных блоков: 1) диска скорости; 2)

устройства для передачи вращения ротора диску скорости; 3) компасной картушки; 4) устройства для отпечатывания показаний диска скорости и компасной картушки; 5) кулачкового валика, служащего для включения и приведения в действие отдельных механизмов; 6) пружинного завода с часовым ходом и механизмом, приводящим кулачковый валик во вращение.

Самописец работает следующим образом. Вращение лопастного винта передается через водонепроницаемое дно корпуса на регистрирующий механизм с помощью магнитной муфты, состоящей из двух одинаковых магнитов, один из которых насажен на ось лопастного винта, а другой — на ось валика регистрирующего механизма. Через заданные промежутки времени автоматически включается сцепление лопастного винта с диском скорости, который начинает поворачиваться тем быстрее, чем больше скорость течения. Одновременно происходит освобождение стопорного устройства магнитной картушки, и она ориентируется по магнитному меридиану. После истечения времени измерения, которое обычно равняется 176 с, срабатывают стопорные устройства диска и картушки компаса и включается печатающий механизм. Он наносит краску на резиновые шкалы, расположенные на диске скорости и магнитной картушке, и прижимает к ним ленту. После того как отпечаток сделан, диск скорости возвращается в исходное положение.

Самописец течений БПВ используется в настоящее время преимущественно как автономный прибор, но им можно работать также с судна и со льда. При автономной работе самописцы устанавливаются в водоеме с помощью буйковых станций. Станция представляет собой поверхностный или слегка притопленный буй, удерживаемый якорем. К стальному канату, которым буй связан с якорем (или к специальному стальному канату), с помощью кронштейнов на заданных горизонтах крепятся вертушки.

7.6.3. Обработка результатов вертушечных измерений

Первичная обработка данных измерений морской вертушкой и измерителем течений ГР-42, заключается в определении модуля (значения скорости) и направления среднего вектора скорости течения.

Наиболее точно эти характеристики могут быть получены на основании измерений измерителем течений ГР-42, если отсчеты по угломеру брались одновременно с измерением скорости с осреднением направлений за промежутки времени между приемами сигналов вертушки. Для этого, вычислив скорости течения за каждый прием, определяют их векторную сумму. Делается это следующим образом. Из начала координат, вертикальная ось которых условно принимается за линию С—Ю, по направлению, осредненному за время первого приема, откладывается отрезок, длина которого в принятом масштабе соответствует зафиксированной скорости. К его концу пристраивают таким же способом следующий вектор и т. д. Соединив начало первого вектора (точка 0) с концом

последнего (точка N), получают суммарный вектор. Измерив его длину и разделив ее на число приемов (частных векторов), получают модуль (значение) среднего вектора скорости за время измерения. Что касается направления среднего вектора, то оно совпадает с направлением результирующего вектора ON (рис. 7.14).

Если при измерении направлений в показаниях логометра не было учтено магнитное склонение, истинное направление течения определяется путем введения в полученное значение магнитного азимута поправки на магнитное склонение с соответствующим знаком.

В общем случае, когда отсчеты по угломеру не совпадают по времени с отсчетами по секундомеру, фиксирующими определен-

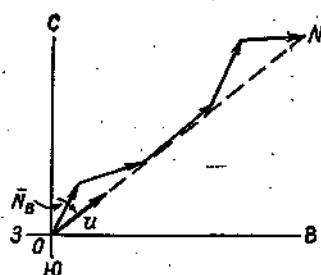


Рис. 7.14. Определение среднего вектора течения по данным измерителя течения ГР-42.

ное количество оборотов лопастного винта, Наставлением вып. 7, ч. I предлагается среднее направление течения определять как среднее арифметическое из возможных вариантов осреднения направления. Для этого вводятся следующие понятия:

1) угол рассеивания A , равный углу между предельными направлениями течений, зафиксированными за время измерения;

2) N_A — направление, соответствующее среднему положению прибора во время измерений и равное сумме минимального из наблюдаемых значений направления и половины угла рассеивания $(\frac{A}{2})$;

3) N_a — направление, соответствующее среднему положению прибора во время измерений и определяемое как среднее арифметическое из всех отсчетов логометра, зафиксированных через равные интервалы времени. Такое осреднение производится при $A \leq 30^\circ + 4n$, где n — число измерений направления. При $A > 30^\circ + 4n$ направление, соответствующее среднему положению прибора, определяется как среднее векториальное (геометрическое) из всех зафиксированных положений прибора и обозначается N_v ;

4) N_{π} — преобладающее направление течения, т. е. наиболее часто повторяющаяся характеристика направления течения;

5) N_c — среднее направление течения, соответствующее среднему положению прибора и определяемое как среднее арифметическое из всех возможных вариантов осреднения:

$$N_c = \frac{N_A + N_a(N_v) + N_{\pi}}{3}.$$

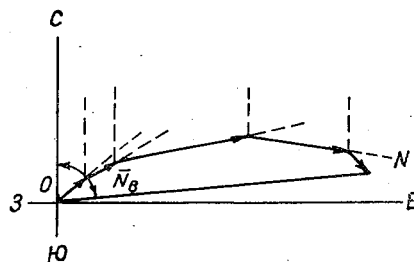
Результаты измерений морской вертушкой дают возможность решить указанную задачу лишь приближенно. При их обработке учитываются выше приведенные понятия, при этом придерживаются следующего порядка:

1. По числу оборотов вертушки, зарегистрированному счетчиком, и продолжительности измерения вычисляют среднюю скорость течения.

2. Вычисляют средний магнитный азимут течения за время наблюдения $N_a(N_v)$ как среднее арифметическое или геометрическое из частных значений, зафиксированных положением шариков в соответствующих секторах компасной коробки.

При вычислении N_a арифметическим способом номер каждого сектора умножают на число выпавших в него шариков, произведе-

Рис. 7.15. Графическое определение среднего магнитного азимута по данным измерений морской вертушкой.



ния складывают и полученную сумму делят на общее число шариков в компасной коробке. Умножив результат на 10° (угловой размер одного сектора), получают направление N_a .

В основе геометрического способа определения среднего магнитного азимута лежит построение прогрессивного векторного графика наблюдаемых направлений графическим способом или с помощью специального приспособления — векторного круга. Как в том, так и в другом случае каждому отсеку компасной коробки, в которых имеются шарики, приписывается вектор-эквивалент, за направление которого принимается магнитный азимут сектора, а за модуль — длина отрезка, пропорциональная числу шариков. В качестве линейного эквивалента одного шарика (M) принимается отрезок произвольной длины, удобный для построения графика (часто $M=1$ см/шарик). Таким образом, если, (например, в 19-й отсек попало шесть шариков, то магнитный азимут вектора-эквивалента $19 \times 10^\circ = 190^\circ$, а модуль — $l=6M$ (при $M=1$ см/ш $l=6$ см).

Графическое определение среднего магнитного азимута выполняется следующим образом (рис. 7.15). От вертикальной линии, условно принимаемой за направление СЮ, отмеряют по часовой стрелке с помощью транспортира угол, соответствующий магнитному азимуту сектора с наименьшим номером, и по этому направлению откладывают длину его вектора-эквивалента. К концу этого вектора таким же образом пристраивают вектор-эквивалент следующего по номеру отсека. Магнитный азимут линии, соединяю-

щей начало первого вектора с концом последнего, и есть среднее значение магнитного азимута направления течения (N_B).

Векторный круг представляет собой два наложенных друг на друга круга: нижнего неподвижного с рукояткой и верхнего, вращающегося на оси, укрепленной в центре нижнего круга (рис. 7.16). Нижний круг обклеен миллиметровой бумагой, верхний, изготовленный из прозрачного материала (оргстекла, целлулоида), размечен по окружности на градусы (через 1°). У основания рукоятки, на нижнем конце вертикального диаметра неподвижного круга укреплена стрелка-указатель.

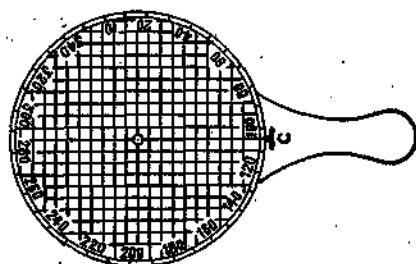


Рис. 7.16. Векторный круг.

Вычисление N_B с помощью векторного круга производится в следующем порядке.

Совмещают стрелку-указатель с делением верхнего круга, соответствующим направлению первого вектора-эквивалента. От центра круга вверх откладывают отрезок, равный его длине. Конец вектора отмечают точкой. Поворачивая верхний круг, совмещают стрелку-указатель с делением, равным магнитному азимуту второго вектора, и от полученной ранее точки откладывают вверх его длину. Аналогично поступают со всеми следующими векторами. Если теперь конец последнего вектора совместить с верхней частью вертикальной оси неподвижного круга, то деление, оказавшееся против стрелки-указателя, будет соответствовать магнитному азимуту среднего вектора течения.

3. Истинное значение направления получают введением в средний магнитный азимут поправки на магнитное склонение.

4. При арифметическом способе определения направления среднего вектора течения модуль среднего вектора скорости принимается равным измеренной скорости $u_{ист} = u_{верт}$.

При геометрическом способе осреднения направления он вычисляется по формуле

$$u_{ист} = lu_{верт}/(Mn),$$

где l — длина равнодействующей векторов, определяемая по графику (при обработке с помощью векторного круга это — расстояние между центром круга и точкой, соответствующей концу последнего вектора), см; M — линейный эквивалент шарика, см/шарик;

n — общее число шариков, выпавших в компасную коробку. Отношение $l/(Mn)$ называется коэффициентом рассеивания шариков (k_p) и характеризует степень неустойчивости направления течения.

Пример. В компасную коробку выпало 10 шариков, которые распределены по секторам следующим образом: 5, 6, 8, 4, 10, 3, 13, 1. Средняя скорость течения за время измерения составила 0,16 м/с. Магнитное склонение -5° (западное), $N_A = (50 + 130) : 2$, $N_H = 80^\circ$.

Вычисляем угол разброса шариков: $(13 - 5) \cdot 10 = 80^\circ$. Это больше критерияльного угла рассеивания, который в этом случае составляет $30 + 4 \cdot 10 = 70^\circ$. Следовательно, вычисление среднего магнитного азимута течения нужно выполнять геометрическим способом.

Примем в качестве линейного эквивалента шарика отрезок длиной 0,5 см. Тогда пятому сектору (магнитный азимут течения 50°) будет соответствовать вектор-эквивалент длиной 0,5 см; шестому (азимут 60°) — 0,5 см; восьмому (азимут 80°) — 2,0 см; десятому (азимут 100°) — 1,5 см; тринадцатому (азимут 130°) — 0,5 см. Векториальный график, построенный по этим данным, представлен на рис. 7.16. Длина суммарного вектора ON составляет 4,7 см, а его магнитный азимут $N_B = 85^\circ$. Используя выражение для среднего направления течения, получаем $N_C = 85^\circ$. Вводя в значение магнитного азимута поправку на магнитное склонение, получаем направление среднего вектора течения $N_{ист} = 85 - 5 = 80^\circ$.

Для вычисления модуля среднего вектора течения необходимо сначала рассчитать коэффициент рассеивания шариков: $k_p = 4,7 / (0,5 \cdot 10) = 0,94$. Теперь $u_{ист} = 0,94 \cdot 0,16 = 0,15$ м/с.

7.6.4. Авиаизмерения течений

Авиаизмерения течений, т. е. определение скорости и направления течения последовательными аэрофотосъемками свободно перемещающихся поплавков, дают возможность получать синхронную картину течений на значительных частях акватории водоема. Широко применяются авиаизмерения, например, для вычисления характерных особенностей ветровых течений при разных скоростях и направлениях ветра, для оценки трансформации речных струй на участках впадения рек в водоемы, для изучения водообмена в зонах промышленных водозаборов и водосбросов и т. п.

Обычно авиаизмерения выполняются по характерным створам, ориентированным по мере возможности перпендикулярно ожидаемому направлению течения. Расстояния между створами могут быть различными и зависят главным образом от требований, предъявляемых к детальности схемы течения, которая должна быть получена в процессе авиаизмерений.

Для измерения течения могут применяться разные типы ураниновых поплавков. Наиболее распространен озерный поверхностный поплавок (рис. 7.17), предназначенный для измерения скорости в верхнем слое толщиной около 30 см. Он представляет собой полиэтиленовый цилиндр диаметром 7 см, высотой 36 см, в стенках которого вырублено несколько рядов отверстий. Внутри поплавок в матерчатом мешочке закладывается около 400 г уранина (красителя), растворение которого обеспечивает видимость поплавка в течение 1,5—2,0 ч. Для придания плавучести внутри цилиндра, ближе к его верхнему основанию, вставляется кусочек

пенопласта, а к нижнему основанию для вертикальности положения поплавок в воде крепится металлический грузик. Коэффициент ветрового дрейфа поплавка составляет 0,005.

При необходимости измерения скоростей на более глубоких горизонтах обычно применяются пенопластовые поплавки, покрытые ураниновоклеевой пастой, с демпферными устройствами разного заглубления. На рис. 7.18 показан озерный поплавок с металличе-

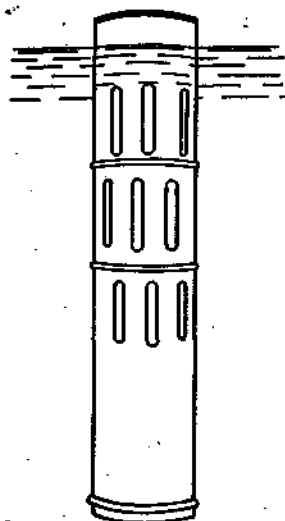


Рис. 7.17. Озерный поверхностный поплавок.

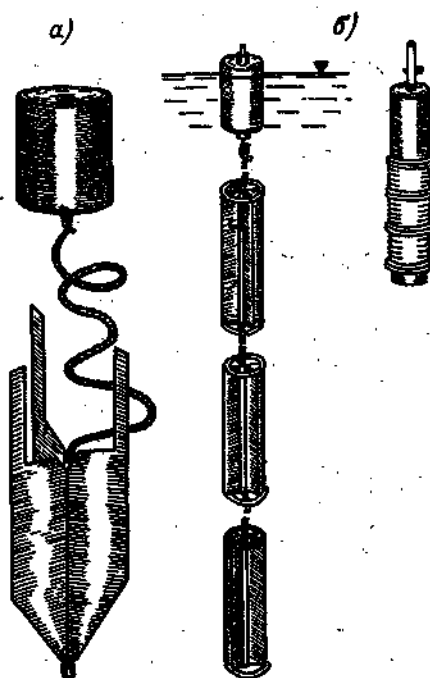


Рис. 7.18. Поплавок с металлическим демпфером (а) и поплавок-гирлянда (б) в воде и в собранном состоянии в самолете.

ским демпфером, заглубленным до 2—3 м, и поплавок-гирлянда, имеющий несколько парусиновых демпферов и обеспечивающий определение средней скорости течения в слое толщиной до 25 м.

Авиаизмерение включает сброс поплавков и их последовательные аэросъемки через заданные (фиксируемые по секундомеру) интервалы времени. Если вся ширина створа не захватывается одним аэроснимком, съемка производится маршрутом перекрывающихся между собой кадров. В этом случае сбросу поплавков должна предшествовать установка (сброс) в зонах перекрытия неподвижных якорных буйков, что обеспечит при камеральной обработке увязку снимков в маршруте.

При небольших скоростях течения и незначительном удалении створов друг от друга авиаизмерения могут одновременно выполняться на нескольких створах. Помимо ускорения процесса измерения такой порядок работы обеспечивает получение действительно синхронной схемы течений на группе створов. В такие группы могут быть объединены створы, общее время облета которых не превышает принятого интервала времени между двумя последовательными съемками поплавков.

Обработка материалов включает построение планшетов авиаизмерений по отдельным створам с траекториями поплавков и вычисление скоростей течения с введением в показания поплавков соответствующих поправок, учитывающих влияние ветра (см. п. 4.6.3). После этого по характерным точкам береговой полосы или другим ориентирам планшеты привязываются к крупномасштабному плану или фотосхеме водоема (части водоема), на которые данные отдельных авиаизмерений переносятся в виде векторов скорости или исправленных (с учетом влияния ветра) траекторий поплавков.

7.7. Наблюдения за наносами и переформированием берегов

7.7.1. Режим наносов

Создание водохранилища резко изменяет режим наносов, который был свойствен до этого реке. Влекомые наносы, свободно перемещавшиеся ранее вниз по течению, теперь полностью задерживаются в водохранилище; из-за малых скоростей течения здесь выпадает и значительная часть взвешенных наносов. Таким образом, с первого дня заполнения водохранилища начинается необратимый процесс его заиления (занесения), что ведет к постепенному сокращению полезной емкости водохранилища, а следовательно, и снижению его регулирующей способности. В связи с этим изучение интенсивности заиления водохранилищ и прогнозирование этого процесса имеет важное народнохозяйственное значение.

Для оценки качества воды в различных частях водоема с целью ее использования в промышленном и бытовом водоснабжении, а также для решения ряда других практических задач важно иметь представление о распределении мутности воды по акватории.

По характеру движения наносов и пространственному распределению мутности воды в водохранилищах могут быть выделены верхняя, средняя и нижняя зоны. Для верхней зоны (включающей и участок реки до выклинивания подпора) режим мутности обычно близок к речному. Основное влияние здесь на перемещение наносов оказывают стоковые течения. По мере продвижения к плотине, однако, они уменьшаются и все больший удельный вес приобретают ветровые течения. В прибрежной зоне наиболее важная роль в движении наносов принадлежит вдольбереговым течениям.

Специфические особенности режима наносов прибрежной зоны связаны также с переформированием берегов, т. е. с разрушением под действием волнения и течений относительно крутых склонов речной долины, вступивших в контакт с водой при создании водохранилища, и последующим отложением материалов их разрушения в приглубых зонах. Результатом этого является общее выполаживание дна в прибрежной зоне, т. е. образование береговой отмели. Процессы переформирования, особенно интенсивные в первые годы после создания водохранилища, со временем постепенно затухают и могут совсем прекратиться, когда отмель достигнет такой ширины, что окажется способной полностью гасить энергию волн, подходящих к берегу.

Без всестороннего изучения процессов переформирования берегов невозможно создание надежных методов их прогнозирования, а следовательно, и рационального научно обоснованного освоения прибрежной зоны.

В состав работ по изучению движения наносов, заиления и переформирования дна водоема и его берегов могут входить:

а) наблюдения за распределением мутности по акватории водоема в различные фазы гидрологического режима (съемки мутности);

б) наблюдения за заилением и переформированием ложа водоема;

в) наблюдения за вдольбереговыми перемещениями наносов и взмучиванием донных отложений под действием волнения и течений в прибрежной зоне;

г) наблюдения за переформированием берегов.

Из этого перечня к стандартным наблюдениям относятся только съемки мутности; все остальные виды работ выполняются озерными станциями и специализированными гидрометобсерваториями по специальным программам.

7.7.2. Наблюдения за наносами в открытой части водоема

Съемки мутности, т. е. наблюдения за распределением мутности воды по акватории водоема, производятся обычно два раза в год. Одна съемка приурочивается к периоду паводка (половодья), когда имеет место максимальное поступление наносов с водами впадающих в водоем рек; вторая — к моменту наибольшего взмучивания донных отложений ветровым волнением. При необходимости более детального изучения режима мутности количество съемок может быть увеличено.

Съемкой охватывается только та часть акватории водоема, где мутность превышает 20—30 г/м³. На озерах это обычно районы впадения наиболее крупных притоков, на водохранилищах — верхняя и средняя зоны, а также некоторые участки мелководий.

Отбор проб воды на мутность при съемках производится на 15—25 вертикалях, располагаемых таким образом, чтобы наиболее

полно выявить характерные особенности распределения мутности по акватории. На водохранилище, например, пять—семь вертикалей обычно назначаются равномерно по его осевой линии, а остальные — по нескольким поперечным створам. Во всех случаях в число вертикалей для съемки мутности желательно включать также рейдовые вертикали.

Пробы воды на мутность отбираются в трех точках на каждой вертикали (пов.; $0,5h$; дно), а при глубинах менее 1 м только в точке $0,5h$. Объем пробы, отбираемой в точке, при мутности более 100 г/м^3 должен составлять 1 л, а при меньшей мутности — 3 л.

Наблюдения за мутностью сопровождаются следующими видами работ: а) измерением температуры воды в точке $0,5h$ на каждой вертикали; б) отбором проб воды для определения гранулометрического состава взвешенных наносов на трех-четыре вертикалях в каждой характерной зоне мутности; в) отбором проб донных наносов на всех вертикалях; г) наблюдениями за волнением, скоростью и направлением ветра на береговых пунктах.

Первичная обработка материалов съемки сводится к фильтрованию проб и вычислению мутности, а также выполнению гранулометрического состава взвешенных и донных наносов.

Наблюдения за заилением и переформированием ложа водохранилища производятся путем периодических промеров глубин по постоянным створам. На начальном этапе изучения этих процессов наблюдениями охватывается обычно все водохранилище, а после выявления зон активной аккумуляции наносов и размыва промерные створы в основном сосредотачиваются на этих участках.

Одновременно с промерами на нескольких вертикалях каждого створа отбираются пробы донных отложений для определения их плотности, что необходимо для последующего пересчета объема отложений в их массу.

По данным промеров для каждого створа строятся профили глубин. Толщина слоя отложений или смыва на створе определяется по разности отметок дна при данном и предшествующем промерах. Определив среднюю высоту деформаций между соседними створами и умножив ее на площадь между ними, получают объем деформации на участке между соседними створами.

7.7.3. Наблюдения за наносами в прибрежной зоне

Наблюдения за вдольбереговыми перемещениями наносов и мутностью воды в прибрежной зоне производятся на нескольких (двух-трех) специально оборудованных участках, режим наносов в пределах которых наиболее характерен для прибрежной зоны водоема в целом. За безледоставный период на каждом участке выполняется два-три 20—30-дневных цикла наблюдений, приуроченных к разным гидрологическим фазам.

Наблюдениями охватывается прибрежная полоса, включающая береговую отмель и примыкающую к ней часть мелководья

с глубинами приблизительно до $\frac{1}{2}$ длины штормовых волн. На очень мелких водоемах ширина зоны наблюдений может быть ограничена 200—300 м. Протяженность участка от 200 до 600 м.

В течение каждого цикла наблюдений ежедневно выполняются разовые измерения расходов взвешенных (а при наличии соответствующего оборудования) и влекомых наносов, а также серии этих измерений, приуроченные к наиболее выдающимся штормам.

Ежедневные измерения осуществляются только в пределах отмели на основном створе, в качестве которого обычно назначается один из центральных поперечников, и сопровождаются наблюдениями за уровнем и температурой воды, скоростью и направлением ветра, а также основными элементами волн.

Серия штормовых измерений выполняется на нескольких (трех-четырех) створах с захватом не только отмели, но и прибрежного мелководья. Причем наряду с перечисленными выше видами сопутствующих наблюдений дополнительно определяются: угол подхода волн, характер трансформации волн на мелководье, места их забурунивания, положение внешней границы взмучивания и особенности движения наносов. В конце каждой серии измерений производятся промеры глубин по всем промерным поперечникам.

На местности участок наблюдений закрепляется магистралью и несколькими промерно-нивелировочными поперечниками, часть из которых при измерениях расходов наносов служит измерительными створами.

Определение расходов взвешенных наносов осуществляется путем отбора проб воды на мутность на пяти-восьми вертикалях с одновременным измерением скоростей и направления течения и промерами глубин (число промерных вертикалей в 1,5—2,0 раза больше). Пробы воды на мутность отбираются батометром-бутылкой интеграционным (при глубинах более 2 м) или точечным способом (в точках пов.; 0,5*h*; дно), а при глубине на вертикали менее 0,5 м — только в точке 0,5*h*.

Измерение вдольбереговых перемещений мелкозернистых влекомых наносов производится ловушками разных конструкций, а гравийно-галечных наносов — батометрами-сетками.

Для определения остальных характеристик (течение, ветер, температура и т. д.) используются приборы и методы, описанные выше, в соответствующих разделах данной главы.

Два-три раза за сезон на участке отбираются пробы взвешенных и донных наносов для гранулометрического анализа.

Порядок обработки расходов взвешенных и влекомых наносов аналогичен изложенному в главе 5.

Вдольбереговые перемещения наносов, перераспределяя материалы разрушения берегов между отдельными частями побережья, играют тем самым заметную роль в общем формировании береговой полосы водоема. В связи с этим участки наблюдений за вдольбереговыми перемещениями наносов обычно стремятся совмещать с участками наблюдений за переформированием берегов.

7.7.4. Наблюдения за переформированием берегов

Изучение процессов переформирования берегов водоемов производится путем: а) систематических наблюдений на отдельных постоянных участках и створах побережья и б) периодических обследований береговой полосы водоема в целом.

Стационарные пункты (участки и створы) наблюдений выбираются в местах наиболее интенсивного переформирования и в первую очередь там, где последние представляют угрозу для народнохозяйственных объектов. Общее количество участков на водохранилище зависит от его размеров, степени хозяйственного освоения прибрежной полосы и обычно колеблется от 5 до 10; а общее число отдельных створов — от 15 до 30.

Периодические планово-высотные съемки участка (а для створа — его профиля), фиксирующие изменения в строении его надводной и подводной частей за время между съемками, составляют основу наблюдений.

Частота и периодичность съемок определяется интенсивностью переформирований. На водохранилищах в первые годы после их заполнения съемки производятся ежегодно 3—4 раза, а затем их число сокращается до 1—2 раз в год.

Для упрощения производства систематических съемок на участке создается постоянная планово-высотная основа, включающая закрепленную на местности магистраль с 10—20 поперечниками и два репера. Таким образом, процесс съемки сводится в конечном итоге к выполнению промерно-нивелировочных работ по поперечникам. Отдельный створ закрепляется на местности двумя створными знаками и оборудуется репером. За постоянное начало обычно принимается один из створных знаков или репер, если он установлен в створе.

Первую съемку участка желательно выполнить до заполнения водохранилища (или в крайнем случае сразу после его заполнения). Ею необходимо осветить береговую полосу (вглубь водоема и в сторону коренного берега), заведомо включающую ту часть прибрежной зоны, которая может подвергнуться в будущем переформированию. Одновременно с этой съемкой должна быть выполнена морфологическая съемка и геологические работы с нанесением на план участка всех деталей строения берега и основных видов слагающих его горных пород.

Последующие планово-высотные съемки должны каждый раз освещать полосы берега от бровки берегового уступа до основания отмели с захватом небольшого участка подводного берегового склона, не подвергающегося изменениям. Профиль надводной части поперечников получают в этом случае путем нивелирования, а подводной — с помощью промеров. Работы, сопутствующие съемке, включают: а) визуальное определение геологического строения вновь образовавшихся обнажений; б) морфологическую съемку в той части участка, где обнаружены изменения (вновь образовавшиеся волноприбойные ниши, береговые уступы, нагромождение

обломочного материала и т. п.); в) отбор проб отложений, формирующих пляж и отмель, на гранулометрический анализ.

Учитывая, что основным фактором, определяющим переформирование берегов, является ветровое волнение, стационарные участки и створы необходимо располагать в непосредственной близости от волномерных пунктов. Если в процессе наблюдений выяснится, что на переформирование берега на участке (створе) заметное влияние оказывают другие факторы (особенности ледового режима, физическое или химическое выветривание горных пород, склоновая эрозия и т. п.), то за ними должны быть установлены дополнительно специальные наблюдения.

Контроль за состоянием оборудования стационарных пунктов наблюдений за переформированием берегов, сохранностью и неизменностью местоположения и высотных отметок знаков планово-высотного обоснования осуществляется путем их ежегодных рекогносцировочных обследований.

Наблюдения за общим развитием переформирования берегов водоема производятся 1 раз в пять лет путем обследования всего побережья с картированием и фотографированием наиболее существенных деформаций берега. Исключительно ценные материалы для оценки плановых деформаций могут быть получены также с помощью аэрофотосъемки побережья водоема.

Глава

8

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УЧЕТ ВОД И ВОДНЫЙ КАДАСТР

Советский Союз располагает значительными водными ресурсами. Средний годовой сток наших рек составляет 4720 км^3 , или около 12 % стока земного шара. Всего в озерах и водохранилищах, ледниках и снежниках, реках и подземных кладовых СССР содержится более $43\,000 \text{ км}^3$ пресной воды. Водные богатства нашей страны, а именно воды суши (реки, озера, водохранилища, ледники и подземные воды, внутренние моря и территориальные морские воды) составляют единый государственный фонд СССР.

Сведения о водных ресурсах, полученные по результатам гидрологических наблюдений, публикуются в справочно-кадастровых изданиях. Публикация данных ведется с начала организации сети гидрологических постов.

Новый этап в организации учета, планирования и контроля использования вод нашей страны связан с принятием Верховным Советом Союза ССР «Основ водного законодательства СССР и союзных республик» (1970 г.). В развитие этого важнейшего решения Совет Министров СССР принял постановления о государственном учете вод и ведении государственного водного кадастра.

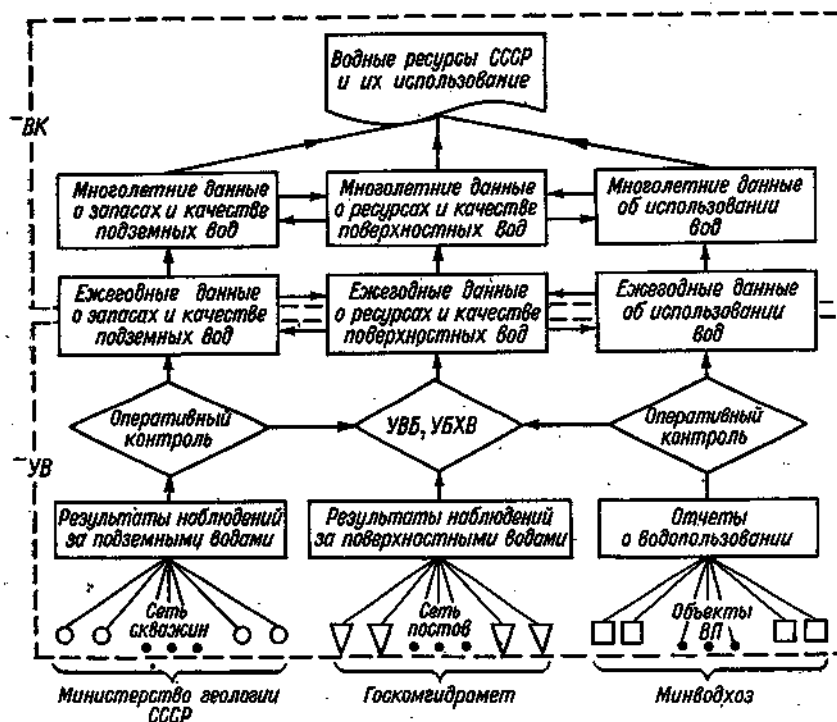


Рис. 8.1. Общая структура потоков и состава информации в системе государственного учета вод и государственного водного кадастра.

УВБ и УВХВ соответственно означают учетные водные балансы и учетные балансы химических веществ как средство контроля данных учета вод.

Государственный учет вод и их использования (ГУВ) и государственный водный кадастр (ГВК) в совокупности образуют информационную систему, охватывающую сеть наблюдательных станций (постов), вычислительных центров, территориальные управления и научно-исследовательские институты Госкомгидромета СССР, Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР и Министерства геологии СССР, а также предприятия и организации, использующие воды (рис. 8.1).

8.1. Государственный учет вод и их использования по количественным показателям

8.1.1. Структура водохозяйственных систем и гидрологической сети

На зарегулированных реках гидрометрический контроль должен охватывать 50—70 %, а в наиболее ответственных случаях 80—90 % всего стока выше створа ГЭС или водозаборных узлов.

Уровенные посты должны открываться в крупных населенных пунктах, подверженных подтоплению при высокой воде или испытывающих недостаток воды в маловодные годы (периоды). Положение гидростворов определяется структурой гидрографической и водохозяйственной сети, гидрогеологическими и морфологическими условиями бассейна. Особое значение имеет размещение гидрологических постов на границах водохозяйственных районов (ВХР), которые устанавливаются при составлении схем комплексного использования водных ресурсов речного бассейна. На рис. 8.2 приведена схема размещения гидрологической сети, характерная для больших рек, расположенных в аридной зоне и берущих начало в горных районах. Обычно водохозяйственная система таких бассейнов включает:

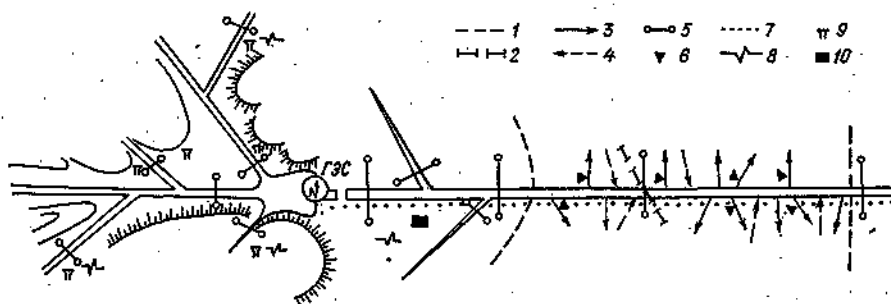


Рис. 8.2. Гидрографическая схема водохозяйственных районов и сети пунктов наблюдений за формированием и использованием речного стока.

1 — границы ВХР, 2 — границы административного района, 3 — водозаборные каналы, 4 — сбросные каналы и коллекторы, 5 — гидрометрические створы на реках, 6 — расходомерные посты на каналах, 7 — наземная линия связи, 8 — радиосвязь, 9 — осадкомерные посты, 10 — вычислительный центр.

— водохранилища или каскад водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования;

— транзитную часть реки с интенсивным разбором воды на орошение земель и промышленные нужды.

При создании сети в подобных условиях должны решаться две основные задачи:

а) получение данных для гидрологического прогноза приточности и расчета водного баланса регулирующего водохранилища;

б) гидрологический контроль использования вод и получение данных для расчета руслового водного баланса по длине рек.

Расстояние между постами по длине реки с интенсивным использованием водных ресурсов необходимо назначать так, чтобы изменение стока на участке ΔQ превосходило предельную суммарную погрешность его определения m_Q . Так, для доверительной вероятности $P=0,95$ получим

$$\Delta Q \geq m_Q = 1,96 \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{\Delta}^2}. \quad (8.1)$$

Особый случай представляет размещение створов измерения расходов воды для определения коэффициентов полезного действия

каналов, характеризующих потери воды по их длине. Если трасса канала проложена в однородных литологических условиях, оптимальное расстояние между контрольными створами (км) определяется по выражению

$$L \geq \bar{m}_Q \sqrt{Q/A},$$

где A — характеристика проницаемости грунтов; для легких суглинков равна 3,2, средних — 2,1, тяжелых — 1,2, галечников — 10÷12; $\bar{m}_Q$ — здесь выражается в процентах к расходу в верхнем створе.

Для оперативного регулирования стока и оптимального водораспределения создаются автоматизированные системы сбора информации и управления водными ресурсами речных бассейнов. Первые звенья таких систем уже осуществляются на ряде рек (Сырдарья, Днепр и др.).

8.1.2. Основные звенья ГУВ и его информационное обеспечение

Ведение ГУВ осуществляется в соответствии с Положением, утвержденным постановлением Совета Министров СССР от 10 марта 1975 г. ГУВ состоит из трех основных звеньев.

Первое — учет ресурсов поверхностных вод, выполняемый организациями Госкомгидромета. Источником информации о водах суши служит основная гидрологическая сеть на реках, озерах и водохранилищах, а также специальные станции и посты на морях в устьях рек и в горных ледниковых зонах.

Учет подземных вод представляет собой второе звено системы ГУВ. Он осуществляется Министерством геологии СССР, опираясь на разветвленную гидрогеологическую сеть наблюдательных скважин.

Третье звено системы ГУВ — учет использования вод и контроль их качества. Он возложен на Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Предприятия и организации-водопользователи ведут первичный учет забираемой и сбрасываемой воды, учитывают сбросы загрязняющих веществ и представляют годовой статистический отчет об использовании воды по форме № 2-тп (водхоз).

Качество вод находится также под надзором общегосударственной службы наблюдений и контроля за уровнем загрязнения объектов внешней среды, действующей в составе Госкомгидромета.

Во всех трех звеньях ГУВ циркулируют и обрабатываются потоки информации, как оперативной, так и статистической. Всего ГУВ охватывает более 8000 гидрологических постов на реках, озерах и водохранилищах, более 6000 гидрогеологических скважин и свыше 150 000 водопользователей. К обработке информации привлечено более 20 вычислительных центров, расположенных в различных регионах Советского Союза.

8.2. Русловые водные балансы и гидрологический контроль данных ГУВ

8.2.1. Структура русловых водных балансов

Русловым водным балансом (РВБ) называется количественное соотношение между поступлением и оттоком воды на участке реки или канала, ограниченном входным и замыкающим створами. При составлении детальных РВБ учитывается достаточно сложный комплекс его компонентов, который, кроме речного стока и водозаборов (сбросов вод) на участке, включает испарение и транспирацию влаги водной растительностью, фильтрационный водообмен, осадки и русловое регулирование стока (потери на заполнение емкостей русла на подъеме половодья и поступление из них на спаде).

РВБ выражаются в виде алгебраических уравнений и таблиц. Наиболее простую структуру РВБ приобретает в меженьный период, когда расходы руслового регулирования отсутствуют и осадками можно пренебречь. Например, для участка реки, водные ресурсы которой используются на промышленно-коммунальное водоснабжение и орошение, уравнение РВБ имеет вид

$$Q_v - Q_n - Q_{бп} - Q_{вз} + Q_{сб} \pm Q_{ф} - Q_{ит} \pm Q_0 = 0. \quad (8.2)$$

Все члены этого уравнения представляют собой расходы воды в м³/с соответственно: Q_v и Q_n — приток в верхнем и отток в нижнем створах; $Q_{бп}$ — боковой приток; $Q_{вз}$ и $Q_{сб}$ — суммарные водозабор и сброс воды в реку; $Q_{ф}$ — фильтрационный приток или отток; $Q_{ит}$ — испарение с водной поверхности и транспирация воды, влаги растительностью; Q_0 — остаточный член, компенсирующий неучтенные компоненты и погрешности определения учтенных.

Надежность расчета РВБ определяется точностью исходных данных. Чем короче расчетный период и чем больше число элементов водного баланса, тем точнее должны быть исходные данные. В противном случае погрешности расчета становятся соизмеримыми с значениями определяемого элемента, а решение уравнения водного баланса сводится к некорректной задаче определения малой величины по разности больших, заведомо неточных величин.

Точность РВБ оценивается средней квадратической погрешностью определения его остаточного члена по совокупности N составляющих:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}. \quad (8.3)$$

Природа остаточного члена (является ли его значение случайным или отражает некоторые физические факторы, непосредственно не учтенные РВБ) оценивается методами статистической проверки гипотез о значимости различия результатов и погрешности расчета. В простейшем варианте при нормальном распре-

Таблица 8.1

Русловой водный баланс участка реки (август 1975 г.)

№ п/п	Элементы руслового водного баланса	Расход, м³/с	Средняя квадратиче- ская погрешность	
			%	м³/с
I. Приходная часть				
1	Приток воды в верхнем створе $Q_{в}$	16,10	5	0,80
2	Боковой приток $Q_{бп}$	2,44	7	0,17
3	Фильтрационный приток в реку	0,44	10	0,04
4	Сбросы в русло реки:			
	коммунальное водоснабжение $Q_{ск}$	0,83	10	0,08
	промышленное водоснабжение $Q_{по}$	1,31	7	0,09
	возвратные воды оросительных систем $Q_{со}$	0,22	15	0,03
	Итого	21,34	—	0,83
II. Расходная часть				
1	Сток воды в нижнем створе $Q_{н}$	15,05	5	0,75
2	Испарение с водной поверхности и транспирация влаги растениями в русле и пойме реки $Q_{ит}$	0,09	10	0,01
3	Водозаборы из реки:			
	коммунальное водоснабжение $Q_{ик}$	2,14	7	0,15
	промышленное водоснабжение $Q_{ип}$	2,14	7	0,15
	орошение и обводнение $Q_{во}$	1,49	10	0,15
4	Водозаборы грунтовых (подземных) вод $Q_{иг}$	1,12	7	0,08
	Итого	22,03		0,81
III. Результаты расчета РВБ				
1	Совокупный остаточный член Q_0	0,69		
2	Совокупная погрешность расчета РВБ σ_0	1,15		
3	Критерияльное условие $Q_0=0,69 \text{ м}^3/\text{с} < 1,96\sigma_0$	2,26		
	РВБ надежен			

лении погрешности σ_0 РВБ признается надежным, если с доверительной вероятностью $P=0,95$ соблюдается критериальное условие

$$|Q_0| \leq 1,96\sigma_0. \quad (8.4)$$

Обратимся к табл. 8.1, в которой представлен РВБ участка реки, к которому тяготеют промышленные объекты, городские поселения и орошаемые земли (см. рис. 8.2). В РВБ учтен достаточно полный комплекс использования водных ресурсов, в том числе и подземные воды. Изъятие последних учтено как водозабор из реки на том основании, что в рассматриваемом случае подземные воды гидравлически связаны с русловым потоком. Данные табл. 8.1 получены в результате специальных гидрометрических съемок, выполненных ГГИ и Приволжским УГКС. Достаточная точность и полнота проведенных измерений подтверждается тем, что значение остаточного члена Q_0 находится в пределах доверительного интервала совокупной погрешности расчета РВБ (см. табл. 8.1, графа 3).

Обычно при относительно малых отъемах воды точность измерения и учета стока на постах основной сети не обеспечивает корректного расчета РВБ. Поэтому при коротких расчетных интервалах (месяц, декада) необходимо проводить специальные балансовые измерения расходов воды повышенной точности и повторности.

8.2.2. Гидрологический контроль данных ГУВ

Для рационального использования водных ресурсов необходимо постоянно контролировать надежность учета воды, забираемой из рек или сбрасываемой в них. Из-за несовершенства применяемых способов водоучета и большого количества водопользователей не всегда удается получить достаточно точные и полные отчетные сведения. В этих случаях достоверность общих данных об использовании водных ресурсов может быть проверена методом гидрологического контроля. Он заключается в следующем.

Уравнение РВБ типа (8.2) может быть решено относительно безвозвратного водопотребления — разность суммарных водозаборов $Q_{\text{ва}}$ и сбросов воды $Q_{\text{сб}}$:

$$Q_{\text{вп}} = Q_{\text{и}} - Q_{\text{в}} - Q_{\text{сб}} \pm Q_{\text{ф}} + Q_{\text{ит}}. \quad (8.5)$$

Отсутствие свободного члена в (8.5) указывает на достаточную полноту учета естественных составляющих РВБ. В таком случае значение $Q_{\text{вп}}$ не должно существенно отличаться от суммарных водозаборов за вычетом сбросов воды по отчетам водопользователей $Q_{\text{у}}$.

Сопоставление двух значений одного и того же элемента РВБ — $Q_{\text{вп}}$ и $Q_{\text{у}}$ позволяет осуществить гидрологический контроль данных ГУВ, т. е. оценить степень соответствия результатов расчета баланса и отчетных сведений об использовании вод. С этой целью определяется невязка баланса $Q_{\text{нев}}$

$$Q_{\text{нев}} = Q_{\text{вп}} - Q_{\text{у}}. \quad (8.6)$$

Для оценки надежности учета отъемов и сбросов воды на участке необходимо значение $Q_{нев}$ сопоставить с доверительной погрешностью ее определения $\alpha_p \sigma_{нев}$.

Среднее квадратическое значение погрешности $\sigma_{нев}$ вычисляется по формуле

$$\sigma_{нев} = \sqrt{\sigma_{вл}^2 + \sigma_y^2}, \quad (8.7)$$

где $\sigma_{вл}$ и σ_y — соответственно средние квадратические погрешности определения значений $Q_{вл}$ и Q_y , равные

$$\sigma_{вл} = \sqrt{\sigma_{в}^2 + \sigma_{н}^2 + \sigma_{бп}^2 + \sigma_{нт}^2 + \sigma_{ф}^2}, \quad (8.8)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{вз}^2 + \sigma_{сб}^2}.$$

Исходя из доверительной вероятности $P=0,95$ и нормального закона распределения погрешностей расчета невязки ($\alpha_p=1,96$), запишем условие надежности учета водных ресурсов и их использования на каком-либо участке

$$-1,96\sigma_{нев} \leq Q_{нев} \leq 1,96\sigma_{нев}. \quad (8.9)$$

Пример. Проверим надежность данных о безвозвратном водопотреблении, учтенных при составлении РВБ в табл. 8.1.

1. Безвозвратное водопотребление по совокупности естественных составляющих РВБ

$$Q_{вл} = 15,05 + 0,09 - 16,10 - 2,44 - 0,44 = -3,84 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Та же величина по отчетам водопользователей (данные табл. 8.1)

$$Q_y = 0,83 + 1,31 + 0,22 - 2,14 - 2,14 - 1,49 - 1,12 = -4,53 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Невязка данных о водопользовании

$$Q_{нев} = -3,84 + 4,53 = 0,69 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4. Погрешности определения:

$$\sigma_{вл} = (0,80^2 + 0,17^2 + 0,04^2 + 0,75^2 + 0,01^2)^{0,5} = 1,11 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\sigma_y = (0,15^2 + 0,15^2 + 0,15^2 + 0,08^2 + 0,08^2 + 0,09^2 + 0,03^2)^{0,5} = 0,30 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\sigma_{нев} = (1,11^2 + 0,3^2)^{0,5} = 1,15 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. Условие надежности

$$-1,96 \cdot 1,15 \text{ м}^3/\text{с} < 0,69 \text{ м}^3/\text{с} < 1,96 \cdot 1,15 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Итак, данные отчетности о безвозвратном водопотреблении вполне надежны. Если $Q_{нев}$ выходит за границу доверительного интервала

$$|Q_{нев}| > 1,96\sigma_{нев},$$

то может быть сделан вывод о ненадежности учетных данных.

Причинами невязки РВБ может быть недостаточная точность учета стока в речных гидростворах ($Q_{в}$, $Q_{н}$, $Q_{бп}$), неполнота и

ненадежность данных о естественных потерях и поступлениях воды, в том числе подземным путем, неполнота и ненадежность сведений о водозаборах и сбросах воды ($Q_{вз}$ и $Q_{с}$).

Вывод о ненадежности данных об использовании водных ресурсов может быть сделан лишь при условии, что измерения расходов воды и подсчет стока в ограничивающих гидростворах и на боковых притоках проводятся с достаточной точностью, т. е. в соответствии с требованиями действующих Наставлений и на оптимальной основе.

Данные ГУВ принимаются для дальнейшего обобщения лишь в том случае, когда значение $Q_{нев}$ лежит в пределах доверительного интервала погрешности его расчета. При недостаточной точности данных должны быть приняты меры по устранению нарушений правил учета заборов и сбросов воды.

РВБ в первую очередь составляются для участков лимитированного водопользования (ЛВП). Участками ЛВП называются участки рек, на протяжении которых наблюдается недостаток водных ресурсов или имеют место ограничения в использовании вод, вызванные хозяйственной деятельностью, в продолжение всего года или хотя бы в отдельные лимитирующие периоды.

8.3. Государственный учет вод и их использования по качественным показателям

8.3.1. Принципы нормирования качества воды

Качество воды — это совокупность ее свойств, определяющихся составом и количеством растворенных и взвешенных веществ, биомассы и микроорганизмов, а также содержанием тепла.

Требования, предъявляемые к качеству воды, могут быть весьма разнообразными в зависимости от ее использования. Так, при питьевом водоснабжении в первую очередь должны быть учтены вкусовые и санитарные свойства воды, обусловленные ее химическим и биологическим составом. Соленость и температура воды, а также насыщенность кислородом и другими газами оказывают решающее влияние на рыбное хозяйство. Использование воды с повышенным количеством растворенных минеральных веществ (соли натрия, кальция, магния и т. п.) может привести к засолению орошаемых земель, а наличие в воде агрессивных химических элементов и соединений — ускорить процессы разрушения бетонных и металлических конструкций гидротехнических сооружений.

Даже из этого небольшого числа примеров ясно, что качество воды не может быть оценено как хорошее или плохое, если при этом не указывать, для какой цели вода предназначена. Поэтому на практике обычно прибегают к нормированию качества воды для разных водопользователей. В настоящее время общесоюзные нормы качества воды разработаны и утверждены для водных объектов санитарно-бытового и рыбохозяйственного назначения.

В основу нормирования положен принцип ограничения водопользования по общесанитарному, санитарно-токсикологическому или органолептическому лимитирующему показателю вредности (ЛПВ), каждому из которых соответствует определенное относительное содержание в воде специфических вредных веществ.

Оценка качества воды и степени загрязнения воды по тому или иному (j -му) ЛПВ производится с помощью гидрохимического критерия качества $K_{\text{лпв}}$, учитывающего фактическое присутствие в воде вредных веществ, принадлежащих к данной (j -й) группе ЛПВ. Расчет критерия производится по формуле

$$K_{\text{лпв}j} = \sum_{i=1}^N (S_i/\text{ПДК}_i), \quad (8.10)$$

где S_i — концентрация одного i -го вещества в воде, принадлежащего к данной (i -й) группе ЛПВ; ПДК_i — предельно допустимая концентрация i -го вещества, установленная для данного вида водопользования; N — общее количество веществ данной (i -й) группы ЛПВ, зафиксированных в воде.

Использование воды считается не ограниченным по j -му ЛПВ, если $K_{\text{лпв}j} < 1$; и, наоборот, водный объект или его отдельные участки относятся к загрязненным или лимитированным по качественным показателям, если $K_{\text{лпв}j} > 1$.

Гидрохимические методы являются в настоящее время основным средством оценок степени загрязнения водных объектов. Наряду с ними получают развитие гидробиологические принципы нормирования качества вод, основанные на биотестировании и оценках экологического состояния водных объектов¹.

При биотестировании показателем степени токсичности воды является выживаемость в пробах воды различных тест-объектов, в качестве которых обычно выступают низшие внутриводные организмы (дафнии, прудовики, гупии).

В основе экологических методов лежит представление о водных объектах как о замкнутых системах, физико-химические условия в которых отличаются относительной устойчивостью и тесно связаны с сообществом населяющих их животных, микроорганизмов и растительности (биоценозом). В связи с этим изменения физических и химических свойств воды неизбежно приводят к тем или иным нарушениям биоценоза, фиксируя которые можно оценить совокупный эффект воздействия на качество воды загрязняющих веществ.

Процессам загрязнения в реках и водоемах противостоят процессы *самоочищения*, под которыми понимают совокупность гидродинамических, физических, химических и биологических процессов, приводящих к уменьшению концентрации загрязняющих веществ в воде, а при полном самоочищении — к восстановлению естественного качества воды. В реках и проточных водоемах решающую

¹ Экология — наука о взаимоотношениях и процессах, связывающих живые организмы с физико-химической средой их существования.

роль в самоочищении играет гидродинамический фактор — разбавление сточных вод под влиянием турбулентного перемешивания. В непроточных и малопроточных водоемах существенное значение приобретают химические и биологические превращения и распад веществ.

Наблюдения за качеством и контроль за загрязнением поверхностных вод в нашей стране осуществляет Общегосударственная служба наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК) путем проведения стандартных и специальных наблюдений за физическими, химическими, бактериологическими и биологическими свойствами воды.

8.3.2. Пункты и программы гидрохимических наблюдений

В зависимости от сложности и объема программы наблюдений, количества определяемых ингредиентов и показателей качества воды стационарные пункты наблюдений ОГСНК подразделяются на четыре категории.

Наименьший объем работ выполняется в пунктах наблюдений за естественным составом природных вод (четвертая категория), располагающихся на водных объектах, еще не подвергшихся загрязнению. Наблюдения здесь производится по так называемой обязательной программе, которая наряду с визуальными оценками состояния объекта предусматривает определение следующих характеристик: расход (уровень) воды, температура, прозрачность, цветность, запах, содержание кислорода, взвешенных веществ, главных ионов, биогенных веществ, нефтепродуктов, летучих фенолов, пестицидов, соединений тяжелых металлов и рН, Eh, ХПК, БПК.

Наблюдения приурочиваются к основным фазам гидрологического режима и обычно производятся на реках 6—7 раз, а на озерах 4—5 раз в год.

Гидрохимические пункты более высоких — первой, второй и третьей — категорий организуются для контроля за загрязнением водных объектов. Состав, частота и периодичность наблюдений для этих пунктов уточняются в зависимости от степени существующего загрязнения водного объекта, а также от его водохозяйственной, рыбохозяйственной, культурно-бытовой и природно-ландшафтной значимости.

Пункты гидрохимических наблюдений следует совмещать с существующими гидрологическими постами: на реках с гидрометрическими створами, а на озерах и водохранилищах — с рейдовыми вертикалями и гидрологическими разрезами. При отсутствии такой возможности при каждом цикле наблюдений за качеством и загрязнением воды необходимо параллельно производить требуемый объем гидрометрических работ.

В пунктах гидрохимических наблюдений производится отбор проб воды и ее последующий химический анализ. Отбор проб воды, выполнение некоторых определений по программе «Анализ

первого дня» и гидрометрические работы осуществляются наблюдателями гидрологических постов и персоналом гидрологических (озерных) станций.

Полный химический анализ проб воды и обработка полученных данных выполняется гидрохимическими лабораториями ГМО.

Выполнение необходимого комплекса гидрохимических работ в районах, где зафиксированы особо опасные загрязнения, осуществляется передвижными гидрохимическими бригадами.

На речных пунктах ОГСНК отбор проб воды приурочивается к постоянным створам. Пункты четвертой категории оборудуются одним наблюдательным створом. В пунктах первой—третьей категорий, как правило, назначаются два створа — один (фоновый) выше источника загрязнения, другой (контрольный) ниже источника загрязнения в зоне, где происходит достаточно полное перемешивание сточных и речных вод. При наличии группы источников загрязнения верхний створ располагается выше первого источника загрязнения, а нижний — ниже последнего. В этом случае при необходимости выявления доли загрязнения, вносимой отдельными источниками, в промежутках между двумя вышеуказанными створами могут быть назначены дополнительные контрольные створы.

На озерах и водохранилищах с ненарушенным естественным качеством воды отбор проб приурочивается к рейдовым вертикалям. На водохранилищах речного типа при условии достаточной однородности химического состава назначается не менее трех наблюдательных пунктов, размещаемых по продольной оси водохранилища в верхней, центральной и нижней его части. На водоемах озеровидной формы назначается не менее двух пунктов: один в центральной части водоема, другой — вблизи истока из озера или в плотинной части водохранилища. На водоемах сложной конфигурации и при значительном различии химического состава воды пункты постоянных наблюдений располагаются на каждом из таких участков.

Для контроля за загрязнением на водохранилищах речного типа в зоне наиболее значительных сбросов сточных вод организуется не менее трех пунктов наблюдений: один — примерно в 1 км выше сброса, второй — в 0,5 км ниже источника загрязнения, а третий — на границе зоны загрязнения. На озеровидных водоемах наблюдения производятся в шести пунктах, которые располагаются по трем радиальным створам, расходящимся от источника загрязнения. Первый пункт на каждом створе располагается на расстоянии 0,5 км от места сброса стоков, второй — на границе зоны загрязнения.

Количество точек отбора проб на створе и их распределение по ширине и глубине потока назначают исходя из характера распределения загрязняющих веществ по живому сечению в каждом конкретном случае так, чтобы достаточно точно оценить их среднее значение в сечении. Так, если в пунктах наблюдений четвертой категории, а также в фоновых створах пунктов первой, второй и третьей категории обычно можно ограничиться одной пробой, отбираемой в проточной зоне с поверхности потока, то в створах,

расположенных до зоны достаточного перемешивания сточных и речных вод, отбор проб необходимо производить по крайней мере на трех вертикалях, с трех горизонтов на каждой (поверхность, 0,5 м и 0,5 м ото дна).

8.3.3. Наблюдения в гидрохимических пунктах

В состав наблюдений, выполняемых в гидрохимических пунктах, входит: а) визуальная оценка состояния водного объекта в районе наблюдений; б) определение температуры, цветности и прозрачности воды; в) отбор проб воды на химический анализ; г) измерение расхода (уровня) воды. При выполнении специальных наблюдений дополнительно могут отбираться пробы донных отложений для последующего определения их загрязнения.

Визуальные наблюдения проводятся с целью выявления необычных для данного водного объекта явлений, прямо или косвенно свидетельствующих о появлении в воде загрязняющих веществ или изменения их концентрации. При этом отмечается: наличие и характер пленки на поверхности воды и на береговой полосе, плавающих примесей и пены, появление несвойственных данному объекту мутности, окраски, запаха и цветения воды, выделение пузырьков донных газов, гибель рыбы, лягушек, растений и т. п.

Прозрачность воды, под которой понимается свойство воды пропускать световые лучи, обычно оценивается по предельной глубине видимости белого диска, опущенного в воду. Диск представляет собой металлический круг диаметром 30 см, окрашенный в белый матовый цвет. В центре диска вставлена трубка, через которую пропущен размеченный на метры и дециметры линь. К основанию диска крепится металлический груз, препятствующий сносу диска течением.

Определение прозрачности воды производится с теневой стороны судна. Среднее из значений глубин, при которых наблюдается исчезновение и появление видимости диска соответственно при его погружении и подъеме, характеризует относительную прозрачность воды.

Цветность воды определяется с помощью специальной шкалы цветности, представляющей собой набор из 22 стеклянных пробирок, заполненных цветными растворами разных оттенков от чисто-синего до коричневого. Пробирки укреплены по 11 штук в рамках, которые вставлены в двухстворчатый футляр.

Цветность воды определяется непосредственно после измерения прозрачности. Для этого диск опускается на половину глубины, соответствующей прозрачности, и на его фоне цвет воды сравнивается с цветом воды в пробирках. Найденная таким образом цветность воды обозначается номером соответствующей пробирки.

Отбор проб воды на химический анализ в поверхностном слое производится обычно чистым эмалированным ведром; а с более глубоких горизонтов специальными приборами — батометрами.

Обычно для этой цели используются батометры мгновенного наполнения, представляющие собой цилиндрические сосуды различной емкости, снабженные клапанами и крышками, которые закрываются под водой на заданной глубине. На рис. 8.3 показан батометр международного образца, который относится к группе батометров опрокидывающегося типа. Он представляет собой металлический цилиндр емкостью 1 л, закрепленный на горизонтальной оси внутри прямоугольной рамы. В основаниях цилиндра расположены крышки, соединенные между собой пружиной, проходящей внутри цилиндра. Кроме того, батометр оборудован сливным краном и воздушным вентилем, а вдоль его образующей располагаются гильзы для двух глубоководных термометров.

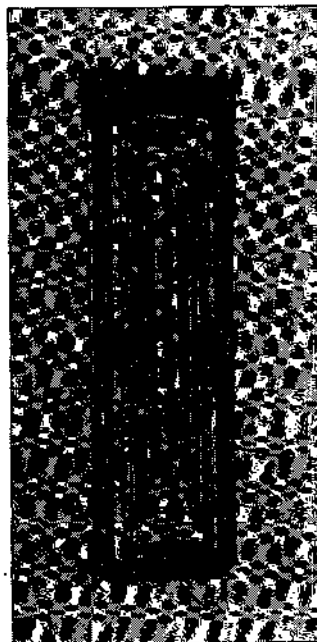


Рис. 8.3. Батометр международного образца для отбора проб воды на химический анализ.

1 — спусковое устройство, 2 — задвижка зацепления, 3 — гильзы для глубоководных термометров, 4 — спиральная пружина, 5 — рычаг, 6 — стержни, 7 — неподвижный штифт, 8 — цилиндрическая емкость, 9 — крышки цилиндра, 10 — зажим стального каната.

В последние годы проводятся работы по автоматизации наблюдений на сети ОГСНК. Разработана 2 автоматическая станция контроля качества поверхностных вод (АКСПВ), позволяющая вести непрерывные или дискретные (с заданным интервалом времени) измерения уровня и температуры воды, растворенного кислорода и общей минерализации (электропроводности) воды.

8.4. Государственный водный кадастр

8.4.1. Структура Государственного водного кадастра

Государственный водный кадастр (ГВК) представляет собой систематизированный постоянно пополняемый и уточняемый свод сведений о водных объектах, составляющих единый государственный водный фонд, о режиме, качестве и использовании вод. Ведение ГВК по единой для СССР системе началось в 1978 г. в соответствии с Постановлением Совета Министров СССР «О порядке ведения Государственного водного кадастра». Данные ГВК предназначены для информационного обеспечения:

- текущего и перспективного использования вод и проведения водоохраных мероприятий;
- размещения производительных сил на территории страны;
- составления схем комплексного использования и охраны вод и водохозяйственных балансов;
- гидротехнического, водохозяйственного и промышленного проектирования;
- осуществления контроля и прогнозирования изменения водности рек и качества вод.

ГВК состоит из следующих разделов и подразделов:

1. Поверхностные воды.
 - 1.1. Реки и каналы.
 - 1.2. Озера и водохранилища.
 - 1.3. Качество вод суши.
 - 1.4. Селевые потоки.
 - 1.5. Ледники.
 - 1.6. Моря и морские устья рек.
2. Подземные воды.
3. Использование вод.

Данные ГВК систематизируются и издаются по территории союзных республик, бассейнов рек и озер, а по разделу подземных вод, кроме того, по гидрогеологическим регионам.

Ведение ГВК возложено на Госкомгидромет СССР совместно с Министерством геологии СССР (по разделу подземных вод) и Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР (по разделу использования вод).

Данные ГВК подразделяются на: архивные материалы (книжки наблюдений, таблицы и др.); долговременные технические носители информации (микрофильмы, магнитные ленты); публикуемые материалы (каталоги водных и водохозяйственных объектов, ежегодные и многолетние данные и др.).

Для повышения оперативности обеспечения народного хозяйства данными о водных ресурсах и их использовании предусмотрено создание автоматизированной информационной системы (АИС ГВК). Ее главным элементом будет служить специализированный банк данных «Государственный водный кадастр», ориентированный на оперативное удовлетворение запросов потребителей информации о водных ресурсах и их использовании. На первом этапе информация будет выдаваться по письменным запросам на специальных бланках. В будущем основные потребители могут получать прямой доступ в ЭВМ банков данных с помощью прямых телетайпных или телефонных линий связи и выносных пультов управления ЭВМ (терминалов).

8.4.2. Характеристика изданий ГВК и организация контроля данных наблюдений

Каждый из разделов «Поверхностные воды», «Подземные воды» и «Использование вод» включает три вида (серии) изданий: каталожные, ежегодные и многолетние данные.

Признано целесообразным, начиная с 1985 г. объединить два последних вида в единое издание — ежегодно-многолетние данные.

К а т а л о ж н ы е д а н н ы е представлены каталогами (перечнями) объектов наблюдений и водопользователей и являются разовыми изданиями.

Раздел «Поверхностные воды» включает каталоги: а) рек, каналов, озер и водохранилищ; б) селевых бассейнов и очагов на территории СССР; в) морей и морских устьев рек; г) ледников. Переиздание каталогов и выпуск дополнений к ним осуществляется по мере необходимости.

Е ж е г о д н ы е д а н н ы е представляют собой систематизированные и обобщенные по установленным формам результаты регулярных наблюдений за режимом, ресурсами, качеством и использованием поверхностных и подземных вод за каждый календарный год.

Их публикация производится систематически с задержкой относительно периода наблюдений не более одного года.

В разделе «Поверхностные воды» серия «Ежегодных данных» представлена четырьмя видами отдельных изданий, посвященных: а) режиму и ресурсам поверхностных вод суши; б) качеству поверхностных вод суши; в) селевым потокам; г) режиму и качеству вод морей и морских устьев рек.

Массив «Ежегодных данных» по территории нашей страны публикуется в виде отдельных книг. Каждой из них присваивается номер тома и выпуска (выпусков), установленные в соответствии с принятой номенклатурой для района (бассейна), где находятся водные объекты, сведения по которым приводятся в данной книге.

Выпуск в свою очередь может состоять из отдельных книг соответственно его первой и второй частям: «Реки и каналы» и «Озера и водохранилища».

В первой части «Реки и каналы» публикуются сведения об уровне воды, стоке воды, заборах и сбросах воды, русловых водных балансах, мутности воды, стоке наносов, их гранулометрическом составе и плотности, температуре воды, толщине льда и высоте снега на льду, ледовых явлениях на реках и каналах. Вторая часть содержит аналогичные сведения по озерам и водохранилищам.

Ежегодные данные содержат и некоторые обобщенные сведения об использовании вод, рассчитанные характеристики водных ресурсов и водных балансов.

Серия «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» является продолжением издававшихся до 1978 г. «Гидрологических ежегодников» и «Материалов наблюдений на озерах и водохранилищах».

Подготовка материалов наблюдений к публикации «Ежегодных данных» осуществляется в настоящее время частично с использованием ручной обработки на гидрологических станциях (гидрометобсерваториях), а частично — в вычислительных центрах на

ЭВМ. По таким элементам, например, как уровень, температура воды, толщина льда и мутность воды, машинная обработка обеспечивает вычисление средних (за сутки, декаду, месяц, год) и выборку экстремальных значений. С этой целью на гидрологических станциях ежемесячно производят перфорацию соответствующих данных и отправляют перфоленты в обслуживающий данную станцию вычислительный центр (отправка перфолент измеренных расходов воды производится один раз в квартал). По сравнению с «Гидрологическим ежегодником» прежних лет форма и содержание некоторых таблиц «Ежегодных данных» в той или иной степени изменены. В первую очередь это касается тех из них, для составления которых используются результаты автоматизированной обработки данных на ЭВМ. По мере дальнейшего развития и совершенствования этой методики возможна корректировка и других таблиц.

Многолетние данные публикуются одновременно с ежегодными и содержат материалы о многолетних характеристиках режима поверхностных и подземных вод.

В структуре Государственного водного кадастра предусмотрены также обобщающие издания о ресурсах поверхностных и подземных вод СССР, их использовании и качестве, осуществляемые ежегодно и, кроме того, применительно к срокам водохозяйственного планирования.

Контроль данных осуществляется на всех этапах подготовки изданий ГВК. Его задача состоит в выявлении и устранении искажений информации, промахов наблюдений и значительных систематических погрешностей. Эффективность контроля обеспечивается оптимальным сочетанием новых (машинных) и традиционных (ручных) методов.

Машинный контроль принято подразделять на синтаксический (контроль наличия требуемых данных, правильности формы и структуры записи) и содержательный (смысловой), т. е. контроль достоверности информации.

На первом этапе автоматизированной обработки данных основным остается ручной контроль, но его аспекты существенно изменяются. Если раньше этот контроль осуществлялся главным образом по истечении года при составлении ежегодников, то в новых условиях центр тяжести переносится на первичный контроль качества данных наблюдений и перфорации до отправки перфолент в вычислительный центр, производящий механизированную обработку.

Пропущенные на этой стадии недостатки не всегда могут быть устранены на последующих стадиях, так как для этого потребовалось бы повторение всего цикла обработки данных с перезаписью годовых магнитофильмов и перепечаткой таблиц.

Все таблицы, полученные на ЭВМ, подвергаются критическому просмотру специалистами — составителями ежегодника. Средние месячные и годовые значения стока увязываются по длине реки и в гидрографических узлах. По рекам, интенсивно используемым

в народном хозяйстве, анализ данных производится на основе русловых водных балансов.

Ведение ГВК регламентировано сериями Методических указаний, которые разделяются на две группы:

— основные положения о порядке ведения ГВК, определяющие состав данных и порядок обмена информацией между ведомствами, структуру публикуемой части, общую классификацию и кодирование информации и т. п.;

— методические указания, регламентирующие ведение ГВК по разделам «Поверхностные воды», «Подземные воды» и «Использование вод».

Ниже остановимся на некоторых вопросах составления «Ежегодных данных», опирающихся непосредственно на результаты наблюдений на гидрологических постах.

8.5. Ежегодные данные: «Реки и каналы»

8.5.1. Общая часть и сведения о реках, каналах и гидрографических постах

В общей части «Ежегодных данных» (в дальнейшем для краткости употребляется термин «ежегодник») важнейшими сведениями являются: а) номенклатура издания «Ежегодных данных» (карта-схема территории СССР с нанесенными на ней границами районов (бассейнов) с указанием соответствующего каждому из них номеру тома и выпуска); б) алфавитный список рек, каналов, водохранилищ и озер, сведения по которым помещены в данной книге; схема расположения гидрологических постов, сведения по которым публикуются в данном выпуске.

Таблица 1.1. «Список постов на реках каналах», в которой указываются номера и местоположение постов, название и код водного объекта и данные, характеризующие состав получаемой информации, место ее хранения и формы публикации.

За списком следует «Описание постов и дополнения к ранее опубликованным описаниям». Полное описание всех постов публикуется один раз в пять лет в изданиях ежегодников за годы, кратные пяти. В изданиях за промежуточные годы полные описания приводятся только для вновь открытых постов, а для действующих даются при необходимости лишь дополнения к описаниям, содержащие сведения об изменениях в оборудовании поста или в условиях наблюдений, происшедших в текущем году.

В «Обзоре режима рек» содержатся краткие сведения об особенностях гидрометеорологических условий года. Обзор дает ответ на вопрос, каким по водности (средним, маловодным или многоводным) был данный год для рек, сведения о которых помещены в настоящем выпуске ежегодника.

Разделение гидрологического года на сезоны (для рек Северного Кавказа, Средней Азии и бассейнов Черного и Азовского

морей за гидрологический год принимается период с 1 ноября по 31 октября, а для остальной территории нашей страны — с 1 октября по 30 сентября). При выделении гидрологических сезонов следует придерживаться установившихся понятий, таких, например, как «предледоставный сезон», «ледостав», «зимняя межень», «весеннее половодье», «сезон летних паводков», «летняя межень» и т. п.

8.5.2. Сведения об уровнях и стоке воды

Сведения об уровнях и стоке воды представлены в ежегоднике следующими таблицами: «Уровень воды», «Расход воды», «Оценка надежности подсчета стока», «Расходы и уровни воды различной обеспеченности и продолжительность их стояния в течение года и гидрологических сезонов», «Заборы и сбросы воды по длине рек», «Русловые водные балансы» и «Ресурсы поверхностных вод».

Таблица 1.2 «Уровень воды» может составляться по полной или сокращенной форме. Таблица, составленная по полной форме, содержит данные о ежедневных (средних суточных) уровнях воды (ЕУВ) за год с указанием их средних, высших и низших значений за каждый месяц. Сведения о состоянии водного объекта отмечаются в таблице условными знаками, проставляемыми справа от значения уровня воды за соответствующую дату. Условные обозначения состояний объектов приведены в главе 1.

Для удобства потребителей информации таблица ЕУВ содержит сведения о характерных (среднем, высшем и низшем) уровнях воды за год и многолетний период с указанием дат их наступления. Сведения о низшем уровне приводятся отдельно для зимнего периода и летне-осенней межени, причем за начало зимнего периода принимается момент появления устойчивых ледяных образований в конце предыдущего года.

В таблице в сокращенной форме вместо ежедневных уровней приводятся их средние декадные значения. Не включаются в таблицу и сведения о состоянии водного объекта. Эта форма используется обычно для постов с незначительными изменениями уровня воды, а также в тех случаях, когда сведения об уровнях не представляют самостоятельного интереса.

Уровень воды приводится в сантиметрах над нулем поста, отметка которого выписывается над таблицей рядом с названием реки и поста.

В пояснении к табл. 1.2 отмечаются особенности производства наблюдений, повлекшие за собой снижение точности.

Таблица 1.3 «Расход воды» по форме совпадает с табл. 1.2 при замене в соответствующих графах значений уровней значениями расходов воды. Однако сведения о состоянии водного объекта здесь не приводятся.

Для вычисления ежедневных расходов воды применяются методы, описанные в главе 6. Часть из них уже реализована на ЭВМ, применение которых принимает все более возрастающие масштабы.

Средние декадные и средние месячные расходы воды вычисляются как среднее арифметическое из ЕРВ соответственно за декаду и месяц. Дни с отсутствием стока при расчете его средних арифметических значений учитываются наравне с другими. Если в течение декады в отдельные дни наблюдения не были произведены, то средние декадные расходы не вычисляются, соответственно не должны вычисляться и средние месячные расходы воды.

Таблица 1.3 составляется по полной или сокращенной форме для всех пунктов учета стока, включая ГЭС и гидроузлы. Полный вариант таблицы содержит ежедневные расходы воды в м³/с. В таблицах сокращенных форм помещаются либо средние декадные, месячные и годовые расходы воды, либо только их средние значения за месяцы и год. Сокращенные таблицы используются обычно для обобщения данных по пересыхающим, перемерзающим рекам или малым рекам грунтового питания с устойчивыми расходами воды, а также для постов, по которым средние суточные расходы воды могут быть оценены только грубо приближенно.

В пояснении к таблице отмечаются имевшие место в данном году изменения условий формирования стока в связи с естественными процессами или хозяйственной деятельностью, а также даются пояснения о полноте и точности учета стока (выявленных при гидрологическом анализе невязок стока по длине реки, случаи неучтенного стока на пойме и т. п.).

Таблица 1.4. «Оценка точности подсчета стока воды» — один из новых видов информации. Она содержит перечень (в хронологическом порядке) методов учета стока с указанием соответствующих периодов их использования. Надежность данных о стоке характеризуется количеством измеренных расходов воды и степенью освещенности ими КР в процентах от амплитуды колебания уровней.

Далее следует ряд таблиц, содержащих статистические и балансовые характеристики водных ресурсов, а также общие данные об их использовании.

Таблица 1.5. «Расходы и уровни воды различной обеспеченности и продолжительности их стояния в течение года и гидрологических сезонов» рассчитана на получение только автоматизированным способом.

В таблице приводятся сведения о средних суточных расходах и уровнях воды обеспеченностью 1, 3, 10, 25, 50, 80, 97, 100 %, а также продолжительности их стояния в течение года и отдельных фаз гидрологического режима. В зависимости от хозяйственного использования рек возможен выбор и других расчетных периодов (навигационный, вегетационный и др.).

Таблица 1.6. «Заборы и сбросы воды по длине реки» содержит сведения о суммарных заборах и сбросах воды для участков рек между створами учета стока, а также в целом для части бассейна, замыкаемой данным створом (постом). И в том и в другом случае указывается число водозаборных и сбросных каналов. Суммарные объемы заборов и сбросов приводятся помесечно и за год.

Исходные данные для составления таблицы передаются гидрологическим станциям (гидрометобсерваториям) органами Минводхоза СССР по истечение года.

Таблица 1.7. «Русловые водные балансы» составляется для участков рек с интенсивным забором воды и напряженным водохозяйственным балансом в зависимости от наличия данных сведения об элементах РВБ приводятся за каждый месяц или только за год в целом.

Таблица 1.8. «Ресурсы поверхностных вод» составляется для гидрометрических створов, замыкающих речные бассейны или значительные их части на реках с интенсивным хозяйственным использованием. В связи с этим в таблице приводятся сведения об изменениях водных ресурсов и для сравнения указывается значение естественного (неискаженного) среднего многолетнего стока за период, когда хозяйственная деятельность в бассейне реки не оказывала на сток существенного влияния. При отсутствии таких данных его оценка производится приблизительно по карте стока или по измерениям на вышерасположенном гидростворе с учетом боковой приточности.

Значение восстановленного годового стока определяется суммированием объемов воды, соответствующих измеренному годовому стоку и общему изменению водных ресурсов в бассейне.

В общих и частных пояснениях к табл. 1.8. могут быть помещены сведения о методике определения среднего годового стока за многолетний период, о достаточности исходных данных, о причинах невязок водозаборов и сбросов воды, надежности значения восстановленного стока.

8.5.3. Сведения о стоке и составе наносов

В состав ежегодника входят три таблицы, содержащие характеристики наносов.

Таблица 1.9. «Мутность воды» и Таблица 1.10 «Расходы взвешенных и влекомых наносов» составляются для всех постов, где проводятся систематические наблюдения за мутностью. В зависимости от режима стока воды она может составляться по двум разным формам.

Для рек, где сток воды имеет место более пяти месяцев в году, помещаются сведения о средних декадных и месячных значениях мутности и расхода взвешенных и влекомых наносов (форма А). Кроме того, здесь приводятся наибольшие и наименьшие значения за месяц и год (для последних указываются даты их наблюдения), а также число дней в году с мутностью более 50, 100, 200, 500, 1000, 5000, 10 000, 20 000 и 50 000 г/м³.

Форма Б — таблицы ежедневных мутностей воды и расходов взвешенных наносов составляется для рек, на которых сток воды был менее пяти месяцев в году. Кроме ежедневных (средних суточных) значений, приводятся средние декадные, средние месячные и экстремальные за каждый месяц значения. Даты, в которые мут-

ность достигала наибольшего или наименьшего значений, отмечаются знаком-звездочкой.

Средняя суточная мутность определяется по графикам или уравнениям связи с единичной мутностью, как указывалось в главе 5. По данным о средней суточной мутности вычисляются как средние арифметические: средняя декадная — из суточных данных и средняя месячная — из средних декадных значений. Каждая из этих операций выполняется только в том случае, если не было пропусков в наблюдениях.

После обработки месячного массива данных определяются экстремальные мутности воды за год и даты их наблюдения.

Ежедневные расходы взвешенных наносов в кг/с вычисляются по формуле

$$P_S = 10^{-3} S Q,$$

где S ежедневная мутность, г/м³; Q — ежедневные расходы воды, м³/с.

Соответственно вычисляются средние декадные и средние месячные расходы как среднее арифметическое из ежедневных расходов взвешенных наносов. Средний годовой сток взвешенных наносов вычисляется как среднее арифметическое из средних месячных значений (при условии что последние были определены для всех месяцев).

Если в соответствии с программой наблюдений измерение мутности (из-за ее малости) в межень не выполнялось, то вычисление стока взвешенных наносов производится по его средней многолетней доле D (%) от годового количества

$$P_{S\text{меж}} = \sum P_{S_{\text{ср. м. меж}}} = \frac{D}{100 - D} \sum_{i=1}^n P_{S_i, \text{ср. мес. изм.}}$$

где n — число месяцев, в которые производились измерения мутности.

Тот же порядок определения средних значений расходов взвешенных наносов сохраняется и в том случае, если они определяются непосредственно по их связи с расходами воды.

В пояснении к таблицам приводятся сведения об имевших место отклонениях от принятой методики измерений и других причинах пониженной точности данных (нарушениях естественного хода мутности в результате хозяйственной деятельности и т. п.).

Таблица 1.11. «Гранулометрический состав и плотность наносов» независимо от категории наносов (взвешенные, влекомые, донные) составляется по единой форме и содержит: номер поста, название водного объекта и поста; номер расхода наносов, при измерении которого отобраны пробы для определения крупности наносов; дата отбора проб; место отбора проб (номер створа); способ отбора проб; процентное содержание (по массе) различных фракций наносов; диаметр наиболее крупной частицы; диаметр частицы 50-ной обеспеченности; метод анализа; процентное

содержание (по массе) органических веществ в наносах; плотность частиц донных наносов; плотность смеси донных наносов в естественном залегании; объем пор в процентах.

8.5.4. Сведения о ледотермическом режиме

Характеристики ледотермического режима приводятся в таблицах «Температуры воды», «Толщина льда и высота снега на льду», «Ледовые явления на участке поста».

Таблицы 1.12 «Температуры воды» исходной информацией для заполнения служат значения температуры воды, записанные в книжке КГ-1М(н).

Средняя суточная и средняя декадная температура воды вычисляется с погрешностью $0,1^\circ$ как среднее арифметическое из n срочных или средних суточных значений

$$T_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n T_i / n.$$

Если в один из сроков было обнаружено, что река пересохла, то средняя суточная температура воды не вычисляется и делается отметка «прсх». В тех случаях, когда средняя суточная температура не вычисляется в течение декады более чем за двое суток, средняя декадная температура не определяется, что отмечается знаком тире. Если среднее значение $T_{\text{ср}}$ за декаду оказалось $0,5^\circ$ и меньше, средняя декадная температура принимается равной 0°C .

При наличии данных о $T_{\text{ср}}$ за все три декады вычисляется средняя месячная температура

$$T_{\text{ср. м}} = \sum T_{\text{ср. д}} / 3.$$

При отсутствии данных о $T_{\text{ср. д}}$ за какую-либо декаду или состояния «прсх» средняя месячная температура воды не вычисляется.

Кроме средних декадных, средних месячных значений, табл. 1.12 содержит сведения о наибольших значениях температуры воды, а также о весенней и осенней датах ее перехода через 0 ; 2 и 10°C . Наибольшие значения температуры воды за год выбираются из всех измеренных ее значений, срочных и дополнительных. Даты перехода температуры через 0 ; 2 и 10°C отмечаются только в случае устойчивого (продолжительностью не менее 20 сут) перехода ее средних суточных значений через указанные пределы.

Таблица 1.13. «Толщина льда и высота снега на льду» составляется за зиму гидрологического года и содержит значения указанных в названии таблицы характеристик за 5, 10, 15, 20, 25-го числа и последний день каждого месяца. При наличии на середине реки двух пунктов наблюдений на плесе и перекате данные приводятся по каждому из них отдельно. В таблице помещаются также сведения о наибольшей толщине льда за год и соответствующей ей дате (датах).

Таблица 1.14 «Ледовые явления на участке поста» составляется за зиму гидрологического года и содержит сведения о сро-

ках наступления ледовых явлений и соответствующих им средних суточных уровнях, а также о продолжительности ледовых фаз. Таблица имеет две формы: форму А — для рек с устойчивым ледоставом; форму Б — для рек с неустойчивым ледоставом и продолжительным периодом шугохода.

При заполнении таблицы формы А за дату появления ледовых явлений принимается начало периода с устойчивыми заберегами, шугоходом или ледоходом, сменяющимся устойчивым (не менее 20 дней) ледоставом. Продолжительность периодов с ледовыми явлениями и ледостава определяется по разности дат их наступления и прекращения. В отличие от этого, при заполнении таблицы формы Б за начало ледовых явлений принимается первая дата их появления (независимо от устойчивости их в дальнейшем), а за окончание — последний день их существования. Длительность существования ледовых явлений и ледостава подсчитывается не по разности указанных дат, а по фактическому числу дней, в которые эти явления наблюдались.

8.5.5. Обобщение материалов стандартных наблюдений

В «Ежегодные данные» не включаются ранее публиковавшиеся в ежегодниках таблицы измеренных расходов воды и наносов.

Книжки измеренных расходов воды и наносов обрабатываются вручную и перфорируются. После поквартального машинного контроля в вычислительном центре на гидрологических станциях (гидрометобсерваториях) «Принятые данные» измеренных расходов воды и наносов переносятся в таблицы «Измеренные расходы воды (ИРВ)» и «Измеренные расходы наносов (ИРН)».

Таблица ИРВ содержит для каждого измеренного расхода воды следующие данные: номер расхода, дата измерения, номер створа, состояние реки на участке гироствора, уровень воды над нулем основного поста и поста в гидростворе, расход воды, площадь водного сечения, средняя и наибольшая скорость течения, ширина реки, средняя и наибольшая глубина, уклон водной поверхности, способ измерения, метод вычисления.

Таблица ИРН содержит следующие сведения: номера измеренного расхода наносов и соответствующего ему расхода воды, дата измерения, номер гидроствора, состояние реки, уровень воды, расход взвешенных наносов, расход воды, средняя мутность воды, способ измерения расхода взвешенных наносов, метод вычисления расхода взвешенных наносов, расход влекомых наносов, метод вычисления расхода влекомых наносов.

По истечении года вычислительные центры формируют годовые массивы измеренных расходов на магнитных лентах для хранения в механизированных архивах и банках данных, одновременно высылая распечатки годовых таблиц ИРВ и ИРН на гидрологические станции. В дальнейшем один экземпляр каждой таблицы остается на гидрологической станции, а второй после сдачи «Ежегодных данных» в печать передается на хранение в отдел гидрометфонда соответствующего УГКС.

8.5.6. Гидрологический анализ сведений о стоке воды и наносов

Одной из форм текущего анализа наблюдений является комплексный график, описанный в главе 6, который позволяет установить взаимные соответствия в динамике элементов гидрологического и метеорологического режима, достаточность выполненного количества измерений и освещенных ими фаз.

Анализ результатов вычисления стока включает оценки: а) полноты учета стока в данном створе и б) достоверности средних месячных, средних годовых и экстремальных значений расходов воды и их внутригодового распределения. Основные приемы анализа: а) сопоставление гидрографов соседних постов, б) увязка стока по длине реки и в гидрографических узлах.

Для сопоставления гидрографы размещаются на чертеже сверху вниз в той же последовательности, в какой расположены гидрологические посты по течению реки (рис. 8.4). Графики колебаний расходов воды для

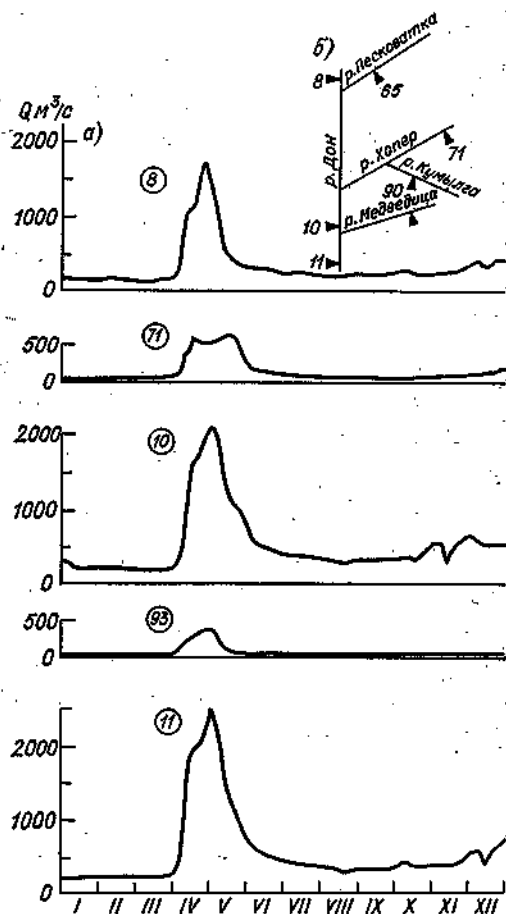


Рис. 8.4. Гидрографы стока (а) за 1980 г. и гидрографическая схема (б) участка р. Дона. Номера постов — в табл. 8.2.

всех постов вычерчиваются на одной общей оси времени и в одном масштабе. Взаимное несоответствие в гидрографах может быть обусловлено как особенностями режима, изъятиями и сбросами воды по длине рек, так и погрешностями измерения расходов воды и учета стока. Для установления причин этих несоответствий производится расчет РВБ и увязка стока по длине главной реки.

В табл. 8.2 А приведен пример расчета среднего годового РВБ для участка р. Дона от станицы Казанской до хут. Беляевского.

Таблица 8.2

Сопоставление и оценка надежности увязки годового стока на участке
и в гидрографическом узле среднего течения р. Дона за 1980 год

№ поста по ежегоднику	Элементы РВБ, река—пост	Расстояние от устья реки, км	Площадь водосбора (зеркала), тыс. км²	Средний годово- вой расход воды, м³/с	Модуль стока, л/(с·км²)	Средняя квад- ратическая погрешность, м³/с
А. Река Дон: участок ст-ца Казанская — хут. Хованский						
I. Приходная часть						
8	р. Дон — ст-ца Казан- ская	955	102,0	320	3,14	4,8
65	р. Песковатка — ст-ца Шумилинская	37	0,57	0,59	1,03	0,01
71	р. Хопер — хут. Бармин- ский	132	57,3	138	2,41	2,07
90	р. Кумылга — хут. Яр- ской	29	1,22	0,86	0,70	0,01
	Боковая приточность с неосвоенными изме- рениями площади водо- сбора	—	7908	6,8	0,86	1,36
	Суммарный приход Q_I			466		5,4
II. Расходная часть						
10	р. Дон — хут. Хован- ский	804	169,0	489	2,89	7,34
	Испарение с поверхно- сти зеркала (годовой слой 760 мм)	—	64,3	1,55	—	0,30
	Суммарный расход Q_{II}			491		7,4
	Остаточный член $Q_0 =$ $= Q_{II} - Q_I$			25,0		9,12
	Критериальное условие: увязка стока недоста- точно надежна			$Q_0 = 25 \text{ м}^3/\text{с} > 2\sigma_0 = 18 \text{ м}^3/\text{с}$		
Б. Гидрографический узел: р. Дон—хут. Хованский—хут. Беляевский и р. Медведица — ст-ца Арчадинская						
10	р. Дон — хут. Хован- ский	804	169,0	489	2,89	7,34
93	р. Медведица — ст-ца Арчадинская	66	33,7	54,1	1,61	0,81
11	р. Дон — хут. Беляев- ский	774	204,0	553	2,71	8,32
	Невязка стока	$\Delta Q = 553 - (489 + 54,1) = 10,0$			—	11,0
	Критериальное условие: увязка стока в гидро- графическом узле на- дежна			$\Delta Q = 10 \text{ м}^3/\text{с} < 2\sigma_n = 22 \text{ м}^3/\text{с}$		

Таблица 2.2. «Местоположение пунктов наблюдений на акваториях озер и водохранилищ». Помещенные в ней данные позволяют установить, где в открытой части водоема производились наблюдения, материалы которых включены в ежегодник. Приводятся сведения о плавучих станциях, автоматических радионизмерителях ветра (АРИВ), рейдовых вертикалях (рейд. верт.) и вертикалях гидрологических разрезов (верт.), термических профилях и других пунктах наблюдений. Их местоположение определяется относительно принятых ориентиров: населенных пунктов, гидротехнических сооружений, мысов, островов и устьев рек с указанием азимута и расстояния от пункта-ориентира до точки на акватории. Для достаточно крупных озер и водохранилищ приводятся схемы размещения пунктов наблюдений на побережье и акватории.

В «Обзоре режима озер и водохранилищ» дается общая характеристика гидрометеорологических условий за рассматриваемый год с указанием особенностей водного режима за отдельные сезоны. Сообщаются данные о термическом и ледовом режиме водоема на общем фоне температуры воздуха. Приводятся сведения о волнении, течениях и особо опасных или исключительно редких явлениях.

При рассмотрении особенностей отдельных элементов режима в качестве численных показателей используются, как правило, отклонения от среднего значения (нормы).

8.6.2. Сведения об уровнях воды

Таблица 2.3. «Уровень воды на постах». Таблица составляется в двух формах: полной — ежедневные (средние суточные) и характерные уровни воды (ЕУВ) и сокращенной — средние декадные, месячные и годовые уровни. Сокращенная форма используется только для постов на малых озерах с небольшими и плавными колебаниями уровня при годовой амплитуде не более 0,5 м, а также для постов в отдаленных районах.

В нижней части таблицы помещаются сведения о среднем и характерных уровнях за год, причем к характерным отнесены высший и низший уровни за календарный год, высший уровень весенне-летнего подъема и низший зимнего периода. Все характерные уровни определяются из срочных значений. Для водохранилищ, режим уровня которых характеризуется циклами наполнений и сбросов, кроме высшего и низшего уровней за календарный год, выбираются также уровни, соответствующие максимальному наполнению и наибольшей сброске.

В полной таблице условными знаками показывается состояние водного объекта, включаются, кроме сведений о ледовой обстановке, данные об искажении хода уровней, деформациях берега и других факторах. Сокращенные таблицы этих сведений не содержат.

Таблица 2.4. «Сведения об уровнях воды при нагонах и сгонах» составляются по материалам постов, на которых действуют

самописцы уровня воды или проводятся учащенные (ежечасные) наблюдения за уровнем и имеются надежные данные о ветре. При подготовке материалов все случаи нагонов (сгонов) группируются по следующим градациям подъема (спада) уровня: 10, 11—14, 15—19, 20—24 см и т. д. Для каждой градации указывается: а) число случаев сгонов (нагонов); б) дата наибольшего сгона (нагона); в) предельные отметки уровня при сгоне (нагоне) над нулем графика; г) дата наиболее высокого стояния уровня при нагонах (наиболее низкого при сгонах); д) продолжительность нагона (сгона); е) сведения о ветре, вызвавшем сгоны (нагоны) (преобладающее направление в румбах, преобладающая и максимальная скорость в м/с). Отдельно приводятся сведения о повторяемости (числе случаев) нагонов (сгонов) по отдельным месяцам.

Таблица 2.5. «Средний уровень воды» составляется в том случае, если на озере или водохранилище действует несколько постов и рассчитывается его водный баланс. Определяется средний арифметический или средний взвешенный (с учетом тяготеющих площадей) уровень по водоему (и отдельным его участкам), выраженный в абсолютных отметках. Уровни в таблице приводятся на первое число каждого месяца и осредненные за месяц.

При контроле данных, которые помещаются в таблицу, необходимо учитывать, что средние уровни по участкам должны убывать по высоте от зоны выклинивания к плотине. В нижней (озеро-видной) части водохранилища средние уровни на смежных участках должны быть близки по высоте, различаясь на 1—3 см и не обнаруживая обратного уклона.

8.6.3. Данные о термическом режиме водоемов

Таблица 2.6. «Температура воды у берега» составляется для всех постов, где выполняются систематические измерения температуры воды в поверхностных слоях прибрежной зоны и содержит средние значения за декады, месяцы и год.

В таблице приводятся также осенние и весенние даты перехода температуры воды через 0, 2, 4 и 10 °С и даты, в которые наблюдалась максимальная температура воды.

Таблица 2.7. «Температура воды поверхностного слоя на акватории водоемов» обобщает данные наблюдений за температурой воды на береговых и островных пунктах и рейдовых вертикалях, термических профилях и гидрологических разрезах служат исходным материалом при вычислении средних значений температуры воды поверхностного слоя для акватории водоема в целом или отдельных ее участков (районов). Составление этой таблицы — достаточно сложная операция. Сначала выделяют однородные по температурному режиму районы акватории водоема. На больших и крупных озерах это обычно прибрежная, промежуточная и глубинная зоны; на водохранилищах — верхняя, средняя и нижняя зоны. Затем для каждой из них определяют средние декадные и месячные температуры поверхностного слоя. При этом прибе-

гают к осреднению ежедневных значений температуры, измеренных или полученных посредством интерполяции на промежуток между датами периодических наблюдений.

Для определения средних декадных и месячных значений температуры воды на рейдовой вертикали, где наблюдения производятся один раз в пять или десять дней, используются графики связи с температурой воды в прибрежных пунктах ежедневных измерений.

Среднее декадное (месячное) значение температуры для рейдовой вертикали снимается с графика по среднему значению температуры за тот же период, вычисленному по данным ежедневных наблюдений на прибрежном пункте.

Средние декадные и средние месячные значения температуры воды в поверхностном слое для акватории водоема в целом подсчитывают по формуле

$$\bar{T}_n = \left(\sum_{i=1}^N T_{ni} f_i \right) / F,$$

где $\bar{T}_n$, T_{ni} — среднее значение температуры воды в поверхностном слое за расчетный период для акватории водоема в целом и для i -го района соответственно; F , f_i — площадь водной поверхности водоема и i -го района соответственно; N — число районов в пределах акватории водоема.

Средняя температура по водоему в целом не вычисляется, если отсутствуют данные по участку, площадь которого превышает 20 % общей площади зеркала водоема.

Таблица 2.8. «Температура воды на различных глубинах». При наличии на водоеме значительного числа рейдовых вертикалей в таблицу помещаются сведения только по тем из них, которые наиболее полно характеризуют термический режим водоема в целом или его обособленных частей. За зимние месяцы в таблице 2.8 приводятся значения температуры на всех горизонтах измерения по данным одного наблюдения, приуроченного к концу каждого месяца. Для летних месяцев эти сведения даются подекадно (по данным наблюдений на рейдовой вертикали, приуроченным к концу каждой декады).

Таблица 2.9. «Теплосодержание водной массы» составляется для всех водоемов с известными морфометрическими характеристиками (кривые объемов и площадей). Предварительно определяется среднее месячное значение температуры водной массы водоема на основе хронологического графика средней температуры, полученного по данным наблюдений на рейдовых вертикалях.

Теплосодержание выражаются в джоулях (Дж) и вычисляются по формуле

$$Q = W \rho c t,$$

где W — объем водной массы, м³; ρ — плотность воды, равная 1000 кг/м³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С) [для воды $c = 4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С)]; t — средняя температура водной массы, °С.

8.6.4. Сведения о ледовом режиме водоемов

Таблица 2.10. «Ледовые явления на участке поста» составляются в двух формах: А — для озер и водохранилищ с устойчивым ледоставом, Б — для водоемов с неустойчивым ледоставом. В таблицу формы А включаются следующие данные: даты появления ледяных образований (появление устойчивых заберегов) начала и окончания ледостава; продолжительность в днях ледостава, а также осеннего и весеннего периодов с ледовыми явлениями.

Для водоемов с неустойчивым ледоставом в таблице формы Б приводятся даты начала ледовых явлений и очищения ото льда и число дней с ледовыми явлениями и ледоставом.

За дату начала ледовых явлений принимается день, в который отмечены первые ледяные образования, а датой очищения ото льда считается первый день после даты, когда еще наблюдались какие-либо признаки ледовых явлений.

Таблица 2.11. «Толщина льда и высота снега на льду у берега» содержит данные о значениях указанных характеристик, измеренных на удаленном от берега участке 5, 10, 15, 20, 25-го числа и в последний день каждого месяца. Приводятся также сведения о наибольшей толщине льда и дата ее наблюдения.

Таблица 2.12 «Толщина льда и высота снега на льду по ледовым профилям» составляется для водоемов, на которых систематически проводится изучение ледяного покрова в открытой части, в районе ледяных переправ или других специально выбранных участках.

Сведения о ледовом режиме водоемов дополняют картограммы распределения толщины льда и ледяных образований по акватории водоемов.

8.6.5. Водный баланс

Таблица 2.13. «Водный баланс» служит обобщением оперативных (декадных и месячных) водных балансов.

Составляющие баланса подразделяются на «приход», «расход» и «аккумуляция». Согласованность этих частей оценивается невязкой баланса.

Основной приходный компонент баланса — поверхностный приток из основной реки и боковых притоков. Меньшую роль играет поступление подземных вод и осадки на зеркало водоема.

Расходная часть складывается из стока в створах ГЭС и гидроузлов, водозаборов, испарения и фильтрации.

Порядок расчета водных балансов водохранилищ регламентируется в специальных методических указаниях и руководствах.

8.6.6. Сведения о ветро-волновом режиме

Таблица 2.14 «Повторяемость ветра различной скорости и направления» составляется по данным восьми срочных измерений на береговых и островных метеорологических площадках, а также находящихся непосредственно на акватории плавучих радиовеометров. Направление ветра разбивается на 16 румбов, а скорость — по градациям.

Таблица 2.15 «Высота и период волн при различной скорости и направлении ветра» содержит осредненные значения высот и периодов волн по всем волномерным пунктам прибрежной зоны и открытой части водохранилища.

При глубине воды у волномерной вехи более 15 м значения наблюдаемых элементов группируются по 16 румбам направлений ветра, а внутри каждого из них — по градациям скорости ветра: 1—5 6—7 8—9 м/с и т. д.

Если глубина у вехи менее 13—15 м, а изменения уровня за период наблюдений превысили 3 м, данные наблюдений разбиваются дополнительно на группы через каждые 3 м уровня. Осреднение элементов волн по градациям направления и скорости ветра производится для каждой из этих групп и приводится в таблице отдельно. Отметка уровня и глубины у вехи определяется для каждой группы как среднее из всех их значений, зафиксированных в этой группе.

Одной из характеристик волнового режима служит длина разгона волн. Ее геометрическое значение равно расстоянию от вехи до берега (по направлению ветра) при данном стоянии уровня. Средняя взвешенная длина разгона рассчитывается с учетом очертания береговой линии по формуле.

$$L_{с. в} = 0,27 [x_0 + 0,85 (x_{+22,5} + x_{-22,5}) + 0,5 (x_{+45} + x_{-45})],$$

где x_0 — геометрическая длина разгона; $x_{+22,5}$, $x_{-22,5}$, x_{+45} , x_{-45} — расстояния между вехой и берегом по направлениям, отклоняющимся от направления ветра в одну и другую сторону на 22,5 и 45°.

Таблица 2.16. «Высота и период волн по данным самописца» содержит наиболее детальные сведения о волнении. Исходными данными для таблицы служат волнограммы, которые позволяют получить сведения о высоте и периоде волн различной обеспеченности.

8.6.7. Мутность воды и состав наносов

Первым источником информации о режиме наносов служат съемки мутности — регулярные наблюдения на акватории водоемов.

Таблица 2.17. «Мутность в открытой части водохранилища» содержит результаты съемок, относящиеся к одной и той же фазе режима водоема, в виде максимальных и осредненных значений мутности по отдельным зонам водохранилища (верхней, средней и нижней). Среднее значение мутности определяют как среднее

арифметическое из ее значений, зафиксированных во всех точках рассматриваемой зоны при съемках, относящихся к одной фазе режима. Общее число вертикалей в каждой зоне указывается отдельно. В таблице приводятся также сведения о глубинах в каждой зоне, ветре и волнении во время съемок.

Таблица 2.18. «Гранулометрический состав и плотность наносов» содержит результаты анализов проб взвешенных и донных наносов, осредненных по зонам водохранилища, а внутри каждой из них — по участкам (береговая отмель, береговой склон, глубоководная часть). Для каждого из участков осреднения в таблице приводятся следующие сведения: количество точек отбора проб; общая характеристика наносов (крупные, средние, мелкие); процентное содержание отдельных фракций; характерные диаметры частиц (максимальный, 50 и 90 %-ной обеспеченности); плотность частиц и смеси донных наносов в естественном залегании, а также объем пор.

8.7. Организация контроля наблюдений на постах и проверка учета использования вод

Регулярный контроль наблюдений на гидрологических постах и учета воды на объектах водопользования — одно из условий, обеспечивающих эффективное функционирование системы ГУВ. До недавнего времени инспекция гидрологических станций и постов рассматривалась только как одна из форм контроля гидрологических работ. В новых условиях такие инспекции, обеспечивая повышение полноты и качества гидрологических наблюдений, служат одним из средств контроля использования водных ресурсов. В свою очередь уровень требований к учету воды на объектах водопользования определенным образом вытекает из сопоставления получаемых на них данных с результатами наблюдений на гидрологических постах.

8.7.1. Инспекция гидрологических постов

Порядок проведения инспекций гидрологических станций и постов регламентируется Наставлением, вып. 10, часть II, 1980 г. Остановимся на основных положениях, относящихся к инспекции гидрологических постов, выполнение которых поручается техникам-гидрологам гидрологических станций и гидрометеорологических обсерваторий.

Инспекции станций и постов подразделяются на плановые и внеплановые. Гидрологические посты, речные и озерные в плановом порядке должны инспектироваться ежегодно. Внеплановые инспекции проводятся при обнаружении крупных нарушений методики наблюдений и серьезных повреждений измерительных устройств.

Инспекции приурочиваются в разные годы к различным сезонам, чтобы убедиться в правильности производства всего годового цикла наблюдений. Контрольное нивелирование постовых устройств и другие технические проверки проводятся по особому плану в сроки, зависящие от водного режима и других условий, влияющих на работу поста. В отдельных случаях допускается совмещать эти работы с проведением инспекций.

Укажем основные виды работ, выполняемые в процессе инспекции постов.

Обследование участка реки (водоема) — производится для выяснения возможных изменений условий движения потока в сравнении с теми, которые указаны в Техническом деле поста. Особо выясняется, насколько удачно выбраны места для визуальных наблюдений, отбора проб наносов, измерения температуры воды и толщины льда.

Проверка топографо-геодезического обоснования включает: сопоставление плана участка поста с современным состоянием местности, контроль точности привязки и закрепления геодезических знаков, основного и контрольных реперов, уровнемерных устройств, разбивки гидрометрического створа, поперечников и постоянных начал.

Важнейшим разделом инспекции является проверка наблюдений, выполняемых на гидрологических постах. Главное, в чем должен удостовериться инспектирующий — соблюдение требований и условий, предусмотренных в Наставлениях и других методических руководствах.

При проверке наблюдений за уровнем обращается внимание на устойчивость нулей наблюдений и удобство доступа к уровнемерным устройствам.

Особое внимание уделяется организации измерения расходов воды. Проверяется положение гидроствора относительно направления течения, назначение скоростных вертикалей и их соответствие структуре потока, правильности производства промеров, приемы опускания вертушки на штанге и канатном подвесе, порядок выполнения промеров глубин и других операций, от которых зависит точность измерения расходов воды.

При проверке наблюдений за стоком наносов следует убедиться, не происходит ли местных искажений мутности, правильно ли отбираются и фильтруются единичные пробы мутности, при этом контролируется полнота слива проб из батометров-бутылок.

На многих постах проводятся наблюдения за загрязнением воды по программе ОГСНК. При инспекции важно установить соблюдение сроков отбора проб и полноты определения инградиентов согласно категории пункта наблюдений, своевременность выполнения срочных анализов и отправки проб для полного анализа в лабораторию. Необходимо проверить соответствие места отбора проб требованиям «Методических указаний по организации и проведению работ в системе ОГСНК» (1977 г.).

Особой тщательности требует проверка условий и хранения, исправности и готовности к работе приборов и постового оборудования: вертушек, СУВ, реек, штанг, термометров, установок ГР-64 и ГР-70, лебедок, лодок и т. п. Инспектирующий должен убедиться в наличии градуировочных характеристик, соблюдении сроков поверки для средств измерения. Необходимо тщательно просмотреть книжки для записи результатов измерений для выявления случаев пропуска или нарушения сроков наблюдений.

Чтобы проверить, насколько наблюдатель владеет приемами измерения и обращения с приборами, следует поручить ему выполнить некоторые виды наблюдений специально в присутствии инспектирующего лица (отсчет уровня при волнении, отбор единичной пробы на мутность и т. п.).

В каждом случае особое внимание следует обращать на соблюдение техники безопасности при выполнении гидрологических работ, предотвращение травматизма из-за неисправности оборудования и приборов.

Материалы инспекции должны отражать качественную оценку наблюдений и содержать предложения, направленные на повышение их точности и достоверности. Результаты проверки записываются в соответствующие разделы Технических дел по элементам гидрологического режима.

8.7.2. Контроль учета использования водных ресурсов

Учет использования водных ресурсов — обязанность предприятий-водопользователей, но в то же время при коренном преобразовании естественного режима рек оценка их современной водности была бы невозможной без надежных данных об изъятиях и регулировании стока воды. Отсюда вытекает необходимость активной роли специалистов-гидрологов в осуществлении мероприятий, обеспечивающих повышение точности измерений расходов воды и учета стока не только на гидрологических постах, но и на объектах водопользования, по крайней мере тех из них, для которых источником водозабора служат непосредственно реки, озера и водохранилища.

Контроль учета использования вод осуществляют организации Минводхоза СССР (Минводхозы союзных республик, территориальные и бассейновые управления по регулированию использования и охране вод). При этом проверке подвергаются:

- состояние измерительных устройств, правила их эксплуатации и проведения государственной аттестации;

- техническая документация — паспорта объектов водопользования с точки зрения своевременного внесения в них записей об изменениях режима водопользования и реконструкции оборудования;

- журналы первичного учета заборов и сбросов воды;

- правильность составления статистического отчета по форме 2-ТП (водхоз);

— наличие эксплуатационных и должностных инструкций, знание персоналом своих обязанностей;

— своевременность представления и полнота данных об использовании воды на орошение, промышленное и коммунальное водоснабжение.

Правильность учета ресурсов подземных вод контролируется Мингео СССР: полнота и надежность измерения уровней в гидрогеологических скважинах, состояние их оборудования, ведение полевых журналов и результатов определения запасов подземных вод.

Регулярный контроль за правильностью учета стока на ГЭС и гидроузлах осуществляет Минэнерго СССР (специализированный трест «Союзтехэнерго»). В этой работе принимают участие специалисты Госкомгидромета.

Периодически (один раз в три года) проводятся совместные проверки важнейших объектов водопользования представителями Госкомгидромета, Мингео и Минводхоза СССР. С этой целью организуются комиссии, которые работают по специально утвержденной программе.

Совместные проверки имеют большое значение в координации мероприятий, направленных на повышение эффективности комплексного использования водных ресурсов.

Глава

9

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

9.1. Основные характеристики измерений и система обеспечения их единства

9.1.1. Метрологические характеристики измерений

Измерения должны быть достоверны, надежны и сопоставимы независимо от того, где и когда они производятся. Только в этом случае можно получить объективное и непротиворечивое представление об окружающем нас мире и кооперировать материальное производство.

Основные проблемы в этой области изучает *метрология* — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Слово «метрология» образовано из двух греческих слов, означающих «учение о мерах». Метрология получила существенное развитие с конца прошлого века благодаря успеху физических наук. Большую роль в становлении современной метрологии сыграл Д. И. Менделеев,

который в 1892—1907 гг. возглавлял в России «Главную палату мер и весов».

Важнейшей задачей метрологии является обеспечение единства измерений, т. е. представление их результатов в указанных единицах с известной и вполне определенной погрешностью.

Физическая величина — наиболее общее понятие физики и метрологии. Одно из первых определений этого понятия дал Л. Эйлер: «Величиной называется все то, что способно увеличиваться или уменьшаться, или то, к чему можно нечто прибавить или от чего можно нечто отнять.» Современное определение содержит ГОСТ 16 263—70: *Физической величиной* называется свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам... но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта».

Количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина», выражается размером физических величин. Для определения их числовых значений принимается система единиц физических величин — основных и производных.

Исторически первой системой единиц физических величин была принята в 1791 г. Национальным собранием Франции метрическая система мер. Ее основу составляли две единицы — метр и килограмм. К концу XIX века сформировалась система единиц физических величин с тремя основными единицами: метр, килограмм—сила, секунда (система МКГСС), которая просуществовала вплоть до наших дней. Однако наряду с этим существовали и другие системы, что создавало значительные неудобства. Важным прогрессивным актом явилась разработка Международной системы единиц (СИ), которая была принята в 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам. В 1981 г. в СССР утвержден ГОСТ 8.417—81, узаконивший систему СИ для обязательного применения в нашей стране. Основные единицы СИ приведены в табл. 9.1.

В качестве дополнительных СИ включает две единицы: радиан (рад, rad) и стерадиан (ср, sr) — соответственно для измерения плоского и телесного угла.

Таблица 9.1

Основные единицы СИ

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение	
		русское	международное
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Сила света	кандела	кд	cd
Количество вещества	моль	моль	mol

Производные единицы СИ выводятся из уравнений связи с основными. В табл. 9.2 представлена наиболее употребительная в гидравлике, гидротехнике и гидрометрии часть производных единиц.

Таблица 9.2

Производные единицы СИ

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение	
		русское	международное
Площадь	квадратный метр	м ²	m ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³	m ³
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³
Сила, вес	ньютон	Н	N
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па	Pa
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	J
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	W

Наряду с системами единиц физических величин в технике и практической деятельности людей издавна были в употреблении единицы, не входящие ни в одну из систем — так называемые внесистемные единицы. К числу таких единиц, имеющих широкое применение относятся единицы: площади — гектар; объема — литр; массы — тонна; давления — бар; плоскости угла — минута, секунда, градус, времени — минута, час, сутки и др. Внесистемные единицы площади, массы, плоского угла и времени допускаются к применению наравне с единицами СИ.

Основные понятия о процессах измерений и погрешностях как характеристиках их качества изложены во «Введении». Здесь рассмотрим некоторые другие положения, относящиеся к измерениям.

По условиям, определяющим точность результата, измерения делятся на три класса.

1. Измерения максимально возможной точности, достижимой при существующем уровне техники. К ним относятся в первую очередь эталонные измерения, связанные с максимально возможной точностью воспроизведения единиц физических величин, а также измерение физических констант и некоторые специальные измерения высокой точности.

2. Контрольно-поверочные измерения, погрешность которых не должна превышать некоторое заданное значение. Измерения этого вида составляют обязанность лабораторий по контролю соблюдения стандартов и состояния измерительной техники и выполня-

ются так, чтобы гарантировать погрешность результата, не превышающую некоторого заданного значения.

3. Технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

Средства измерений включают меры, измерительные преобразователи, приборы и вспомогательные устройства. Их объединение в один комплекс носит название измерительных установок и измерительных систем.

Важнейшей характеристикой средств измерения служат основная и дополнительная погрешности.

Погрешность, свойственная средству измерений, находящемуся в нормальных условиях применения, называется основной. Под нормальными понимаются такие условия применения средств измерения, при которых влияющие на процесс измерения величины (температура, влажность), а также положение средств измерения в пространстве и т. д. имеют нормальные значения или остаются в нормальной области значений. За пределами этой области находится так называемая рабочая область значений влияющей величины, для которой характерны дополнительные погрешности.

Обобщенной характеристикой всех средств измерения является класс точности, который определяется пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющих на их точность.

Классы точности присваивают средствам измерений в соответствии с правилами, изложенными в ГОСТ 13600—68. На классы точности не разделяются угломерные приборы и приборы для измерения длин.

Класс точности средств измерений определяется более строго, если пределы допускаемой основной погрешности (A) задаются в виде их относительных значений

$$\delta = \pm 100A/X_n$$

X_n — номинальное значение меры (абсолютное показание прибора).

Средствам измерения, пределы допускаемой основной погрешности которых задаются относительной погрешностью по указанной одночленной формуле, присваивают классы точности (K), выбираемые из ряда

$$K = [1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n;$$

$$n = 1; 0; -1; -2; \dots$$

Для средств измерения с $\delta = 0,2\%$ класс точности обозначается 0,2 (цифры взять в кружок). В случае использования более сложных (двучленных) формул относительной погрешности класс точности обозначается также одной цифрой, но без обводки ее кружком.

9.1.2. Метрологическая служба СССР и система обеспечения единства измерений

По мере возрастающей сложности измерений становится все более необходимым принятие мер, обеспечивающих их единство и достоверность. Для этого уже недостаточно только единообразия средств измерений — необходим комплекс правил, регламентирующих выполнение и обработку результатов измерений, эталонная база и арсенал образцовых средств измерений. В совокупности все это составляет основу метрологического обеспечения измерений. Его осуществляет Государственная метрологическая служба СССР — сеть метрологических органов, обеспечивающих единство и достоверность измерений в стране (ГОСТ 1.25—76).

Начало организаций в Советской России Государственной службы мер и весов относится к 1922 г., когда было утверждено Положение о Главной Палате мер и весов. В 1930 г. Палата со всеми ее учреждениями была передана Всесоюзному комитету по стандартизации. Таким образом метрология и стандартизация были сближены и рассматривались как два основополагающих условия технического прогресса. Деятельность Главной Палаты мер и весов расширилась, и она была переименована во Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС).

После окончания Отечественной войны происходил быстрый рост сети метрологических и поверочных организаций. Увеличилось число метрологических институтов: кроме Москвы и Ленинграда они появились в Харькове, Новосибирске и других городах.

Оставаясь в составе Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР, Государственная метрологическая служба осуществляет комплекс законодательных и контрольных функций, а именно:

- установление единиц физических величин,
- создание системы государственных эталонов единиц и образцовых средств измерений,
- разработка общесоюзных поверочных схем, стандартных методов и средств испытания,
- исследования измерений и разработка методов оценки погрешностей,
- надзор за приборостроением и эксплуатацией средств измерений.

Органам Государственной метрологической службы предоставлено право контролировать соблюдение правил законодательной метрологии, запрещать серийное производство нестандартных средств измерений и в необходимых случаях изымать такие средства из обращения.

В состав Государственной метрологической службы входят: ее главный центр — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), главные центры государственных эталонов — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) и другие институты, главный центр стандартных образцов веществ и материа-

лов — Свердловский филиал ВНИИМ, Всесоюзный научно-исследовательский центр государственной службы стандартных справочных данных (ВНИЦ ГСССД), органы государственной метрологической службы в союзных республиках.

В министерствах (ведомствах) создаются ведомственные метрологические службы. В их состав входят головные и базовые организации и отделы, на которые возлагаются организация работ по метрологическому обеспечению отраслей народного хозяйства.

Составной частью Государственной метрологической службы является Государственная служба стандартных образцов (ГССО). Ее задача — обеспечение единства измерений химического состава, физических и других свойств веществ и материалов. Стандартные образцы используются в виде вещества или тела, одно из свойств которого служит для воспроизведения единицы измерений, коэффициентов или условной шкалы. Стандартные образцы выпускаются отдельными экземплярами и серийно после того, как они будут аттестованы в порядке, установленном ГОСТ 8.316—78.

В современной науке и технике используется огромное количество веществ и материалов, и не всегда удается получить достоверную информацию об их свойствах. В настоящее время известно около 3,5 миллионов веществ и материалов. Организовать оперативное получение надежных сведений об их свойствах призвана Государственная служба стандартных и справочных данных (ГСССД), созданная Госстандартом СССР. В ее составе функционирует автоматизированная система научно-технической информации, осуществляется издание стандартов, инструкций, правил и методических указаний.

Общие правила и нормы метрологического обеспечения устанавливаются в стандартах Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), основные положения которой определяет ГОСТ 1.25—76.

Технической основой метрологического обеспечения служит система государственных эталонов единиц физических величин и передачи их размеров всем средствам измерений.

Эталон представляет собой средство измерений (или комплекса средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины с целью передачи ее размера образцовым, а от них рабочим средствам измерений.

Первичные эталоны обеспечивают воспроизведение единиц с наивысшей точностью. В связи с этим эталоны, значения которых устанавливаются по первичным, называются вторичными. Первичный или заменяющий его в особых условиях специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны, является государственным (ГОСТ 8.057—80).

В Советском Союзе действует более 100 государственных эталонных комплексов. Для метрологического обеспечения отдельных отраслей народного хозяйства служат рабочие эталоны и образцовые средства измерений, предназначенные для поверки и градуировки рабочих средств измерений.

Все средства измерений подлежат обязательной государственной или ведомственной поверке.

Система передачи размеров единицы физической величины от государственного эталона или исходного образцового средства измерения рабочим средствам измерений устанавливается в поверочных схемах (ГОСТ 8.061—80).

Поверочные схемы подразделяются на государственные, ведомственные и локальные, которые соответственно распространяются на средства измерений, применяемые в стране, внутри отрасли (ведомства) и отдельном органе государственной или ведомственной метрологической службы.

Поверочные схемы составляются отдельно для каждого вида измерений с указанием соподчинения эталонов и образцовых мер, а также порядка и точности передачи единиц измерения от эталонов образцовым, а от них — рабочим мерам и измерительным приборам.

Передачу размеров единиц на высших ступенях схем осуществляют метрологические организации от эталонов и ближайших к ним разрядов образцовых мер. В нижних частях поверочных схем располагаются образцовые меры высшей для данного предприятия точности и, наконец, рабочие приборы как объекты поверки.

При выборе образцовых мер и приборов учитывается, с одной стороны, что чем они точнее, тем надежнее определяется погрешность поверяемого средства измерений, а с другой — прибор высокой точности может быть дорог и неэкономичен в эксплуатации. Считают, что погрешность прибора определяется с достаточной достоверностью, если погрешность образцового прибора в 3—5 раз меньше, чем у поверяемого средства измерения. Ни один образцовый прибор не должен применяться для практических измерений, чтобы обеспечить его наименьший износ и сохранность.

Пример ведомственной поверочной схемы для средств измерения скоростей течения в системе Госкомгидромета СССР приведен на рис. 9.1. В схеме указаны два основных метода поверки: непосредственное сличение и градуировка средств измерения.

В качестве нормируемой метрологической характеристики образцовых средств измерений принята относительная форма предельной погрешности измерения при доверительной вероятности ее непревышения $P=0,95$ и суммарной средней квадратической погрешности S_{Σ_0} . Для реализации поверочной схемы служит ряд установок. Так, в качестве образцового средства I разряда используются прямолинейные градуировочные бассейны ГГИ, Литовского, Иркутского и Северо-Кавказского УГКС.

Роль поверочных средств 2 разряда выполняют круговые бассейны и лотки системы В. А. Урываева, в которых непосредственно устанавливаются образцовые вертушки.

Порядок проведения поверок, ревизий и экспертизы средств измерений установлен в ГОСТ 8.002—71.

Важнейшим звеном системы метрологического обеспечения служит стандартизация и аттестование методик выполнения измерений в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.010—72.

Аттестация методики выполнения измерений — исследование, направленные на определение значений показателей точности

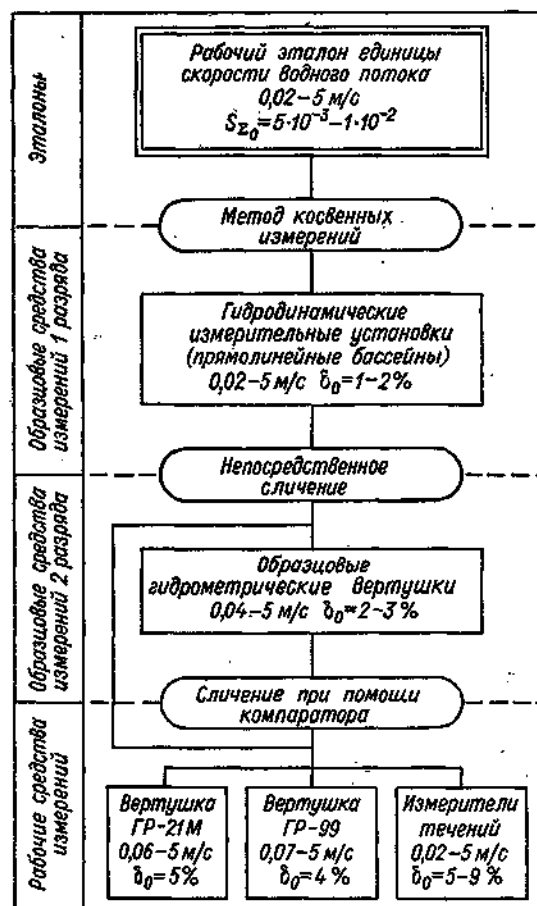


Рис. 9.1. Ведомственная поверочная схема для средств измерения скорости течения в системе Госкомгидромета.

измерений, производимых в соответствии с данной методикой. Само проведение аттестации осуществляют метрологические организации Госстандарта и органы ведомственных метрологических служб. В аттестате методики выполнения измерений указывают:

- назначение и область применения методики,
- типы используемых средств измерений,
- технические характеристики вспомогательных устройств,
- метод измерений,

- численные значения показателей точности измерений,
- межповерочные интервалы для средств измерений,
- требования к квалификации операторов,
- требования к технике безопасности.

9.1.3. Метрологическая служба Госкомгидромета

Госкомгидромет обеспечивает народное хозяйство страны информацией о состоянии окружающей среды. При наблюдениях на сети гидрометеорологических станций и постов применяется большое количество различных специальных методов и средств измерений. В этих условиях проблема метрологического обеспечения гидрометеорологических наблюдений приобретает особое значение. Для ее реализации создана метрологическая служба Госкомгидромета. Функции головной организации метрологической службы Госкомгидромета возложены на Научно-исследовательский институт гидрометеорологического приборостроения (НИИГМП), а другие ведущие научно-исследовательские институты и учреждения Госкомгидромета (всего их 10) утверждены в качестве базовых организаций по метрологическому обеспечению соответствующих видов гидрометеорологических наблюдений. В частности, Главная геофизическая обсерватория (ГГО) несет ответственность за методы и технические средства получения информации о состоянии атмосферы, Государственный гидрологический институт (ГГИ) является базовой организацией в области гидрологии суши.

На базовые организации возлагаются следующие обязанности:

- анализ состояния средств, методов и методик измерений и наблюдений, разработка предложений по совершенствованию метрологического обеспечения;

- разработка и участие в разработке технических заданий на проектирование и изготовление рабочих и образцовых средств измерений;

- разработка предложений к планам отраслевой стандартизации; хранение образцовых средств измерения и проведение работ по их сличению;

- методическое руководство работами, проводимыми в территориальных управлениях Госкомгидромета (УГКС) по внедрению и освоению прогрессивных средств и методов наблюдений;

- проведение метрологической аттестации нестандартных средств и методик измерений;

- разработка ведомственных и локальных поверочных схем;

- контроль за соблюдением стандартов в области метрологического обеспечения.

Измерения, выполняемые на гидрологических постах, контролируются сетью лабораторий и бюро поверок, которые организованы в УГКС. Их задача — поверка и ремонт сетевых приборов, в том числе и применяемых на гидрологических постах. Особое внимание уделяется исправности и метрологическим характе-

ристикам вертушек. В бюро поверки производится контроль и комплектование для отправки на повторную градуировку вертушек, у которых истек срок действия градуировочных свидетельств (2 года).

Основными измеряемыми элементами в речной гидрометрии являются уровни и расходы воды в открытых руслах. Если при измерении уровней и площадей поперечного сечения русла можно опираться на создаваемые в других отраслях средства воспроизведения и поверки линейных величин, то определение скоростей руслового потока нуждается в особом метрологическом обосновании.

Эталонно-поверительную базу речной гидрометрии представляют градуировочные, или, как их называли в прошлом, тарировочные, бассейны, обеспечивающие получение зависимости числа оборотов винта вертушки от скорости потока. Наиболее точную градуировку приборов обеспечивают прямолинейные бассейны. Их основное поверительное устройство — тележка, на которой устанавливаются штанги с вертушками. Массовое строительство прямолинейных бассейнов сдерживается их высокой стоимостью. Естественно поэтому искать другие более экономичные способы градуировки. Так появились круговые (кольцевые) бассейны. Наиболее прост и экономичен круговой лоток, конструкция которого предложена В. А. Урываевым в 1953 г.

Методика выполнения измерений на гидрологической сети регламентируется действующими Наставлениями — выпуск 2, часть II; выпуск 6, ч. I; выпуск 7, ч. I. В них указаны условия выполнения измерений и факторы, влияющие на получаемые результаты. Приведены расчетные зависимости для оценки погрешностей измерения расходов воды и его отдельных элементов. Функции влияния различных факторов представлены в виде корреляционных связей или законов распределения вызванных ими погрешностей. И наконец, в Наставлениях детально изложены правила и порядок выполнения подготовительных работ и самих измерений, а также формы записи их результатов.

9.2. Градуировка средств измерения

9.2.1. Градуировка расходомеров и водопропускных сооружений

Под градуировкой¹ расходомеров и водопропускных сооружений понимается установление зависимости между расходами воды и параметрами истечения — напорами (перепадами давления), открытием затворов, мощности, развиваемой турбинным гидроагрегатом и т. п.

Гидрологические расходомеры подвергаются периодическим поверкам. Водосливы с тонкой стенкой поверяются 1 раз в 2 года,

¹ Термин «тарировка» ГОСТ 16263—70 не рекомендует к употреблению.

а водосливы с широким порогом и лотки — 1 раз в 4 года. Если при этом выявлены недопустимые отклонения от паспортных характеристик, то использование для определения расходов воды гидравлических зависимостей не разрешается и расходомер должен быть подвергнут градуировке.

Расходомеры градуируются для установления зависимости между расходом и напором воды. Градуировке подлежат:

а) нестандартные расходомеры во всем диапазоне измеряемых расходов;

б) стандартные расходомеры для диапазона расходов и напоров, который лежит за пределами действия теоретической зависимости $Q=f(h)$ (например, если возникает необходимость изме-

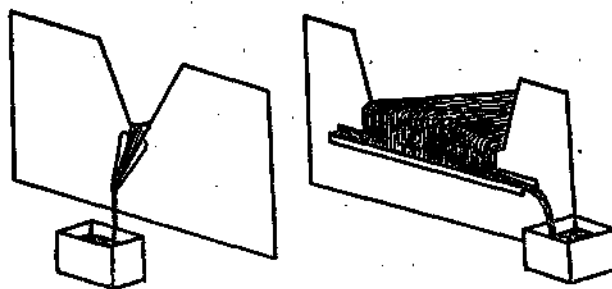


Рис. 9.2. Градуировка водосливов с тонкой стенкой объемным способом.

рения расходов при малых напорах, когда имеет место несвободное истечение через водослив).

Градуировка заключается в измерении расхода воды любым способом, обеспечивающим необходимую точность, с одновременной фиксацией напора воды в верхнем бьефе расходомера. При больших расходах воды измерения расходов воды могут выполняться вертушкой. Малые расходы воды определяются обычно объемным способом или с помощью съемных водосливных рамок. Независимо от применяемого способа режим течения во время контрольного измерения должен быть установившимся.

Для измерения расходов воды объемным способом под нижний край лотка (гребень водослива) по всей его ширине подводится и закрепляется желоб, из которого вода поступает в мерный бак (рис. 9.2). Расход воды определяется по времени T приращения в баке фиксированного объема воды (V): $Q = V/T$. Объем мерного бака выбирается в зависимости от расхода воды и заданной точности его измерения (см. п. 4.6.3).

При градуировке лотков применяются преимущественно водосливные рамки — облегченные треугольные водосливы с тонкой стенкой. Для этого на время контрольного измерения водосливная рамка устанавливается в нижнем выходном сечении лотка. После того как верхний бьеф заполнится водой и истечение через водослив приобретет устойчивый характер, над гребнем водослива не-

посредственно в створе водосливной рамки определяется напор, а затем по связи $Q=f(h)$ и расход воды. Отметим, что зависимость $Q=f(h)$ для водосливных рамок получают также на основании их градуировок объемным способом.

Когда устройство постоянно действующих расходомеров нецелесообразно или невозможно, переносные водосливные рамки могут использоваться в качестве основного средства для измерения малых расходов воды водотоков.

Гидроагрегаты ГЭС градуируются двумя основными способами: абсолютным, заключающимся в непосредственных измерениях расходов воды, и относительным, при котором измеряется

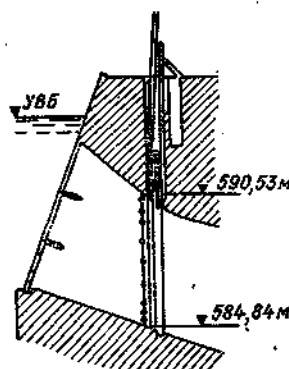


Рис. 9.3. Установка вертушек в приемном отверстии турбинного тракта.

перепад давления в спиральной камере и переход к расходам воды осуществляется по характеристикам турбин в точках наивысших КПД. Градуировка производится в несколько этапов с увеличением нагрузки ступенями от двигательного режима до полного открытия направляющего аппарата турбины. На каждой ступени испытаний измерения начинаются только после стабилизации заданного режима.

Наибольшее распространение имеет градуировка с измерением расходов воды гидрометрическими вертушками. Измерительный створ может располагаться непосредственно во входном отверстии проточной части гидроагрегата и в подводящем или отводящем канале (русле). В случае измерения расходов непосредственно в водопропускном отверстии одновременно устанавливается такое количество вертушек, чтобы с достаточной полнотой осветить распределение скорости в потоке. Число скоростных точек N в сечении площади F устанавливается по формуле

$$N = \alpha \sqrt{F},$$

где $\alpha = 14 \div 25$.

Вертушки размещаются на гидрометрических рамах (рис. 9.3) или балках. В последнем случае балка должна иметь роликовые опоры, находящиеся в шандорных пазах сооружения, что позволяет перемещать конструкцию по высоте отверстия.

Существуют и другие способы градуировки, сведения о которых можно найти в специальной литературе.

Водосбросы и шлюзы-регуляторы, а также гидрологические расходомеры градуируются для уточнения коэффициентов расхода в гидравлических зависимостях, выражающих их пропускную способность. Измерения расходов, как правило, вы-

полняются вертушками непосредственно в отверстиях сооружений, подводящих и отводящих каналы. Градуировка средств измерения расходов воды на оросительно-осушительных системах осуществляется в соответствии с руководством ВТР-М-1-80, изданных ММВХ СССР в 1980 г. В нем предусмотрено ограничение максимальной погрешности построения градуировочной характеристики значением 2 %.

Если в состав гидроузла входит ГЭС, то по предложению А. С. Воробьева (Союзтехэнерго) для градуировки водосбросов в качестве расходомеров используются заранее проградуированные гидроагрегаты или отдельные отверстия (они называются контрольными). В про-

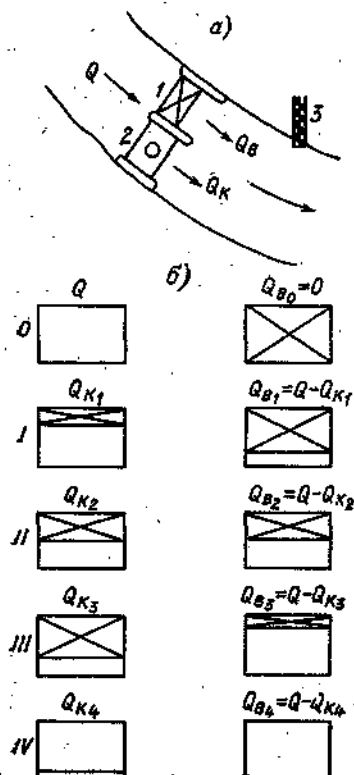


Рис. 9.4. Градуировка водосброса методом контрольного отверстия.

а — схема расположения сооружений: 1 — водосброс, 2 — здание ГЭС, 3 — уровень пост; б — режимы открытия отверстий 0—IV при уровне нижнего бьефа $H = \text{const}$.

цессе градуировки часть транзитного расхода воды Q переключается с гидроагрегатов или контрольных отверстий на водосбросы; их пропускная способность в каждой позиции определяется разностью

$$Q_{вi} = Q - Q_{ki},$$

где Q_{ki} — расходы воды, пропускаемой через гидроагрегаты или контрольные отверстия (рис. 9.4). При правильной организации наблюдений точность рассматриваемого способа не ниже, чем при измерениях вертушками.

Насосные станции машинных каналов градуируются так же, как и водозаборные шлюзы-генераторы — русловым способом с измерением расходов вертушками.

9.2.2. Градуировка гидрометрических вертушек

Градуировкой вертушки называется операция по установлению зависимости между частотой вращения (числом оборотов в 1 с) лопастного винта и скоростью течения, как указывалось выше, она производится в специальных градуировочных бассейнах (прямолинейном, круговом) или в градуировочной лотке. В прямолинейных бассейнах градуировка производится путем непосредственного установления связи между частотой вращения лопастного винта, а в круговых бассейнах и градуировочных лотках — способом эталонирования, т. е. сравнением показаний испытываемых

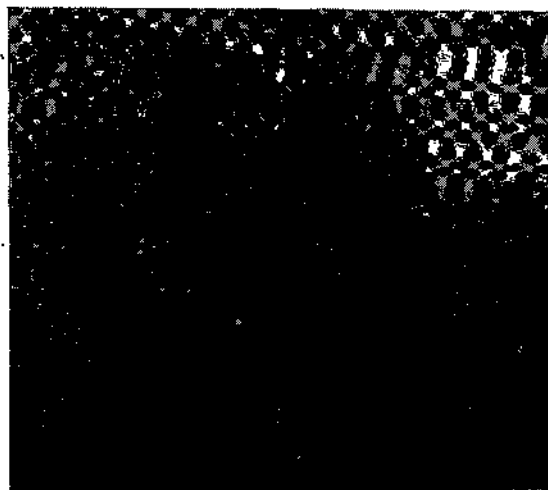


Рис. 9.5. Прямолинейный градуировочный канал.

и образцовых вертушек, предварительно прошедших градуировку в прямолинейном бассейне.

Прямолинейный градуировочный бассейн (рис. 9.5) представляет собой бетонированный канал прямоугольного сечения. Вдоль канала по обеим его сторонам укладываются рельсы, по которым с помощью электромотора перемещается тележка с градуируемой вертушкой. В рельсы через каждые 1—5 м вмонтированы контакты, замыканием которых при движении тележки отмечается пройденный ею путь.

При градуировке вертушка укрепляется на штанге и заглубляется под поверхность воды на глубину 0,4—0,5 м при глубине воды в бассейне не менее 1,3 м. Отклонение оси вертушки от продольной оси канала не должно превышать 2° , а ее расстояние от стенок канала должно быть не менее 0,7—0,8 м. При одновременной градуировке нескольких вертушек между ними также необходимо обеспечить указанное расстояние.

Градуировка вертушки производится путем равномерного передвижения тележки с вертушкой вдоль канала. В процессе нескольких последовательных заездов должен быть освещен диапазон скоростей от начальной до 2,5 м/с. Наиболее подробно освещается зона скоростей, в пределах которой зависимость между скоростью течения и числом оборотов лопастного винта в 1 с имеет нелинейный характер. Укажем, например, что при градуировке вертушки ГР-21М рекомендуются следующие скорости перемещения вертушки: 0,06; 0,08; 0,10; 0,15; 0,20; 0,50 м/с и далее через 0,5 м/с.

Регистрация числа оборотов вертушки, расстояния и времени прохождения тележкой расстояний между контактами в рельсовом пути осуществляется на ленте быстродействующего самописца, к отметчику времени которого подключен морской хронометр. Образец записи приведен на рис. 9.6 В процессе обработки на

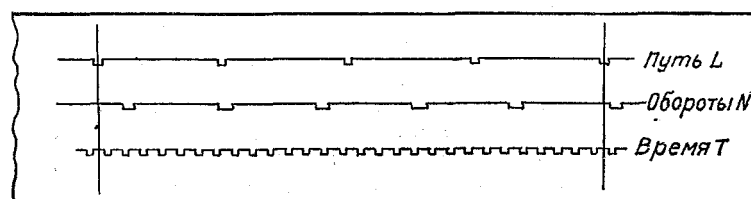


Рис. 9.6. Образец записи на ленте самописца.

ленте для каждой скорости градуирования выбирают участок с постоянной скоростью движения тележки (рабочий участок пути градуирования), в пределах которого по числу зарегистрированных импульсов от путеотметчика, хронометра и контактного устройства вычисляют соответственно длину участка L , время его прохождения тележкой T и число оборотов лопастного винта N . По этим данным скорость u рассчитывается как частное от деления пути на время, а соответствующее ей число оборотов лопастного винта в 1 с (n) — как частное от деления N на T .

Круговой бассейн представляет собой чашу или кольцевой канал, заполненный водой (рис. 9.7). В центре бассейна установлена карусель с выносами для крепления штанг с вертушками. В движение карусель приводится электромотором. При градуировке несколько испытываемых и две образцовых вертушки одинакового типа закрепляются на отдельных штангах на одинаковой глубине от поверхности воды, равной 0,4—0,5 м. Карусель приводится в движение, и на ленте самописца записывается число оборотов для каждой вертушки и время, общее для всех вертушек.

В лотке Урываева процесс градуировки аналогичен. Лоток представляет собой закрытый прямоугольный резервуар длиной 3,5 м, высотой около 0,9 м и шириной 0,4 м (рис. 9.8). Внутренняя часть лотка разделена горизонтальной перегородкой так, что внутри лотка образуется замкнутый трубопровод. Вода в лотке

приводится в движение гребным винтом, соединенным с электромотором. Поворотные лопасти винта обеспечивают изменение скорости движения воды в лотке. В верхней рабочей части лотка расположены три люка с заглушками, в которых на штангах устанавли-

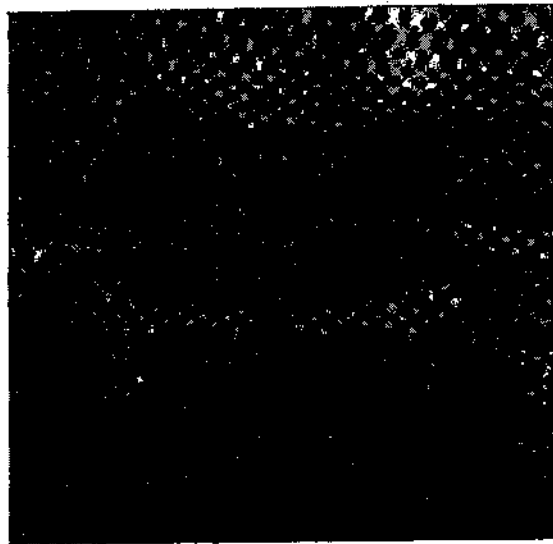


Рис. 9.7. Круговой градуировочный бассейн.

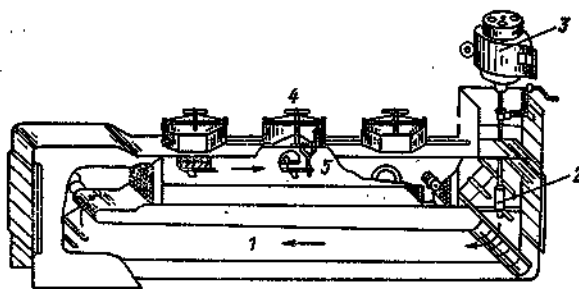


Рис. 9.8. Градуировочный лоток В. А. Урываева.

1 — замкнутый трубопровод, 2 — гребной винт, 3 — электромотор, 4 — люки, 5 — вертушки.

ливаются попарно градуируемые и образцовые вертушки. Градуирование производится в два приема: сначала образцовая вертушка устанавливается слева, а испытываемая справа, а затем они меняются местами. Данные, получаемые при одной и той же скорости движения воды в лотке при первом и втором приеме, осредняются.

Результаты градуировки вертушки оформляются градуировочным свидетельством, представляющим собой график связи между числом оборотов лопастного винта в 1 с n и скоростью течения u (рис. 9.9). По горизонтальной оси графика откладывается число оборотов лопастного винта в 1 с, а по вертикальной — скорость. Масштабы для u и n подбираются с таким расчетом, чтобы линия связи проходила приблизительно под углом 40—45° к горизонтальной оси. Например, градуировочные зависимости рекомендуется строить в следующих масштабах: горизонтальный — в 1 см — 0,5 об/с (для вертушек ГР-21М) и 1 об/с (для вертушек ГР-99); вертикальный — в 1 см — 0,2 м/с. Нижняя — криволинейная

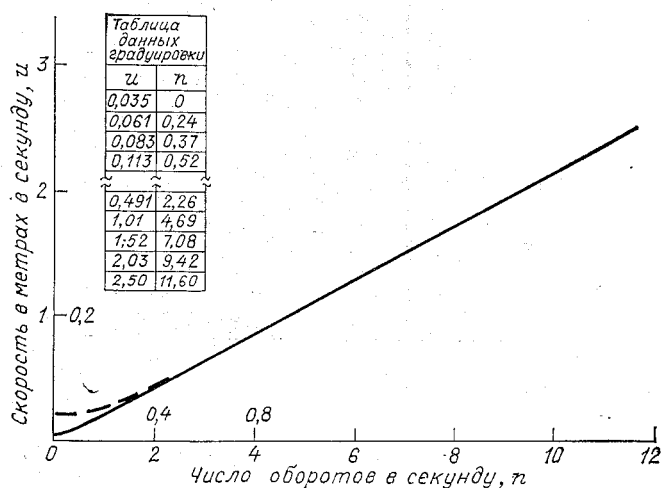


Рис. 9.9. Градуировочное свидетельство.

часть — графика вычерчивается дополнительно в более крупном масштабе (обычно пятикратного увеличения), что облегчает снятие малых значений скоростей с необходимой точностью.

Градуировочная зависимость позволяет по любому значению n определить соответствующую ему скорость течения. Практически для этой цели удобнее использовать не сам график $u=f(n)$, а таблицу его координат, составленную через 0,01 об/с (см. образец табл. 9.3). Составляется таблица следующим образом. С градуировочной зависимости снимается и вписывается в первую графу первой строки таблицы (число оборотов 0,00) значение начальной скорости вертушки. Криволинейный участок графика, построенный в укрупненном масштабе, разбивается на несколько отрезков, в пределах каждого из которых зависимость u от n может быть принята практически линейной. На границах этих отрезков снимают значения скоростей и вписывают их в соответствующие графы таблицы, а промежуточные значения вычисляют путем

прямолинейной интерполяции между ними. Аналогично заполняют и ту часть таблицы, которая соответствует прямолинейной части графика. Разница заключается лишь в том, что опорные точки, между которыми выполняется интерполяция, могут назначаться здесь реже.

При необходимости таблица может быть продолжена и за пределы участка градуировочной зависимости, освещенной при градуировке, вплоть до верхнего критического значения скорости вертушки, при котором линейность связи $u=f(n)$ нарушается (см. п. 3.3.2).

Пользоваться градуировочной таблицей весьма просто: по числу оборотов лопастного винта в 1 с, вычисленному с точностью до сотых долей, находят соответствующую строку и столбец таблицы, и вписывают из этой ячейки значение скорости.

После градуировки вертушки определяется ее основная погрешность путем сравнения скорости перемещения вертушки, полученной прямым путем при контрольных ее опробованиях в градуировочном бассейне с соответствующим значением скорости, снятой с градуировочной зависимости.

Таблица 9.3

Градуировочная таблица вертушки ГР-21М № 2715, лопастный винт № 1
Градуировочное свидетельство № 122690 от 5 августа 1982 г.

Число оборотов в секунду	Скорость, м/с									
	,00	,01	,02	,03	,04	,05	,06	,07	,08	,09
0,00	0,035	0,036	0,036	0,036	0,037	0,037	0,037	0,038	0,038	0,039
0,10	0,040	0,041	0,043	0,044	0,046	0,047	0,049	0,050	0,052	0,053
0,20	0,054	0,056	0,057	0,059	0,060	0,062	0,064	0,066	0,067	0,069
0,30	0,071	0,073	0,075	0,076	0,078	0,080	0,082	0,084	0,086	0,088
4,90	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1,08
5,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10
и т. д.										

Основная погрешность отражает влияние на метрологические характеристики вертушки лишь части факторов, имеющих место в реальных речных потоках. В частности, она не включает погрешностей, связанных с турбулизацией потока и косоструйностью течения. Из этих так называемых дополнительных погрешностей в настоящее время иногда оценивается только погрешность, связанная с компонентными свойствами вертушки. В прямолинейном градуировочном бассейне определяются показания вертушки при развороте ее оси под разными углами к оси канала. Относительное

значение погрешности изменяется с углом поворота и для конкретного угла α подсчитывается по формуле

$$\Delta n = (n_0 \cos \alpha - n_a) / (n_0 \cos \alpha),$$

где n_0 — число оборотов лопастного винта в 1 с, соответствующее на градуировочной зависимости скорости перемещения вертушки;
 n_a — фактическое число оборотов лопастного винта при испытании.

В градуировочном свидетельстве указывается обычно значение этой погрешности, соответствующее $\alpha = 40^\circ$ и скорости перемещения вертушки 1 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г. Д., Марков В. Н. Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 318 с.
2. Гидрологические приборы и гидрометрические сооружения/Под ред. Г. С. Клейна и И. Г. Шумкова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 175 с.
3. Методы изучения гидрологического режима водных объектов/Под ред. В. С. Вуглинского. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 391 с.
4. Методические указания по ведению Государственного водного кадастра:
Разд. 1., вып. 3, ч. 1. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979, 163 с.;
Разд. 1., вып. 6, ч. 1. — Обнинск: ВНИИГМИ, 1983, 208 с.
5. Методические рекомендации. Методы ускоренных измерений расходов воды. — Л.: Изд. ГТИ, 1983. — 69 с.
6. Методические рекомендации по измерению расходов воды рек аэромеходометрами. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 134 с.
7. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений/Под ред. О. А. Городецкого. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 90 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам:
Вып. 2, ч. II. Гидрологические наблюдения на постах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 264 с.;
Вып. 6, ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на реках. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 382 с.;
Вып. 7, ч. I. Гидрометеорологические наблюдения на озерах и водохранилищах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 476 с.;
Вып. 10, ч. II. Инспекция гидрологических станций и постов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 64 с.
9. Правила измерения расхода жидкости при помощи стандартных водосливов и лотков. — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 51 с.
10. Правила по технике безопасности при производстве наблюдений и работ на сети Госкомгидромета. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 234 с.
11. Руководство по поверке гидрологических приборов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 220 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Азимут 317
Амплитуда 14, 16, 25
Аттестация методик выполнения измерений 369

Баланс водный русловой 330, 357
Бассейн круговой 377
Батометр 213, 339
Бур 54

Вероятность доверительная 333
Вертикаль:
 промерная 135
 репрезентативная 157
 скоростная 136
Вежа 300—302
Вертушка гидрометрическая 102—106
 , компанентность 104
Винт:
 лопастный 105, 121
 , скольжение 105
Водослив 179
Водохранилище 5, 283, 288
Волна кинематическая 243, 265
Волнение 45, 298, 305

Галс 76
Гидроагрегат турбинный 191—193
Гидрограф 235, 281, 350
Гидрология суши 5
Гидрометрия 3, 5
Гидроузел 191
Глубина 59, 283
Градуировка средств измерения 371, 375
График комплексный 280
Груз гидрометрический 129

Данные ежегодные 340, 353
Дело техническое 37
Денивелиация 287
Диффузия турбулентная 170
Дночерпатель 224

Зажор 56
Заиление 321, 328
Заращение 151, 270
Затор 56
Зондирование поверхностного слоя потока 163

Измерения:
 волнения 300
 интеграционные 119, 160
 , количество (частота) 281—282
 глубин 67
 наносов 207
 расстояний 73
 расходов воды 122, 152, 195
 скоростей течения 117, 119, 138
 уровня воды 41

Измеритель расхода воды акустический (ультразвуковой) 163
Измеритель скоростей течения 109, 138, 315
Изотакхи 10, 89—90
Изотермы 49
Интерполяция характеристик пропускной способности русла 257

Кадастр водный 4, 326, 339
Канады 5, 328—329
Канат стальной 65, 112, 129
Картирование 57
Классификация 203

Код 45, 53
Косоструйность 118, 161
Коэффициент:
 заращения 271
 зимний 267
 полноты формы поперечного сечения 163
 переходный к средней скорости 155
 уравнения регрессии 47, 157
 шероховатости 247
Кривая расходов воды 236, 256, 281
 — — —, однозначность 250, 252
 — — —, неоднозначность 251, 252
 — — —, петля 262

Лебедка 62, 64, 12
Ледостав 51, 69, 265
Ледоход 43, 53
Лента самописца 30, 47, 376
Лот 61, 75
Лоток гидрометрический 177

Масштаб съемки 20
Методы измерения расхода воды:
 акустический (ультразвуковой) 99
 аэрогидрометрический 164—168
 поплавками 152—155
 смещения 169—175
 «скорость—площадь» точечный 135—152
 — интеграционный 159—160
Методы учета стока 235—276
Метрология 106, 363
Межень 15, 282
Мутность 212, 322

Наледь 51
Наметка 61
Наносы:
 взвешенные 204—207
 влекомые 204, 220, 278
Нивелирование 37, 40
Нуль графика (поста) гидрологического поста 36
 — наблюдений 36, 39

Обследование рекогносцировочное 19, 285
Озера 5, 283—288

Паводок 15
Параметр метрологический 185
Пережат 18
Переправа:
 канатная 70
 люлочная 73
Плес 18
Площадь:
 водосбора 16
 водного сечения 68, 146
 живого сечения 152
 поперечного сечения 80, 237, 269
Погрешность:
 гидрометрического учета стока 281—283
 дискретизации 121
 измерения 10, 185
 инструментальная 10, 84, 121
 морфометрическая 84
 пульсационная 121
 регистрация уровня
 систематическая 10—11, 186, 281
 случайная 10, 121, 186, 281
Подпор 261
Пойма 78, 137
Поплавки 93, 167
Пост гидрологический 18
 , нуль графика 36

, план участка 21
, программа наблюдений 8, 284
Преобразователь первичный 186
Промеры 68, 72

Расход:
 воды 14, 143, 240
 —, экстраполяция 241—243
 , модель 123—125
 наносов 205, 218
 фиктивный 155
 частичный 125, 206
 элементарный 147
Расходомер гидрологический 177, 188, 200, 372

Режим:
 водных объектов 5
 гидрологический 5
 волновой 298
 наносов 321

Репер 34
 , отметка 36

Русло:
 контрольное 176—177
 , пропускная способность 235, 257
 , шероховатость 247

Самописец уровня воды 29—30, 44
Свая 26—27

Сеть гидрологическая 6—9

Система единиц физических величин 363—364

Скорость течения 86, 103

 , пульсация 88
 , эпюра распределения 90—92, 146

Сооружения водозаборные (сбросные) 195—200

Срезка:
 глубин 77
 уровней 261

Станция гидрологическая 7

Створ гидрометрический 22, 60

Сымка русловая 78, 82

Температура:
 воды 16, 49, 289
 воздуха 16

Типизация зимнего режима потока 51, 266
Точность измерения 41, 125, 135, 282
Трубка гидрометрическая 200
Турбулентность потока 86, 91

Увязка стока 350, 352

Угол откоса каната 74

Узел гидрографический 350, 352

Уклон водной поверхности 45, 142, 262

Уравнение регрессии 47, 241

Уровнемер 33

Уровень воды 14, 41

 суточный ход 15—16

Установка гидрометрическая дистанционная 128

Устройства:

 передаточные 29

 речные 23, 42

 свайные 25

 уровнемерные 37

Учет стока:

 воды 235—275

 наносов 276—279

Фаза водного режима 14, 281

Фильтрация 217

Фракциометр 229

Фракция наносов 226

Хронограмма 172

Циркуляция водных масс 87

Шероховатость русла 247

Шкала 247, 249

Шлюз-регулятор 374

Штанга гидрометрическая 111, 113

Шуга 54

Щуп донный 225

Экстраполяция расходов воды 241—243

Электротермометр 50

Элемент гидрологического режима 5

 — чувствительный 106

Эхолот 65

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Предмет гидрометрии	7
Система гидрологических наблюдений	10
Сущность и показатели точности измерений	10
Глава 1. Наблюдения за уровнями воды и ледотермическим режимом рек	14
1.1. Водный режим рек	—
1.2. Организация и оборудование гидрологических постов	17
1.3. Наблюдения за уровнем и продольным уклоном водной поверхности	41
1.4. Термический режим рек и наблюдения за температурой воды	48
1.5. Наблюдения за ледовыми явлениями и толщиной льда	51
1.6. Визуальные наблюдения за водной растительностью и факторами руслового режима	57
Глава 2. Промеры глубин и русловые съемки	59
2.1. Оборудование и средства для измерения глубин	—
2.2. Измерение глубин	67
2.3. Русловые съемки	76
2.4. Обработка промеров	79
2.5. Оценка точности и оптимизация измерений площадей водного сечения потока	84
Глава 3. Измерения скоростей течения в русловых потоках	86
3.1. Общие сведения о скоростной структуре турбулентных потоков	—
3.2. Приборы для измерения скорости и направления течений	93
3.3. Гидрометрические вертушки	102
3.4. Измерение скоростей течения вертушкой	117
Глава 4. Измерение расходов воды	122
4.1. Общая характеристика методов измерения и оборудование гидростворов	—
4.2. Точечные способы измерения расходов воды методом «скорость—площадь»	135
4.3. Измерение расходов воды поплавками	152
4.4. Ускоренные измерения расходов воды	156
4.5. Метод смещения индикатора	169
4.6. Измерение расходов воды на малых реках	175
4.7. Оценка погрешности, текущий контроль и оптимизация измерений расходов воды на гидрологических постах	185
4.8. Измерение расходов воды на гидроузлах и каналах	191
Глава 5. Методы наблюдений за стоком и крупностью наносов	203
5.1. Состав, форма движения и сток речных наносов	—
5.2. Наблюдения за стоком взвешенных наносов	205
5.3. Изучение стока влекомых наносов	218
5.4. Изучение гранулометрического состава и физических свойств наносов	221
Глава 6. Учет стока воды и наносов	235
6.1. Зависимости расходов от уровней воды	—
6.2. Учет стока при неустойчивых руслах	252
	383

6.3. Учет стока при изменяющихся гидравлических условиях	260
6.4. Учет стока при ледообразованиях и зарастании русла . .	265
6.5. Оперативный учет стока воды	272
6.6. Вычисление стока наносов	276
6.7. Выбор методов и оценка точности учета стока воды и наносов	279
Глава 7. Изучение гидрологического режима озер и водохранилищ . .	283
7.1. Гидрометеорологическая сеть на озерах и водохранилищах	—
7.2. Наблюдения за уровнем воды	286
7.3. Изучение термического режима озер и водохранилищ . . .	288
7.4. Наблюдения за ледовой обстановкой	295
7.5. Изучение ветрового волнения водоемов	298
7.6. Наблюдения за течениями	308
7.7. Наблюдения за наносами и переформированием берегов . .	321
Глава 8. Государственный учет вод и водный кадастр	326
8.1. Государственный учет вод и их использования по количественным показателям	327
8.2. Руслые водные балансы и гидрологический контроль данных ГУВ	330
8.3. Государственный учет вод и их использования по качественным показателям	334
8.4. Государственный водный кадастр	339
8.5. Ежегодные данные: «Реки и каналы»	343
8.6. Ежегодные данные: «Озера и водохранилища»	353
8.7. Организация контроля наблюдений на постах и проверка учета использования вод	359
Глава 9. Метрологическое обеспечение гидрологических наблюдений . .	362
9.1. Основные характеристики измерений и система обеспечения их единства	—
9.2. Градуировка средств измерения	371
Список литературы	380
Предметный указатель	381