В. Д. БЫКОВ, А. В. ВАСИЛЬЕВ

Гидрометрия

Издание четвертое, переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Гидрология суши»

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД 1977

УДК 556.5.04(075.8)

Рецензент: кафедра гидрометрии Ленинградского гидрометеорологического института.

В книге излагаются методы количественного определения и учета элементов режима водных объектов — уровней воды, глубин, скоростей течения, расходов воды и наносов, а также методы специальных наблюдений и исследований течений, термического и ледового режимов, волнения. Рассмотрены применение аэрометодов в гидрометрии, вопросы комплексной автоматизации наблюдений и механизации обработки материалов наблюдений на гидрологической сети СССР. Большое внимание уделено современным приборам и методам измерений и наблюдений.

Книга предназначается для студентов государственных университетов и гидрометеорологических институтов по специальности «Гидрология суши» в качестве учебника по курсу гидрометрии, но может также служить пособием для гидрологов, географов, гидротехников, изыскателей при проведении гидрометрических работ на реках и водоемах.

The methods of quantitative determination and inventory of hydrological elements such as water level, depth, flow speed discharge and sedimentation are described for fresh water hydrology. The use of airborne methods in hydrometry and the problems of complex automation of observations at the stations of the USSR hydrological network are discussed. The book was enlarged to cover new technological advances and new developments in the theory of hydrometry.

The book is designed for university and college students in the field of fresh water hydrology as a textbook in hydrometry. It may be also useful for hydrologists, geographers and research workers.

Б $\frac{20806\text{-}220}{069(02)\text{-}77}$ 1-78.

© Гидрометеоиздат, 4-е изд., 1977 г.

Предисловие

Настоящий учебник составлен в соответствии с учебной программой по гидрометрии, утвержденной Министерством высшего и специального среднего образования. Учебник включает следующие основные разделы:

I. Задачи гидрометрии и организации гидрометрических наблюдений.

II. Наблюдения за уровнями воды.

III. Измерение глубин.

IV. Измерение скоростей течения воды.

V. Измерение расходов воды.

VI. Определение зависимости между расходами и уровнями и подсчет стока воды.

VII. Изучение твердого стока и донных отложений.

VIII. Специальные исследования и наблюдения.

IX. Автоматизация гидрологической сети. Механизированная обработка результатов наблюдений.

В новом издании содержание книги переработано. Исключены устаревшие методы и приборы. Дано описание новых методов и приборов. Дополнено содержание глав: «Применение аэрометодов в гидрометрии», «Автоматизация гидрологической сети» и «Механизированная обработка результатов наблюдений».

Учебник предназначен для студентов по специальности «Гидрология суши». Материал излагается с учетом подготовки студентов. Гидрометрия изучается на втором курсе, когда студенты еще не проходили таких специальных дисциплин, как гидрология, гидромеханика и гидравлика, динамика русловых потоков, гидрохимия и др. В связи с этим даны краткие сведения из указанных дисциплин, а отдельные вопросы изложены более доступно. При этом имеется в виду, что более глубокие знания по теории предмета студенты могут получить при изучении перечисленных специальных дисциплин.

Все разделы учебника изложены по следующему плану: 1) сущность и задачи исследований, 2) приборы и оборудование, 3) организация полевых работ и наблюдений, 4) обработка результатов наблюдений.

Авторы стремились подробно осветить только основные методы и приборы, применяемые в настоящее время, и менее подробно — мало применяемые. Наряду с этим кратко рассмотрены методы и приборы, которые в дальнейшем могут быть развиты и усовершенствованы.

Учитывая, что гидрометрические приспособления и сооружения подробно рассматриваются в специальных курсах, в настоя-

щем учебнике даны только общие сведения по этому вопросу, необходимые для понимания действия этих установок и их использования при производстве наблюдений.

В учебнике большое внимание уделено Гидрометеорологической службе СССР, принципам организации ее сети и методической постановке работ и наблюдений, осуществляемой Государственным гидрологическим институтом. Авторы стремились обратить внимание студентов на важность правильной организации и постановки полевых и камеральных работ и на необходимость строгого выполнения методических рекомендаций Гидрометеорологической службы СССР в целях получения однородных и сравнимых материалов наблюдений независимо от ведомства, к которому относятся пункты наблюдений.

Студенты, изучающие гидрометрию, должны всегда помнить, что работы гидрологической сети являются основным фундаментом научной и инженерной гидрологии и ее наблюдения — неисчерпаемый золотой фонд науки, без которого были бы невозможны блестящие достижения советской гидрологии. Это бесспорное и важное положение налагает на каждого гидролога обязанность во всех случаях, которых в производственной деятельности бывает немало, заботиться о развитии и улучшении качества стационарных и экспедиционных работ по изучению гидрологических объектов нашей Родины.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность рецензентам Н. Б. Барышникову, Е. С. Субботиной и Г. Н. Угренинову за ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению книги.

Раздел I

Задачи гидрометрии Краткая история Организация гидрометрических наблюдений

Глава 1

Введение

1.1. Предмет и задачи гидрометрии

Гидрометрия является частью более обширной науки — гидрологии. Слово «гидрометрия» образовано из сочетания двух греческих слов: ὑδωρ — вода и μετρεω — измеряют, т. е. «водомерие», измерение воды. Практически этот дословный перевод удержался только за одним из разделов гидрометрии — наблюдениями за уровнями воды, которые называются водомерными наблюдениями.

Основными задачами гидрометрии являются: 1) разработка методов и приборов для количественного определения и учета различных элементов режима водных объектов, 2) систематическое изучение гидрологического режима водных объектов для получения многолетних характеристик уровней, стока воды и наносов, химического состава воды, температуры воды, ледовых явлений и пр.

Исследование и изучение гидрологического режима необходимо для выполнения гидрологических и водохозяйственных расчетов при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, а также для научных выводов и обобщений в гидрологии.

При исследовании водных объектов, чтобы получить полное представление об их гидрологических особенностях и возможностях использования в народном хозяйстве, применяются стационарные и экспедиционные методы.

Устройство и оборудование сети гидрологических станций и постов, организация наблюдений на них, разработка методов и приборов для изучения элементов режима водных объектов рассматриваются и изучаются в курсе гидрометрии, а организация

и производство специальных водных исследований в связи с водохозяйственным проектированием изучаются в курсе водных исследований.

В соответствии с делением гидрологии по видам вод, являющихся объектами ее изучения, гидрометрия может быть подразделена на:

А. Гидрометрию атмосферных вод — гидрометеорологию, изучаемую в метеорологии.

Б. Гидрометрию поверхностных вод: 1) гидрометрию океанов и морей — морскую гидрометрию, называемую также практической океанографией; 2) гидрометрию вод суши (рек, озер, водохранилищ).

В. Гидрометрию подземных вод.

Из перечисленных разделов гидрометрии наиболее разработанными и выделившимися в форме особых научных дисциплин являются морская гидрометрия и речная гидрометрия.

В состав основных гидрометрических работ на реках, озерах и водохранилищах входят: 1) устройство и оборудование гидрологических станций и постов; 2) промерные работы для изучения глубин и рельефа дна водных объектов; 3) наблюдения за колебаниями уровней воды; 4) наблюдения за уклонами водной поверхности; 5) наблюдения за температурой воды, замерзанием и вскрытием водоемов, состоянием ледяного покрова; 6) измерение скоростей и направлений течений; 7) определение стока воды и наносов; 8) определение механического состава наносов и донных отложений; 9) наблюдения за цветом, прозрачностью, плотностью и химическим составом воды.

Помимо перечисленных, в состав гидрометрических работ могут входить наблюдения за деформацией речных русел и побережий водохранилищ, наблюдения за волновым режимом, исследование новых приборов и разработка методов гидрометрических работ и пр.

1.2. Значение гидрометрии для народного хозяйства

Результаты гидрометрических работ широко используются для различных научных обобщений и выводов, способствуя развитию теоретических основ гидрологии и методов гидрологических расчетов. Водные объекты страны используются для судоходства и лесосплава, водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, гидроэнергетики, рыбоводства, сельскохозяйственных мелиораций: орошения, обводнения, осушения, а также как места отдыха, спорта, туризма.

Плановое социалистическое хозяйство СССР предусматривает комплексное использование вод, поэтому гидрология должна дать не только расчетные данные для проектирования отдельных гидротехнических сооружений, но и проект водохозяй-

ственного баланса одного или многих объектов, расположенных на большей или меньшей территории, в целях наилучшего и комплексного использования водных ресурсов этой территории для народного хозяйства.

Решение сложных вопросов планирования водного хозяйства и строительства крупных гидротехнических сооружений невозможно без достаточно длительного и всестороннего гидрометрического изучения водных объектов, намечаемых к использованию.

Гидротехнические сооружения не только вносят изменения в естественный режим водных объектов, но и сами подвергаются воздействию со стороны последних. Сооружения, построенные без достаточного гидрологического обоснования, могут быть частично или полностью разрушены.

Эксплуатация оросительных систем, водных путей сообщения и сплава и различных гидротехнических сооружений (плотин, гидроэлектростанций, водозаборных установок и пр.) требует непрерывного наблюдения за режимом используемых водных объектов, с одной стороны, в целях наиболее рационального использования их водных ресурсов, а с другой — в целях предупреждения опасных для сооружений последствий в результате сильных половодий, паводков, ледоходов и пр. В связи с этим результаты наблюдений гидрологических станций и постов используются для информации о гидрологическом режиме водных объектов, изменении их режима и прогнозов гидрологических явлений (вскрытие и замерзание водоемов и пр.).

Между гидрометрией, водным хозяйством и гидротехникой всегда существовала тесная связь, способствовавшая развитию и усовершенствованию методов гидрометрии одновременно с развитием гидротехники и ростом потребностей водного хозяйства страны в целом. В настоящее время эта связь еще более усиливается. В соответствии с Положением о государственном учете вод и их использованием, утвержденным Советом Министров СССР 10 марта 1975 г., задачи гидрометрии значительно расширяются, а ее значение возрастает.

Основной задачей государственного учета вод и их использования является установление количества и качества вод, составляющих единый государственный водный фонд, и данных об использовании вод для нужд населения и народного хозяйства.

Эти сведения необходимы для:

— текущего и перспективного планирования использования вод и проведения водоохранных мероприятий, а также для рационального развития и размещения производительных сил на территории страны;

— составления схем комплексного использования и охраны вод, водохозяйственных балансов и ведения государственного водного кадастра;

— проектирования водохозяйственных, транспортных, промышленных и иных предприятий и сооружений, связанных с использованием вод;

— прогнозирования изменений гидрологических условий, водности рек и качества вод;

— разработки мероприятий по повышению эффективности работы водохозяйственных систем;

— оперативного управления водохозяйственными системами;

— нормирования потребления и сброса вод, а также показателей качества вод;

— разработки мероприятий по предупреждению и ликвидации вредного воздействия вод;

— осуществления государственного контроля за проведением мероприятий по рациональному использованию и охране вод;

— регулирования взаимоотношений между водопользователями, а также между водопользователями и другими заинтересованными организациями и учреждениями;

— иных нужд в случаях, предусмотренных законодательством СССР.

Государственный учет вод и их использования осуществляется по единой для Союза ССР системе Главным управлением гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР совместно с Министерством геологии СССР (по разделу подземных вод) и Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР (в части учета использования вод).

1.3. Краткие исторические сведения о развитии гидрографических и гидрометрических работ в СССР

Наиболее ранние водомерные наблюдения в СССР относятся к первому тысячелетию до нашей эры. Установлено, что разного рода водомеры для распределения оросительной воды на ирригационных системах применялись в бассейне р. Зеравшана, где было расположено древнее государство Согдиана, а также в нижнем течении Амударьи, в Хорезме.

Примером внимания наших предков к водным путям может служить факт измерения ширины Керченского пролива, проведенного князем Глебом Святославовичем, по льду зимой 1068 г. Ширина пролива была определена в 14 000 сажень (29 850 м).

Для обеспечения безопасности плавания по рекам в качестве указателей опасных для судоходства мест наносились знаки на валунах в руслах рек, примером чего могут служить Борисовы камни на Западной Двине (рис. 1.1), установленные по распоряжению князя Бориса Всеславича в XI—XII вв. Подобные путевые знаки в виде береговых каменных крестов с надписями, предупреждавшими о песчаных косах, мелях и перекатах, были найдены на берегах Волги, Волхова и других рек.

Значительное количество сведений о реках и озерах нашей Родины имелось в «Книге Большому Чертежу», являвшейся приложением к карте России, известной под названием «Большой Чертеж». Эта книга была впервые издана Н. И. Новиковым в 1773 г. под названием «Древняя Российская Идрография, содержащая описание Московского государства рек, протоков, озер, кладезей, и какие по них городы и урочища и на каком оные разстоянии».

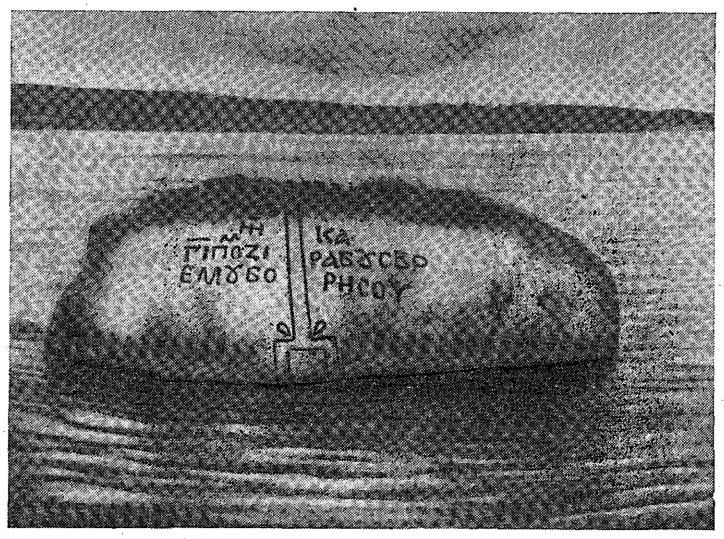


Рис. 1.1. Борисов камень на р. Западной Двине.

В Москве уже в середине XVII в. велись ежедневные наблюдения за состоянием погоды и уровнями на Москве-реке.

В первый, ранний период исследований (до 1700 г.) было проведено первичное изучение гидрографии рек и озер на огромной территории — от Белого моря до Черного, от Балтийского моря до Тихого океана. Обследованы были также моря, прилегающие к границам нашего государства. Были установлены связи между речными бассейнами, что в дальнейшем способствовало строительству водных соединений.

Одновременно был накоплен ряд ценных гидрологических и частично гидрометрических сведений, собранных в русских летописях, исторических документах и в «Книге Большому Чертежу».

Во второй период (1700—1874 гг.) — с образования Российской империи до начала развития в стране промышленного капитализма во второй половине XIX в. и организации в 1874 г. навигационно-описной комиссии — изучение водных объектов и их режима велось преимущественно экспедиционными методами.

Исследования рек, озер и водоразделов в целях инженерного использования рек в нашей стране получили развитие со времен Петра I, когда значительный рост производительных сил, развитие промышленности и торговли, а также потребности обороны страны вызвали необходимость усиленного использования рек для судоходства и строительства каналов и водных соединений. Так, в 1697—1701 гг. в связи с азовскими походами были проведены первые инженерные исследования Дона, а также первые изыскания водораздела Дон—Волга. В 1700—1704 гг. были проведены изыскания в районе Иван-озера для составления проекта водного соединения бассейна Оки с Доном. Шлюзованный канал, построенный для соединения р. Шать (приток Упы) с верховьями Дона через Бобриковскую долину, просуществовал до XIX в.

В 1703—1709 гг. были проведены изыскания и построена М. И. Сердюковым Вышневолоцкая система, соединившая Волгу с Балтийским морем. На этой системе было впервые осуществлено регулирование стока посредством водохранилищ. При Петре I были проведены изыскания Волго-Балтийского (Мариинского) водного пути, строительство которого начато в 1719 г. и закончено в 1731 г. По заданию Петра I полковник Геннин произвел изыскания на Москве-реке и ее притоках в целях соединения Москвы-реки с Верхней Волгой.

Петр I в одном из своих указов повелел отмечать на стенах городов, монастырей и церквей уровень воды весеннего половодья, установил в 1715 г. первый водомерный пост на р. Неве у Петропавловской крепости. Несколько позже водомерные наблюдения были начаты на Ладожском озере, валдайских озерах и уральских прудах. При Петре I был измерен первый расход Волги у г. Камышина. Ему принадлежит идея создания глубоководного лота с приспособлением для взятия пробы грунта.

В целях изучения основных гидрологических характеристик режима рек в 1760 г. по инициативе М. В. Ломоносова географическим департаментом Академии наук была разослана анкета, заключавшая вопрос: «В какую пору по большей части реки при городах замерзают и выходят (вскрываются) и где бывают вешние и осенние наводнения и как велики?».

М. В. Ломоносову принадлежит также идея и разработка первой конструкции прибора типа вертушки для измерения скоростей течения.

Значительная работа по изучению рек и озер России выполнена Академией наук, которая в 1768—1774 гг. провела ряд географических экспедиций, собравших обширные материалы по гидрографии. Следует отметить сочинение А. Колмакова, изданное в 1791 г. под названием «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия или по желобам...». В 1856 г. инженер В. Рожков опубликовал монографию «О гидравлическом и горнозаводском хозяйстве

с описанием устройств, в нем употребляемых». Труд Рожкова в основном представляет собой практическое руководство по производству различного рода гидрометрических работ применительно к запросам горнозаводского хозяйства.

Большое значение для дальнейшего развития водных исследований в России имела организация в 1767 г. главного управления водяных коммуникаций, преобразованного впоследствии в главное управление водными и сухопутными сообщениями, которое предписало в 1811 г. вести на крупных пристанях, мостах и шлюзах ежедневные наблюдения за уровнем воды и отмечать даты вскрытия и замерзания рек и озер. Эти наблюдения вскоре прекратились и были вновь возобновлены в 1843 г.

Наблюдения за уровнями воды велись по рейкам, забиваемым в дно реки у берега, без увязки их с реперами. В 1858 г. главным управлением путей сообщения была издана первая «Инструкция для производства наблюдений за изменениями горизонта и ложа в реках», которая упорядочила водомерные наблюдения и предписала связывать нули водомерных реек при их перестановках с береговыми реперами.

Водные исследования и гидрометрические работы были тесно связаны со строительством искусственных водных соединений и освоением рек для судоходства. Строительство и эксплуатация водных путей показали всю важность и необходимость систематического изучения режима вод, в результате чего было осознано значение стационарных наблюдений и сделаны первые попытки их массовой организации. Наряду с этим были заложены основы развития научной гидрологии, сделан ряд крупных обобщений по результатам прошлых исследований и начаты работы в области развития и систематизации методики гидрометрических исследований.

В период с 1874 по 1917 г. гидрологические исследования получают дальнейшее развитие.

В 1874 г. при департаменте шоссейных и водных сообщений министерства путей сообщения была учреждена навигационно-описная комиссия (НОК) под председательством инж. П. А. Фадеева, действовавшая в течение 20 лет и положившая начало планомерному изучению рек и озер. Навигационно-описная комиссия образовала специальные описные партии, которые вели работу по единой инструкции, составленной инж. Н. А. Богуславским. Была выработана новая инструкция для водомерных наблюдений, действовавшая до 1925 г.

Работы комиссии открыли новую и весьма плодотворную эпоху в изучении гидрографии нашей страны, в развитии и усовершенствовании методов гидрометрии. Описные партии НОК организовали около 500 водомерных постов и на ряде рек изучали скорости течения и определяли расходы воды.

В 1881 г. было положено начало изданию «Сведений о колебаниях уровня воды на реках и озерах Европейской России».

Руководство деятельностью описных партий после закрытия навигационно-описной комиссии осуществлялось (до 1917 г.) управлением водных путей министерства путей сообщения. В этот период были начаты планомерные исследования рек Сибири. Результаты исследований рек и озер печатались в «Материалах для описания русских рек и улучшения их судоходных условий» (74 выпуска) и других изданиях. Эти труды, в которые вошли сведения о большинстве крупных рек и озер, явились прочной основой не только для гидрографии СССР, но и для научного развития русской гидрологии и гидрометрии, так как одновременно с исследованиями описными партиями разрабатывались, проверялись на практике и улучшались методы и приборы для гидрометрических работ.

Из наиболее значительных работ в области гидрометрии следует отметить труд инж. Д. Д. Гнусина «О способах определения скоростей и расходов воды в реках», ряд статей инж. Н. С. Лелявского с описанием изобретенного им подводного флюгера и впервые произведенных им с помощью этого прибора определений направлений течений (1895—1896 гг). В 1901 г. Н. Д. Тяпкин опубликовал книгу «Приборы для определения скоростей и расходов воды в открытых руслах».

С 1873 г. создавались экспедиции министерства земледелия и государственных имуществ для изучения рек в целях использования их для сельскохозяйственных мелиораций (осушение и орошение). Эти исследования уделяли, в отличие от работ министерства путей сообщений, большое внимание вопросам режима стока, а также химического состава вод.

С 1909 г. отделом земельных улучшений главного управления земледелия и землеустройства была начата организация постоянных гидрометрических исследований, для этого были созданы гидрометрические части в Туркестанском крае и на Кавказе, а в 1913 г. была учреждена гидрометрическая часть Европейской России. Они организовали гидрометрическую сеть в Туркестанском крае (14 станций и 114 водомерных постов), на Кавказе (10 станций и 100 водомерных постов) и в Европейской России (374 водомерных поста).

Труды гидрометрических частей напечатаны в их годовых отчетах и представляют ценный вклад в гидрологию и гидрометрию. Помимо разнообразных материалов наблюдений за уровнями, расходами воды и наносов, составом наносов, температурой и химическим составом воды, сведений по гидробиологии и гидрометеорологических данных (осадки, испарение), они содержат много рекомендаций по методам гидрометрических работ и приборам.

Из упомянутых отчетов особенно следует выделить «Отчет гидрометрической части в Туркестанском крае за 1910 г.», в котором содержится ряд весьма ценных методических разработок, выполненных под руководством В. Г. Глушкова. Необходимо

также отметить деятельность партии крымских водных изысканий (1910—1916 гг.) под руководством Д. И. Кочерина, впервые применившего в широком масштабе специальные гидрометрические сооружения (водосливы, лотки, рамки, донные контроли) для учета стока на реках, ручьях и балках горного Крыма. В 1916 г. общее количество гидрометрических станций и водомерных постов достигло 1500.

Рассматриваемый период характеризуется созданием постоянно действующей сети гидрометрических постов и станций и систематическим изданием материалов их наблюдений. Особо следует отметить развитие научных исследований в области гидрологии и гидрометрии, что нашло отражение в выдающихся трудах Н. С. Лелявского, В. М. Лохтина, А. И. Воейкова, Д. Н. Анучина, В. Г. Глушкова, Н. Д. Тяпкина, Д. И. Кочерина и др.

После Великой Октябрьской социалистической революции, в годы напряженной борьбы молодого Советского государства с объединенными силами интервентов и контрреволюции, резко сократились, а в ряде мест и полностью прекратились исследовательские и гидрометрические работы на реках и озерах страны, которые были уже значительно сокращены в зоне военных действий в годы первой мировой войны. В первые же годы существования Советское государство заботилось о возобновлении и развитии гидрометрических работ и водных исследований.

В 1919 г. в Петрограде был основан Российский гидрологический институт, ныне Государственный ордена Трудового Красного Знамени гидрологический институт, являющийся центральным научным гидрологическим институтом Советского Союза. В задачи Института входит методическое руководство работами по изучению режима вод суши и разработка научных основ для рационального использования водных ресурсов страны.

В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина ВЦИК принял историческое решение об образовании Государственной комиссии по электрификации России — ГОЭЛРО. Составленный комиссией по ГОЭЛРО план электрификации был одобрен VIII съездом Советов и явился мощным толчком развития водного хозяйства СССР на основе комплексного использования вод для различных нужд народного хозяйства страны. Это решение поставило ряд весьма сложных и важных задач не только в области восстановления и развития водных исследований, но и в отношении повышения их качества.

Чтобы изжить организационные и методические недостатки в гидрометеорологических исследованиях, СНК СССР в 1929 г. принял решение об объединении всех работ по гидрологии, метеорологии и геофизике, для чего при СНК СССР был учрежден Гидрометеорологический комитет СССР, преобразованный в 1933 г. в Центральное управление единой гидрометеорологи-

ческой службы СССР (ЦУЕГМС), а в 1936 г.— в Главное управление гидрометеорологической службы СССР (ГУГМС).

Общее число действующих на территории СССР пунктов наблюдений на реках, озерах, водохранилищах и в головах водоотводящих каналов составляет (1972 г.) около 35 000. Опорная сеть Гидрометслужбы состоит из 6243 пунктов, из которых на 4896 систематически ведется учет стока воды, а около 2200 пунктов оборудованы самописцами.

С целью изучения гидрометеорологического режима крупных озер и водохранилищ создана сеть гидрометеорологических обсерваторий (15), озерных станций (58) и постов (618).

Значительное внимание уделяется изучению химического состава вод, ведущемуся на 1900 водных объектах в 3700 створах, сток наносов изучается на 1300 створах.

Особо следует отметить развитие воднобалансовых исследований, которые осуществляются на 16 воднобалансовых станциях в различных физико-географических зонах СССР. В опытном порядке воднобалансовый подход к изучению водных ресурсов применяется на 250 речных бассейнах опорной сети.

Кроме указанного числа гидрологических станций и постов, находящихся в ведении Гидрометеорологической службы СССР, имеется значительное количество ведомственных станций и постов.

Одним из важнейших достижений советской гидрологии является организация и развитие постоянно действующей службы гидрологических информаций и прогнозов. До Октябрьской революции систематически действующей службы гидрологических прогнозов не было, хотя регулярные телеграфные гидрологические информации для обслуживания судоходства по Волге были впервые введены в Казанском водном округе министерства путей сообщения еще в 1893 г. Развитие народного хозяйства СССР и строительство крупных гидротехнических сооружений вызвали неотложную потребность в организации службы гидрологических прогнозов и информаций, в результате чего уже в 1922 г. в Центральном управлении морского транспорта, Государственном гидрологическом институте, Управлении водного хозяйства Средней Азии и в ряде других учреждений была начата работа по прогнозам уровней воды, стока, вскрытия и замерзания рек, озер и морей. В настоящее время работы по гидрологическим прогнозам ведутся в Гидрометцентре СССР (Москва) и в территориальных управлениях Гидрометеорологической службы.

Таким образом, Гидрометеорологическая служба СССР организовала и провела ряд крупных стационарных, экспедиционных, экспериментальных и теоретических исследований, которые, помимо большого практического значения, способствовали развитию гидрологии как науки. Значительные работы в области гидрологии были выполнены в различных гидротехнических и

водохозяйственных организациях и в Академии наук СССР. В результате этих исследований появился ряд крупных теоретических и региональных работ по вопросам водного баланса и стока, температурного и ледового режима водоемов, химизма вод, гидрологии рек, озер и водохранилищ, болот, ледников и подземных вод, а также по вопросам гидрологических прогнозов.

Значительные работы по обобщению и систематизации опыта гидрометрических работ были выполнены при разработке учебников и учебных пособий по гидрометрии и водным исследованиям, что нашло отражение в трудах Б. А. Аполлова и М. А. Лукашина, Е. В. Близняка, В. Д. Быкова, В. И. Владычанского, Н. А. Гирилловича, Г. В. Железнякова, А. В. Огиевского, Б. В. Полякова, Г. И. Шамова, В. Н. Ярцева и др.

Резкое возрастание объема работ по изучению ресурсов поверхностных вод СССР после Великой Отечественной войны вызвало необходимость упорядочения и унификации методов гидрометрических измерений, обработки и публикации получаемых материалов. С этой целью Государственный гидрологический институт (ГГИ) по заданию Главного управления Гидрометслужбы при Совете Министров СССР подготовил ряд методических пособий — наставлений, определяющих содержание и технику выполнения гидрометрических работ на больших и малых реках, озерах, водохранилищах, болотах. В последующем основные положения наставлений получили дальнейшее развитие в серии методических указаний, подготовленных ГГИ.

В развитии методики гидрометрических работ и в подготовке методических пособий принимали участие А. К. Проскуряков, В. В. Уханов, С. И. Коплан-Дикс, А. М. Гаврилов, Д. Е. Скородумов, Г. И. Шамов, И. Ф. Карасев, П. Н. Бурцев, А. М. Димаксян и др. Большая работа в этом отношении проведена Центральной методической комиссией под руководством А. И. Чеботарева, осуществившей техническую экспертизу всех методических пособий.

Следует отметить, что в 1929—1931 гг. были впервые открыты специальные высшие и средние учебные заведения (гидрометеорологические институты и техникумы) для подготовки инженеров и техников-гидрологов; кроме того, осуществлялась подготовка гидрологов в ряде университетов СССР.

Советский период характеризуется широким развитием научных и производственных гидрологических исследований в целях комплексного использования водных ресурсов и плановой организации водного хозяйства СССР. Организация Гидрометеорологической службы СССР, создание ряда научных и учебных гидрометеорологических учреждений, организация государственной опорной сети гидрометеорологических станций, а также научно-исследовательских станций и гидрологических лабораторий (стоковых, русловых, ледовых и др.), оборудованных первоклассными гидрометрическими установками и приборами,

организация службы гидрологических информаций и прогнозов, а также составление Водного кадастра СССР являются наиболее важными мероприятиями по развитию водных исследований в СССР.

За период с 60-х годов Гидрометеорологической службой СССР и другими ведомствами в области гидрометрии и учета вод осуществлены следующие значительные мероприятия:

— по расширению (в особенности в Азиатской части СССР) и техническому оснащению опорной гидрологической сети;

— по созданию на крупных водохранилищах и озерах гидрометеорологических станций и обсерваторий для изучения их гидрометеорологического режима и составляющих водного баланса;

— по развитию и усовершенствованию воднобалансовых исследований на болотных, стоковых и воднобалансовых станциях;

— по теории гидрометрии, точности измерений и усовершенствованию методики гидрометрических работ на сети и обработки материалов наблюдений;

— по увеличению количества пунктов, ведущих наблюдения за твердым и солевым стоком рек;

— выполнены исследования в части учета стока на гидроузлах, ГЭС и водозаборах оросительных систем;

— разработаны методы и аппаратура для производства гидрометрических измерений с помощью аэрометодов и начато внедрение их в практику;

— осуществляется разработка аппаратуры для автоматизации гидрометрических наблюдений и проводятся ее экспериментальные исследования в полевых условиях;

— разрабатывается методика машинной обработки материалов гидрометрических наблюдений;

— выполнены огромные по своему объему работы по подготовке и изданию научно-прикладного справочника о ресурсах поверхностных и подземных вод, а также проведены работы по организации учета водопотребления и водоотведения;

— выполнены значительные работы по усовершенствованию существующих и разработке новых приборов и аппаратуры для гидрометрических измерений.

Советский период развития гидрологии и гидрометрии является, в особенности со дня организации Гидрометеорологической службы СССР, наиболее плодотворным как по глубине и всесторонности теоретических исследований, так и по размеру и сложности произведенных в этот период стационарных, экспедиционных и специальных исследований вод СССР. С полным основанием можно утверждать, что гидрология как наука с определенным теоретическим содержанием и практическим приложением ее научных выводов для нужд народного хозяйства сформировалась после Великой Октябрьской социалистической революции и дальнейшее ее развитие всецело связано со строительством коммунистического общества в СССР.

Глава 2

Организация сети гидрометеорологических станций и постов СССР

2.1. Гидрометеорологическая служба СССР

Общее руководство всеми гидрометеорологическими работами на территории Советского Союза осуществляется Главным управлением гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР.

Гидрометеорологическая служба СССР является общегосударственной службой и призвана удовлетворять запросы народного хозяйства и обороны страны в области метеорологии, климатологии, аэрологии, агрометеорологии, гидрологии и морской гидрометеорологии. Основными задачами Гидрометслужбы являются: 1) изучение гидрометеорологического режима территории СССР, морей и океанов; 2) обслуживание народного хозяйства и обороны страны гидрометеорологической информацией, прогнозами погоды и гидрологических явлений, сведениями о климате, гидрологическом режиме и агроклиматических условиях; 3) проведение научно-исследовательских работ в области метеорологии, аэрологии, гидрологии, морской гидрометеорологии; 4) обобщение и издание материалов наблюдений и научных исследований — ежегодников, справочников, трудов и т. п.

В республиках, краях и областях имеются управления Гидрометслужбы (УГМС), которые руководят работой всех станций, постов и бюро, расположенных на обслуживаемой ими территории, обрабатывают и обобщают результаты наблюдений сети и удовлетворяют запросы всех местных организаций, нуждающихся в гидрометеорологических сведениях и материалах.

В настоящее время осуществляется комплексная автоматизация Гидрометслужбы СССР, в связи с чем будет производиться ее организационная перестройка. Структура Гидрометслужбы в условиях комплексной автоматизации рассматривается в главе 34.

Научно-методическое руководство всеми гидрологическими работами Гидрометеорологической службы осуществляется Гидрометцентром СССР и Государственным гидрологическим институтом (ГГИ).

2.2. Основные принципы организации и размещения сети гидрометеорологических станций и постов

Для изучения гидрометеорологического режима организуются наблюдения на постоянной и временной государственной сети станций и постов, а также производятся экспедиционные работы.

Ленинградский Гидрометеорологический ин-т БИБЛИОТЕКА

Государственная гидрометеорологическая сеть состоит из основных и специальных станций и постов.

Основные, или опорные, станции и посты систематически и всесторонне изучают гидрометеорологические процессы и явления, атмосферные процессы, погоду, климат, гидрологический режим рек, озер, водохранилищ, ледников, болот, морей, а также агрометеорологические условия. Основные станции и посты открываются на продолжительные сроки, а в необходимых случаях — на неограниченное время (вековые, или реперные, станции и посты).

Основные, или опорные, посты делятся на режимные и оперативные (информационные). Режимные гидрологические посты создаются с целью изучения местных особенностей гидрологического режима: уровней, стока воды, наносов, растворенных веществ, уклонов водной поверхности и других гидравлических элементов рек и водоемов.

Оперативные гидрологические посты создаются для информации заинтересованных народнохозяйственных организаций о текущих явлениях гидрологического режима: паводках, наводнениях, явлениях ледового режима, уровнях воды и др.,— и для составления прогнозов элементов гидрологического режима.

Специальные станции и посты изучают местные особенности гидрометеорологических условий и режима для специальных целей, например для изучения климата больших городов, агрометеорологических условий возделывания сельскохозяйственных культур и т. п. Специальные станции организуются в тех случаях, когда данные наблюдений ближайших основных станций и постов оказываются недостаточными для удовлетворения различных специфических требований. Сроки действия специальных станций и постов устанавливаются в зависимости от поставленных перед ними задач.

Кроме государственной гидрометеорологической сети станций и постов, имеются ведомственные станции и посты, организуемые различными ведомственными учреждениями (научными, проектными и пр.) для удовлетворения их специфических запросов. Так, Министерством сельского хозяйства создана гидрологическая сеть станций и постов на ирригационных каналах, Министерством речного флота — гидрологические посты на шлюзах и перекатах, Министерством путей сообщения — гидрологические посты при мостах. Ведомственные станции и посты организуются по согласованию с местными управлениями Гидрометслужбы.

При размещении сети станций и постов учитываются:

1) географическое распределение станций и постов в зависимости от степени изменчивости наблюдаемых гидрологических и метеорологических элементов и явлений в пространстве, а также от степени однородности природных условий географической среды в целом;

2) репрезентативность (представительность, характерность) наблюдений станций и постов, т. е. степень отражения их показаниями характерных особенностей данного района, водного объекта или части его;

3) степень точности определения гидрометеорологических элементов и явлений в соответствии с запросами науки, народного хозяйства и обороны страны;

4) план развития водохозяйственных мероприятий в СССР;

5) экономические соображения.

План размещения станций и постов гидрометеорологической сети разрабатывается республиканскими и территориальными УГМС при участии научных учреждений Гидрометслужбы (Гидрометцентра СССР, Государственного гидрологического института, Государственного океанографического института, Главной геофизической обсерватории и др.), после чего утверждается Главным управлением Гидрометслужбы СССР.

При размещении гидрологических станций и постов (основных и специальных) учитывают, что основные элементы гидрологического режима водных объектов (колебания уровней, расходов воды и наносов, вскрытие и замерзание, химический состав воды и пр.) подвержены непрерывным изменениям, имеющим весьма сложный характер. Эти колебания обусловлены влиянием и взаимодействием ряда изменяющихся природных и хозяйственных факторов. Для надежной оценки гидрологического режима водных объектов необходимо иметь возможно более продолжительные и непрерывные наблюдения.

Гидрологические станции и посты размещаются с таким расчетом, чтобы при возможно меньшем их количестве можно было бы получить достаточные и надежные данные о водном режиме главной реки и ее притоков.

Для сравнимости материалов наблюдений станций и постов все они работают по типовым программам, устанавливающим состав и сроки наблюдений. Гидрометрические наблюдения на станциях и постах ведутся с помощью стандартных приборов на основании единых для всей сети методических указаний, определяющих способы полевых наблюдений и камеральной обработки их результатов.

2.3. Классификация гидрометеорологической сети

Все гидрометеорологические станции и посты Главного управления гидрометслужбы СССР подразделяются по видам и разрядам. Вид станции и поста определяет область их деятельности, а разряд — объем выполняемых наблюдений и работ.

По видам станции и посты подразделяются на метеорологические, аэрологические, гидрологические, морские гидрометеорологические (береговые), судовые гидрометеорологические, а также специализированные.

Станции и посты подразделяются на I, II и III разряды.

Гидрологические станции — это учреждения, имеющие определенный штат сотрудников. Они бывают I и II разрядов. Станции I разряда изучают гидрологический режим водных объектов на территории своей деятельности, руководят прикрепленными станциями II разряда и гидрологическими постами, сообщают необходимые сведения о гидрологическом режиме заинтересованным организациям и учреждениям. Станции II разряда производят полевые гидрологические наблюдения и работы, обработку и анализ материалов наблюдений постов, а также передают информацию о наблюдениях. Гидрологические станции II разряда создаются там, где организация станций I разряда нецелесообразна, а постоянное присутствие технического персонала на гидрометрическом створе необходимо.

Гидрологический пост — это место на реке, озере или водохранилище, выбранное с соблюдением определенных требований и оборудованное для проведения наблюдений. На гидрологическом посту имеется наблюдатель.

Речные гидрологические посты бывают I, II и III разрядов. Посты I разряда ведут наблюдения за уровнем и температурой воды, ледяными образованиями и ледовой обстановкой, измеряют расходы воды и производят метеорологические наблюдения по программе метеорологических постов I разряда. На отдельных постах измеряют расходы взвешенных и донных наносов и производят отбор проб воды на мутность и для химического анализа. Посты II разряда ведут наблюдения по программе постов I разряда за исключением измерения расходов воды, взвешенных и донных наносов. Посты III разряда ведут наблюдения за уровнем и температурой воды, ледяными образованиями и ледовой обстановкой. Гидрологические посты всех разрядов могут привлекаться к передаче информации о результатах наблюдений.

Кроме речных гидрологических постов, имеются озерные гидрометеорологические посты I и II разрядов, которые ведут наблюдения за гидрометеорологическим режимом озер: уровнем и температурой воды, ледовыми явлениями, толщиной льда и снега на льду, ветром, волнением и др.

Специализированные станции ведут наблюдения и работы по специальным программам, предусматривающим изучение отдельных объектов и явлений. В сети Гидрометеорологической службы СССР имеются следующие специализированные станции:

— стоковые, исследующие процессы формирования водного баланса на малых водосборах в различных физико-географических условиях;

— агрометеорологические, изучающие агроклиматические условия и их влияние на сельскохозяйственное производство;

— устьевые, изучающие гидрометеорологический режим

устьев крупных рек, впадающих в моря, и прилегающих участков взморья;

— озерные, изучающие гидрометеорологический режим озер и водохранилищ;

— снего-лавинные, изучающие снегозалегание, возникновение и перемещение лавин в горных районах;

— болотные, изучающие все элементы водного и теплового режима крупных болотных массивов в различных физико-географических условиях.

Раздел II

Наблюдения за уровнями воды

Глава 3

Основные сведения о режиме уровня воды и сущность водомерных наблюдений

3.1. Основные сведения о режиме уровней воды

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

Многолетние колебания уровней связаны с периодическими колебаниями климата вследствие более или менее длительных изменений в режиме общей атмосферной циркуляции. Наблюдающиеся в связи с этим длительные похолодания или потепления и сопутствующие им уменьшения или увеличения осадков, влажности и испарения вызывают увеличение или уменьшение стока воды, а следовательно, повышение или понижение уровней воды в реках, озерах, болотах и уровней подземных вод.

Многолетние колебания уровней воды могут быть вызваны также геологическими причинами (поднятие или опускание дна водоема) и эрозионно-аккумулятивной деятельностью рек. Так, например, в верховьях горных рек наблюдается непрерывный процесс глубинной эрозии (размыв) русла, вследствие чего абсолютные отметки средних многолетних уровней этих рек имеют устойчивую тенденцию к снижению. Эти изменения уровня не связаны с изменением количества воды.

Годовые колебания уровня воды определяются в основном метеорологическими условиями данного года, т. е. количеством осадков, выпавших на территории водосбора, температурами и влажностью воздуха и ветрами, определяющими потери влаги на испарение. Размеры потерь воды на инфильтрацию (просачивание) в почвы и грунты хотя в основном и зависят от их состава, а также от геологического и геоморфологического строения бассейна, но они связаны и с метеорологическими условиями, в особенности в осенний и весенний сезоны. В годы

с обильным увлажнением уровни в реках, озерах, болотах и близких от поверхности подземных вод стоят выше, чем в сухие годы. Вследствие медленного движения воды в порах грунтов колебания уровней глубоко залегающих подземных вод отражают влияние метеорологических условий данного года лишь спустя 1—2 года.

Сезонные колебания уровня воды в реках, озерах, болотах определяются прежде всего географическим положением их водосборного бассейна и его физико-географическими условиями. Непосредственно влияют на ход уровней в отдельные сезоны климатические условия, в частности распределение осадков внутри года. Именно этим обстоятельством и обусловливается весеннее (март—апрель) половодье на реках европейской части СССР, в бассейнах которых количество зимних осадков составляет около 30% годовой их суммы, в отличие от дальневосточных рек, где основное половодье наблюдается летом (июль—август), так как 90—95% годовых осадков выпадает здесь летом.

Сезонные колебания уровней зависят также от высоты и рельефа бассейна, а также от его лесистости, заболоченности и озерности. У горных рек и озер, питающихся от таяния высокогорных снегов и ледников, наивысшие уровни обычно наблюдаются в июле (Кубань, Амударья). Кроме того, для горных рек (Ингур, Рион, Чорох) характерно большое количество паводков от дождей. Влияние лесистости, заболоченности и озерности бассейна реки выражается в сглаживании и выравнивании хода уровней по отдельным сезонам года, что хорошо видно на реках Свири, Неве, Орше и др.

В летний период колебания уровней воды в реках могут обусловливаться развитием и отмиранием водной растительности.

Сезонные колебания уровней воды в реках тесно связаны и с ледовыми явлениями. Так, почти на всех реках в период замерзания наблюдается вначале кратковременный подъем уровней вследствие резкого возрастания сопротивления движению воды в момент ледостава, а затем снижение уровней в связи с переходом рек на грунтовое питание.

Периодические размывы русла и отложения в нем наносов при прохождении паводков, что особенно ярко бывает выражено у горных рек, накладывают дополнительный отпечаток на характер сезонных колебаний уровней воды. Значительное влияние на колебания уровней воды в реках и озерах могут оказывать гидротехнические сооружения и забор воды на орошение.

Суточные колебания уровня воды в низовьях рек могут вызываться приливами, как, например, на реках Онеге, Северной Двине, и сгонно-нагонными ветрами, влияние которых более ярко выражено в устье Невы и более слабо в устьях Волги, Дона, Днепра и других рек. Определенно выраженный суточный

ход уровня наблюдается у небольших рек с ледниковым питанием (Зеравшан, Кубань в верховьях) вследствие суточного изменения метеорологических элементов (солнечной радиации, температуры воздуха), влияющих на таяние ледников. Суточный ход уровня воды отмечается на малых реках при выпадении в их бассейнах дождей. Суточные колебания уровня воды характерны для периода осенних и весенних ледоходов на реках (или участках рек), где наблюдаются явления зажоров и заторов льда, а также на сплавных реках при образовании заломов. Выше заторов, зажоров и заломов уровень воды резко поднимается, а ниже — столь же резко падает.

Значительные суточные колебания уровня воды наблюдаются в нижних бьефах крупных гидроузлов в связи с работой ГЭС по суточному графику нагрузки; наибольшие уровни бывают при пропуске максимальных расходов через турбины в суточный период максимума нагрузки. В верхних бьефах гидроузлов суточные колебания уровня менее выражены ввиду значительного объема воды в водохранилище.

Колебания уровней воды по длине рек (от истока к устью) хотя и сохраняют свои основные очертания, но в значительной степени сглаживаются по мере приближения к устью рек.

3.2. Цели и основные задачи водомерных наблюдений

Изучение колебаний уровней воды в реках, озерах, водохранилищах, болотах и морях имеет большое научное и хозяйственное значение. Строительство мостов, плотин, гидроэлектростанций, различных береговых сооружений (пристаней, складов, водозаборных сооружений), а также ирригационных каналов, дорог и населенных пунктов вдоль русел рек не может быть рациональным без учета режима и возможных размеров колебаний уровня воды в реках в районе расположения сооружений. Например, при неучете гидрологических условий построенный мост может явиться препятствием для судоходства на реке в период высокого стояния уровня или будет затопляться вместе с прилегающей к нему дорогой. Ирригационные каналы, выведенные из реки без достаточного изучения режима колебаний ее уровня, могут в период межени оказаться без воды. Береговые сооружения и населенные пункты могут подвергаться разрушительному действию наводнений и ледоходов. Изучение колебаний уровней воды в реках имеет большое значение для судоходства.

Наблюдения за уровнями на водохранилищах необходимы для наиболее рационального использования их водных ресурсов в интересах всех участников водохозяйственного комплекса: гидроэнергетики, судоходства, рыбного хозяйства и др.

В гидрометрии наблюдения за уровнями воды рек имеют особо важное значение для подсчета стока воды. В основу под-

счета стока положена связь между высотой уровня и расходом воды в реке, устанавливаемая обычно эмпирическим путем. Измерение расхода воды — трудоемкая и достаточно длительная операция, в то время как измерение уровня выполняется легко и быстро, зачастую автоматически.

Установленная на основе сравнительно небольшого числа одновременных измерений расходов Q и уровней H зависимость $Q=f(H)$ позволяет определить по наблюденным уровням ежедневные расходы воды и подсчитать сток за год или иной период времени.

На основе многолетних и непрерывных наблюдений за уровнем можно охарактеризовать режим уровней изучаемого водного объекта и, кроме того, по зависимости между расходами и уровнями получить представление о расходах воды реки за различные по водности годы.

3.3. Принципы устройства водомерных постов

Наблюдения за уровнями воды на водомерных постах должны быть организованы таким образом, чтобы материалы наблюдений: 1) по одному посту были сравнимы за весь период его действия и 2) допускали возможность сопоставления результатов наблюдений по ряду постов, расположенных на одном водном объекте. Эти требования могут быть выполнены при условии, что на всех постах будет действовать единая система наблюдений.

Каждый водомерный пост должен состоять из: 1) водомерных устройств — приспособлений для измерения уровней (реек, свай, самописца) и 2) постоянных высотных знаков (реперов). Уровни воды, наблюдаемые на водомерных постах, должны быть отнесены к условной плоскости нуля графика поста, высотная отметка которой остается постоянной для всего периода существования поста.

Отметка нуля графика поста выбирается при устройстве поста с таким расчетом, чтобы плоскость нуля графика находилась не менее чем на 0,5 м ниже самого низкого уровня воды в реке (озере), который можно ожидать в створе поста. Этим достигается то, что при самых низких уровнях воды отсчеты их над нулем графика будут положительными. На реках с неустойчивым руслом отметку нуля графика поста необходимо назначать с учетом возможной глубинной эрозии (размыва) русла. При малых глубинах русла отметка нуля графика может быть приурочена к наинизшей отметке дна реки в створе поста или же несколько ниже нее. При наличии ряда постов, расположенных на коротком участке реки (5—10 км), имеющей небольшое падение, целесообразно для всех постов назначить общий нуль графика. Общий нуль графика следует также назначать для всех постов, расположенных на одном озере или водохранилище.

На водохранилищах отметка нуля графика поста назначается на 0,5—1,0 м ниже проектного уровня сработки в приплотинной части водохранилища.

В отдельных случаях все же может возникнуть необходимость изменения отметки нуля графика. Изменение высотного положения плоскости нуля графика производится в случаях: 1) переноса поста на значительное расстояние, 2) неудачного первоначального назначения отметки нуля графика выше низшего уровня воды, 3) резкого изменения уровенного режима, например при создании водохранилища. Кроме того, может возникнуть необходимость изменить отметку нуля графика при фактической неизменности его высотного положения. Это бывает

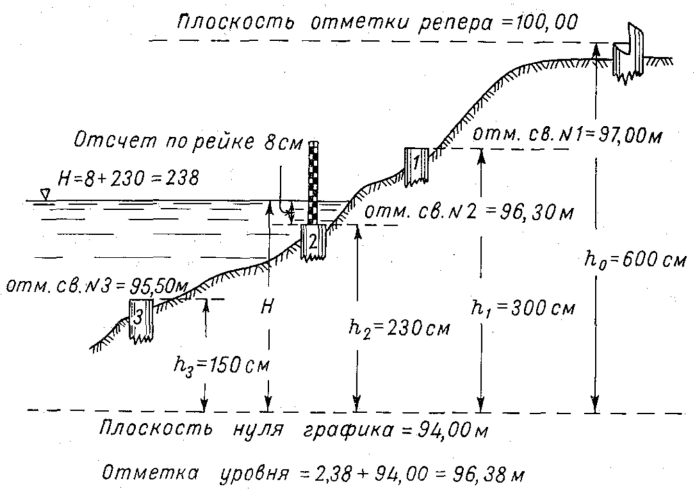


Рис. 3.1. Схема отметок и отсчетов на свайном водомерном посту.

в тех случаях, когда изменяются отметки постовых реперов: 1) при переходе от условной системы отметок к Балтийской, 2) при пересчете отметок исходных реперов органами ГУГК, 3) после повторной нивелировки постовых реперов, если при этом выявятся расхождения, превышающие допустимые невязки нивелирного хода.

Высотное положение плоскости нуля графика поста определяется расстоянием h_0 (рис. 3.1) по вертикали от репера водомерного поста. Если репер имеет абсолютную отметку, то, вычитая из нее превышение h_0 репера над нулем графика поста, получим абсолютную отметку нуля графика поста. Помимо нуля графика, на водомерных постах имеется один или несколько (при наличии ряда реек или свай) нулей наблюдения. Под понятием «нуль наблюдения» подразумевается та высотная плоскость, от которой производится отсчет уровня воды в момент

наблюдения. Высотное положение нулей наблюдения определяется превышением репера над площадками свай (или нулями реек) поста. На реечном водомерном посту — это плоскость нуля рейки, а на свайном — площадка (головка) сваи, по которой в этот момент ведут наблюдения. На рис. 3.1 нуль наблюдения представлен площадкой сваи № 2.

Следовательно, нуль наблюдения, в отличие от нуля графика, является не условной, а вещественной плоскостью. Положение нуля наблюдения может меняться в зависимости от колебания уровня воды и количества реек или свай, установленных на посту. Эти изменения могут иметь место при ремонте и замене реек и свай.

Превышение нулей реек и головок свай над нулем графика поста, или, иначе, разность их высотных отметок, называется п р и в о д к о й этих реек или свай. На рис. 31 приводки свай № 1, 2, 3 будут соответственно h_1, h_2, h_3. Для удобства вычислений уровней над нулем графика поста приводки выражают в сантиметрах.

Наблюдения на водомерном посту могут быть начаты только после того, как будут выполнены следующие работы:

1) назначена отметка нуля графика поста;

2) нивелировкой от репера поста установлены отметки нулей реек, а на свайном посту — площадок (головок) свай;

3) вычислены (в сантиметрах) приводки всех реек (свай) над нулем графика поста, т. е. разности отметок нулей реек (площадок свай) и отметки нуля графика.

Наблюдения за уровнями воды на постах реечного или свайного типа заключаются в следующем:

1) наблюдатель записывает номер рейки (сваи), по которой он проводит наблюдения, и делает отсчет уровня воды (на реечном посту по постоянной рейке, а на свайном — по переносной, устанавливаемой на площадке сваи). Отсчет уровня записывается в сантиметрах;

2) по справочной таблице нивелировки поста устанавливается приводка нуля рейки (сваи), по которой был произведен отсчет уровня воды;

3) вычисляется высота (в сантиметрах) наблюденного уровня воды над нулем графика поста (приведенный уровень) как сумма отсчета уровня по рейке (свае) и приводки нуля данной рейки (сваи).

Схема отсчета уровня над нулем графика поста и нулем наблюдения показана на рис. 3.1, где отсчет уровня по переносной рейке на свае № 2 равен 8 см, а отсчет уровня над нулем графика поста $H=8+h_2$ см. Если необходимо получить абсолютную отметку уровня воды, то к высоте уровня над нулем графика следует прибавить абсолютную отметку нуля графика поста.

Глава 4

Типы и устройство водомерных постов

По конструкции водомерных устройств посты подразделяются на: 1) простые (реечные, свайные, смешанные); 2) передаточные; 3) самопишущие; 4) дистанционные, регистрирующие уровень непрерывно или в определенные сроки и передающие информацию на значительное расстояние от места измерения.

Водомерные устройства должны регистрировать уровень на 0,25—0,50 м выше и ниже крайних исторических уровней, выявленных по естественным меткам или опросу местного населения. На зарегулированных реках указанные выше пределы устанавливаются по отношению к высшему и низшему проектным уровням.

4.1. Простые водомерные посты

Простые водомерные посты в настоящее время широко распространены вследствие несложности устройства и сравнительно невысокой стоимости. Отсчеты уровня на них производятся при посещении поста наблюдателем. Эти посты дают достаточно точные сведения о режиме уровня, если на водном объекте, где установлен пост, нет ярко выраженного суточного хода уровня.

Простые водомерные посты в зависимости от оборудования для наблюдений за уровнем воды подразделяются на реечные, свайные, смешанные (реечно-свайные).

Выбор того или иного типа простого поста определяется размером годовой амплитуды колебания уровня, особенностями строения берега реки, наличием мостов и гидротехнических сооружений и другими местными условиями.

Реечные посты. Реечный водомерный пост является наиболее дешевым и простым по устройству и удобным для производства наблюдений. Посты этого типа устраиваются на участках рек, где имеются условия, обеспечивающие их сохранность от повреждения волнением, ледоходом, при сплаве леса или судами. Реечные посты наиболее распространены на реках, каналах и озерах с небольшими (до 2—3 м) годовыми амплитудами колебаний уровней воды. На реках с большими годовыми амплитудами колебаний уровней воды реечные посты применяют только в том случае, если можно прикрепить водомерную рейку к мостовой опоре или гидротехническому сооружению.

Основной принадлежностью реечного поста является водомерная рейка. Постовые водомерные рейки бывают металлические эмалированные, чугунные и деревянные (рис. 4.1).

Деревянные рейки недостаточно прочны, а масляная краска с них быстро смывается водой, поэтому на постоянных постах рекомендуется устанавливать чугунные рейки; еще более удобны

металлические рейки с фарфоровыми вкладышами или металлические эмалированные рейки. В экспедиционных условиях для оборудования временных постов удобны ленточные металлические рейки со сквозными делениями. Ленточные рейки рекомендуется крепить на обугленных или окрашенных черной масляной краской досках, брусках или сваях.

Посты с вертикальной рейкой. На скальных берегах, у мостов и гидротехнических сооружений водомерная рейка прочно прикрепляется в вертикальном положении к обрыву скального берега, к набережной, устою моста, стенке шлюза, плотине, Рейку заделывают заподлицо в специально выбранный в сооружении паз. При опасности повреждения плывущими предметами рейка должна быть ограждена отбойными брусьями, укрепленными выше по течению.

При плотинах устанавливают две рейки — одну для наблюдений за уровнями воды в верхнем бьефе[1], а другую — в нижнем бьефе.

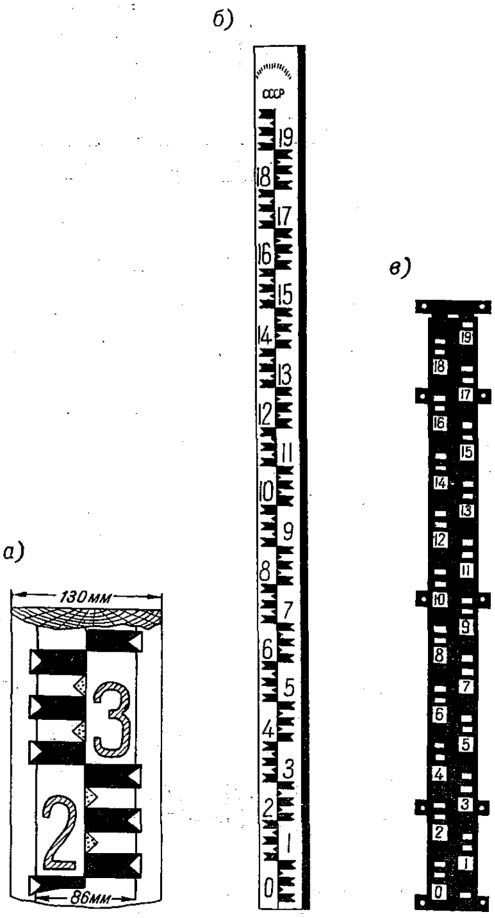


Рис. 4.1. Типы постовых реек.

а — деревянная; *б* — металлическая эмалированная; *в* — чугунная.

При отсутствии на участках поста мостов и гидротехнических сооружений водомерная рейка укрепляется на специально устанавливаемой свае или кусте из трех—пяти свай, стянутых хомутами. Рейка прикрепляется к свае при помощи болтов. Для предохранения рейки от повреждения ледоходом, бревнами и

[1] Бьефом называется участок реки, примыкающий к подпорному сооружению; верхний бьеф — выше сооружения, нижний — ниже него.

другими плывущими предметами она должна быть защищена специальным ограждением — ледорезом (рис. 4.2).

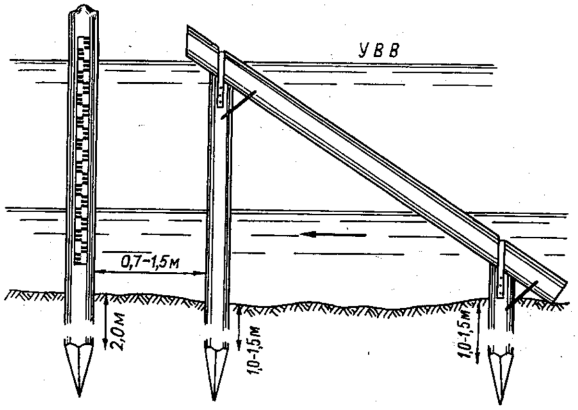


Рис. 4.2. Ограждение постовой рейки ледорезом.

Посты с наклонной рейкой (рис. 4.3). Этот вид поста удобен тем, что его рейка лучше защищена от ударов льдин и других плавающих предметов, а при больших скоростях течения он более удобен для отсчетов уровня, чем посты с вертикальной

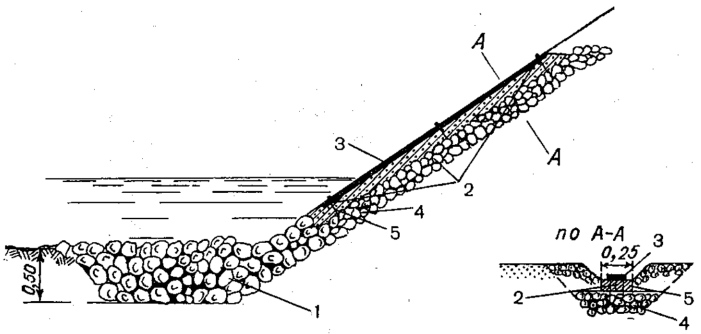


Рис. 4.3. Схема установки наклонной рейки.

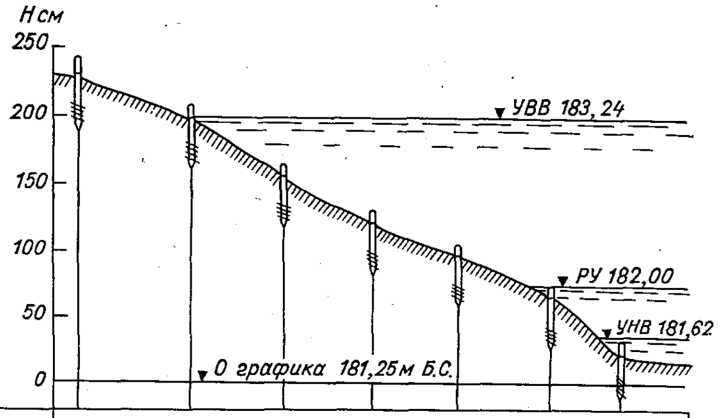
1 — упор из каменной наброски; *2* — опоры рейки (закладываются при устройстве щебеночной подготовки); *3* — рейка; *4* — щебеночная подготовка; *5* — бетонная подготовка 10 см.

рейкой, где отсчет может искажаться влиянием подпора от набега воды на сваю с рейкой. Установка поста с наклонной рейкой целесообразна в местах, где имеется искусственное укрепление береговых откосов.

Наклонные реки размечаются на деления, равные $\frac{2}{\sin \alpha}$, где α — угол наклона рейки к горизонту. В этом случае одно деле-

ние наклонной рейки будет соответствовать 2 см вертикальной рейки.

Свайные посты. Свайный пост (рис. 4.4) наиболее удобен для равнинных рек со значительной амплитудой колебаний уровней воды. Водомерные сваи, образующие пост, устанавливают в одном створе, перпендикулярном течению реки. Общее количество свай поста зависит от амплитуды колебаний уровня воды и от угла наклона берегового откоса. Площадка (головка) верхней сваи поста должна быть на 0,25—0,5 м выше наивысшего

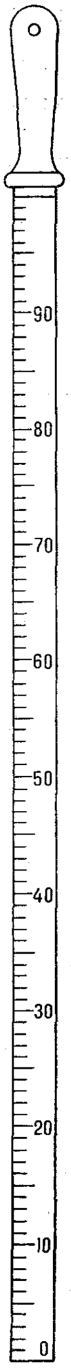


№ сваи	Рп	1	2	3	4	5	6
Расстояние от П.Н., м	0	4,3	7,8	11,2	14,5	18,0	20,7
Отметка Б.С., м	183,70	183,35	182,91	182,55	182,31	182,02	181,54
Приводка, см	245	210	166	130	106	77	29

Рис. 4.4. Схема свайного водомерного поста.

исторического уровня воды в реке, а площадка нижней сваи — на 0,5 м ниже наинизшего уровня. На пересыхающих реках нижняя свая устанавливается выше наинизшей точки дна в створе поста не более чем на 10—15 см. Разность высот площадок двух смежных свай должна быть не более 0,8 м, а горизонтальное расстояние между сваями устанавливается с учетом особенностей берегового откоса и удобства подхода к сваям для производства наблюдений. Общее количество свай, необходимых для устройства поста, и их размещение предварительно определяют по поперечному профилю берега, затем данные проекта поста переносят на местность.

В настоящее время свайные посты оборудуют стандартными металлическими винтовыми сваями; длина их 220 см, диаметр 8 см. Нижняя часть сваи на протяжении 35 см имеет винтовую нарезку, а верхняя длиной 15 см представляет собой головку диаметром 10 см. На головке сваи с двух противоположных



сторон сделаны плоские срезы, служащие опорой для ключа, с помощью которого свая завинчивается в грунт. Головка сваи окрашивается белой масляной краской, и на ней черной краской с двух сторон надписывается номер сваи. Сваи поста нумеруют по порядку сверху вниз от ближайшей к реперу сваи, которая получает первый номер.

Временные сваи при отсутствии металлических можно изготовлять из дерева прочных, не поддающихся гниению пород. Для свай берут отрезки бревен диаметром 20—25 см. Длина назначается в зависимости от характера грунта и глубины его промерзания, но не менее 1,5 м. Нижний конец деревянной сваи (комлевый) затесывается на три или четыре грани.

При забивке свай в плотные грунты на заостренный конец сваи надевают стальной башмак. Вся свая обстругивается и для предохранения от гниения осмаливается или слегка обугливается. Во избежание раскалывания и размочаливания при забивке ее в грунт на верхний конец сваи надевают стальное кольцо — бугель.

Глубина забивки свай должна быть такой, чтобы нижний конец сваи углубился не менее чем на 0,5 м в непромерзающий слой грунта, а в районах многолетнемерзлых пород — на такую же глубину в слой неоттаивающего грунта, если он расположен не более 2 м от поверхности.

Головки свай после забивки спиливают горизонтально ниже бугеля, оставляя над поверхностью земли 10—15 см, а если есть основания опасаться повреждения свай ледоходом — 5—10 см. В центре торца сваи забивают гвоздь с полусферической шляпкой .

Если берег реки скалистый, то вместо установки свай целесообразнее сделать в скале высечки в виде ступеней. Горизонтальные площадки ступеней должны быть достаточного размера для прохода по ним наблюдателя, т. е. не менее 20×30 см. В центре площадок устанавливают металлические штыри, зацементированные в скалу.

Все сваи поста нивелируются, получают отметку и приводку к нулю графика поста.

Высота уровня воды в реке на свайном посту отсчитывается при помощи переносной водомерной рейки, устанавливаемой в центре торца (на шляпку гвоздя) ближайшей к берегу затопленной сваи. Зная величину

Рис. 4.5. Стандартная водомерная переносная рейка.

приводки сваи, нетрудно вычислить высоту уровня воды над нулем графика поста (см. рис. 3.1).

Стандартная водомерная переносная рейка (рис. 4.5) изготовляется из легкой металлической трубы; рейка имеет длину 100 см; деления нанесены через 1 см.

Смешанные посты. Тип смешанного поста возник из сочетания элементов реечного и свайного постов. Реечно-свайные посты устраиваются на участках рек, имеющих резкие переломы склонов берега: на крутой части устанавливается рейка, на пологой — сваи. Устройство смешанных постов целесообразно при наличии сооружений, например мостов. На посту у моста уровни меженных вод наблюдают по сваям, а уровни высоких вод — по вертикальной рейке, укрепленной на устое моста.

4.2. Передаточные водомерные посты

Передаточные посты устраиваются в тех случаях, когда подход к воде затруднен из-за отвесных берегов. Передаточный пост может быть сооружен на естественном берегу или гидротехническом сооружении, если последнее имеется на участке поста.

Если в зимнее время водоем (река, озеро) покрывается льдом, то в дополнение к передаточному посту необходимо устраивать реечный или свайный пост для наблюдений за уровнями в зимний период.

В зависимости от местных условий передаточные посты бывают различных видов.

Мостовой пост. Если на месте установки поста имеется мост или другое сооружение, частично или полностью расположенное над рекой, то устроить пост несложно. На мосту меткой закрепляется постоянная точка (нуль наблюдения) для отсчета уровня. Высотное положение этой точки определяется нивелировкой от ближайшего репера. Наблюдения за колебаниями уровней заключаются в измерении расстояния от точки нуля наблюдения на мосту до поверхности воды. Измерения могут производиться посредством размеченного троса или стальной рулетки с грузом на нижнем конце. При небольших расстояниях измерения удобно делать размеченной рейкой.

Тросовый пост. Пост этого вида устраивается чаще всего на горных реках, когда берег обрывист, а искусственных сооружений на реке нет. Основной частью поста является вынос (стрела), устройство которого видно на рис. 4.6. Вынос изготовляется из бруса прочной породы (дуб, сосна) или из стальной трубы. Он укрепляется на берегу на прочных опорах. На береговом конце выноса неподвижно закрепляется горизонтальная водомерная рейка длиной 1 м, нулевое деление которой обращено в сторону реки. На конце выноса, обращенном к реке, укрепляется блок, а на береговом его конце — вьюшка, на которую наматывается гибкий тросик, идущий вдоль рейки через

блок к воде. На нижнем конце троса подвешивается цилиндрический груз с заостренным в виде конуса концом весом 2—5 кг. Для отсчета уровня воды трос размечается метками через 1 м на длину, равную амплитуде колебаний уровня. Метровые деления отмечаются кольцами с выбитым номером метра.

Для того чтобы отсчет по рейке давал непосредственно высоту уровня над нулем графика, производят тарирование поста. До тарирования рейка остается незакрепленной, точное ее положение устанавливается во время тарировки. Ее проводят так. Посредством нивелировки определяют превышение уровня воды над нулем графика поста. Сразу после этого опускают трос до

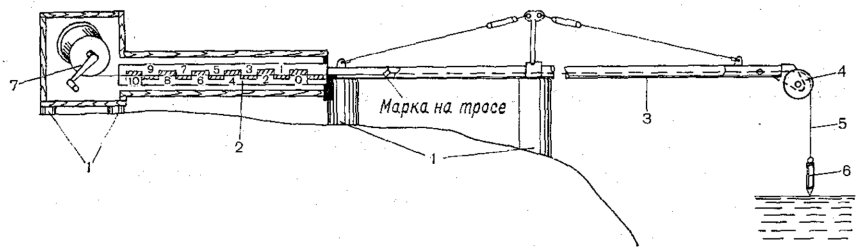


Рис. 4.6. Схема передаточного поста.

1 — сваи; *2* — рейка; *3* — вынос; *4* — блок; *5* — трос; *6* — груз; *7* — вьюшка.

касания грузом поверхности воды, а рейку сдвигают вдоль выноса до положения, при котором ближайшая метка на тросе совпадает с делением рейки, равным количеству сантиметров в значении превышения уровня воды над нулем графика; метка на тросе будет соответствовать числу метров в значении превышения уровня над нулем графика, и на ней выбивают это число. Остальные метки троса нумеруют подряд с возрастанием значений в сторону воды. По окончании тарирования рейку прочно закрепляют.

При небольшой амплитуде колебаний уровня воды, порядка 2—3 м, установку удобно снабдить рейкой длиной 2,5—3,5 м, что позволит отсчитывать уровень непосредственно по рейке против указателя, укрепленного на тросе. Точность отсчета уровня на передаточных постах 2—3 см, при применении электроконтакта точность повышается до 1 см. В этом случае трос с грузом, являющийся одним звеном электрической цепи, должен быть изолирован от заземления, а другой конец электрической цепи надежно заземлен. Место прикрепления троса к ушку груза должно быть припаяно, а острие груза покрыто полудой.

Фиксация касания грузом поверхности воды производится по амперметру или вольтметру. Для питания электрической цепи применяют батарею от карманного фонаря.

Передаточный пост с автоматическим указателем и отметчиком уровня воды. Передаточный пост может быть оборудован

более совершенным способом: установкой специального прибора — указателя уровня У-52, описанного ниже.

4.3. Устройства и приборы для регистрации максимальных и минимальных уровней на простых и передаточных постах

Наблюдения за уровнем воды, выполняемые на водомерных постах один или два раза в сутки, во многих случаях не позволяют зафиксировать наивысшее и наинизшее положение уровня. Вместе с тем знание этих характеристик уровня и особенно его наибольшего значения важно для установления пределов колебания водности.

Предельные положения уровня воды в периоды между сроками наблюдений фиксируются по максимальным и минимальным водомерным рейкам или по указателю уровня воды более совершенной конструкции.

Максимальные и минимальные рейки располагают в створе основного поста или рядом с ним. Длина реек должна быть не более 2 м. При значительной амплитуде колебаний уровня устанавливают две (и более) максимальные рейки.

Ниже дано краткое описание некоторых наиболее распространенных конструкций максимальных и минимальных водомерных реек.

Максимальная рейка в стальной трубе на свае (рис. 4.7 *а*). Рейка представляет собой трубу диаметром 5 см, устанавливаемую на свае и прочно закрепляемую на ней при помощи специальной скобы и болта. В нижней части трубы делается несколько отверстий для входа воды в трубу. Отсчеты уровня производят при помощи стержня-указателя диаметром 1 см, вставляемого в трубу. Верхний конец стержня закреплен в головке, которая одновременно закрывает трубу. На стержне нанесены деления через 1,0 см с оцифровкой их через 10 см. Перед опусканием в трубу стержень-указатель покрывают разведенным в воде мелом. Высота уровня определяется по границе смытого раствора мела по делениям на стержне.

Металлическая рейка с винтовым наконечником (рис. 4.7 *б*) по своему устройству не отличается от описанной выше, но устанавливается не на сваю, а путем забуривания ее винтового наконечника на глубину 0,75 м. После этого необходимо определить нивелировкой отметку ее головки и вычислить отметку (и приводку) нуля наблюдения.

Зубчатая рейка Фролова предназначена для фиксации минимального уровня (рис. 4.7 *в*). Надетый на рейку поплавок опускается вместе с уровнем воды, но при его подъеме задерживается пружинами и тем самым отмечает положение самого низкого уровня между сроками наблюдений. Эта же рейка

в перевернутом виде может служить для фиксации максимального уровня.

Более удобно и надежно положение экстремальных уровней фиксируется прибором У-52 и самописцами уровня.

Указатель уровня У-52. Более удобными устройствами для регистрации крайних значений уровня являются стрелочные

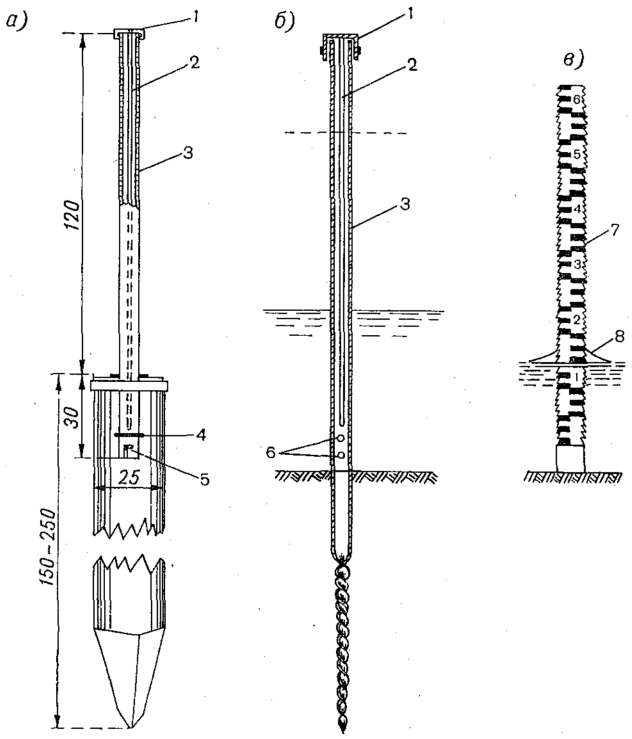


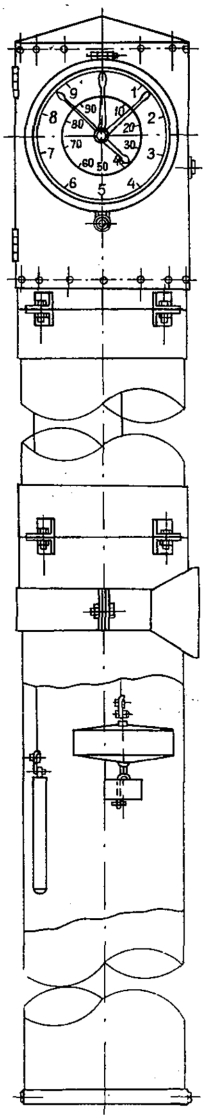
Рис. 4.7. Типы максимальных и минимальных реек.

а, б — максимальные рейки; *в* — минимальная. *1* — головка; *2* — стержень-указатель; *3* — труба; *4* — скоба; *5* — болт; *6* — отверстия; *7* — зубчатая рейка; *8* — поплавок с пружинами.

отметчики. К их числу относится прибор У-52 (рис. 4.8). Он позволяет измерять уровень с точностью до 1 см и автоматически отмечает наивысший и наинизший уровни между сроками наблюдений.

Колебание уровней воспринимается поплавковым устройством, заключенным в защитную трубу и соединенным с редуктором. Положение уровня показывает стрелка на циферблате. Поплавковое устройство прибора состоит из поплавка и грузапротивовеса, соединенных тросом, перекинутым через поплавковое колесо, надетое на выходную ось редуктора. Поплавковое

Рис. 4.8. Указатель уровня У-52.



колесо, редуктор и циферблат прибора заключены в защитный корпус с застекленной дверцей перед циферблатом. Редуктор имеет две стрелки для отсчета уровня в момент наблюдения: одна из них указывает метры, а другая — сантиметры по соответствующим шкалам. Предельные положения уровня между сроками наблюдений отмечаются посредством двух особых стрелок, которые перемещаются при помощи штифта, укрепленного на стрелке, указывающей метры. Эти стрелки, отведенные в крайние положения, соответствующие высшему и низшему уровням между сроками наблюдений, сохраняют свое положение вследствие трения их осей.

Указатель уровня У-52 устанавливается на защитную трубу диаметром 300 мм, собираемую из двухметровых секций, нижняя из которых перфорирована. Защитная труба с установленным на ней указателем уровня прикрепляется в вертикальном положении к прочной опоре или скальному обрыву берега, а при наличии сооружений — к устою моста, стенке набережной и т. п.

Нижний обрез трубы должен быть расположен на 0,5 м ниже наинизшего уровня воды. На зимний период указатель уровня снимают с установки.

4.4. Приспособления и приборы для увеличения точности отсчета уровня воды

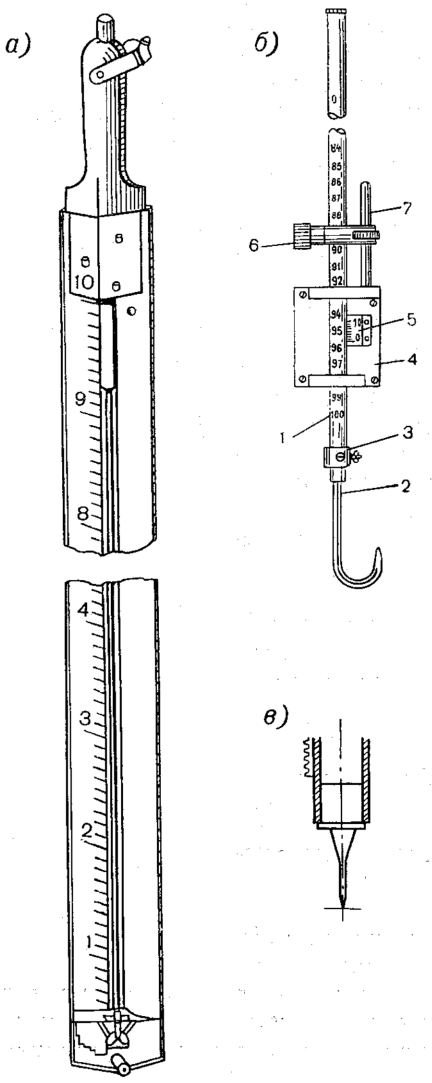
Для увеличения точности отсчета высоты стояния уровня воды применяются различные приспособления и приборы.

Рейка в ковше. На горных реках с быстрым течением, где чаще устраиваются реечные посты, набег воды на рейку затрудняет отсчеты уровня. В этом случае следует помещать рейку в ковше, вырытом на берегу и соединенном с рекой канавой или трубой с направлением их вниз по течению.

Водомерная рейка из органического стекла с успокоителем применяется для повышения точности отсчета уровня воды при волнении (рис. 4.9 *а*), имеет рабочую длину 1 м с делениями через 1 см и оцифровкой через 10 см.

Внутри рейки находится цилиндрическая трубка, заканчивающаяся внизу боковым выходом наружу, перекрываемым клапаном.

Для отсчета уровня рейку ставят на сваю. Нажимая кнопку в верхней части ручки, открывают клапан, и вода входит внутрь рейки. Когда уровень установится, кнопку отпускают и клапан закрывается. Отсчет производят после подъема рейки при вертикальном ее положении.



Рейку целесообразно применять при волнении и на горных реках с бурным течением. В последнем случае рейку следует ставить на сваю так, чтобы она располагалась острым ребром навстречу потоку.

Крючковая рейка предназначается для измерения высоты уровня воды в верхних бьефах водосливов, мерных баках и гидрометрических лотках. Крючковая рейка обеспечивает точность отсчета уровня при отсутствии волнения ±1 мм (имеются рейки с точностью отсчета ±0,1 мм). Рейка (рис. 4.9 *б*) состоит из латунной трубки *1* с делениями от 0 до 100 см. На нижнем конце рейка снабжена выдвижным стержнем *2* длиной 50 см, который оканчивается крючком с остроотточенным концом. Выдвижной стержень рейки закрепляется винтом *3*.

Рис. 4.9. Приборы для увеличения точности измерения уровня.

а — водомерная рейка с успокоителем; *б* — крючковая рейка; *в* — игольчатая рейка.

Рейка при помощи специального кронштейна *4* укрепляется на свае, стенке колодца или другой неподвижной опоре. На кронштейне укреплена масштабная планка (нониус) *5*, позволяющая делать отсчеты уровня с точностью до 1 мм.

Для отсчета уровня необходимо освободить зажим *6* и опустить иглу крючка ниже уровня воды, а затем посредством подъемного винта с микрометренной гайкой *7* поднять иглу до накалывания ею поверхности воды, после чего делается отсчет уровня: по трубке рейки отсчитываются сантиметры, а по масштабной планке — миллиметры. Рейка позволяет вести наблюдения в пределах амплитуды колебания уровня 150 см.

Игольчатая рейка отличается от описанной выше тем, что конец ее снабжен вместо крючка иглой (рис. 4.9 *в*). Трубка игольчатой рейки разделена на миллиметры, что позволяет при помощи нониуса производить отсчеты с точностью до ±0,1 мм.

4.5. Самопишущие водомерные посты

Самопишущие водомерные посты непрерывно регистрируют колебания уровней воды. Установка самопишущего поста необходима при значительном суточном ходе уровня, а также при резких его колебаниях, вызываемых дождевыми паводками, приливами, сгонно-нагонными ветрами, работой гидротехнических сооружений.

Основной частью самопишущего поста является прибор — самописец для автоматической записи колебаний уровня воды. При большом разнообразии систем самописцев уровня все типы их состоят из двух основных элементов: датчика уровня и записывающего устройства.

Датчик уровня может быть поплавочным, манометрическим и др. Поплавочное устройство датчика является в настоящее время наиболее распространенным.

Записывающее устройство производит запись в виде графика хода уровня. У некоторых систем самописцев через определенные промежутки времени на ленте печатаются цифры, соответствующие высоте стояния уровня, или осуществляется перфорация ленты в условном коде.

Масштаб записи подбирается в зависимости от амплитуды колебаний уровня и желаемой степени точности их записи.

Самописцы уровней приводятся в действие пружинными, гиревыми или электрическими часовыми механизмами.

Бумажная лента, на которой записывается ход уровня, укрепляется на барабане самописца. Барабаны могут быть расположены горизонтально или вертикально и приводятся в движение либо часовым механизмом, придающим барабану вращение в одну сторону, либо колебаниями уровня воды, сообщающими вращение барабану посредством поплавка на тросе, перекинутом через шкив, соединенный с барабаном. В этом случае барабан при подъеме уровня вращается в одну сторону, а при спаде его — в другую.

Записывающее приспособление (каретка с пером) у самописцев с барабаном, вращающимся под действием часового

механизма, приводится в движение посредством поплавка, передающего колебания уровня воды, а у самописцев с барабаном, вращающимся от поплавочного устройства, каретка с пером движется в одном направлении вдоль барабана, при этом скорость движения ее регулируется часовым механизмом.

Имеется много типов самописцев уровня. В настоящее время на гидрологической сети наиболее распространены самописцы «Валдай» и ГР-38 (длительного действия).

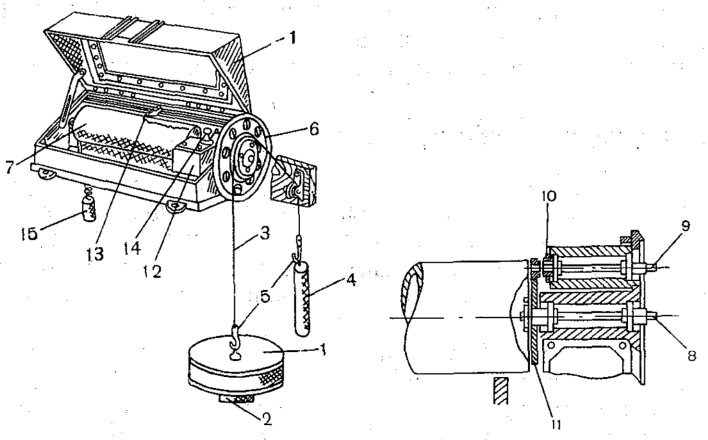


Рис. 4.10. Схема устройства самописца «Валдай».

Самописец «Валдай» предназначается для непрерывной записи колебаний уровня воды (рис. 4.10). Он состоит из поплавковой системы и регистрирующего механизма. Поплавковая система состоит из пустотелого металлического поплавка *1* диаметром 250 мм с грузом *2*, который прикрепляется под поплавком. Поплавок подвешен на мягком тросе *3*, на противоположном конце которого прикреплен груз-противовес *4*. Поплавок и груз крепятся к тросу специальными зажимами *5*. Трос надевается на поплавкое колесо *6*, представляющее собой два спаренных диска: малый с длиной окружности 300 мм и большой — 600 мм. Поплавковая система при колебаниях уровня воды приводит во вращение барабан 7 самописца, сцепляющийся с осью поплавкового колеса.

Таблица 4.1

Амплитуда колебания уровня, м	Рекомендуемый масштаб записи
До 1	1:1
1—2	1:2
2—3	1:5
3—6	1:10

Поплавковая система самописца «Валдай» обеспечивает возможность выбора масштаба записи уровня воды в зависимости от амплитуды его колебания, как это указано в табл. 4.1.

Установка желаемого масштаба записи достигается следующим образом. Для записи хода уровня в масштабах 1 : 1 и 1 : 2 поплавковое колесо закрепляется на основной оси прибора *8*; масштаб записи 1 : 1 будет получен при наложении троса на малый диск, а наложение троса на большой диск дает масштаб 1 : 2. Поплавок при указанных масштабах записи навешивается слева от поплавкового колеса. Для записи хода уровня в масштабах 1 : 5 и 1 : 10 поплавковое колесо закрепляется на вспомогательной оси *9*. Трибка *10* сдвигается до сцепления ее с шестерней *11*. Для получения записи в масштабе 1 : 5 трос надевается на малый диск, а для получения масштаба 1 : 10 — на большой диск. Поплавок при масштабах записи 1 : 5 и 1 : 10 навешивается справа от поплавкового колеса.

Регистрирующий механизм самописца состоит из барабана *7*, часового механизма *12* и каретки *13* с пером, скользящей по двум направляющим стержням вдоль образующей барабана. Длина окружности барабана 300 мм, длина образующей 330 мм. Барабан вращается на подвижном центре, укрепленном в левом боку корпуса, и на основной оси *8* поплавкового колеса, укрепленной в правом боку корпуса. Для надевания ленты на барабан подвижный центр оттягивается от опорного гнезда и устанавливается на предохранитель. Барабан движением вперед и влево вынимают из прибора. Лента с обрезанными уголками накладывается на барабан, концы ее заправляются в прорезь и зажимаются поворотом рычага на щеке барабана. Установка барабана в прибор производится в обратном порядке.

Часовой механизм помещен во влагонепроницаемой коробке. Он действует от гиревого привода. На верхней стороне коробки укреплена заводная головка *14* и выведены два рычага — один из них, с индексом «ВКЛ», служит для пуска и остановки часового механизма, а другой, с индексом «П» (прибавить) и «У» (убавить), предназначен для регулировки хода.

Каретка с пером передвигается вдоль барабана действием часового механизма, передаваемым на каретку через стальную струну, навитую одним концом на барабанчик заводной головки *14*; на свободном конце струны подвешена гиря *15*. Каретка скреплена со струной зажимным винтом и после завода часового механизма может быть передвинута и закреплена в требуемом исходном положении.

Конструкция прибора допускает производить запись уровня при многократных оборотах барабана. На рис. 4.11 *а* показана запись подъема уровня, при котором барабан больше двух раз обернулся вокруг оси, на рис. 4.11 *б* — развертка этой записи.

Для нормальной работы самописца уровня необходимо обеспечить своевременный завод часового механизма и смену ленты. При смене ленты производят следующие работы:

1) подготавливают новую ленту; на ней проставляют поряд-

ковый номер, дату ее постановки, название реки и пункта наблюдения;

2) измеряют уровень на внешнем (на реке, озере) и внутреннем (в приемном резервуаре-колодце) постах с приведением отсчетов к нулю графика поста;

3) на старой ленте самописца делают засечку пером самописца на конце линии записи уровня и около засечки выписывают часы и минуты снятия ленты и значение уровня, приведенного к нулю графика поста, после чего старую ленту снимают;

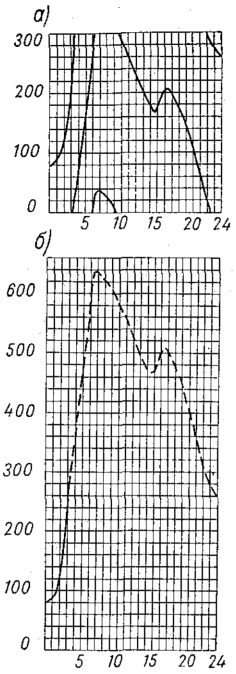


Рис. 4.11. Запись хода уровня на ленте самописца при многократном обороте барабана (а), развертка этой записи (б).

4) заводят часовой механизм и проверяют правильность действия пишущего приспособления и часового механизма;

5) прочищают и заправляют чернилами перо самописца;

6) надевают на барабан новую ленту, на нее накладывают перо в точке, соответствующей времени и уровню в этот момент; на ленте делают засечку пером и около нее записывают время (час и минуты) и уровень по контрольному посту.

Самописец уровня длительного действия ГР-38 рассчитан на автономную работу в течение 32 суток. В комплект прибора входят сменные шестерни, позволяющие устанавливать самописец на сроки автономной работы также 16 и 18 суток. При каждом из указанных сроков барабан с диаграммной лентой делает один оборот, поэтому масштаб записи времени тем меньше, чем больше срок автономной работы самописца: при работе в течение 32 суток — 0,5 мм/ч, в течение 16 суток — 1 мм/ч, в течение 8 суток — 2 мм/ч.

Пределы регистрации изменений уровня воды при масштабе записи уровня 1 : 10 — 3 м, а при масштабе 1 : 20 — 6 м.

Внешний вид и кинематическая схема самописца показаны на рис. 4.12. Прибор состоит из поплавковой системы и регистрирующего механизма. Поплавковое колесо помещено внутри кожуха *1*, что сделано для предупреждения попадания влаги в механизм самописца. Для этой же цели в нем имеется патрон с влагопоглощающим веществом *2*, а кроме того, крышка прибора имеет резиновую прокладку.

Поплавковое колесо *3* приводит во вращательное движение шестерни зубчатой передачи *4* и ходовой винт *5*, на котором на-

сажен держатель карандаша *6*. При изменении уровня карандаш перемещается по образующей барабана. Барабан *7* приводится во вращательное движение от часового механизма *8* через пару сменных шестерен *9*. В комплект самописца входят три пары сменных шестерен, позволяющих устанавливать указанные выше сроки автономной работы прибора. Для изменения масштаба записи уровня имеются две пары сменных шестерен,

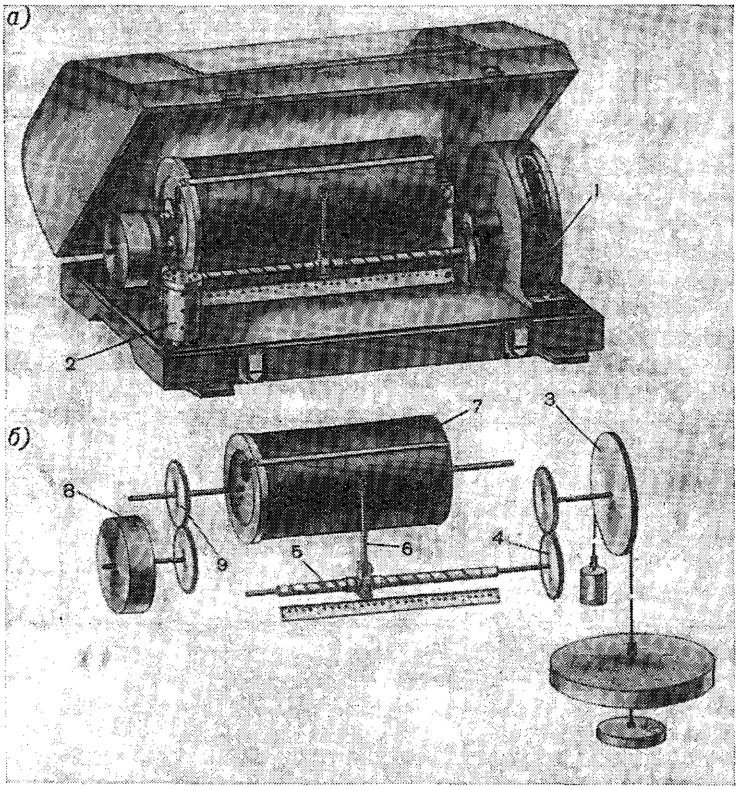


Рис. 4.12. Самописец уровня воды длительного действия ГР-38.
а — общий вид, *б* — кинематическая схема.

обеспечивающих указанные масштабы записи уровня. Завод часового механизма осуществляется ключом на 38 суток.

Пузырьковый самописец уровня «Омега» фирмы Себа (рис. 4.13) применяется для изучения режима уровней рек, озер, водохранилищ и подземных вод.

Сущность работы прибора заключается в следующем:

из баллона *11* через гибкий шланг *13*, соединенный с ртутным манометром *9*, азот или сжатый воздух поступает

в водоем. Выходное отверстие шланга должно быть закреплено ниже возможного минимального уровня воды. Давление в трубе пропорционально толщине слоя воды над ее выходным отверстием. Устройство *7* по уравновешиванию давления включает систему баланса *8*, состоящую из двойной чашечки со ртутью,

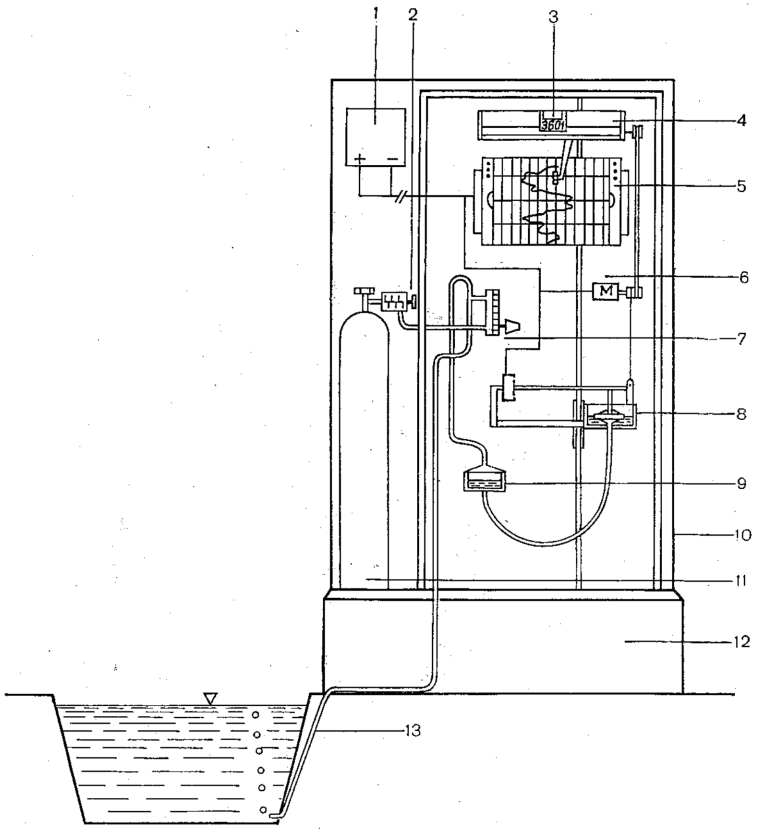


Рис. 4.13. Пузырьковый уровнемер.

1 — источник энергии; *2* — редуктор давления; *3* — цифровой указатель; *4* — записывающее устройство; *5* — лента с записью; *6* — мотор; *7* — уравнительный клапан; *8* — балансовое устройство; *9* — манометр; *10* — будка; *11* — баллон; *12* — основание; *13* — шланг.

и систему считывающих контактов. При повышении или понижении уровня изменяется давление, и ртуть переходит из одной чашечки в другую, выводя тем самым систему из равновесия. Эти движения воспринимаются чувствительным стальным поплавком *8*, считывающими контактами и сервомотором *6*. Когда система баланса с двойной чашечкой приходит в равновесие, процесс останавливается. Цифровой указатель *3* и перо

записывающего устройства *4* показывают на ленте *5* положение уровня воды.

Электропитание *1* от аккумулятора 6 В постоянного тока. Баллон *11* емкостью 10 л достаточен для работы в течение 4—6 месяцев. Редуктор давления *2* со шкалой для определения исправленного атмосферного давления. Прибор монтируется в будке *10*, устанавливаемой на бетонном основании *12*. Прибор записывает колебания уровня в амплитуде 7,5 м с точностью измерения ±1 см. Масштабы записи 1 : 5, 1 : 10, 1 : 20, а времени — 2 мм/ч, но могут быть посредством смены шестеренок 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20 мм/ч. Длина ленты для записи уровней 16 м, емкость пера с чернилами на 1 год.

Шланг, выводимый в воду, может быть на временных установках проложен по поверхности земли, а на постоянных — под землей. Максимальная дальность удаления от водоема 300 м. Выходной конец трубки (шланга) в воде должен быть закреплен на откосе берега или на свае.

Прибор снабжен приспособлением для продувки трубки сжатым воздухом или газом.

Способы установки самописцев уровня воды. Для установки водомерного поста, оборудованного самописцем, необходимо специальное сооружение, конструкция которого зависит от длительности периода работы поста, особенностей гидрологического режима водного объекта и местных условий.

В зависимости от срока действия поста установки самописца могут быть капитальные, рассчитанные на неограниченно долгий срок службы, и временные, рассчитанные для работы в течение 1—2 лет и менее. В конструктивном отношении установки самописцев делятся на два типа: 1) островной, когда сооружение с самописцем устанавливается непосредственно в водоеме, реке, озере; 2) береговой, когда все сооружение устанавливается на берегу в колодце, сообщающемся с водоемом через трубу.

При выборе типа и конструкции установки самописца необходимо учитывать: 1) гидрологический режим водоема, 2) форму берегов и состав слагающих их грунтов, 3) наличие гидротехнических сооружений, 4) характер использования водного объекта в районе установки, 5) экономические соображения. Пределы возможного колебания уровня воды определяют глубину заложения приемного колодца и соединительной трубы, а также общую высоту установки. Интенсивность колебаний уровня воды, размеры волнений, приливов, скорости течения определяют размеры отверстий для пропуска воды из водоема в приемный колодец. Характеристики режима вскрытия, замерзания, толщины льда и ледохода, а также образования внутриводного льда и шуги определяют размер и характер защитных сооружений и мероприятий по предохранению установки от разрушения и по обеспечению ее нормальной работы. Характеристики режима наносов и устойчивости ложа водоемов определяют мероприятия,

необходимые для предохранения установки от разрушения и заиления.

Форма и грунты берегов, водоема, а также наличие постоянных гидротехнических сооружений и намечаемый срок действия установки определяют ее тип, а наличие судоходства и сплава — необходимые мероприятия по ограждению установки. Каждая установка самописца должна иметь два контрольных водомерных поста: внешний — реечного или свайного типа вблизи или в створе самописца и внутренний — рейку в приемном колодце.

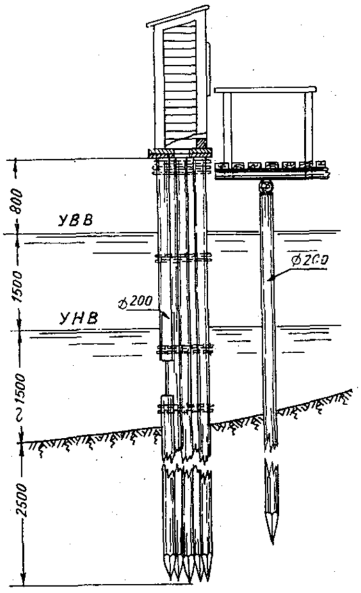


Рис. 4.14. Островной тип установки самописца.

Островной тип установки самописца. Этот тип установки наиболее прост и экономичен по своему устройству и может быть применен при условии: 1) небольших амплитуд колебаний уровня воды; 2) защищенности пункта установки от повреждения ее льдом, судами, плотами; 3) отсутствия необходимости действия установки в зимнее время.

Установка состоит из трех основных частей: 1) опоры, сооружаемой непосредственно в водоеме; 2) будки для самописца, устанавливаемой на опоре; 3) приемного резервуара в виде трубы, в которой помещается поплавок самописца. Конструкции этих частей в зависимости от местных условий могут быть весьма разнообразными.

В качестве опоры установки рекомендуется по возможности использовать искусственные сооружения: устои мостов, стенки набережных, пристаней, молов, волноломов. Если берег водоема скалистый и обрывистый, то его также можно использовать в качестве опоры установки. Будка с самописцем уровня устанавливается на площадке, укрепленной на сооружении или обрыве берега посредством кронштейнов. Площадка должна быть расположена выше наивысшего уровня воды на 0,5—1,0 м. Приемный резервуар в виде трубы (см. рис. 4.8) крепится к сооружению или берегу с помощью хомутов и кронштейнов. Нижний конец трубы должен быть опущен на 0,5—1,0 м ниже наинизшего уровня воды и закрыт откидной крышкой или задвижкой для очистки трубы от наносов. В верхней части трубы через 1,5—2,0 м имеются смотровые дверцы. Для про-

пуска воды в трубу в конце ее нижней части устраивают отверстия.

При отсутствии гидротехнических сооружений, которые могли бы быть использованы в качестве готовой опоры для установки самописца, такую опору необходимо соорудить. На рис. 4.14 показана схема установки островного типа на сваях. Опора выполнена из шести свай, забитых по окружности и связанных хомутами из полосового железа. Внутреннее пространство между сваями является приемным резервуаром (трубой), в котором помещается поплавок самописца. Для очистки трубы от наносов в нижней ее части имеется смотровое окно, закрываемое съемной крышкой. На верхнем конце опоры сооружается деревянная будка для установки самописца. Сообщение с установкой осуществляется посредством мостика на сваях или же лодки.

Береговой тип установки самописца (рис. 4.15). Этот тип уста-

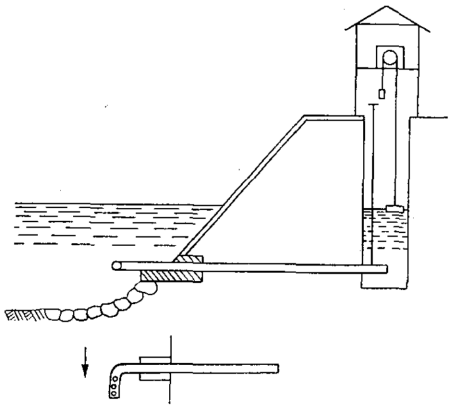


Рис. 4.15. Береговой тип установки самописца.

новки более долговечен, но сооружение его сложнее и значительно дороже установки островного типа. Применять его целесообразно при: 1) неограниченно долгом сроке работы поста; 2) больших амплитудах колебаний уровней воды; 3) наличии опасности разрушения установки островного типа волнением, ледоходом, судами; 4) необходимости действия установки в зимнее время.

Береговой тип установки состоит из четырех основных частей: 1) приемного колодца, сооруженного на берегу, в котором помещается поплавок; 2) трубы, соединяющей колодец с водоемом; 3) приемного устройства, в котором помещается конец водозаборной трубы; 4) будки для самописца, устанавливаемой над колодцем. Колодец устраивается на берегу из такого расчета, чтобы его верхняя поверхность была не менее чем на 1,0 м выше наивысшего уровня воды, а дно его — ниже на 1,0—1,5 м наинизшего уровня. В зависимости от местных условий колодец может быть деревянный, бетонный или каменный.

4.6. Дистанционные водомерные посты

Дистанционными называются водомерные посты, автоматически передающие показания высоты уровня на расстояние. Передача

сведений об уровнях может производиться в определенные сроки или непрерывно.

Дистанционные водомерные посты имеют большое значение для диспетчерской службы на гидроэлектростанциях, шлюзах, водохранилищах, оросительных системах, а также в малонаселенных и труднодоступных районах, так как они не требуют постоянного обслуживания наблюдателем.

Дистанционные водомерные посты будут являться основным источником информации об уровнях водных объектов в условиях комплексной автоматизации гидрометеорологической сети, переход к которой намечается в ближайшие годы. Для автоматической сети разработан и проходит испытания специальный датчик уровня, описание которого приводится в главе 34.

Рассмотренные в предыдущем разделе самописцы уровня относятся к приборам местного отсчета и не имеют устройств для передачи результатов измерений на расстояния. Однако разработаны устройства, преобразующие угол поворота вала, вращаемого поплавковой системой самописцев, в цифровой числоимпульсный код, что делает возможным применение их в качестве дистанционных уровнемеров и, в частности, на автоматизированных гидрологических постах.

Дистанционные водомерные посты состоят из следующих основных элементов: 1) датчика уровня, 2) канала связи, 3) регистрирующего устройства, 4) источника питания.

Датчик состоит из чувствительного элемента и преобразователя. Чувствительный элемент непосредственно воспринимает изменения уровня. Применяются следующие типы чувствительных элементов: бесконтактные электрические, электроконтактные, поплавковые, гидростатические.

Бесконтактные электрические чувствительные элементы представляют собой металлический электрод в виде стержня, покрытый слоем изоляции. Электрод вместе со средой (водой) образует конденсатор, емкость которого зависит от глубины погружения электрода.

Электроконтактные чувствительные элементы бывают непрерывного, дискретного и омического типов. Действие приборов первого типа основано на использовании контакта поискового электрода или пары электродов с поверхностью воды с последующей логической обработкой сигнала системой автоматического поиска. К приборам второго типа относятся электроконтактные рейки, контакты на которых расположены на определенных расстояниях; при этом осуществляется дискретная регистрация положений уровня воды при его колебаниях. Действие омических приборов основано на том, что при погружении в воду натянутой проволоки, по которой пропускается переменный ток, падение напряжения изменяется обратно пропорционально глубине ее погружения.

Действие поплавкового чувствительного элемента ясно из описания самописцев «Валдай» и ГР-38.

Действие гидростатических чувствительных элементов основано на регистрации давления столба воды над прибором, устанавливаемым на дне водоема. В качестве чувствительного элемента используют сильфоны, манометрические коробки и другие упругие элементы, а также ртутные манометры, как например, у пузырькового уровнемера (рис. 4.13) и в приборе УДВ-1М (см. главу 34).

Для гидрологических датчиков в качестве чувствительных элементов применяют в основном поплавковые и гидростатические, причем наиболее часто — поплавковые.

Назначение преобразователя состоит в преобразовании информации, поступающей в него от чувствительного элемента, в форму сигнала, удобную для передачи на регистрирующее устройство. Наиболее часто информация преобразуется в электрические сигналы — дискретные или непрерывные.

Таблица 4.2

Диапазон амплитуды уровней, м	Погрешность, см
2,5	0,5
2,5—5,0	1,0
5,0—10,0	2,0
10,0—25,0	5,0

С целью установления оптимальных значений допустимой погрешности датчиков уровнемеров в ГГИ И. Ф. Карасевым и А. Н. Чижовым [24] была проведена методическая разработка, в результате которой получена зависимость погрешности от амплитуды колебаний уровней (табл. 4.2).

Оптимальная точность измерения уровня на водохранилищах зависит от задачи измерения. Так, относительная погрешность измерения уровня для определения емкости водохранилища должна быть 0,2—1,5%, для учета стока воды (расхода через турбины ГЭС) — 0,26%, для расчета водного баланса — 0,01—0,2%.

В качестве канала связи чаще всего применяется электропроводная связь, а при установке автоматических постов в отдаленных и труднодоступных районах — радиосвязь.

Регистрирующее устройство может быть в виде самописца, стрелочного или шкального указателя. Для использования информации водомерных постов автоматизированной сети предполагается применять перфораторы, связанные с датчиками водомерных постов, с помощью которых на перфоленте будут накапливаться данные об уровнях воды в закодированном виде и затем периодически, месячными массивами, вводиться в ЭВМ для обработки (более подробно этот вопрос рассматривается в главе 35).

В дальнейшем рассмотрим устройство и действие некоторых типов дистанционных уровнемеров: уровнемера с поплавковой

системой и сельсинами завода «Электропульт» (глава 19) и уровнемера УДВ-1 для автоматизированных гидрологических постов (глава 34).

4.7. Уклонные водомерные посты

Назначение этих постов заключается в определении падения и уклона водной поверхности на исследуемом участке реки. Особенно необходимы уклонные посты на участках с явлениями переменного подпора.

Переменный подпор может возникать при наличии подпора от водоприемника (основная река, озеро, водохранилище), при неустановившемся движении воды (половодье, паводки, попуски), зажорах и заторах, зарастании русла и пр. При наличии переменного подпора связь между уровнями и расходами воды в реке становится неоднозначной, в этом случае расход зависит не только от уровня, но и от уклона водной поверхности.

Для точного определения падения и уклона водной поверхности большое значение имеет расстояние между уклонными постами, которое назначается исходя из минимального падения на изучаемом участке и требуемой точности его определения.

Для использования результатов наблюдений за уклоном водной поверхности при вычислении стока воды и экстраполяции кривых расходов значения уклонов должны определяться с погрешностью не более 10—15%. Такая точность может быть достигнута при условии, что измеряемое падение на равнинной реке будет не менее 10—20 см, а на горной — 25—50 см.

Для определения расстояния между уклонными постами Е. В. Близняк предложил формулу

$$L=\frac{28\,\Delta H}{h},$$

где ΔH — точность определения отметок уровня на обоих постах в миллиметрах, h — падение реки на 1 км в миллиметрах. Так, при $h=200$ м на 1 км ($i=0{,}0002$) и $\Delta H=5$ мм

$$L=\frac{28\cdot 5}{200}=0{,}7 \text{ км}.$$

Получить достаточно точное значение уклонов водной поверхности можно при тщательном определении: 1) расстояния между уклонными постами, 2) отметок площадок свай или нулей реек постов, 3) уровней воды на постах.

Схема определения падения и уклона водной поверхности показана на рис. 4.16. Падение $h=H_1—H_2$, а уклон $I=\frac{h}{l}$. Для выбора участка наблюдений за уклоном водной поверхности и установления его границ, а следовательно, и места расположения верхнего и нижнего уклонных постов производят обследо-

вание реки с нивелированием мгновенного профиля водной поверхности. На действующих водомерных постах необходимо стремиться к тому, чтобы основной водомерный пост оказался на одной из границ участка и мог бы одновременно служить уклонным постом.

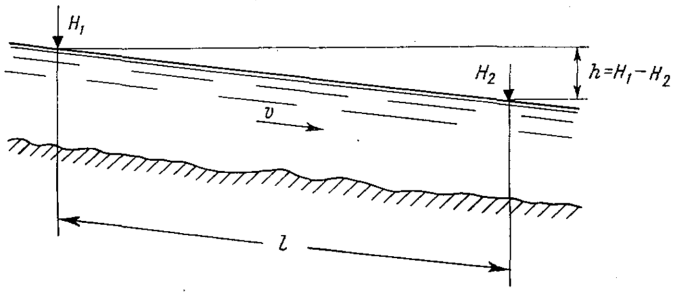


Рис. 4.16. Схема к определению падения и уклона водной поверхности.

Нивелирование участка производят дважды: в половодье при высоком уровне и в межень при низком уровне, так как в зависимости от особенностей русла участки для измерения уклона могут быть разной длины.

Границы участка для измерения уклона назначают (рис. 4.17) с таким расчетом, чтобы уклон выше и ниже этих границ был на некотором расстоянии однообразным.

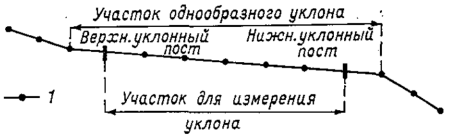


Рис. 4.17. Схема расположения уклонных постов.
1 — точки нивелирования.

Определение уклона водной поверхности посредством нивелировки. На исследуемом участке реки одновременно, по часам, забивают колья вровень с водной поверхностью через 50—100 м, а также во всех характерных местах перелома водной поверхности (перепады, перекаты). Для увеличения точности фиксации положения уровня колья забивают в естественных заливчиках берега или же в ковшах, выкопанных у берега и соединенных с рекой канавками. Отметки площадок кольев определяют нивелированием IV класса, двойным ходом от репера основного поста.

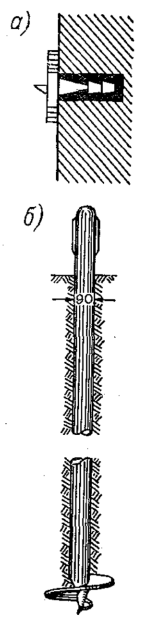
4.8. Реперы водомерных постов

Водомерный пост оборудуется двумя постоянными реперами — основным и контрольным, устанавливаемыми вне зоны затопления высокими водами. Основной репер, как правило, устраи-

вается потайным и должен удовлетворять требованиям долговременной сохранности и неизменяемости его высоты. Он служит для поверок высоты контрольного репера и располагается поблизости от поста.

Контрольный репер устанавливается в створе поста возможно ближе к водомерным устройствам и служит для систематических поверок высотного положения свай, нулей реек и других водомерных устройств.

Для установки реперов выбирают места, не подверженные затоплению, заболачиванию, оползанию и другим смещениям грунта. Не допускается устанавливать реперы на пашне, огороде, на тропинках и дорогах.



Основание репера поста закладывают на глубине не менее чем на 0,5 м ниже линии сезонного промерзания грунта, а в районах многолетнемерзлых пород — ниже линии сезонного оттаивания. Кроме того, в условиях мерзлоты необходимо защищать репер сверху от действия тепла, что можно достигнуть, поместив головку репера в деревянный сруб с теплоизоляцией. Отступление от этого правила допускается только при установке репера на скальном основании.

Постоянные реперы. При наличии поблизости от поста капитальных сооружений или скал в качестве постоянного репера поста может быть установлен стенной репер (рис. 4.18 *а*), заделываемый в отверстие на цементном растворе. При отсутствии капитальных сооружений репер делают из стандартной металлической винтовой сваи (рис. 4.18 *б*), заглубляемой в грунт до головки. При возможности повреждения репера его делают потайным.

Рис. 4.18. Типы постовых реперов.
а — стенной репер; *б* — репер—винтовая свая.

Потайные реперы отличаются тем, что головки их скрыты под землей на глубине 0,5 м и во избежание ржавления покрыты асфальтовым лаком. Для опознавания места расположения репера на поверхности земли насыпают курган. В населенных пунктах местоположение репера не отмечается, а необходимые сведения даются в паспорте поста и на плане участка.

Реперы должны иметь отчетливо и прочно сделанные надписи с обозначением ведомства, номера репера и года установки.

Основной репер привязывается к государственной высотной сети нивелированием III и IV класса двойным ходом. Нивели-

рование реперов производят спустя два-три дня после установки.

Временные реперы изготовляют из прочных, хорошо сопротивляющихся гниению древесных пород (лиственница, кедр, сосна, дуб, бук).

В районах, где имеются выходы скальных пород, в качестве временного репера можно использовать вырубленную в скале горизонтальную полочку или стальной штырь, заделанный в отверстие на цементном растворе.

Глава 5

Организация водомерных наблюдений

5.1. Выбор участка реки и места для установки поста

Участок реки (озера, водохранилища) и место для установки постовых устройств выбираются в зависимости от поставленных целей и задач наблюдений. Во всех случаях необходимо стремиться к тому, чтобы место, выбранное для устройства поста, отражало характерные особенности режима уровней данного участка водного объекта.

На равнинных реках участок, намечаемый для установки поста, должен быть без поймы, а при наличии ее следует предпочесть наиболее прямую и узкую пойму с ровным рельефом, без проток и стариц, свободную от древесной и кустарниковой растительности. Широких пойм следует избегать, так как наличие поймы сильно усложняет измерение расхода воды.

Река на участке поста должна протекать одним руслом, не разбиваясь на рукава и протоки. Русло должно быть прямое, но следует иметь в виду, что на очень длинных и широких участках больших рек, расположенных по направлению господствующих ветров, может быть искажение хода уровней от сгонно-нагонных явлений, возникающих под воздействием ветров.

В русле реки не должно быть осередков, островов и отмелей, вызывающих косоструйность течения, поперечные уклоны, подпоры, а также способствующих образованию заторов и зажоров льда. Русло реки должно быть устойчивым, т. е. не подвергаться размыву или значительному заилению, не должно быть засорено карчами и не зарастать водной растительностью (камышом, тростником, рдестом), так как это затрудняет измерение расходов воды.

Район расположения поста должен находиться за пределами распространения подпора от притоков, искусственных сооружений и водоприемника данной реки.

На участке не должно быть лесных бирж и пристаней с большим грузооборотом, добычи песка и гравия из реки, купальных пляжей, сбросов промышленных канализационных вод, которые могут искажать естественный режим реки и мешать работе поста.

При выборе поста на горных реках необходимо дополнительно к указанным выше условиям стремиться располагать пост выше стремнин и порогов, там, где течение относительно спокойное, русло реки не загромождено валунами и обломками скал, а также обратить особое внимание на устойчивость русла как в высотном, так и в плановом отношении.

Следует иметь в виду, что и крутые и очень пологие берега неудобны для установки поста и затрудняют производство наблюдений; наиболее удобны берега средней крутизны (20—30°).

На озерах и водохранилищах значительного размера сеть водомерных постов должна располагаться таким образом, чтобы данные измерений на них позволяли вычислять средний уровень, в частности, в условиях денивеляций, т. е. искажений уровенной поверхности под влиянием ветра, стока рек, впадающих в озеро и вытекающих из него, сброса воды из водохранилища и пр. Следует при этом иметь в виду, что на величину денивеляций оказывают влияние морфологические особенности строения котловины водоема и побережья (изрезанность береговой линии, глубины, наличие мелководных заливов и т. п.).

Таким образом, при организации сети водомерных постов на большом озере (водохранилище) необходимо предварительно изучить причины колебания уровня воды при различных условиях. Первоначально намеченный план размещения сети водомерных постов в дальнейшем должен быть уточнен на основе изучения материалов наблюдений, полученных в результате работы созданной водомерной сети. Изучение материалов наблюдений позволит также наметить пункты, которые целесообразно оборудовать самописцами уровня для повышения точности наблюдений и учета суточного хода уровня под влиянием денивеляций.

При устройстве постов на озерах и водохранилищах особое внимание следует уделять защите водомерных установок от разрушительного воздействия прибоя и льдов.

Выбирая место для вновь открываемого поста, следует принять во внимание наличие населенных пунктов в данном районе, средств сообщения и почтово-телеграфной связи. Соблюдение всех этих условий практически не всегда возможно, но они должны приниматься во внимание при выборе наиболее рационального варианта.

Полевые работы при выборе участка реки и места для установки поста. Перед выездом на рекогносцировочное обследование реки или озера для выбора участка для гидрологических наблюдений необходимо предварительно ознакомиться с райо-

ном и участком реки (озера) по литературным и архивным материалам и другим источникам.

Рекогносцировочное обследование участка реки наиболее удобно производить в летнее время при низком стоянии уровней воды. При обследовании производят следующие работы: а) общий осмотр участка реки для выяснения его состояния и особенностей гидрологического режима, б) выявление переменного подпора, в) глазомерно-буссольную съемку участка с промерами глубин и определениями скоростей течения и г) опрос местного населения для выявления особенностей режима реки.

Общий осмотр участка. Обследование участка начинают с общего осмотра, для чего полезно привлечь знающего человека из местных жителей, чтобы иметь возможность получить от него справки о состоянии участка и особенностях его гидрологического режима в периоды половодья и паводков, весенних и осенних ледоходов, летней и зимней межени. В процессе осмотра необходимо выявить размеры и режим колебаний уровня, общий характер течения реки, состояние ее меженного русла, ширину реки в межень и половодье, общее состояние ее поймы, устойчивость ложа реки и состояние ее берегов, зарастание русла, наличие естественных и искусственных причин образования переменного подпора, наличие регулирующих сечений (пороги, узости), степень мутности воды в различные времена года, характер и особенности ледоходов и ледостава, возможность образования заторов, зажоров и полыней; для малых рек необходимо выяснить возможность их промерзания до дна зимой и пересыхания летом. Дополнительно к этому оцениваются условия берега для установки водомерных устройств и участка реки в целом в отношении удобства гидрологических наблюдений.

Выявление переменного подпора на участке. Наиболее сложную задачу представляет выявление возможности и наличия переменного подпора, который, как и неустойчивость русла реки, снижает точность гидрометрических измерений и осложняет их обработку. Причинами возникновения переменного подпора могут быть: а) искусственное регулирование стока реки плотиной, расположенной ниже обследуемого участка; б) естественные колебания уровней воды притоков, впадающих ниже намечаемого створа, или уровней водоприемника (реки, озера, моря); в) временные стеснения русла реки льдом (заторы, зажоры) или сплавляемой древесиной (запани, заломы); г) деформации русла, вызывающие значительные изменения дна; д) значительное зарастание русла непосредственно ниже намечаемого створа.

Дальность распространения подпора от гидротехнических сооружений (рис. 5.1) может быть выяснена из материалов изысканий и проекта сооружений или опросом лиц, обслуживающих сооружение, и местных жителей. Если сведений не имеется,

то дальность распространения подпора может быть приближенно определена по формуле

$$L = a\frac{h_0 + z}{I}, \qquad (5.1)$$

где L — искомое распространение подпора в метрах; I — средний уклон водной поверхности при отсутствии подпора; h_0 — средняя глубина русла при отсутствии подпора; z — подпор непосредственно выше его источника; a — коэффициент, зависящий от отношения z/h_0 и определяемый из табл. 5.1.

Таблица 5.1

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

Входящие в формулу величины берут из материалов изысканий или они могут быть приближенно определены на месте.

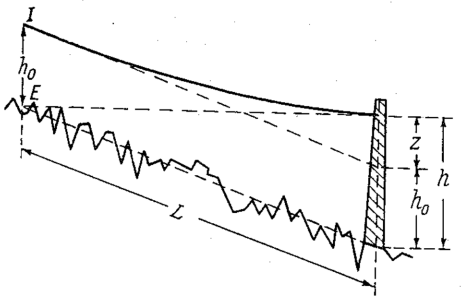


Рис. 5.1. Схема распространения подпора.

При определении дальности распространения подпора, возникающего вследствие естественных колебаний уровня воды притоков или водоприемника, за величину z принимают полную амплитуду колебаний уровня в водоприемнике. Вероятность появления переменного подпора от временных стеснений русла, деформации дна и растительности, а также его примерную величину и дальность распространения выясняют при опросе местных жителей.

Учитывая возможность ошибки при вычислении дальности распространения подпора по формуле (5.1) и при определении ее по опросу жителей, рекомендуется для окончательного использования установленную границу распространения подпора принимать с некоторым запасом.

Если в районе, намечаемом для установки поста, нет участков, свободных от переменного подпора, то в этих случаях задача сводится к нахождению такого участка, где переменный подпор выражен слабее и продолжительность его наименьшая.

Для наблюдений за режимом уклонов водной поверхности на таком участке необходимо установить уклонные водомерные посты.

Топографические и промерные работы. Топографическая съемка выполняется непосредственно после выбора

участка. Цель этих работ — получить план участка с нанесенными на нем планово-высотными характеристиками водного объекта и прилегающей к нему местности с указанием расположения постовых устройств.

Объем топографических работ по съемке участка зависит, с одной стороны, от размеров водного объекта, а с другой — от состава работ вновь открываемого поста. Для большинства гидрологических постов выполняется полуинструментальная съемка участка. Для постов на больших реках со сложным рельефом русла и поймы полуинструментальная съемка является предварительной; после устройства всех постовых установок на таких станциях производится инструментальная планово-высотная съемка.

Полуинструментальная съемка включает следующие работы: а) прокладку планово-высотной основы; б) нивелировку профилей и промеры глубин; в) измерение скоростей и направлений поверхностных течений; г) глазомерную съемку ситуации и составление плана; д) описание участка. Плановой и высотной основой съемки служат магистраль и поперечники. Границы съемки по ширине реки определяются отметками самого высокого (исторического) уровня воды, они должны быть выше него на 0,5—1,0 м, а по длине — размерами реки. Так, на реках шириной в межень до 100 м участок должен быть равен пятикратной ширине реки, а на более широких реках — двух-трехкратной ширине меженного русла. На реках с широкими поймами длина съемки устанавливается в зависимости от особенностей поймы.

Если участок поста находится не далее чем в 10 км от репера государственной высотной сети, то одновременно со съемкой производится высотная привязка реперов поста, а план съемки и профили представляются в системе абсолютных отметок.

На основе проведенных работ составляется план участка (рис. 5.2) и отдельно вычерчиваются поперечные профили русла по материалам промерных работ.

Инструментальная топографическая съемка участка проводится в пределах всей ширины поймы реки и включает следующие работы в полном объеме: а) проложение плановой и высотной основ съемки; б) нивелирование поперечных профилей через долину реки; в) промеры глубин; г) нивелирование мгновенного продольного профиля водной поверхности; д) мензульную или теодолитную съемку рельефа и ситуации долины, поймы и русла реки; е) определение значений и направлений скорости течения; ж) составление описания участка реки. Границы съемки и масштабы назначают исходя из тех же соображений, что и при полуинструментальной съемке.

Описание участка. Основная задача описания заключается в том, чтобы дать все необходимые сведения для суждения об основных чертах гидрологического режима реки,

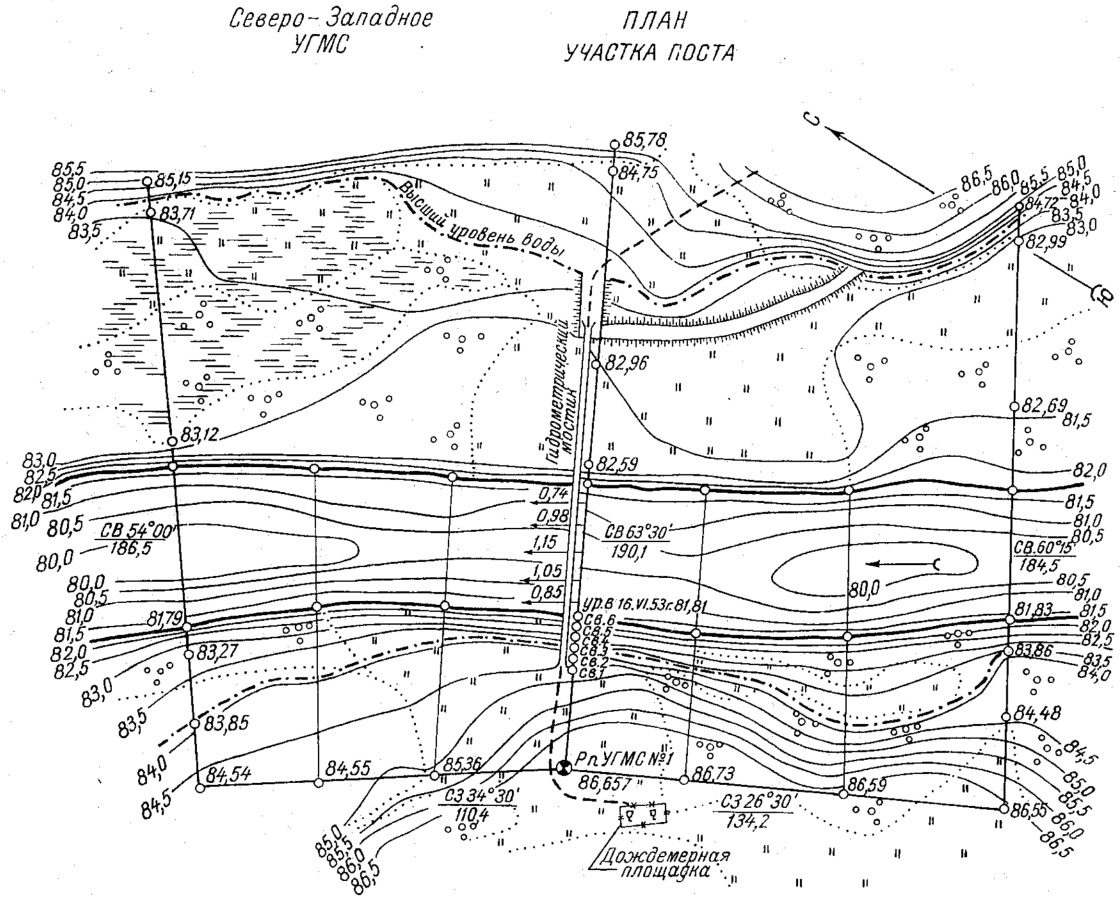


Рис. 5.2. План участка поста.

состояния участка ее в районе поста и условиях гидрологических наблюдений. Описание по мере надобности иллюстрируется фотографиями, зарисовками и схемами и должно содержать следующие данные:

а) общие сведения о реке, озере (наименование, бассейн реки, длина реки, площадь зеркала озера, площадь бассейна);

б) общие сведения об участке поста (на каком километре от устья находится, площадь водосборного бассейна для данного створа, наименование поста, административные характеристики местоположения станции: республика, область, район, сельсовет, средства сообщения и связь со станцией и постом);

в) морфологические и морфометрические характеристики участка (краткая характеристика долины и поймы реки с указанием ширины долины и поймы, характера склонов и дна долины, строения, рельефа, грунтов и растительного покрова поймы, формы очертания меженного русла в плане, характера берегов, ширины русла и распределения глубин в нем, грунтов дна, степени устойчивости русла и берегов, зарастания русла водной растительностью, уклонов водной поверхности, общего характера течения реки, скоростей течения и их направления);

г) основные характеристики водного режима: общий характер колебаний уровней воды в течение годового цикла с распределением по сезонам года, характер суточного колебания уровней, средняя и наибольшая амплитуда колебания уровней, возможность пересыхания и перемерзания русла, ориентировочные соображения о расходе воды в межень и в половодье;

д) зимний режим: процессы замерзания и вскрытия, характер ледохода и ледостава, наличие внутриводного льда и шуги;

е) сведения о хозяйственном использовании реки (для водоснабжения, сплава, судоходства, орошения, энергетики), краткую характеристику водохозяйственных сооружений и устройств, расположенных вблизи участка поста, работа и эксплуатация которых может влиять на режим реки.

5.2. Устройство, оборудование и нивелировка поста. Открытие поста. Обязанности наблюдателя

Устройство и оборудование поста производятся на основе проекта, составленного по материалам полевых работ, выполненных при выборе и обследовании участка реки (озера).

Из постовых устройств в первую очередь необходимо заложить реперы, за двое-трое суток до нивелирования. Нивелировка поста необходима для определения высотного положения нулей наблюдения водомерных устройств (реек, свай) относительно репера поста и нуля графика. Нивелировка ведется по IV классу от основного репера через контрольный двойным ходом — в прямом и обратном направлениях. Расхождение сумм

превышений, полученных по прямому и обратному ходу, должно быть не более $\pm 3\sqrt{n}$ мм, где n — число стоянок инструмента за один ход.

Кроме отметок постовых устройств, нивелированием определяется высота рабочего уровня в створе поста по колу, забитому вровень с водой, а также метки высоких вод, если они имеются в районе поста. Одновременно с нивелировкой рабочего уровня отсчитывается уровень воды по постовым устройствам.

Если пост оборудован самописцем, то, кроме нивелирования контрольных постов, необходимо определить отметки: 1) площадки (столика), на которой установлен самописец; 2) нижнего обреза приемного резервуара (островной тип установки); 3) заложения трубопровода; 4) дна колодца установки. Одновременно с определением уровня по контрольным постам делается засечка этого уровня на ленте самописца.

Результаты нивелировки постовых устройств записываются в нивелировочный журнал, где вычерчивается также схематический план нивелирного хода. Полученные отметки постовых устройств и их приводки к нулю графика переписывают в техническое дело поста и в справочную таблицу полевой книжки. По результатам нивелирования вычерчивают профиль поста (см. рис. 4.4).

Гидрологические посты Гидрометслужбы снабжаются приборами и оборудованием в зависимости от разряда (I, II или III) в соответствии с «Типовым табелем приборов и оборудования для гидрологических постов» (Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. I, 1960). Для водомерных наблюдений на постах свайного типа, в частности, должны иметься следующие приборы и оборудование: рейка водомерная переносная, нивелир, рейка нивелирная, уровень, рулетка, рейка ледомерная, бур ледовый, наметка, рейка водомерная максимальная, термометр водный в оправе, термометр-пращ, часы стенные, фонарь электрический или «летучая мышь», бланки книжек для записи водомерных наблюдений. На посту должна иметься лодка.

Открытие поста оформляется актом, который составляется представителем организации, открывающей пост, и наблюдателем в присутствии представителя местного совета. По постановлению Совета Министров СССР все устройства водомерного поста передаются под особую охрану местному совету. Оборудование водомерного поста передается по инвентарному списку наблюдателю.

При открытии поста составляется техническое дело, в котором содержится описание участка реки и постовых устройств, указываются сроки и места наблюдений. К делу прилагаются: план участка реки, профиль створа, зарисовки, схемы. Для наблюдателя составляется инструкция.

Наблюдатель на водомерном посту является единственным постоянным работником, и от качества его работы зависит качество материалов наблюдений поста. Наблюдателя рекомендуется брать из местных жителей, связанных в своей деятельности с водным объектом, на котором расположен пост.

5.3. Перенос водомерного поста

Перенос поста является крайне нежелательным ввиду большой ценности длительных наблюдений в одном месте. Но с течением времени могут возникнуть обстоятельства, при которых нормальная работа поста будет нарушена, а предусмотреть их при его открытии было невозможно. Это может быть при постройке плотины, выводе оросительного канала, выправлении русла реки и других мероприятиях, которые могут значительно изменить режим реки или препятствовать проведению наблюдений. Наряду с указанным в районе участка поста со временем могут произойти значительные изменения в строении русла и берегов при сильных паводках и возникнет угроза разрушения постовых устройств. В таких случаях пост может быть перенесен на новое место. При переносе поста необходимо соблюдать следующие условия:

1) новое место поста выбирается возможно ближе к старому; для сохранения непрерывности ряда наблюдений показания нового поста и старого должны быть увязаны;

2) при переносе поста на новое место, характеризующееся совершенно иным режимом уровня (перенос поста из одного бьефа гидроузла в другой, вынос за пределы подпора и т. п.), увязывать показания постов не требуется, так как показания нового поста будут несопоставимы с данными старого поста.

Для увязки наблюдений нового и старого постов необходимо, чтобы в течение некоторого времени они вели наблюдения параллельно. Длительность этих парных наблюдений должна быть не менее полугода, чтобы охватить фазы паводка и межени. Нуль графика нового поста, вначале временно, может быть назначен приближенно, ориентируясь на падение водной поверхности между постами. После построения графика связи уровней постов (рис. 5.3) нуль графика нового поста перемещается (поднимается или опускается) так, чтобы линия связи уровней проходила через начало координат. На рис. 5.3 приводка уровней старого и нового постов равна отрезку ΔH, на размер которого надо поднять нуль графика нового поста. После установления связи уровней постов и окончательного положения нуля графика нового поста наблюдения нового поста будут являться продолжением наблюдений старого поста.

Если график связи уровней постов получается в виде прямой, проходящей к осям не под углом 45°, то это означает, что режимы уровня в прежнем и новом местах различны. В этом

случае можно сделать пересчет показаний старого поста в систему показаний нового поста по графику найденной связи и тем самым получить непрерывный ряд наблюдений по новому посту. Однако обычно в этом случае ряд наблюдений считается

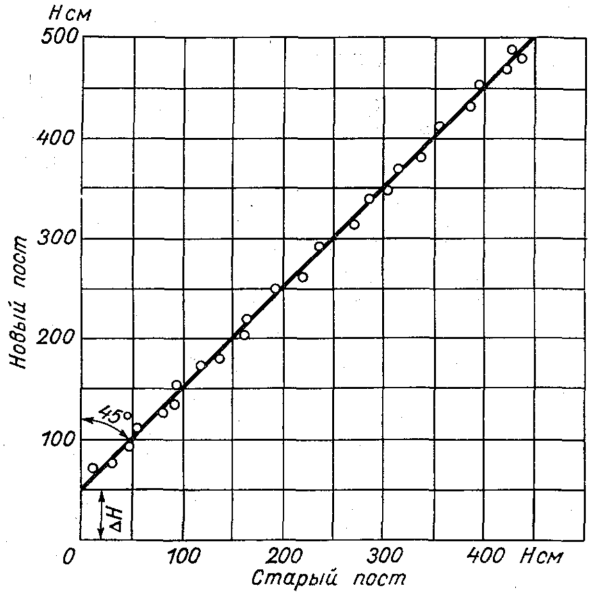


Рис. 5.3. График связи уровней старого и нового постов.

прерванным, и по результатам наблюдений на новом посту составляется отдельная таблица ежедневных уровней.

Глава 6

Наблюдения за уровнем воды на посту

6.1. Состав и сроки наблюдений

Состав и сроки наблюдений на постах определяются их назначением. Этот вопрос наиболее полно разработан для постов Гидрометслужбы СССР. Для получения материалов, сопоставимых с данными государственной гидрологической сети, необходимо на постах ведомственной сети наряду с наблюдениями, обусловленными потребностями ведомств, устанавливать состав и сроки основных наблюдений в соответствии с указаниями ГУГМС.

Состав наблюдений определяется разрядом поста. На всех гидрологических постах государственной сети проводятся наблюдения за следующими элементами: 1) высотой уровня воды; 2) температурой воды; 3) толщиной льда, снега на льду и шуги; 4) ледовым режимом, ветром, волнением, осадками, водной растительностью, изменением русла, началом и прекращением переправы по льду, сплавом, судоходством. Кроме того, отмечаются события, оказывающие влияние на режим водного объекта, а также связанные с его использованием, и, наконец, стихийные явления.

В состав наблюдений на постах I разряда, кроме того, входит: измерение расходов воды, взятие проб воды на мутность, измерение высоты волн на озерах и водохранилищах, измерение осадков дождемерной установкой, измерение высоты и плотности снежного покрова и др. При значительной удаленности от метеорологических станций организуются наблюдения за температурой воздуха.

Наблюдения за уровнем воды чаще всего подчинены общей задаче учета стока воды, но могут иметь и самостоятельное значение. В первом случае наблюдения за уровнем воды должны быть организованы таким образом, чтобы в результате можно было достаточно точно определить величину среднего суточного уровня.

Частота регистрации высоты уровня в течение суток зависит от характера уровенного режима реки. Основными сроками наблюдений являются 8 и 20 часов. В периоды половодья и дождевых паводков, кроме указанных сроков, необходимо назначать дополнительные сроки наблюдений через равные промежутки времени: 2, 4, 6 часов, в зависимости от характера и быстроты подъема и спада волны половодья или паводка.

На реках с быстрым подъемом и спадом половодья или же с половодьем, характеризующимся наличием ряда гребней на значительно растянутой общей волне, а также при дождевых паводках, следующих сериями, необходимо водомерный пост оборудовать самописцем уровня. Самописец необходим также на приливных участках рек.

В период летней межени с незначительными колебаниями уровня достаточно вести наблюдения в 8 и 20 часов. Но если в этот период проходят одиночные дождевые паводки, производятся дополнительные наблюдения через равные промежутки времени.

В зимний период основные сроки наблюдений сохраняются, но во время замерзания и вскрытия реки, когда наблюдаются шугоходы, ледоходы и сопровождающие их явления зажоров и заторов, в дополнение к основным срокам ведутся учащенные наблюдения через равные интервалы. Таким же образом следует организовать наблюдения и при неустойчивой ледовой обстановке в течение всей зимы. На реках с устойчивым

длительным ледоставом при плавном изменении уровня воды наблюдения достаточно вести один раз в сутки — в 8 часов.

Уровни воды на уклонных постах измеряют в сроки, установленные для основного поста при наличии переменного подпора. Ежедневные измерения уклона могут быть прекращены в те периоды, когда заведомо известно, что переменный подпор отсутствует. В эти периоды измерения уклона делают при измерениях расхода воды.

6.2. Наблюдения на водомерном посту

Измерение уровня воды. На свайном посту уровень измеряется при помощи переносной рейки, устанавливаемой вертикально на площадку ближайшей к берегу сваи, покрытой водой, а на реечном посту — по ближайшей к берегу рейке, погруженной в воду.

На постах, оборудованных самописцами, в состав работ входит смена ленты самописца, систематический уход за установкой.

Наблюдения за температурой воды проводят ежедневно в 8 и 20 часов, а на постах, ведущих измерения уровня один раз в сутки, — в 8 часов. Наблюдения начинают с первых весенних оттепелей и прекращают осенью через 3—5 суток после установления устойчивого ледостава. Зимой при оттепелях и временном нарушении ледяного покрова наблюдения возобновляют.

На озерах и водохранилищах измерения температуры воды производят одновременно с измерением уровня.

Место измерения температуры воды в реках выбирают в створе или вблизи водомерного поста, в прибрежной части с ясно выраженным течением и глубиной не менее 0,3—0,5 м.

Для выбора постоянного места наблюдений проводят обследование участка. Избранное место должно быть свободно от местных искажений температурного режима реки (выходы грунтовых вод и пр.). На больших реках температура воды в живом сечении неодинакова; для ее определения делают измерения на нескольких вертикалях на различных глубинах.

Для измерения температуры воды на водомерных постах применяется водный термометр в оправе. Более подробно вопрос об измерении температуры воды рассматривается в главе 30.

Наблюдения за температурой воздуха проводят только на постах, удаленных более чем на 30—50 км от метеорологических станций. Непосредственно на посту температуру воздуха измеряют лишь при специальных исследованиях, например при изучении образования внутриводного льда и т. п.

Наблюдения за ледовыми явлениями проводят с целью осветить ледовую обстановку на участке поста, получить данные о толщине льда и шуги. Наблюдения ведут в течение всего зимнего периода.

Измерения толщины льда, снега на льду и подледной шуги производят 10, 20-го числа и в последний день месяца. Особое внимание обращают на явления, которые могут значительно изменить естественный ход уровня. К числу их в первую очередь относят зажоры и заторы; необходимо установить место и время их возникновения и причины образования.

Наблюдения за ледовой обстановкой осенью и весной проводят на участке поста в течение суток. В осенний период отмечают появление сала, шуги, заберегов, осеннего ледохода, зажоров. В период ледостава дополнительно к измерениям толщины льда отмечают появление полыней, трещин, наледей, в весенний период — появление закраин, подвижки льда, ледоход, образование заторов.

Глава 7
Обработка результатов водомерных наблюдений

7.1. Обработка книжек для записи водомерных наблюдений

В состав обработки материалов наблюдений водомерного поста входит: 1) проверка полевой книжки наблюдателя с целью установления правильности и необходимой полноты записей; 2) вычисление окончательных приводок нулей наблюдений и приведение отсчетов высоты уровня к нулю графика; 3) анализ результатов наблюдений; 4) составление годовой таблицы «Ежедневные уровни воды».

Первичная обработка записей производится ежедневно наблюдателем поста и заключается в приводке отсчетов уровня к нулю графика поста и вычислении среднего уровня за сутки.

Записи наблюдателя проверяются на гидрологической станции сразу после получения книжки за истекший месяц. Вычисление значений уровня воды производится после проверки и установления значений приводок.

Для контроля материалов наблюдений рекомендуется строить график связи между значениями уровня воды на соседнем и данном постах (см. ниже). При построении таких графиков используют ряд наблюдений, охватывающих значительно больший период времени, чем тот, который вызывает сомнение в отношении приводок. Кроме графиков связи, строят совмещенные во времени хронологические графики хода уровня воды по всем постам, прикрепленным к данной гидрологической станции (рис. 7.1), и анализируют их согласованность.

Несогласованный ход уровня будет указывать на моменты изменения приводок, характер этих изменений и их величину.

Приведенные к нулю графика значения уровня воды записывают красными чернилами в полевой книжке рядом с записями наблюдателя. Из строчных и дополнительных наблюдений уровня выбирают экстремальные значения — высшие и низ-

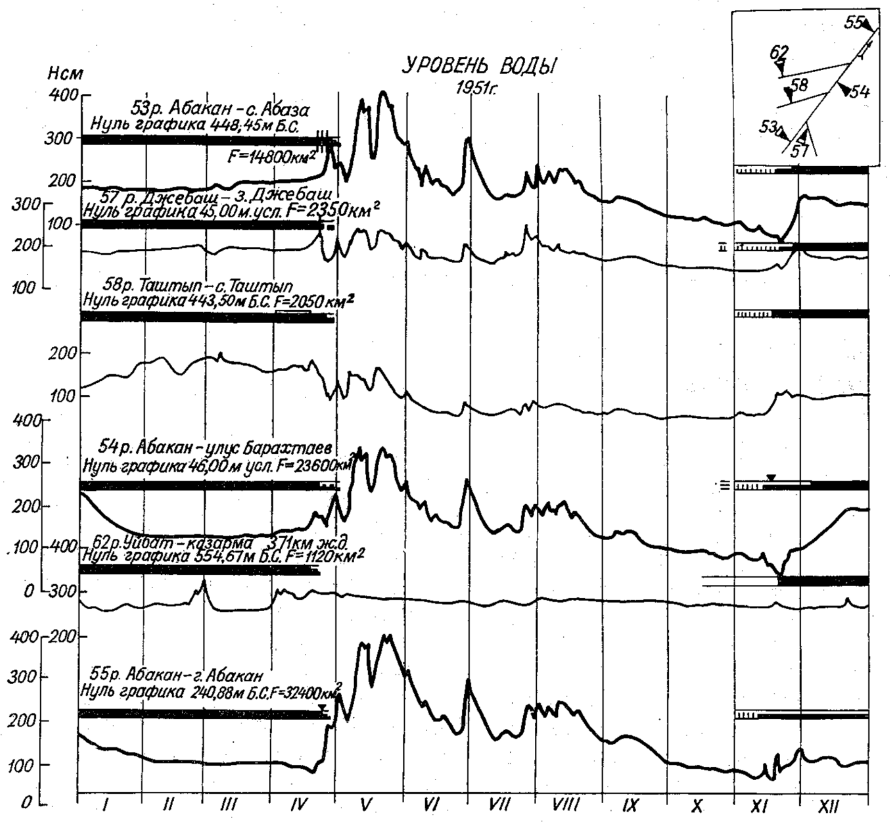


Рис. 7.1. Совмещенные графики колебания уровня воды.

шие месячные. После выборки экстремальных значений рядом со значениями уровня показывают условными знаками ледяные образования.

Для контроля и анализа окончательно установленных значений уровней строят комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений (рис. 7.2), на который наносят температуру воздуха и воды, уровни воды, а также осадки, запас воды в снеге, высоту снега на льду, толщину льда и пр. Для постов с полным комплексом гидрологических наблюде-

ний на этот график наносят наблюденные элементы режима реки (расходы воды, мутность рек и др.).

7.2. Обработка лент самописца

В состав обработки ленты самописца уровня входит: 1) проверка качества записи; 2) разметка записи для нахождения значений уровня; 3) снятие ординат (высот) уровней с записи; 4) приведение показаний самописца к нулю графика; 5) составление месячной и годовой таблиц уровней. Вся обработка (см. п. 1—4) ведется на самой ленте.

Проверка качества записи заключается в критическом просмотре записи, установлении наличия на ленте контрольных отметок и их соответствия записям в полевой книжке, а также надписей с указанием водного объекта, даты и отметки нуля графика.

Разметка записи может быть сделана через равные интервалы времени или же по характерным точкам. Способ разметки по равным интервалам применяется в случае плавного хода уровня с выделением суточного максимума и минимума.

При разметке записи по способу характерных точек намечают точки на всех пиках, впадинах и характерных переломах линии записи. Независимо от принятого способа необходимо выверить запись во времени. Невязка во времени устраняется путем пропорциональной ее разверстки между контрольными засечками.

Значения уровня находят по линии записи для каждого часа, снимая отсчеты от нуля ленты или другой начальной ординаты. Для определения этой ординаты служат отсчеты уровня по контрольному водомерному посту, выписанные на ленте. Если лента была размечена по способу характерных точек, то отсчеты уровня делают в местах засечек этих точек по линии записи, а время определяют по выверенной шкале времени. Если между показаниями поста и самописца есть разница, то обнаруженную невязку разносят пропорционально для каждого отсчета уровня по ленте и отсчет по ней соответственно исправляют.

В результате обработки ленты вычисляют средний уровень за сутки и определяют наивысший и наинизший суточные уровни. Средний суточный уровень определяют: 1) в случае разметки записи через равные интервалы — как среднее арифметическое значение из всех отсчетов уровня; 2) в случае разметки записи по характерным точкам — путем суммирования площадей, ограниченных линией записи уровня, границами интервалов и осью времени, и деления полученной суммы на продолжительность записи. Средний суточный уровень можно также определить планиметрированием площади, ограниченной линией записи, с последующим делением ее на длину (абсциссу) записи.

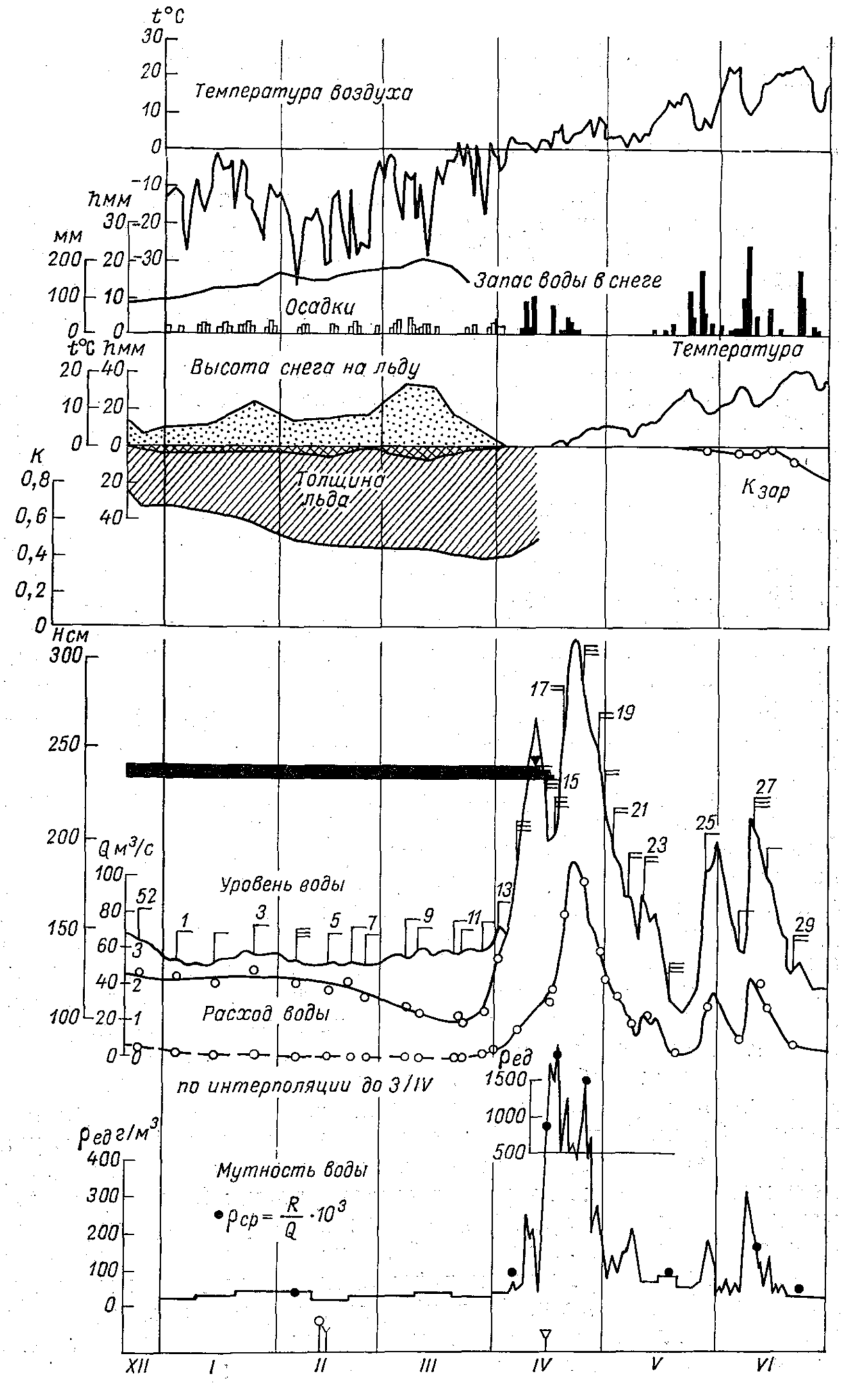
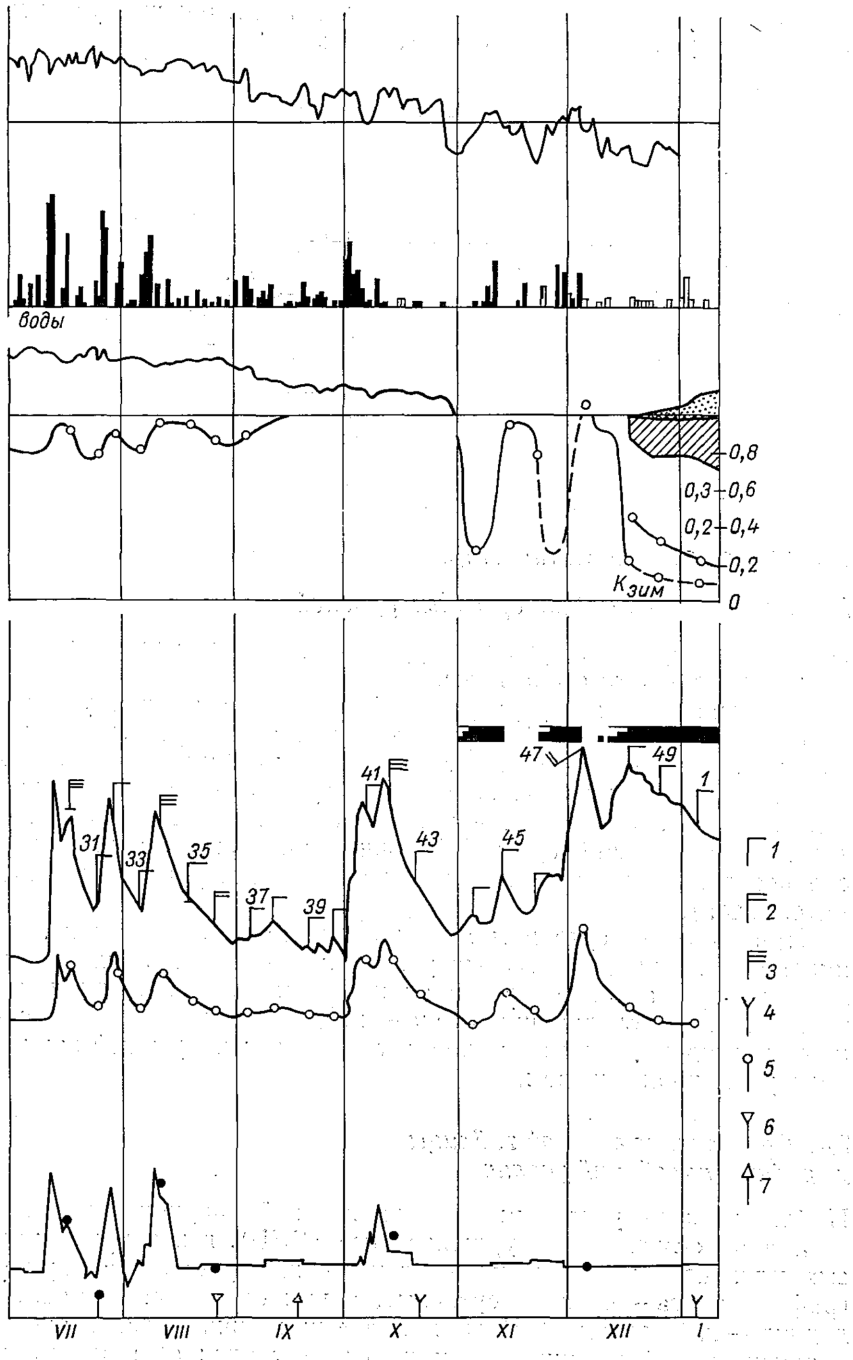


Рис. 7.2. Комплексный график результатов гидрометеорологических наблюде

1 — измерение расходов воды; *2* — измерение расхода воды и взвешенных наносов; *3* — рольная нивелировка водпоста; *6* — съемка течений; *7* — взятие проб воды на химический



ний.

измерение расходов воды, взвешенных и донных наносов; *4* — промеры русла; *5* — конт-
анализ.

На рис. 7.3 показана обработка ленты самописца, установленного на реке с приливными явлениями.

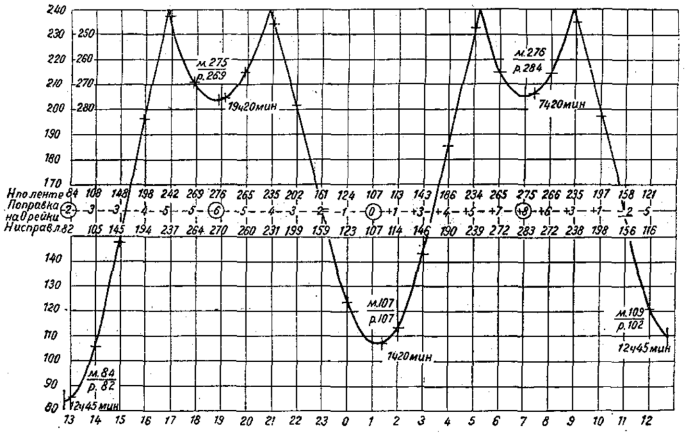


Рис. 7.3. Обработка ленты самописца.

7.3. Вычисление средних суточных уровней

Вычисление среднего суточного уровня необходимо для подсчета среднего суточного стока воды.

В случаях когда внутрисуточный ход уровня отсутствует или выражен слабо, средний суточный уровень определяют как среднее арифметическое из отсчетов уровня в 8 и 20 часов, а при наблюдении в один срок за средний суточный уровень принимают наблюденный уровень в 8 часов. При наличии дополнительных наблюдений средний суточный уровень вычисляют как среднее арифметическое из всех отсчетов (при условии равных интервалов).

При сложном суточном ходе уровня: на горных реках ледникового питания, в устьевых участках рек, впадающих в приливные моря, а также на озерах и водохранилищах при деривеляциях и регулировании стока — надежное вычисление среднего суточного уровня возможно только при непрерывной записи хода уровня самописцем.

7.4. Составление годовой таблицы и графика колебаний уровня

Наблюдения за уровнями воды за годовой период сводятся в таблицу «Ежедневные уровни воды» (ЕУВ), в которую выписываются из обработанных полевых книжек уровни над нулем графика поста — средние суточные, а при односрочных наблюдениях — наблюденные. Если в полевых книжках встречаются пропуски в наблюдениях, их можно восполнить: а) при пропу-

ских не более пяти дней — путем линейной интерполяции, если уровни в этот период изменялись плавно; б) при более длительных пропусках со значительными колебаниями уровня — по графику связи уровней с ближайшим постом на данной реке. В таблицу вписывают также наивысшие и наинизшие уровни из срочных наблюдений за каждый отдельный месяц и год в целом.

В таблице явления ледового режима и некоторые другие характеристики водного объекта отмечают условными обозначениями, проставляемыми справа от значений уровня:

забереги,
сало,
редкий шугоход,
густой шугоход,
редкий ледоход,
густой ледоход,
ледостав,
вода течет поверх льда,
закраина,
подвижка льда,
затор,
первый и последний пароход,
начало и конец лесосплава.

В примечаниях к таблице указывают сроки пересыхания или перемерзания реки в районе поста, а также явления, объясняющие резкое изменение высоты уровня: зажор, затор, разбор

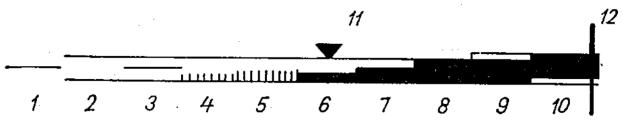


Рис. 7.4. Условные обозначения фаз ледового режима.

1 — сало; *2* — забереги; *3* — сало при заберегах; *4* — редкий шугоход; *5* — шугоход; *6* — редкий ледоход; *7* — ледоход; *8* — неподвижный ледяной покров; *9* — вода течет поверх льда; *10* — закраины и лед подняло; *11* — дата зажора или затора; *12* — дата подвижки льда.

воды на орошение и др. Таблицы ЕУВ публикуются в гидрологических ежегодниках.

По данным таблицы ЕУВ строится график колебаний средних суточных уровней аналогично указанному на рис. 7.1, на котором, пользуясь условными обозначениями (рис. 7.4), показывают фазы ледового режима. Если на реке имеется несколько водомерных постов, то целесообразно строить совмещенные графики колебаний уровня (см. рис. 7.1), что позволяет судить о развитии и продвижении по реке волн половодья и паводков, а также о характере режима уровня в различные сезоны года.

7.5. Специальная обработка уровней

Материалы наблюдений за уровнями воды могут быть подвергнуты дополнительной обработке, в результате которой можно установить: 1) характерные уровни и 2) повторяемость и продолжительность уровней. Кроме того, могут быть определены статистические характеристики уровней, а также типовое распределение уровней в году; эти вопросы рассматриваются в гидрологии.

Характерные уровни. Большое практическое значение имеют характерные уровни, которые могут быть определены как для каждого года в отдельности, так и для многолетнего периода. В последнем случае для каждого характерного уровня указывается его среднее многолетнее и предельные значения — низшие и высшие.

Для каждого года устанавливается:

1) высший годовой уровень и дата его наступления;

2) низший годовой уровень и дата его наступления;

3) уровень, при котором река очистилась ото льда, и его дата;

4) уровень, при котором начали появляться ледяные образования, и его дата.

Для каждого характерного уровня находят сроки наступления: наиболее ранний, средний и наиболее поздний. Крайние сроки наступления того или иного характерного уровня выбирают из годовых таблиц уровней, а средние сроки вычисляют.

Для вычисления средних сроков какого-либо характерного уровня, когда в отдельные годы он наблюдается в разные месяцы, необходимо сроки каждого года приводить к началу года или же к одному наиболее раннему месяцу, а затем вычислить среднюю дату. Например, если уровень весеннего половодья приходится за пять лет на сроки: 5/IV, 30/III, 25/II, 5/IV и 15/III, то, приводя эти даты к началу года, получим:

Дата уровня половодья	Число дней от начала года
5/IV	95
30/III	89
25/II	56
5/IV	95
15/III	74
	Всего 409

При приведении сроков к началу года средний день наступления уровня весеннего половодья будет

$$409 : 5 = 82 \text{ дня},$$

а средняя дата

$$82 - 31\,(\text{I}) - 28\,(\text{II}) = 23/\text{III}.$$

Повторяемость и продолжительность уровней. При эксплуатации рек (судоходство, сплав, орошение и пр.), а также при проектировании гидротехнических сооружений необходимо знать повторяемость (частоту) уровней и их продолжительность (обеспеченность) стояния в определенных высотных зонах. Для этого строят графики повторяемости и продолжительности уровней. Графики этого типа могут быть построены как для целого года, так и для отдельного его периода (зимнего, летнего) или же для периодов весеннего и осеннего ледоходов. Они могут быть построены на основании обработки уровней за отдельный год, а также и за многолетний период.

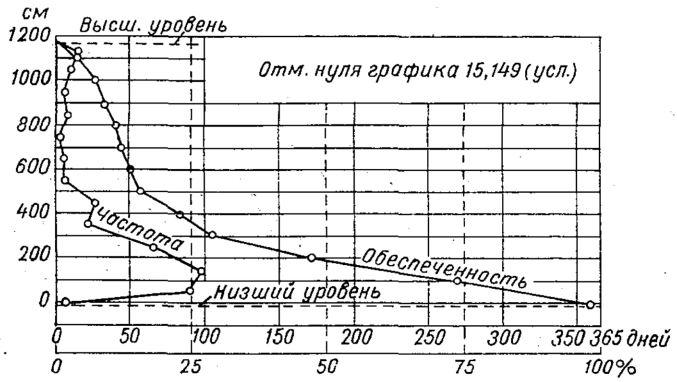


Рис. 7.5. Кривые повторяемости (частоты) и продолжительности (обеспеченности) уровня.

Для подсчета повторяемости, или частоты стояния уровней, амплитуда их колебания разбивается по высоте на равновеликие интервалы через 5—50 см в зависимости от общей амплитуды колебаний уровня. Подсчеты ведут путем выборки соответствующих данных из годовых таблиц уровней. Результаты выборки заносят в ведомость, где уровни в интервалах удобно размещать в убывающем порядке.

На графике повторяемости (частоты) и продолжительности (обеспеченности) уровней (рис. 7.5) точки повторяемости откладывают в середине соответствующего интервала, а точки продолжительности — в конце интервала. Из рис. 7.5 видно, что кривая продолжительности является интегралом кривой повторяемости.

Для сравнения результатов вычислений продолжительности уровней, относящихся к периодам разной длительности, удобно на оси абсцисс продолжительность выражать в процентах от всего периода.

7.6. *График связи соответственных уровней двух водомерных постов*

Выше отмечалось, что для восполнения пропусков в наблюдениях на одном из водомерных постов, а также для исправления ошибочных уровней можно воспользоваться графиком связи соответственных уровней. На рис. 7.6 показано, что колебания уровней на двух постах, расположенных на одной реке на небольшом расстоянии друг от друга, обнаруживают явное подобие в общих очертаниях и в особенности в расположении характерных точек (гребни паводков, низины впадин). Уровни двух сравниваемых пунктов, соответствующие однородным фазам, называются соответственными.

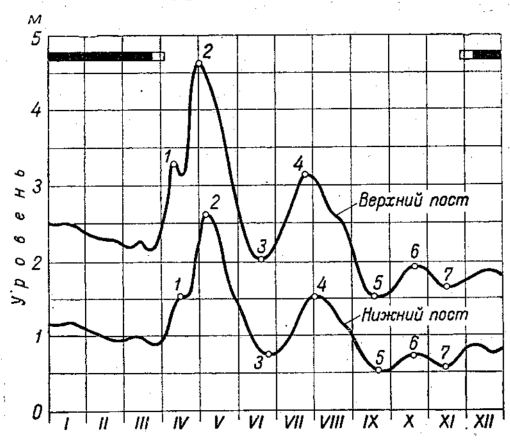


Рис. 7.6. Схема к определению соответственных уровней.

Во времени соответственные уровни двух постов сдвинуты, что обусловливается временем добегания воды от верхнего поста к нижнему.

На рис. 7.6 однозначными номерами отмечены соответственные уровни по фазе на верхнем и нижнем постах. Построение графика связи соответственных уровней для двух постов выполняется следующим образом. Парные значения соответственных уровней наносят на график (рис. 7.7), на котором по вертикальной оси расположена шкала уровней верхнего поста, а по горизонтальной — нижнего. Нанесенные точки соединяют прямой или кривой линией связи. Имея непрерывные наблюдения за уровнями по одному из постов, можно восполнить пропущенные наблюдения по другому посту. При значительных расстояниях между постами необходимо при построении графика связи соответственных уровней учитывать время добегания отдельно для периодов подъема и спада уровней.

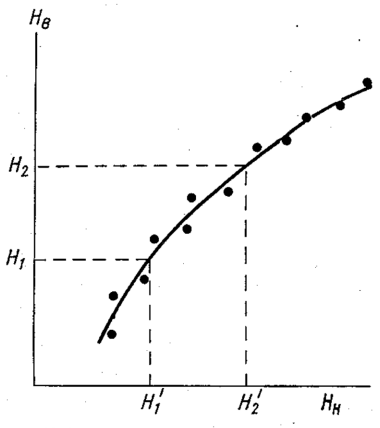


Рис. 7.7. График связи соответственных уровней.

Раздел III

Измерение глубин

Глава 8

Производство промерных работ

8.1. Задачи промерных работ

Цель промерных работ — определить глубины и характер рельефа дна реки, озера, водохранилища. В результате промерных работ могут быть получены план русла реки или ложа водоема в изобатах (линиях равных глубин) или горизонталях, а также поперечные и продольные профили. Для рек по материалам промеров могут быть определены площади водных сечений, а для озер и водохранилищ может быть вычислен объем содержащейся в них воды.

Задачами промерных работ могут являться:

— исследования водных объектов в гидрографических целях;

— измерение глубин для гидрометрических работ (при измерении расходов воды и наносов и т. п.);

— определение глубин для нужд судоходства и лесосплава;

— измерение глубин и профилей дна в связи с составлением проектов гидротехнических сооружений;

— измерение глубин и профилей дна в связи с изучением режима перекатов, переформирования береговой зоны водохранилищ, размывов дна в нижних бьефах гидроузлов и пр.

Промерные работы удобнее проводить при низких (меженных) уровнях, когда обнажаются мели, косы, выступы скал и пр. В этот период легче определить места с наименьшими глубинами, что важно для судоходства и лесосплава. Кроме того, объем промерных работ существенно сокращается.

Промерные работы можно проводить путем измерения глубин в отдельных точках или же путем непрерывной записи профиля дна. В первом случае определяются глубины в отдельных точках, отстоящих одна от другой на определенных расстояниях в зависимости от требуемой точности промеров. Непрерывная запись профиля дна производится с помощью автоматических промерных приборов.

Измерение глубин всегда сопровождается плановым координированием промерных точек или створов, т. е. определением их координат в плане. Для этого создается геодезическая

основа. При промерах необходимо вести наблюдения за уровнем воды.

Глубины, измеренные в разное время в одной и той же точке, могут иметь разное значение, так как уровень воды изменяется. При измерении глубин на значительном протяжении реки проходит много времени, за которое уровень может все время меняться. Это приведет к тому, что глубины, измеренные в разное время, будут несопоставимы. Для устранения этого в конце работ все измеренные глубины приводят к одному расчетному (условному) уровню, соответствующему определенному моменту времени.

8.2. Методы и приборы для измерения глубин и профилей дна

Существует большое количество методов и приборов для измерения глубин и профилей дна. Здесь мы рассмотрим только наиболее часто применяемые в гидрометрии и гидрологических исследованиях вод суши. Для измерения глубин применяют простейшие приспособления, механические приборы и ультразвуковые приборы — эхолоты. Применение эхолотов позволяет значительно ускорить выполнение промерных работ и повысить точность; для промеров глубин в отдельных точках применяют эхолоты со стрелочным указателем глубин, а для непрерывной записи профиля дна — эхолоты с самописцем. Начнем рассмотрение промерных приборов с самых простых.

Наметка представляет собой деревянный шест круглого сечения диаметром 4—5 см, длиной до 5—7 м. Нижний конец заделывается в металлический башмак, который помогает своим весом (0,5—1,0 кг) погружать наметку в воду и предохраняет ее от раскалывания и истирания при ударах о дно. При илистых грунтах на нижнем конце башмака укрепляется поддон. Наметку размечают на десятые доли метра белой и красной масляной краской, нулевое деление должно совпадать с нижней поверхностью башмака.

При измерении глубин наметку выбрасывают нижним концом вперед по ходу промерного судна, а отсчет глубин по ней производят в тот момент, когда наметка будет стоять на дне водоема вертикально. Отсчеты глубин делают с точностью до 2—5 см. Точность измерения глубин наметкой зависит от скорости течения, волнения и грунтов дна.

При малых глубинах для промеров применяют рейки — нивелирные, водомерные, а также штанги от вертушек.

Лот ручной представляет собой металлический груз весом от 2 до 5 кг, на верхнем конце которого имеется ушко для прикрепления линя, в качестве которого употребляют предварительно растянутый пеньковый или капроновый шнур или же

мягкий стальной трос. Лотлинь размечают марками на метры и дециметры.

Стандартный промерный ручной лот (рис. 8.1) имеет вес 4,5 кг, диаметр 56 мм и длину 355 мм; он рассчитан на измерение глубин в реках до 25 м, а в водоемах без течения — до 100 м.

При измерении глубин лот забрасывают вперед против течения, а отсчет берут в момент, когда линь будет расположен (натянут) вертикально. Точность измерения глубин лотом меньше, чем наметкой, вследствие прогиба линя и относа лота течением; точность отсчета по линю 5—10 см.

Лот механический состоит из трех основных частей: 1) лебедки со счетчиком, служащей для опускания и подъема

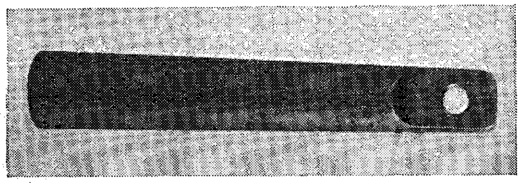


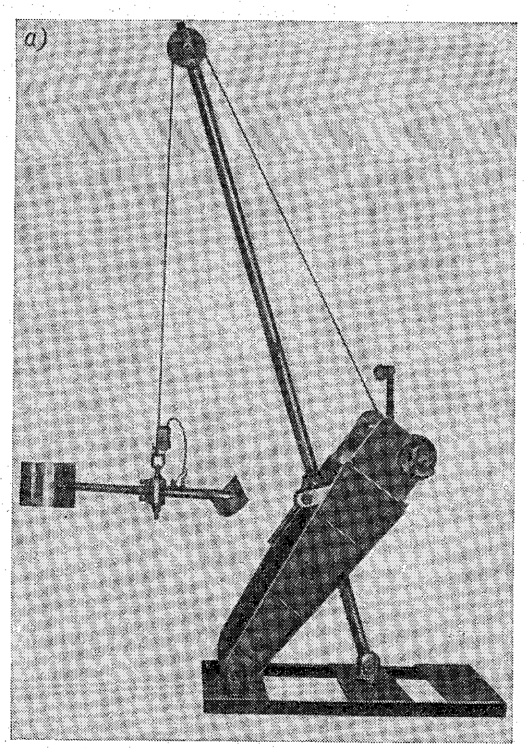
Рис. 8.1. Лот промерный ручной.

груза (лота) при измерении глубин; 2) троса, на котором опускается груз; 3) груза обтекаемой формы.

Для измерения глубин и других гидрометрических работ чаще всего применяют лебедки «Нева» и «Луга», а также лебедку ЛМ-046 с кран-балкой ПЧ-52. Реже применяют лебедку с поворотной стрелой ГР-36 и морскую лебедку ЛМ-006. Ниже мы дадим описание только первых трех.

Лебедки «Нева» (ГЛН-52) и «Луга» (ГЛЛ-52) (рис. 8.2) собраны в основном из одних и тех же деталей; намоточные приспособления и счетчик одинаковые на обеих лебедках. Счетчики лебедок указывают длину размотанной части троса с точностью до 1 см и имеют приспособления для установки на нуль. Станина лебедки «Нева» более высокая, имеет шарнирную опору и скользящую связь со стрелой. У лебедки «Луга» стрела крепится отдельно от станины. Длина троса на обеих лебедках по 22 м. Грузоподъемность лебедки «Нева» 50 кг, лебедки «Луга» 30 кг. Лебедка «Нева» удобна для применения с гидрометрического мостика, «Луга» — с лодки.

Лебедка с кран-балкой состоит из собственно лебедки и кран-балки (рис. 8.3). Обе части крепятся болтами к палубе судна с таким расчетом, чтобы блок кран-балки, служащий для направления троса, находился за бортом. Кран-балка представляет собой изогнутую стальную трубу с шаровым подпятником; для лучшей устойчивости кран-балка укрепляется двумя тросовыми растяжками. Длина вытравленного троса регистрируется счетчиком, укрепленным на кран-балке. Лебедка может



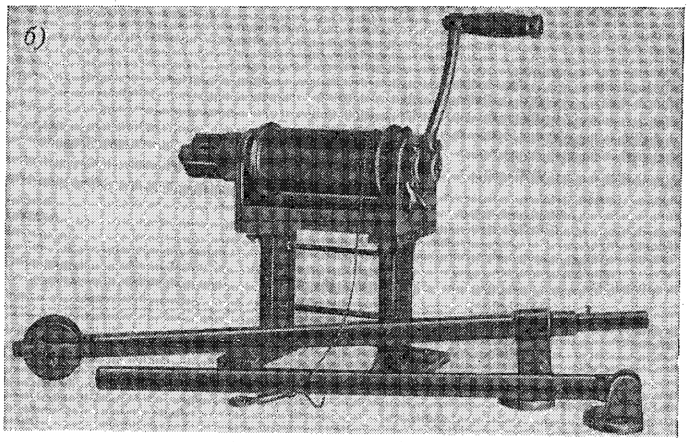
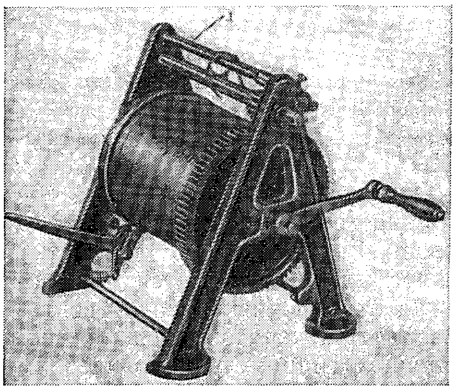


Рис. 8.2. Гидрологические лебедки.
а — «Нева»; *б* — «Луга».

применяться на судах, понтонах и мостах. Грузоподъемность лебедки 50 кг, масса лебедки 35, кран-балки — 20 кг.

Трос для опускания груза входит в комплекс лебедки. Применяется стальной трос мягкой свивки диаметром 2,2—3,0 мм. При наличии у груза донного контакта вместо обычного троса применяют трос-кабель.



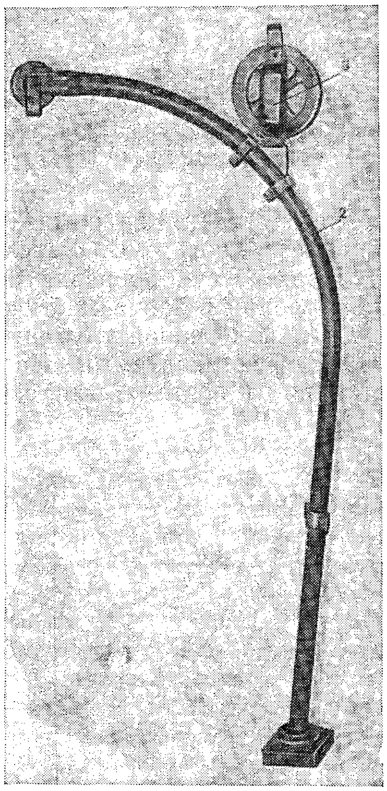


Рис. 8.3. Гидрометрическая лебедка с кран-балкой.

1 — лебедка; *2* — кран-балка; *3* — счетчик.

Грузы, применяемые в качестве лота, имеют обтекаемую (рыбовидную) форму, снабжены стабилизатором направления для устойчивого положения в потоке и имеют вертлюг, обеспечивающий свободное вращение груза в горизонтальной плоскости и установку его по направлению течения. Стандартные гидрометрические грузы (рис. 8.4) выпускаются массой от 5 до 100 кг.

При промерах механическим лотом на ходу судна обычно лотлинь выбирается не полностью. Достаточно нескольких оборотов барабана лебедки при каждом измерении, чтобы опустить и вновь поднять лот.

Поправка на относ лотлиня течением. В случае измерения глубин при значительных скоростях течения наблюдается относ лота, вследствие чего промер дает преувеличенное значение глубины. Это же явление наблюдается при промерах с хода судна. Для определения правильного значения глубины необходимо вводить поправки со знаком минус.

Трос (лотлинь) с подвешенным к нему грузом прогибается в воде по сложной кривой, вид которой зависит от веса и формы груза, диаметра, структуры свивки и длины троса, скорости течения и профиля скоростей в потоке. Форма кривой прогиба лотлиня, а также глубина погружения груза могут быть определены теоретически. Подробное теоретическое рассмотрение этого

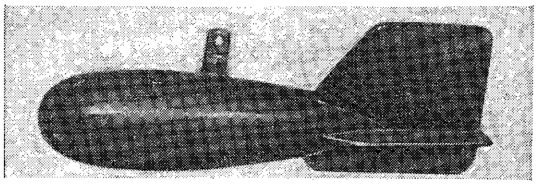


Рис. 8.4. Груз гидрометрический стандартный.

вопроса выходит за рамки учебника; с ним можно познакомиться по книге Г. В. Железнякова [21].

Практически поправки на относ лотлиня вводятся с помощью таблиц в зависимости от угла отклонения троса от вертикали и измеренной глубины. Рассмотрим способ введения поправок, рекомендуемый «Наставлением гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 6, ч. 1.

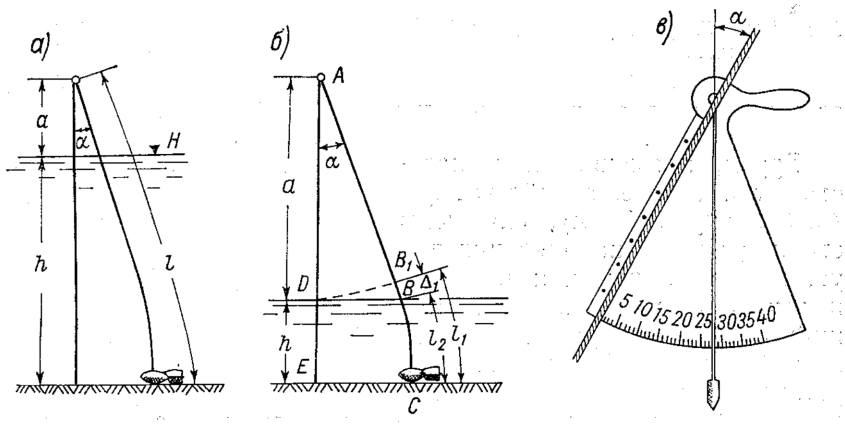


Рис. 8.5. Схемы к определению поправок на относ лотлиня течением (а, б) и угломер (в).

Для измерения угла отклонения троса от вертикального положения применяют угломер (рис. 8.5 *в*). В нижней части сектора наносится шкала в градусах, а в верхней его части имеется отверстие, через которое пропущена нить отвеса. Край сектора образует желобок, которым угломер прикладывается к тросу, при этом линия нулевого деления совпадает с направлением троса. Угол между направлением троса и линией отвеса определяется по линии отвеса.

В случае когда высота подвеса троса над водой невелика, не превышает 1 м (рис. 8.5 *а*), глубина h определяется по формуле

$$h = l - a - \Delta_2, \tag{8.1}$$

где l — длина вытравленного троса: a — высота подвеса; Δ_2 — поправка к подводной части троса за счет кривизны (приложение 1).

При измерении глубин с гидрометрических люлек высота подвеса может быть большая, особенно на горных реках с обрывистыми берегами. Если высота подвеса превышает 1 м, то поправка определяется следующим образом:

— измеряют расстояние от точки подвеса до поверхности воды путем опускания груза, берут отсчет по счетчику $a = AD$ (рис. 8,5 *б*);

— при положении груза у поверхности воды устанавливают счетчик на нуль;

— опускают груз до дна;

— отсчитывают по счетчику глубин расстояние $B_1C = l_1$ (фиктивная глубина);

— измеряют угол отклонения троса α.

После этого производят расчет истинной глубины h, для чего:

— определяют поправку Δ_1 к длине надводной части троса по формуле

$$\Delta_1 = BB_1 = \left(\frac{1}{\cos\alpha} - 1\right)a \tag{8.2}$$

(допускается, что надводная часть троса прямолинейна); по приведенной формуле составлены таблицы [12];

— определяют длину подводной части троса $l_2 = l_1 - \Delta_1$;

— для найденной длины подводной части троса l_2 находят поправку Δ_2 (приложение 1);

— определяют истинную глубину $h = l_2 - \Delta_2$.

Промерные эхолоты широко применяются для промерных работ. Они обеспечивают высокую точность измерения глубин, большую скорость выполнения работ и удобны в обращении.

Действие эхолота основано на посылке ультразвуковых импульсов от вибратора-излучателя в водную среду и приеме отраженных от дна импульсов (эха) вибратором-приемником. Промежуток времени, за который ультразвуковой импульс проходит путь от излучателя до дна и обратно до приемника, пропорционален глубине. Эта зависимость используется для определения глубин, которое осуществляется посредством механических или электрических развертывающих устройств.

Скорость распространения ультразвука в воде зависит от ее температуры и солености (при температуре +14°С в пресной воде скорость ультразвука равна 1462 м/с). Для обеспечения

необходимой точности измерения глубин перед началом каждого промера производят полевую тарировку эхолота [1], при этом автоматически осуществляется коррекция показаний эхолота в соответствии с температурой во время работ и соленостью воды.

Для создания и посылки ультразвуковых колебаний в эхолотах применяются магнитострикционные или пьезоэлектрические вибраторы-излучатели. Для приема отраженных от дна сигналов служат вибраторы-приемники тех же типов, при этом используется обратный магнитострикционный или соответственно пьезоэлектрический эффект. Магнитострикционные вибраторы создают ультразвуковые колебания частотой 40—60 кГц, пьезоэлектрические — 100—150 кГц. Посылка ультразвуковых колебаний осуществляется отдельными короткими импульсами частотой 36—60 Гц.

Речные промерные эхолоты можно разделить по виду регистрации глубин на два основных типа: 1) эхолоты с самописцем, 2) эхолоты с указателем глубин. Оба указанных типа применяются в водных изысканиях и, по-видимому, должны в ближайшее время получить широкое применение в гидрологии.

Рассмотрим кратко действие эхолотов с самописцем на примере речного эхолота ИРЭЛ, показанного на рис. 8.6.

Эхолот позволяет измерять глубину от 0,2 до 20 м, при этом запись глубин производится в виде непрерывного профиля на бумажной ленте типа ЭТБ-2 электротермическим способом. Верхний белый слой бумаги при прохождении электрического тока прожигается, в результате получается запись линии дна в виде черной линии на белом фоне. Точность измерения глубин составляет: при глубинах 0,5—5 м — 0,1 м, при больших глубинах — 2% измеряемой глубины. Масштаб записи глубин 1 : 100.

Комплект эхолота состоит из центрального прибора (см. рис. 8.6), блока питания, магнитострикционных вибраторов, смонтированных на специальном кронштейне для погружения в воду на заданную глубину (обычно 0,5 м), а также вспомогательных принадлежностей.

Центральный прибор служит для автоматической записи глубин и управления посылкой и приемом ультразвуковых импульсов. Блок питания служит для преобразования постоянного тока источника питания — аккумулятора — в переменный ток с последующим его выпрямлением в постоянные токи различных напряжений для питания электрических цепей; анодной цепи усилителя (220 В), цепи оперативной отметки (300 В), питания двигателя (22 В) и др.

---

[1] Тарировка производится в соответствии с типом эхолота по указаниям заводской инструкции.

Рассмотрим принципиальную схему работы эхолота. Электродвигатель через редуктор вращает с постоянной скоростью барабан, на оси которого находится посылочное устройство. Одновременно электродвигатель через редуктор вращает валик протяжки бумаги и приемную бобину. Бумага протягивается между барабаном и пишущей линейкой. Барабан сделан

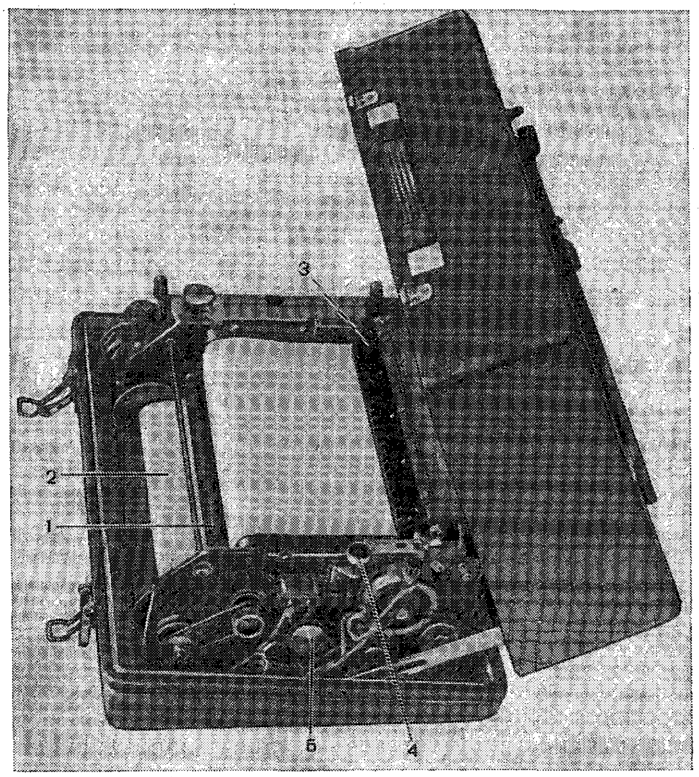


Рис. 8.6. Эхолот ИРЭЛ (центральный прибор).

1 — прижимной валик; *2* — бумажная лента типа ЭТБ-2 на приемной бобине; *3* — пишущая линейка; *4*, *5* — регулировочные винты для полевой тарировки эхолота.

из токонепроводящего материала и на его поверхности натянута металлическая струна, образующая винтовую линию — ровно один оборот. При любом положении барабана в каждый момент струна имеет контакт в одной точке с расположенной над барабаном металлической линейкой (пишущая линейка). При вращении барабана точка контакта перемещается вдоль линейки, образуя скользящий контакт.

При вращении барабана происходят замыкания цепи конденсатора и обмотки вибратора-излучателя, при этом создается колебательный контур. При разряде конденсатора в контуре возникает колебательный процесс и при этом никелевый пакет вибратора-излучателя посылает ультразвуковые импульсы. Отраженный от дна импульс воздействует механически на никелевый пакет вибратора-приемника, вследствие чего в его обмотке возникает слабый электрический ток. Возбужденный в обмотке импульс поступает в усилитель, а усиленное напряжение подается на пишущую линейку.

За время от момента посылки ультразвукового импульса до поступления усиленного импульса на пишущую линейку точка контакта линейки со струной переместится на расстояние, пропорциональное глубине. В этом месте происходит прожог белого слоя бумаги. Через каждый оборот барабана в момент прохождения точки контакта линейки со струной через нуль шкалы происходит следующая посылка импульса. В течение работы эхолота на ленте получается ряд точек, образующих сплошную линию, соответствующую профилю дна.

Скорость вращения барабана должна быть согласована со скоростью ультразвука в воде. Это достигается в процессе полевой тарировки (см. рис. 8.6).

Эхолоты с указателем глубин делаются двух типов — стрелочного и страбоскопического. Стрелочный указатель имеет шкалу, по которой непосредственно берется отсчет глубины. Страбоскопический указатель имеет круговую шкалу, отсчет глубин по которой производится по вспышкам неоновой лампочки, укрепленной на вращающемся диске; первая вспышка соответствует нулевому отсчету, вторая — указывает глубину.

Рассмотрим действие эхолота со стрелочным указателем на примере полупроводникового одновибраторного эхолота ЭПО-10, измеряющего глубины до 10 м [32]. Комплект эхолота состоит из центрального прибора, указателя и вибратора. В качестве источника питания применяется батарея напряжением 12 В.

Центральный прибор весит всего 1,5 кг и потребляет мощность 3 Вт. В качестве излучателя применен пьезоэлектрический вибратор на основе керамики титаната бария. Тот же вибратор выполняет и функции приемника отраженных от дна ультразвуковых колебаний. Вибратор монтируется в забортном устройстве, которое делается двух типов: в виде навесного вибратора для моторных лодок и в судовом исполнении, при этом вибратор устанавливается в шахте.

Погрешность измерения глубин составляет $\pm(1\%+5$ см). Диапазон рабочих температур эхолота от -10 до $+40°C$; при отрицательных температурах ниже указанной нарушаются свойства вибратора.

Рассмотрим функциональную схему эхолота ЭПО-10, показанную на рис. 8.7. Задающий генератор *1* осуществляет запуск ге-

нератора-возбудителя *2*, энергию которого поглощает акустический преобразователь-вибратор *3*. Ультразвуковая посылка распространяется в направлении дна, отражается и вновь поступает на вибратор.

Одновременно с изучением импульса происходит запуск каскада подавления нулевой помехи *6*, в результате чего триггер *7* перебрасывается в исходное положение. Отраженный от дна импульс проходит через входную цепь *4*, усилитель *5*, детектор *8* и поступает на второй вход триггера *7*, вызывая его опрокидывание. Поскольку этот процесс периодически повторяется, напряжение на выходе триггера имеет форму пря-

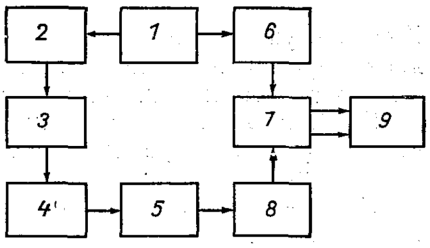


Рис. 8.7. Функциональная схема эхолота ЭПО-10.

моугольных импульсов, длительность которых определяется временем прохождения ультразвукового импульса расстояния, равного двойной глубине.

Прямоугольные импульсы поступают на указатель глубины *9*, который измеряет среднее значение тока, пропорциональное измеряемой глубине.

В табл. 8.1 помещены основные данные промерных эхолотов, выпускаемых в настоящее время.

Таблица 8.1

Название эхолота	Способ регистрации глубин	Диапазон глубин, м	Тип и число вибраторов	Потребляемая мощность, Вт	Масса центрального прибора, кг
ЭПО-10	Указатель	до 10	Пьезоэлектрический *1*	3	1,5
ИРЭЛ	Запись	до 20	Магнитострикционные *2*	80	16
«Язь»	Запись	до 160	Пьезоэлектрический *1*	5	4,75
ПЭЛ-3	Запись	до 200	Магнитострикционные *2*	80	32

Указанные в таблице эхолоты применимы для всех видов гидрометрических работ. При промерах и других измерениях на гидростворах небольших и средних рек весьма удобен в применении эхолот ЭПО-10. Для работ на больших реках, а также на озерах и водохранилищах при глубинах до 20 м можно применять эхолоты с самописцами ИРЭЛ, а при больших глубинах — «Язь» и ПЭЛ-3. Эхолот «Язь» имеет самописец с записью на

бумажной ленте ЭТБ-2 шириной 80 мм; запись сигналов круговая, для определения глубин по ней применяется специальный шаблон. Эхолоты ЭПО-10 и «Язь» удобны в применении благодаря небольшим габаритам и малому весу. Эхолот ПЭЛ-3 имеет большие размеры и массу, поэтому применять его можно на сравнительно больших промерных судах.

8.3. Способы выполнения промерных работ

Как уже указывалось, для каждой промерной точки при проведении промеров необходимо измерить глубину воды, определить плановые координаты и отметку уровня воды.

Глубина измеряется одним из рассмотренных выше приборов. Координаты промерных точек могут определяться разными способами, а именно:

1) по натянутому вдоль створа тросу от постоянного начала или уреза воды;

2) засечками промерных точек с берега угломерными инструментами — теодолитом или кипрегелем на мензуле;

3) засечками угломерным инструментом — секстантом — с промерного судна ориентиров на берегу;

4) радиогеодезическими методами.

Отметки уровня воды в месте работ определяются по показаниям водомерных постов — одного или более в зависимости от длины участка реки. На время промеров, выполняемых на длинных участках рек или на озерах и водохранилищах, устанавливают в дополнение к имеющимся временные водомерные посты. В начале и конце каждого промерного хода (поперечника, галса) определяют отметки уровня воды на посту.

В зависимости от целей, желаемой точности и подробности промерных работ, а также от местных условий промерные ходы располагаются: 1) по поперечным профилям, 2) по продольным профилям, 3) по косым галсам, 4) смешанным способом.

Одновременно с промерами можно исследовать грунты дна с помощью специальных приборов, описание которых дано ниже, а также приближенно — на ощупь и отчасти на слух. При таком определении при известном навыке могут быть отмечены следующие виды грунтов: ил, глина, песок, галька, камень, плита (скала), а также наличие водной растительности.

Результаты промерных работ записывают в промерной книжке стандартного образца или в журнале, форма которого разрабатывается в соответствии с принятым способом промеров. В случае применения эхолотов с самописцами отчетной документацией промеров являются эхограммы.

Промеры по поперечным профилям. Этот вид промеров позволяет достаточно точно определить положение промерных точек и выявить распределение глубин по заранее установленному направлению.

Недостатком способа является значительная трудоемкость и невозможность его применения на больших реках с сильным течением. Для промеров по поперечникам вдоль реки на одном из ее берегов прокладывают и закрепляют реперами магистраль. Поперечники разбивают перпендикулярно магистрали и закрепляют кольями на линии магистрали и урезах берега. Расстояния между поперечниками назначают в зависимости от ширины реки, характера рельефа дна и требуемых подробностей промеров. Для средних условий поперечники назначают через $^1/_2$—$^1/_3$ ширины реки при ширине до 100 м и через $^1/_3$—$^1/_4$ при ширине реки до 1000 м.

Количество промерных точек на поперечнике назначают исходя из цели промерных работ и характера рельефа дна. Для средних условий на реках шириной от 10 до 50 м берут 10—20 промерных точек, на реках шириной от 100 до 300 м — 20—30 точек и при ширине до 1000 м — 40—50 точек. При плавном изменении рельефа дна точки намечают реже, а при неровном дне — чаще в соответствии с местными особенностями. При промерах по гидрометрическим створам количество промерных точек увеличивают по сравнению со средними условиями примерно вдвое [1].

Промеры с мостика и люльки. Гидрометрические створы на малых реках оборудуют для гидрометрических работ мостиками, с которых производят и промеры водного сечения. В этих случаях промерные работы весьма несложны: вдоль мостика от постоянной точки натягивают рулетку или стальную ленту, служащую для определения положения (расстояния) урезов воды и промерных точек от постоянного начала. Глубины в промерных точках измеряют обычно рейкой, штангой или наметкой.

Если створ оборудован люлькой, то для определения положения промерных точек параллельно ездовому тросу натягивают мерный трос диаметром 2,5—3 мм, размеченный марками через 1—2 м. Глубины измеряют наметкой, штангой или механическим лотом. При измерении глубин с люльки делают два отсчета: первый — в момент соприкосновения лота (наметки) с поверхностью воды, а второй — при соприкосновении с дном. Глубина определяется как разность двух отсчетов. При относе лотлиня течением вводится поправка.

Промеры с лодки по тросу [2]. Промеры рек шириной до 200—300 м при скорости течения не более 1,5 м/с можно производить с лодки по тросу. В этом случае на створе натягивают стальной трос диаметром 3—5 мм, размеченный марками че-

---

[1] Более детальные рекомендации даны в «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 6, ч. 1.

[2] Промеры по тросу допустимо производить лишь на несудоходных реках.

рез 2—5 м. Один конец троса прочно закрепляют, а другой конец натягивают на противоположном берегу вручную или посредством лебедки.

При ширине реки более 100 м на середине реки необходимо ставить на якоре лодку или поплавок для поддержания троса. Трос должен быть натянут достаточно туго — так, чтобы расхождение значений ширины реки, определенных дальномером и по тросу, было не более 2%.

Если трос натянут не от магистрали, то необходимо измерить расстояние от магистрали до места, где закреплен трос.

Промерная лодка перемещается вдоль троса. Наметчик или лотовой производит промеры глубин против марок на тросе. По окончании промера на данном профиле трос переносят на следующий.

На реках шириной до 25 м вместо троса на промерном профиле можно натягивать размеченную капроновую или пеньковую бечеву диаметром 10 мм. Промеры мелких речек можно производить вброд.

Промеры с засечками с берега и лодки. На реках шириной более 200—300 м положение промерных точек на профиле определяют посредством засечек их с берега кипрегелем на мензуле, теодолитом или с лодки секстантом.

Промерные створы в этом случае должны быть оборудованы створными знаками, которые обычно делают переносными. На реках шириной до 500 м створные знаки достаточно установить на одном берегу, а на реках шириной более 500 м их устанавливают на обоих берегах.

Форма и размеры створных знаков зависят от ширины реки. При ширине до 300 м створные знаки могут иметь вид шестов с флагом из цветной материи, а при большей ширине — вид щитов из легких досок, фанеры или материи, укрепленных на шестах высотой 3—5 м, диаметром 5—7 см.

Таблица 8.2

Ширина реки, м	Расстояние между створными знаками, м
До 100	Не менее 5
100—200	5—10
200—500	10—20
500—1000	20—50

Для лучшей видимости створные знаки — щиты и шесты — окрашивают в белый и красный цвета. Расстояние между створными знаками назначают исходя из величины допускаемого сноса промерной лодки со створа. Выход лодки из створа обычно становится заметен, когда просвет между шестами створных знаков будет равен примерно толщине шеста.

Расстояние между створными знаками можно устанавливать, придерживаясь указаний табл. 8.2.

При промерах с засечками одним угловым инструментом после выполнения подготовительных работ (прокладка магист-

рали, разбивка поперечников, плановая съемка исследуемого участка реки) на магистрали выбирается и отмечается на плане место стоянки угломерного инструмента (рис. 8.8 *а*) с таким расчетом, чтобы с одной стоянки можно было выполнить засечки для ряда поперечников вверх и вниз по реке. Взаимное положение базиса промерных створов и стоянок инструментов должно быть таково, чтобы углы между направлением поперечника и лучом визирования были не менее 30°.

При выполнении засечек двумя инструментами на магистрали назначается базис, длина которого должна быть измерена и в масштабе нанесена на план участка реки. Угломерные инструменты устанавливают на концах базиса (рис. 8.8 *б*).

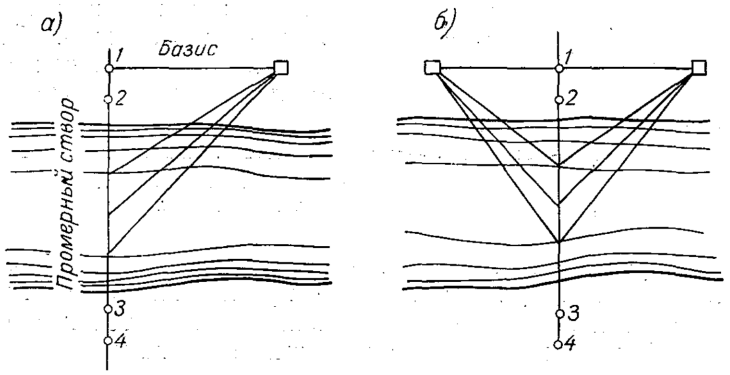


Рис. 8.8. Схема засечек промерных точек на створе одним (а) и двумя (б) инструментами.

Промеры производят с промерного судна, передвигающегося от берега к берегу строго в линии створных знаков данного поперечника. Если ширина реки не превышает 500 м и скорости течения не более 1,5 м/с на стрежне, то промеры можно производить с лодки с двумя парами весел. При больших размерах реки и больших скоростях течения необходимы лодки с подвесным мотором, моторные лодки и катера.

Засечки могут выполняться двумя способами: в одном случае засечки производятся по сигналу, подаваемому с лодки в момент промера; в другом случае мензулист заранее размечает по линии створа места промеров, в которых и делают промер по его сигналу в момент, когда лодка выйдет на створе в место промерной точки. Второй способ дает возможность получить более равномерное расположение промерных точек на створе и менее утомителен для геодезиста. Однако при промерах по первому способу имеется возможность размещать промерные точки, сообразуясь с характером рельефа дна, что невозможно осуществить при втором способе.

Засечками определяются обычно не все промерные точки, а лишь через известные промежутки. Так, засекают 1, 5, 10-ю точки, а промежуточные точки определяют без засечки, через равные интервалы времени. Этот способ может давать хорошие результаты только при равномерном ходе лодки. Моменты засечек промерных точек сигнализируются с промерной лодки отмашками красным и белым флагами поочередно. Мензулист, наблюдая промерную лодку в трубу кипрегеля, засекает положение промерной лодки по наметке или лотлиню в момент отмашки. Засечки на линии створа, нанесенного на планшете, снабжаются номерами промерных точек и начальными буквами, обозначающими цвет сигнала. Размещение промерных точек, глубины которых были измерены без засечек, производится после окончания работ в соответствии с записями в журнале.

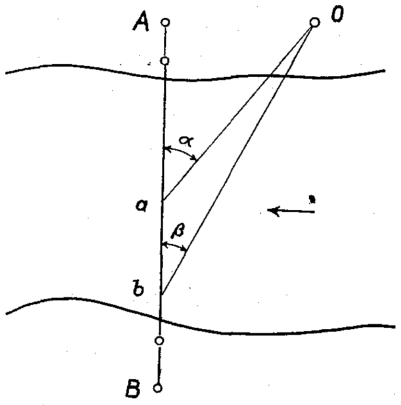


Рис. 8.9. Схема засечек промерных точек секстаном.

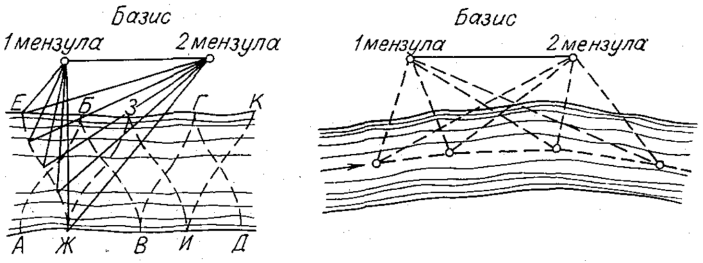


Рис. 8.10. Схема промеров косыми галсами и продольниками.

Промеры с засечками секстантом. При промерах озер и рек со значительной шириной и малодоступными берегами для засечек промерных точек удобно применять секстант. Засечки производят с промерного судна. Положение промерной точки *а* на створе определяет угол α (рис. 8.9), составленный направлением линии промерного створа *АВ* и направлением на береговой ориентир *О*, которым может быть веха или ориентир, имеющийся на местности. Положение точки *О* выбирается на месте, видном при промерах с нескольких профилей, и должно быть определено в плане.

Промеры по косым галсам. В тех случаях, когда промеры производят на значительных по протяжению участках рек, могут применяться способы промеров по косым галсам или продольникам, обеспечивающие ускорение работ по сравнению со съемкой по поперечникам. Эти способы оказываются более удобными при значительных скоростях течения, когда держаться на линии створа трудно. При промерах по косым галсам (рис. 8.10) лодка, сносимая течением, пересекает реку под углом 15—30°. При большой ширине реки применяется система перекрестных косых галсов. Галсы располагают через $^1/_4$—$^1/_2$ ширины реки.

Засечки положения промерных точек на галсе производят с базиса двумя угломерными инструментами. Для систематизации засечек применяют обычно следующий способ: из точки, изображающей стоянку мензулы, на планшете проводят концентрические полуокружности, каждая из которых используется для засечек промеров только на одном галсе. При засечках записывают номер промерной точки и начальную букву цвета сигнала.

Промеры по продольникам. Этот способ удобен при больших скоростях течения и значительных глубинах. Измерение глубин при этом лучше делать лотом. Если требуется одновременно исследовать направление струй поверхностных течений, то лодка с промерным отрядом сплывает вниз лишь под воздействием течения. Положение промерных точек на продольнике определяется (см. рис. 8.10) засечками с базиса двумя угломерными инструментами, так же как при промерах по косым галсам. При промерах по продольникам последние назначаются через $^1/_{10}$—$^1/_{20}$ ширины реки. Для лучшего выявления рельефа дна у берегов продольники назначают чаще.

Промеры смешанными способами. Для наиболее полного освещения рельефа дна или в случаях, когда из-за больших скоростей течения и сложного строения русла применить какой-либо один способ невозможно, пользуются смешанными способами. Чаще всего комбинируют промеры по косым галсам или поперечникам с продольниками.

Особенности промеров со льда. Промеры со льда дают высокую точность измерений. Особенно выгодно применять зимние промеры там, где летом точные промеры делать затруднительно из-за больших скоростей течения, сильного волнения или сложного рельефа дна. Основным недостатком зимних промеров является большая трудоемкость.

Зимние промеры на реках обычно ведут по способу поперечных профилей, а на озерах также и по способу квадратов.

При промерах на реках по поперечным профилям профили наносят на план мензулой с кипрегелем, а расстояние промерных точек от магистрали определяют мерной лентой или по размеченному тросу.

Глубины измеряют наметкой или ручным лотом. Лотлинь для зимних промеров лучше делать из мягкого стального троса, так как длина пенькового линя при резких изменениях температуры сильно меняется, кроме того, им неудобно работать в морозы.

При зимних промерах измеряют: глубину воды, толщину снега на льду, толщину льда, глубину погруженного льда и толщину слоя подледной шуги, если она имеется.

Особенности промеров на озерах и водохранилищах. При промерах на водоемах возможны два вида работ: 1) промеры небольших водоемов и узких водных пространств — заливов, бухт, когда промерные профили опираются на два берега; 2) промеры открытых водных пространств, когда промерные профили опираются только на один берег и могут удаляться на значительное расстояние от него, что осложняет определение положения промерных точек в плане.

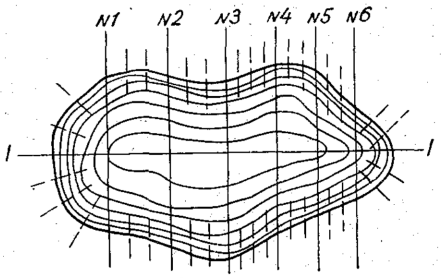


Рис. 8.11. Схема промеров на небольшом озере.

Промерные профили назначаются в зависимости от формы озера в виде одной или нескольких систем параллельных профилей, располагаемых приблизительно нормально к продольной оси промеряемого объекта. Профили первоначально проектируют на плане водоема, затем разбивают и закрепляют на местности и привязывают к плановой основе.

Число промерных точек на единицу площади озера зависит от сложности рельефа дна и от масштаба съемки. Так, при сложной конфигурации ложа промерные профили назначают не более чем через 50 м, а при ровном дне — через 200—500 м. Расстояние между промерными точками на профиле на малых озерах со сложным рельефом принимают 5—10 м, а на озерах с плавным очертанием дна 10—20 м и более.

При промерах необходимо вести наблюдения за уровнем. Количество водомерных постов и частота наблюдений на них зависят от режима уровня. При промерах необходимо вести наблюдения за состоянием погоды и водной поверхности.

При промерах небольших озер, водохранилищ и узких водных пространств промерные профили разбивают от одного берега к другому приблизительно перпендикулярно продольной оси водоема. Для более подробного обследования мелководной прибрежной зоны в промежутках между основными профилями назначаются дополнительные (рис. 8.11).

Промеры на озерах и водохранилищах в настоящее время производятся в основном эхолотами. Только на прибрежных участках и в проливах, а также на маленьких водоемах промеры делают наметкой или лотом.

8.4. Выполнение промерных работ эхолотами

Перед началом промерных работ требуется подготовить эхолот к действию. Необходимо установить эхолот и вибраторы на промерном судне. Если для промеров используют эхолот с самописцем, то надо заправить в лентопротяжный механизм бумажную ленту. Следует подключить питание, проверить действие всей схемы эхолота. Затем производят полевое тарирование, сущность которого заключается в настройке оборотов электродвигателя на скорость распространения ультразвука в данной водной среде.

В процессе промеров эхолот обслуживает один оператор, в обязанности которого входит включение прибора в начале промерного галса, выключение по окончании галса и нанесение на эхограмму оперативных отметок в моменты производства засечек, координирующих промеры. Отметки наносят посредством нажатия кнопки «Оперативная отметка», причем на эхограмме получается вертикальная прямая линия, проходящая по всей ширине ленты. При проведении эхолотного промера необходимо вести водомерные наблюдения, чтобы затем определить отметки уровня воды на каждом промерном галсе.

Координирование эхолотных промеров может производиться геодезическими и радиогеодезическими методами. Рассмотрим эти методы.

Координирование эхолотных промеров геодезическими методами. Эхолотные промеры могут производиться теми же системами галсов, что и промеры механическими промерными приборами, т. е. по поперечным и продольным профилям, косым галсам и пр. На нешироких реках или озерах промеры можно производить вдоль натянутого размеченного троса; при прохождении промерного судна вдоль троса оператор наносит оперативные отметки на эхограмму в моменты совмещения вибратора с метками на тросе. Следует иметь в виду, что небольшие участки профиля у урезов воды остаются неснятыми, поскольку невозможно подойти к берегам из-за малых глубин. В этих случаях оператор фиксирует начало и конец промера оперативными отметками и измеряет расстояния до урезов воды рулеткой.

На широких реках и озерах промеры координируются посредством засечек одним, двумя или тремя геодезическими инструментами (мензулой, теодолитом) с берега или же засечками секстантом береговых ориентиров с промерного судна. Момент засечки отмечается на эхограмме оперативной отметкой.

Для координирования промеров можно использовать аэрофотоснимки. На них намечают линии промерных галсов с учетом наиболее характерных мест подводного рельефа водоема. За опознавательные точки при проектировании галсов принимают хорошо видные на местности предметы — углы строений, гидротехнических сооружений и т. п. Для рассматриваемой цели применяют снимки в масштабе не менее 1 : 10 000. На местности выбранные галсы закрепляют вехами и проводят промеры с координированием геодезическими инструментами.

Эхолотный промер можно производить также «свободным ходом», т. е. без инструментальных засечек; точность такого промера ниже, чем при координировании.

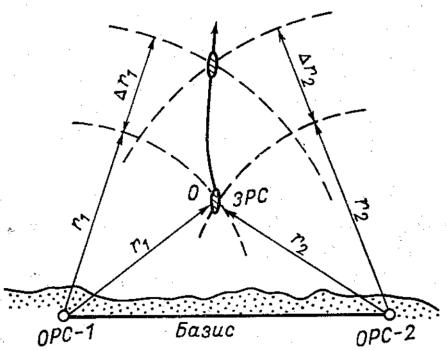


Рис. 8.12. Схема определения координат промерного судна по системе радиолага.

Координирование эхолотных промеров радиогеодезическими методами. Радиогеодезические методы координирования промеров применяют при работах на больших водных объектах — крупных водохранилищах, озерах. Особую ценность эти методы представляют при промерах открытых водных пространств при отсутствии прямой видимости берегов.

Радиогеодезическая аппаратура может применяться в двух вариантах — радиолаг и фазовый зонд. При работе в варианте радиолага производится непрерывная автоматическая регистрация приращений расстояний от базовых радиостанций до промерного судна (в биполярной системе координат). При работе в варианте фазового зонда производится непрерывная автоматическая регистрация приращений разностей расстояний от базовых станций до промерного судна. Для координирования эхолотных промеров применяется преимущественно система радиолага.

Промеры по системе радиолага. На берегу в подходящем месте разбивается базис, на концах которого устанавливают две радиостанции, называемые отражающими (ОРС). Третья радиостанция — задающая (ЗРС) — устанавливается на промерном судне, на котором установлен эхолот с самописцем. Промерное судно выходит в начальную точку промера; координаты этой точки определяют обычным геодезическим способом — путем засечек с концов базиса (рис. 8.12). После этого судно начинает движение по заданному галсу, производя промеры эхолотом. Одновременно с этим начинают работу все три радиостанции и продолжают ее в течение всего времени про-

меров. Они ведут непрерывное излучение на строго стабилизированных когерентных частотах: задающая радиостанция излучает колебания частотой f, отражающие станции принимают их, преобразуют в частоты $f_1 = {}^2/_3 f$ и $f_2 = {}^3/_2 f$ и снова передают в эфир. Выбор указанных соотношений частот обусловливается удобством регистрации фазовых циклов счетчиками.

На промерном судне имеется двухканальный радиоприемник, каналы которого принимают: один — колебания с частотой f_1, другой — f_2. Принятые колебания f_1 и f_2 и собственные колебания f подаются попарно, f_1+f и f_2+f, на соответствующие каналы фазового счетчика. Фазовый счетчик выполняет автоматический счет фазовых циклов. Перевод фазовых циклов в линейную меру делают с помощью коэффициента радиолага, значение которого определяется в зависимости от фазовой скорости распространения радиоволн и частоты колебаний, величины которых известны.

Таким путем определяются приращения Δr_1 и Δr_2 расстояний от начальной точки O (см. рис. 8.12). Зная расстояния r_1 и r_2 от концов базиса до начальной точки, можно вычислить расстояния до промерного судна $r_1+\Delta r_1$ и $r_2+\Delta r_2$, т. е. определить положение судна в биполярной системе координат. При промерах регистрация фазовых циклов производится также и на эхограмме в виде черточек.

Для фазовых измерений используют средний диапазон волн. При работе радиостанций создается устойчивое фазовое поле с радиусом действия 100 км и более. Точность измерений радиолагом характеризуется средней квадратической ошибкой от долей метра до нескольких метров в зависимости от атмосферных условий и времени суток (в ночное время погрешность возрастает).

Для промеров на реках, небольших озерах и водохранилищах разработан облегченный вариант радиолага — речной радиолаг с автопрокладчиком курса. Аппаратура его состоит из задающей радиостанции, устанавливаемой на промерном катере, где также имеется эхолот, и двух отражающих радиостанций, устанавливаемых на берегу, на концах базиса. При действии аппаратуры во время промеров автопрокладчик автоматически вычерчивает курс промерного катера на специальном планшете в заданном масштабе. При этом на эхолоте ведется синхронная запись профиля дна; оперативные отметки фиксируются одновременно на эхограмме и на планшете.

Исследование грунтов дна посредством ультразвука. При проведении промерных работ всегда желательно одновременно проводить определение донных отложений. Такое определение в настоящее время можно производить с помощью ультразвуковых приборов. Обычные промерные эхолоты для этой цели не применяют, а используют специальные ультразвуковые грунтографы (геолокаторы), отличающиеся от эхолотов увеличен-

ной мощностью излучаемого импульса, большей степенью усиления отраженных от дна импульсов, меньшим углом направленности ультразвуковых излучений и меньшей частотой колебаний. Такие приборы дают на эхограмме запись поверхности дна, а также залегающих на дне слоев грунта — различные грунты обладают разной степенью проницаемости для ультразвука. Ультразвуковые грунтографы дают возможность устанавливать характер залегания грунтов, мощность их слоев, а также определять глубины и рельеф дна; методика качественного определения грунтов — литологического состава и физических свойств — пока не разработана.

Глава 9

Обработка материалов промерных работ

9.1. Обработка записей в промерной книжке

Результаты промеров записывают в книжку для записи промеров глубин стандартного образца.

В книжке результаты работ для каждого промерного профиля (галса, продольника) записывают на отдельном листе. При промерах глубин во время измерения расхода воды результаты промера заносятся на соответствующие страницы книжки для записи измерений расхода воды.

В записях для каждого профиля приводят следующие сведения: 1) местоположение профиля по отношению к магистрали, 2) способ определения координат промерных точек, 3) наименование прибора, которым измеряли глубины, 4) время начала и конца промера, 5) отсчет уровня воды на ближайшем водомерном посту, 6) отметка уровня воды на профиле. Дополнительно к указанному отмечают состояние погоды и реки в период промера.

Обработка результатов промеров заключается в следующем: 1) производится сличение и проверка количества и нумерации промерных точек по данным журнала и засечкам на мензульном планшете; 2) при промерах по поперечным профилям с засечками угломерными инструментами для каждой промерной точки устанавливается на планшете расстояние от постоянного начала; 3) вычисляется средняя глубина, если промер велся в два хода; 4) вводятся поправки в измеренную глубину на относ лота и вычисляется исправленная глубина; 5) устанавливается отметка уровня воды в начале и конце промера и, если в этом есть необходимость, определяются поправки к выбранному рабочему уровню. При незначительных изменениях уровней во время промеров (1—5 см для промеров наметкой и 5—10 см — лотом) за рабочий уровень принимают средний из на-

блюденных без введения поправок; 6) для всех промерных точек вычисляют отметки дна; 7) проверяют записи, характеризующие грунт дна, а при зимних промерах — записи о толщине снега, льда, шуги и пр.

Данные промеров используют в дальнейшем для: 1) построения поперечных профилей и вычисления морфометрических характеристик русла; 2) построения плана русла реки или ложа озера, водохранилища в горизонталях или изобатах; 3) составления продольного профиля участка реки; 4) вычисления морфометрических характеристик озера, водохранилища.

9.2. *Построение поперечных профилей и вычисление морфометрических характеристик*

Если целью промеров было определение формы и размеров водного сечения, то профиль строится так, как показано на рис. 9.1.

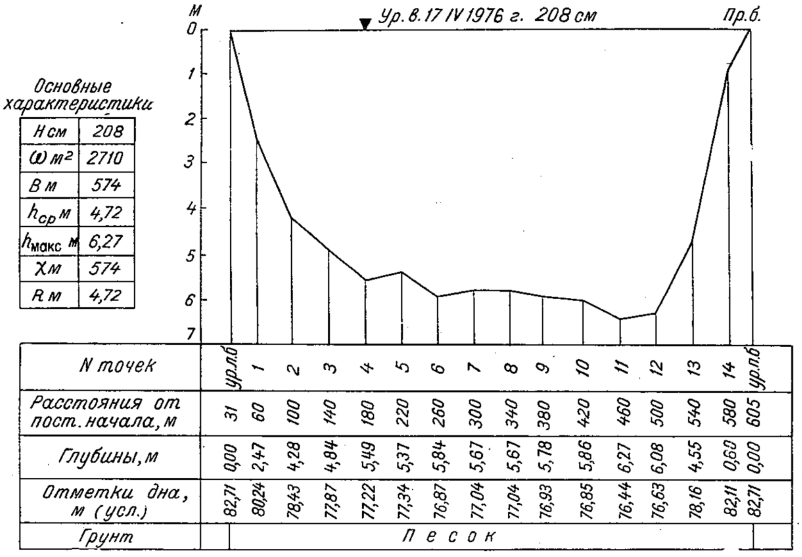


Рис. 9.1. Поперечный профиль реки.

Для каждого профиля могут быть вычислены следующие морфометрические характеристики: 1) площадь водного сечения ω в м^2; 2) ширина реки B в метрах; 3) длина смоченного периметра χ в метрах; 4) наибольшая глубина $h_{макс}$ в метрах; 5) средняя глубина $h_{ср}$ в метрах; 6) гидравлический радиус R в метрах. Эти характеристики используются при вычислении расходов воды, построении зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$ и пр.

Площадь водного сечения может быть определена планиметрированием или аналитически. Как видно из рис. 9.2, промерные вертикали разбивают водное сечение на ряд трапеций, и только береговые участки его могут иметь форму прямоугольного треугольника, если глубина на урезе воды равна нулю.

Аналитически общая площадь водного сечения получается как сумма частных площадей.

При наличии ледяного покрова, кроме площади водного сечения, вычисляют площади погруженного в воду кристаллического льда, шуги и общую площадь сечения профиля.

На гидрометрических створах, где измеряют расходы воды, помимо площади водного сечения, определяют площадь живого сечения, которая при наличии течения воды в пределах всего

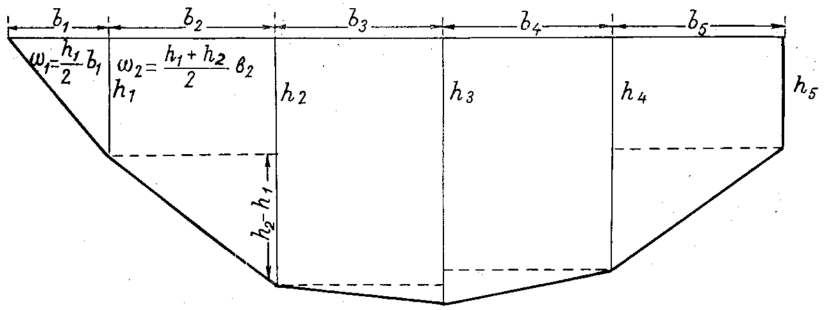


Рис. 9.2. Схема вычисления площади водного сечения и длины смоченного периметра.

сечения будет равна ему, а при наличии в нем застойной зоны (мертвой) будет меньше площади водного сечения на размер площади мертвого пространства.

Смоченный периметр χ — длина линии дна реки на профиле, заключенная между урезами воды. При наличии на реке ледяного покрова в понятие «смоченный периметр», кроме длины линии дна, включается длина нижней поверхности ледяного покрова. Если под ледяным покровом есть слой шуги, то длина смоченного периметра подсчитывается с учетом длины нижней поверхности шуги.

Гидравлический радиус R — частное от деления площади водного сечения на длину смоченного периметра ($R=\omega/\chi$). Вычисление смоченного периметра и гидравлического радиуса обычно бывает необходимо для узких русел со значительной глубиной, так как в этом случае длина смоченного периметра может значительно отличаться от ширины реки.

Средняя глубина $h_{ср}$ — частное от деления площади водного сечения на ширину реки ($h=\omega/B$).

Для равнинных рек при сравнительно небольшой глубине и значительной ширине русла значение гидравлического радиуса близко к средней глубине ($R\approx h_{ср}$).

Наибольшая глубина $h_{макс}$ на профиле устанавливается по данным промерной книжки.

Морфометрические характеристики профиля водного сечения изменяются в зависимости от высоты уровня воды. При наличии профиля водного сечения, построенного до отметки наивысшего уровня воды, можно построить кривую зависимости площади водного сечения от уровня. Для этой цели площадь профиля расчленяют через определенные интервалы по высоте уровня, а затем определяют площади при различных значениях уровня воды. Кривая $\omega=f(H)$ показана на рис. 9.3. При плавном очертании профиля кривая $\omega=f(H)$ получает вид плавной кривой, обращенной выпуклостью к оси H; в местах резкого изменения сечения, например при выходе воды из меженного русла на пойму, направление кривой резко меняется.

При вертикальных берегах, например в каналах прямоугольного сечения, приращение площади $\Delta\omega$ на единицу уровня ΔH постоянно и кривая $\omega=f(H)$ обращается в прямую.

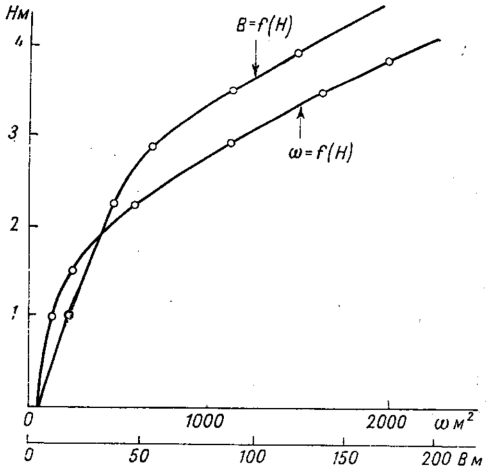


Рис. 9.3. Кривые зависимости площади водного сечения и ширины реки от уровня воды.

Зависимость $\omega=f(H)$ будет постоянной только при условии постоянства во времени очертаний русла в профиле. Если русло реки изменчиво и подвергается размыву или намыву, то в соответствии с этим изменяется и положение кривой $\omega=f(H)$.

С увеличением высоты уровня изменяется и ширина реки B. Зная ширину реки при различной высоте уровня, нетрудно построить кривую $B=f(H)$.

При устойчивом русле как в глубинном, так и в плановом отношении кривые $\omega=f(H)$ и $B=f(H)$ позволяют определить ширину и площадь водного сечения реки при любой высоте уровня.

9.3. Приведение промеров к условному (срезочному) уровню

При исследовании реки на значительном протяжении рабочий уровень воды, при котором производились съемка, нивелировка и промеры, изменяется во времени. Для получения сопоставимых

результатов работ необходимо полевые данные привести к одному мгновенному уровню, называемому условным, или срезочным.

В качестве условного уровня нередко принимают наиболее низкий уровень, наблюдавшийся при проведении работ.

Рабочий уровень в зависимости от длины участка реки и имеющихся материалов приводится к условному различными способами. Рассмотрим способ, применяемый на участках рек сравнительно небольшой длины. Сущность его заключается в следующем. Во всех точках, где ранее нивелировкой были определены отметки рабочего уровня, одновременно, по часам, забивают на урезах колья вровень с поверхностью воды. Нивелировкой от реперов определяют отметки верха кольев, в результате получают отметки мгновенного уровня на всем исследуемом участке. Для получения срезки ΔH необходимо определить разность отметок рабочего уровня H и мгновенного условного уровня h, т. е. $\Delta H = H - h$.

Если одновременно с промерами была определена отметка рабочего уровня на профиле, то для получения срезки измеренных глубин необходимо прибавить или вычесть из отметки рабочего уровня значение срезки, вычисленное, как указано выше.

9.4. Составление плана реки в горизонталях и изобатах

Приступая к составлению плана реки в горизонталях или изобатах, необходимо предварительно привести промеры к условному уровню и нанести на план урезы этого уровня. Если русло реки изображается в горизонталях, то линии урезов соответствуют отметкам условного уровня; если же план будет строиться в изобатах, то линиями урезов будут изобаты с нулевыми глубинами.

Выписав на плане отметки дна (для плана в горизонталях) или глубины (для плана в изобатах) по всем промерным профилям, проводят горизонтали или изобаты. Сечение горизонталей (изобат) выбирают исходя из масштаба съемки, например: при масштабе 1 : 1000 и 1 : 2000 через 0,25 или 0,50 м, при масштабе 1 : 5000 через 0,50 м, при масштабе 1 : 10 000 через 1 м.

Точки наибольших глубин на профилях соединяют плавной линией, называемой линией наибольших глубин. В некоторых случаях для наглядности на плане вычерчивают поперечные профили русла.

9.5. Составление продольного профиля

Продольный профиль реки позволяет судить об изменении глубин, падений и уклонов реки на отдельных ее участках, а также о высоте берегов, границах их затопления высокими водами.

Продольный профиль составляют на основании данных нивелировок и промеров, сделанных на участке реки. Результаты промеров должны быть приведены к условному уровню.

На продольном профиле (рис. 9.4) по горизонтальной оси откладывают расстояния до поперечников, на которых делались промеры и нивелировки, а по вертикальной оси откладывают

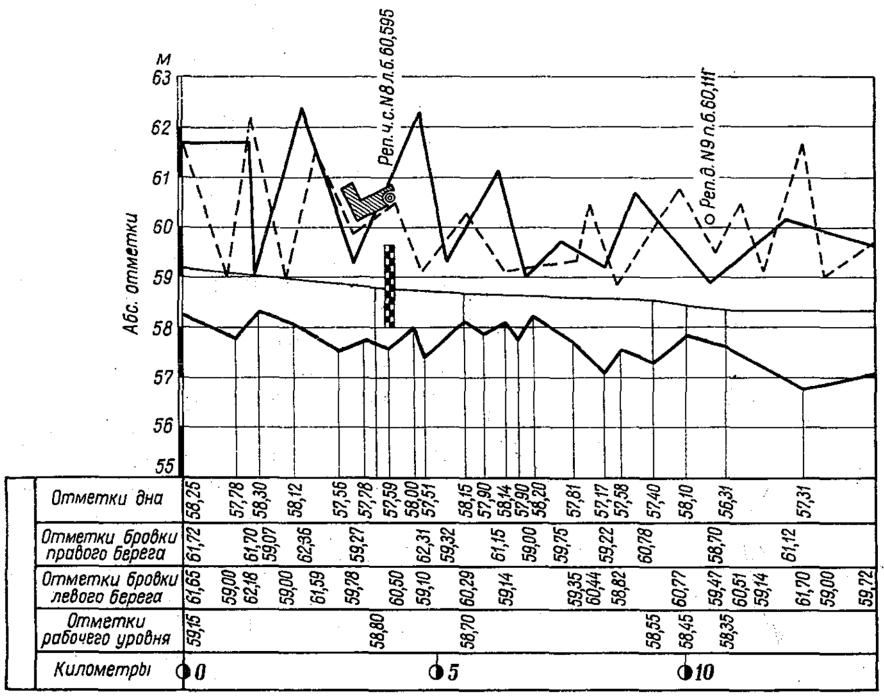


Рис. 9.4. Продольный профиль участка реки.

отметки дна реки, уровень условный и уровень высоких вод, а также отметки бровок правого и левого берега реки.

Под профилем помещают таблицу, в которой дают числовые значения характеристик, положенных в основу построения профиля. Масштабы для профиля подбирают с таким расчетом, чтобы изменения характеристик были отчетливо видны на чертеже.

9.6. Обработка результатов промеров озер

Обработка результатов промеров включает следующие работы: 1) проверку промерного журнала, 2) приведение промеров к условному уровню, 3) нанесение на контурный план озера на кальке измеренных глубин, 4) вычисление отметок дна в точках промеров, 5) проведение на кальке горизонталей дна или

изобат, 6) перенесение горизонталей или изобат на основной план озера, 7) вычисление морфометрических характеристик озера.

Промерные точки, определенные секстантом, наносят на план протрактором. Протрактор состоит из круга с лимбом, одной неподвижной и двух подвижных линеек, снабженных микрометренными винтами и нониусом для отсчета углов с точностью 1′. В центре лимба имеется круг с вырезом и иголкой для накола точек. Закрепив линейки так, чтобы образуемые ими углы были равны измеренным углам, и совместив их с опорными точками на планшете, нетрудно найти положение искомой промерной точки.

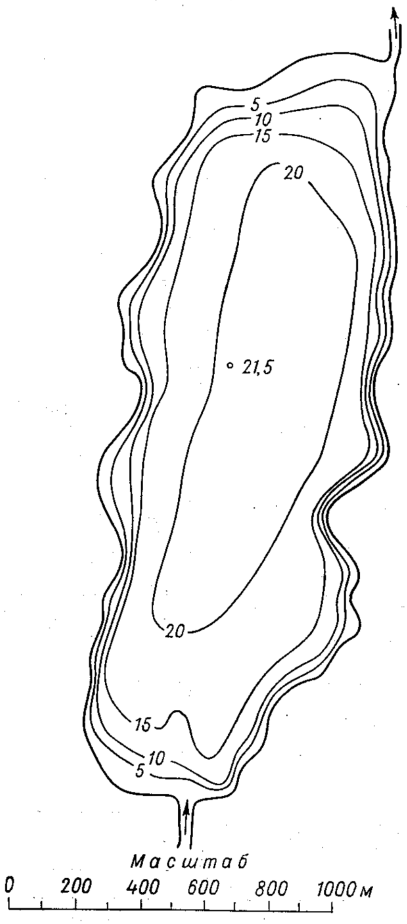


Рис. 9.5. План озера в изобатах.

Координаты промерных точек, определенных с берега теодолитом, вычисляются путем решения треугольников, а точки, засеченные кипрегелем, переносятся с рабочих планшетов на контурную карту озера.

При составлении плана озера (рис. 9.5) сечение горизонталей или изобат подбирают в зависимости от амплитуды колебаний отметок дна так, чтобы характерные особенности рельефа дна были достаточно хорошо выявлены.

Основные морфометрические характеристики озера следующие: 1) длина, 2) средняя ширина, 3) изрезанность береговой линии, 4) площадь водного зеркала, 5) объем воды.

Длина озера L — кратчайшее расстояние по поверхности между двумя наиболее отдаленными друг от друга точками на береговой линии озера.

Средняя ширина озера $B_{ср}$ определяется из отношения площади к длине

$$B_{ср} = \frac{\omega}{L}. \qquad (9.1)$$

Изрезанность береговой линии K определяется как отношение длины береговой линии S к длине окружности круга, имеющего площадь, равновеликую с площадью озера [1]:

$$K=\frac{S}{2\pi\sqrt{\frac{\omega}{\pi}}}. \qquad (9.2)$$

Площадь водного зеркала озера определяется планиметрированием или с помощью палетки. При наличии островов их поверхность в площадь водного зеркала не включается.

Объем воды в озере вычисляют обычно приближенным способом [2]. Если площади, ограниченные изобатами (горизонталями), равны $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_{n-1}$, а расстояния между изобатами (горизонталями) по высоте равны $h_1, h_2, \ldots, h_{n-1}$, то, принимая площадь поверхности по низшей изобате при $h_{макс}$ равной нулю ($\omega_n=0$), объем озера получим по формуле

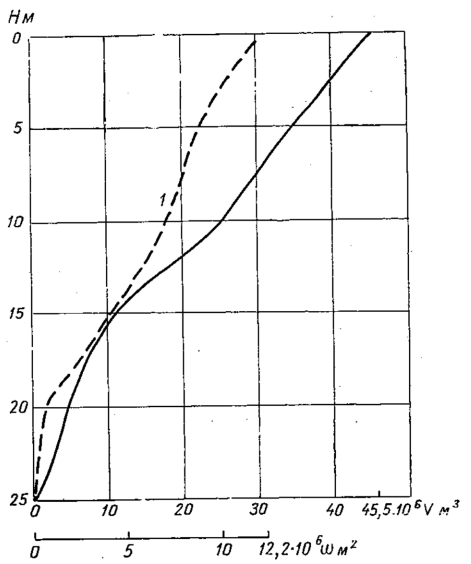


Рис. 9.6. Кривые зависимостей: 1) $\omega=f(H)$, 2) $V=f(H)$.

$$V=\frac{\omega_1+\omega_2}{2}h_1+\frac{\omega_2+\omega_3}{2}h_2+\ldots+\frac{\omega_{n-2}+\omega_{n-1}}{2}h_{n-2}+$$

$$+\frac{\omega_{n-1}}{2}h_{n-1}. \qquad (9.3)$$

Средняя глубина озера $h_{ср}$ определяется как отношение объема озера к площади его зеркала

$$h_{ср}=\frac{V}{\omega}. \qquad (9.4)$$

При различного рода расчетах удобно иметь кривые зависимостей между уровнем воды в озере и его площадями и объе-

[1] По С. Д. Муравейскому, $K=L/l$, где L — длина береговой линии, l — длина периметра обводящей озера.

[2] Более точно объем всей водной массы озера и объемы отдельных слоев при различных уровнях можно вычислить по батиграфической или гипсографической кривой (рис. 9.6).

мами (рис. 9.6), т. е. $\omega=f(H)$ и $V=f(H)$. Для построения указанных зависимостей составляют таблицу площадей и объемов озера при различных отметках уровня.

9.7. Обработка материалов эхолотного промера

В случае измерения глубин эхолотом со стрелочным указателем глубин, например эхолотом ЭПО-10, материалы промеров представляют в виде записей в промерном журнале. Обработка их при этом ничем не отличается от обработки промеров наметкой или лотом. По материалам промеров может быть составлен профиль или план русла в горизонталях или изобатах.

При производстве промеров эхолотами с самописцами материалы промеров получаются в виде эхограмм с записью линии дна в определенном вертикальном масштабе (обычно 1 : 100), при этом глубины в любом месте профиля могут определяться непосредственным отсчетом по сетке, нанесенной на эхолотной бумаге, или измерением масштабной линейкой. Для использования эхограмм при составлении плана водоема или профилей необходимо произвести их обработку, которая заключается в приведении профиля к одному заданному горизонтальному масштабу. Горизонтальный масштаб профиля на эхограмме может быть непостоянным по длине профиля в связи с непостоянством скорости движения промерного судна вдоль створа. Для приведения к одному масштабу используют оперативные отметки, обозначающие на эхограмме места засечек. Расстояния между засечками должны быть определены. Если засечки делались с берега теодолитом (см. рис. 8.8), то расстояния от базиса до каждой точки засечки определяются по измеренному углу и длине базиса; после этого можно определить расстояния между засечками на эхограмме.

Затем для каждого участка профиля определяют горизонтальный масштаб путем деления расстояния между засечками на эхограмме, взятого в сантиметрах, на соответствующее расстояние в натуре (тоже в сантиметрах). Например, если расстоянию на эхограмме 5 см соответствует расстояние в натуре 50 м, масштаб равен $\frac{5}{5000}=1:1000$.

Масштаб каждого участка выписывают на эхограмме. Затем на линии записи дна намечают характерные точки и нумеруют их. Пользуясь определенными ранее масштабами, вычисляют расстояния от базиса до каждой точки. Зная глубины и расстояния до точек, вычерчивают профиль створа в нужном масштабе.

Обработку эхограммы можно делать графическим способом (это удобно при небольшой длине записи). Для этого на эхограмме ниже линии дна проводят вспомогательную горизонтальную прямую A_1B_1 (рис. 9.7), на которую сносят точки характерных глубин, и против этих точек выписывают значения глубин

с учетом срезки уровней. На эхограмме проводят линию условного (срезочного) уровня и над ней проставляют значение срезки. Затем переносят глубины с эхограммы на план. Для этого к эхограмме снизу подклеивают лист миллиметровой бумаги с соблюдением параллельности линии уровня воды на эхограмме и горизонтальных линий миллиметровки. Затем из начальной точки промера проводят вертикальную линию A_1A_3 (рис. 9.7), на которой произвольно выбирают точку A_3; из этой точки проводят лучи в точки характерных глубин на вспомога-

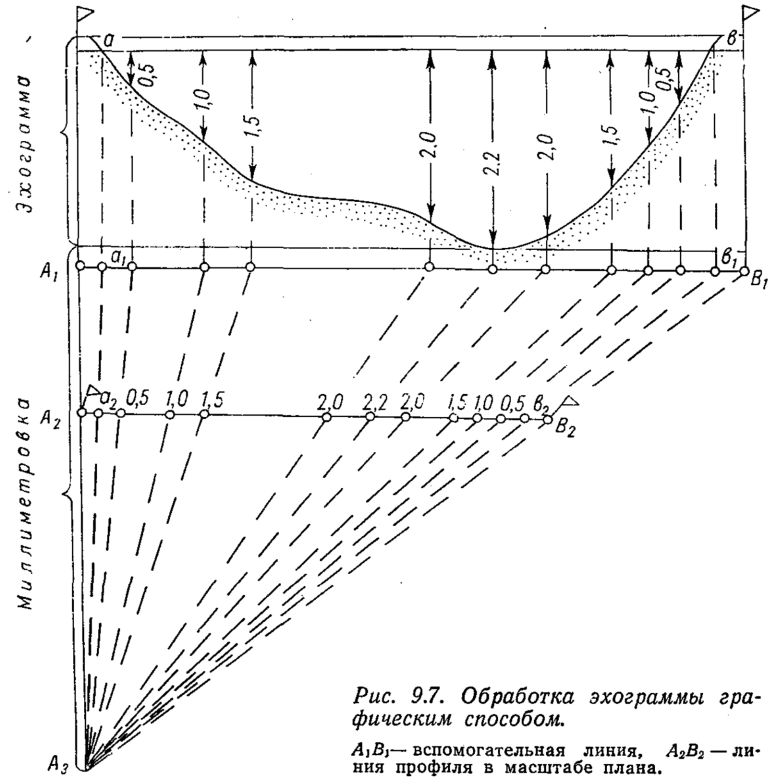


Рис. 9.7. Обработка эхограммы графическим способом.

A_1B_1 — вспомогательная линия, A_2B_2 — линия профиля в масштабе плана.

тельной линии A_1B_1. Если промер производился с координированием геодезическим способом, то из точки A_3 проводят лучи также в точки на вспомогательной линии A_2B_2, соответствующие местам засечек. Глубины эхограммы на план переносят по участкам между соседними засечками. Практически это делают так. На полоску миллиметровки с плана снимают расстояние между началом промера и первой засечкой. Затем эту полоску миллиметровки перемещают параллельно линии уровня воды на эхограмме так, чтобы отметки на ней совместились с линией

A_1A_3 и с лучом, проведенным из первой засечки; в этом месте на полоску переносят глубины, а с нее — на план. Так же переносят глубины между последующими засечками.

Если промер производился свободным ходом, то глубины на план переносят сразу для всего галса.

Кроме описанных способов, переносить глубины на план можно механическим способом, посредством специального прибора, а также оптическим способом при помощи проектора. Оба эти способа целесообразно применять при большом объеме промерных работ, так как они (особенно оптический способ) значительно ускоряют камеральную обработку.

Раздел IV

Измерение скоростей течения воды

Глава 10

Скорости течения в русловых потоках

10.1. Пульсация скоростей

В реках, каналах и других водотоках обычно наблюдается турбулентный режим движения воды, который характеризуется перемешиванием водных масс, вызывающим пульсацию скоростей как по величине, так и по направлению. Причиной турбулентного перемешивания является возникновение вихрей на выступах шероховатости русла; вихри, отрываясь от выступов, проникают в толщу потока. В результате этого вся масса воды потока движется в условиях непрерывного перемешивания отдельных объемов воды. В связи с этим скоростное поле потока представляет собой сложную картину, непрерывно меняющуюся во времени. Повороты русла, всевозможные препятствия (камни, водные растения), а также разные русловые образования (песчаные гряды, перекаты и др.) вносят искажения в скоростное поле потока. При обтекании потоком препятствий за ними возникают зоны завихрений, при этом возможно возникновение обратных течений.

Современная аппаратура позволяет измерить и записать пульсационные изменения скорости течения во времени. Подобные измерения показывают, что пульсационные изменения происходят с большой частотой, причем на отдельные пики значительной амплитуды накладываются пики меньшей амплитуды, но большей частоты. Для примера на рис. 10.1 приведен график пульсации продольной составляющей скорости течения в точке потока. Анализ подобных графиков позволяет определять продолжительность и амплитуду пульсаций. В открытых потоках амплитуда пульсаций обычно увеличивается от поверхности ко дну. В поперечном сечении потока амплитуда пульсаций возрастает от оси потока к берегам. Частота пульсаций мало зависит от положения точки в потоке и от размера потока.

В связи с наличием пульсации скоростей в гидрометрии различают мгновенную скорость и осредненную местную скорость.

Мгновенной скоростью (u) называется скорость в данной точке в данное мгновенье. Мгновенная скорость изменяется во времени по величине и по направлению. В гидрометрии обычно рассматривают не сам вектор мгновенной скорости, а его компоненты в прямоугольной системе координат. При этом одну из координатных осей направляют горизонтально вдоль продольной оси потока. Проекцию вектора мгновенной скорости на эту ось называют продольной составляющей или продольной скоростью. Проекцию же вектора на вертикальную ось называют вертикальной составляющей или вертикальной скоростью.

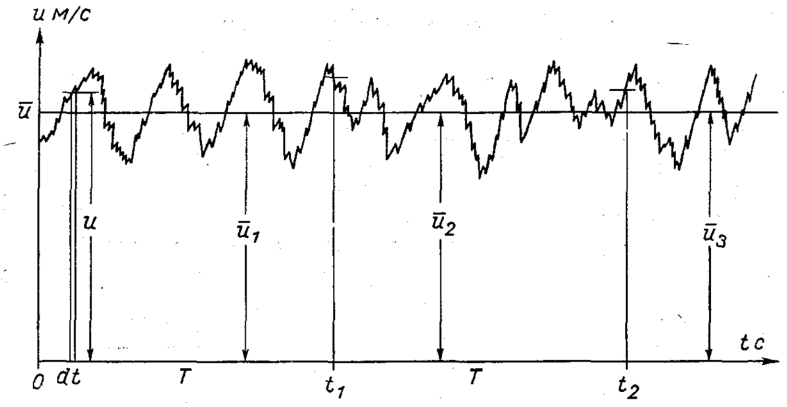


Рис. 10.1. График пульсации продольной составляющей скорости течения воды.

В практической гидрометрии, как правило, приходится иметь дело со скоростями течения, осредненными во времени. Скорость течения в точке потока, осредненная за достаточно продолжительный период времени, называется осредненной местной скоростью и определяется выражением

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_T u\,dt, \qquad (10.1)$$

где $\int_T udt$ — площадь графика пульсации скорости в пределах периода времени T (см. рис. 10.1).

Как показали наблюдения, при установившемся движении воды всегда можно определить такое значение T, которое будет удовлетворять условию

$$\bar{u}_1 = \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \ldots = \text{const}. \qquad (10.2)$$

Период времени, соответствующий этому условию, называется периодом осреднения. Продолжительность периода осреднения зависит от степени турбулентности потока: чем

больше турбулентность, тем больше период осреднения. При измерении скоростей течения очень важно, чтобы продолжительность отдельного измерения была бы не менее периода осреднения. В противном случае местная скорость будет определена неверно.

Определению продолжительности периода осреднения при гидрометрических измерениях были посвящены многочисленные исследования. Строго говоря, даже в различных точках одной и той же вертикали период осреднения должен быть различным,— как правило, он возрастает от поверхности ко дну. Однако

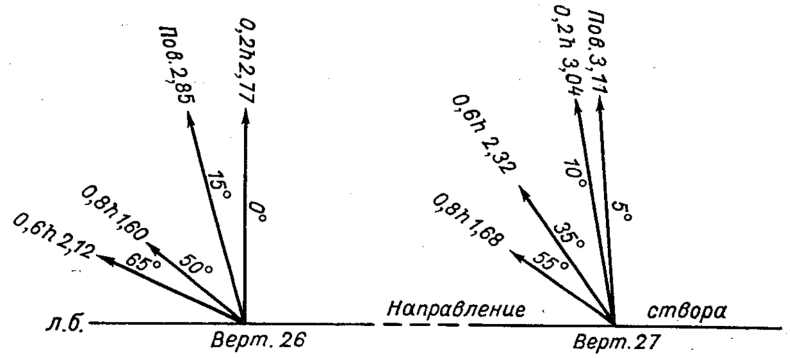


Рис. 10.2. Направления и величины скоростей в разных точках по глубине вертикали.

определение периода осреднения при каждом отдельном измерении очень усложнило бы производство гидрометрических работ. Поэтому у нас принято производить измерение скорости течения в точке в течение 100 секунд, что для большинства случаев оказывается достаточным, т. е. это время превышает период осреднения. При большой степени турбулентности этой продолжительности может все же оказаться недостаточно. Тогда она должна быть увеличена. Практический прием определения достаточности осреднения пульсации во времени рассматривается в п. 13.4.

Следует иметь в виду, что направления векторов местных скоростей в отдельных точках могут сильно отклоняться от общего направления движения потока. Многочисленными наблюдениями установлено, что в реках даже при отсутствии препятствий, искажающих скоростное поле, отклонение скоростных векторов от общего направления потока может достигать в отдельных точках живого сечения 50—65°. Сказанное иллюстрируется рис. 10.2, на котором показаны векторы местных скоростей в разных точках по глубине вертикалей гидроствора на р. Угам у с. Ходжикент (по В. В. Дементьеву).

10.2. Распределение скоростей в речном потоке

Распределение скоростей течения воды в речном потоке может быть весьма разнообразным в зависимости от типа реки (равнинная, горная и др.), морфологических особенностей, шероховатости русла, уклона водной поверхности. Будем в дальнейшем рассматривать распределение местных продольных скоростей[1]. При всем разнообразии указанных выше факторов существуют некоторые общие закономерности в распределении скоростей по глубине и ширине реки.

Рассмотрим распределение продольных скоростей на различных глубинах по вертикали. Если от направления вертикали отложить значения скоростей и соединить их концы плавной линией, то эта линия будет представлять собой профиль скоростей. Фигура, ограниченная профилем скоростей, направлением вертикали, линиями поверхности воды и дна, называется эпюрой скоростей (рис. 10.3). В открытом потоке наибольшая скорость наблюдается обычно на поверхности. Скорость у дна потока имеет определенное конечное значение и называется донной скоростью.

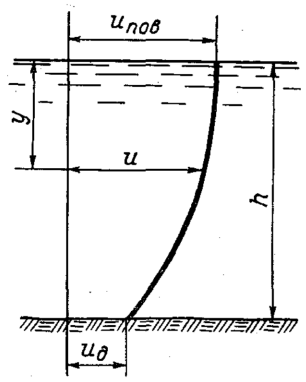


Рис. 10.3. Эпюра скоростей течения на вертикали.

Для математического выражения линии профиля скоростей были предложены многочисленные формулы, в частности уравнения параболы, гиперболы, логарифмической кривой и др. Не останавливаясь на всех предлагавшихся формулах, приведем только одну (по А. В. Караушеву)

$$u = u_{пов}\sqrt{1 - P\left(\frac{y}{h}\right)^2}, \qquad (10.3)$$

где $u_{пов}$ — поверхностная скорость; h — глубина вертикали; y — расстояние от поверхности до точки со скоростью u; P — безразмерный параметр, который зависит от коэффициента Шези (C):

при $10 \leqslant C \leqslant 60$

$$P = 0{,}57 + \frac{3{,}3}{C}, \qquad (10.4)$$

при $60 \leqslant C \leqslant 90$

$$P = 0{,}0227C - 0{,}000\,197C^2. \qquad (10.5)$$

Определение коэффициента Шези рассматривается в п. 15.2.

[1] Далее местную скорость, осредненную во времени, будем обозначать буквой u без черточки сверху.

Формула (10.3) представляет собой уравнение эллипса и основана на гипотезе о пропорциональности коэффициента турбулентного обмена местной скорости [25]. По имеющимся данным, эта формула дает хорошее соответствие с эпюрами измеренных скоростей течения в условиях установившегося равномерного движения воды в реках.

Если измерить площадь эпюры скоростей и разделить ее на глубину вертикали, то получим величину, которая называется средней скоростью на вертикали и обозначается буквой $v_в$. Средняя скорость на вертикали выражается формулой

$$v_в = \frac{1}{h}\int_0^h u\,dh. \qquad (10.6)$$

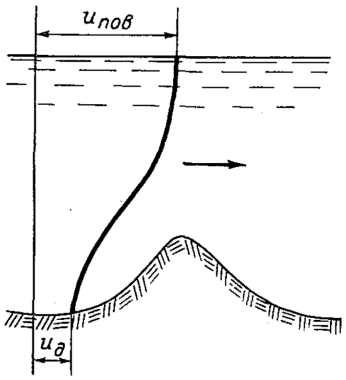


Рис. 10.4. Эпюра скоростей на вертикали у препятствия.

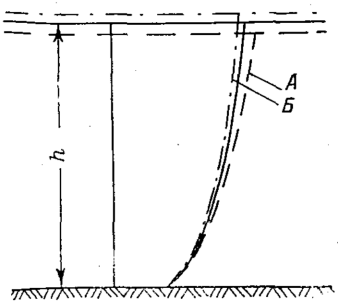


Рис. 10.5. Эпюры скоростей течения при ветре по течению (А) и против течения (Б).

Наблюдениями и теоретическими исследованиями установлено, что при отсутствии искажений средняя скорость на вертикали открытого потока располагается на глубине от поверхности примерно $0{,}6h$.

Нормальный вид профиля скоростей, показанный на рис. 10.3, в условиях естественных потоков может искажаться воздействием различных факторов, например неровностями дна, водной растительностью, ветром, ледяными образованиями и др. При значительных неровностях скорость у дна может резко снижаться, примерно так, как показано на рис. 10.4; такое же влияние может оказывать водная растительность.

При ветре по течению поверхностные скорости могут увеличиваться, а уровень воды несколько понижаться; при ветре против течения наблюдается обратная картина (рис. 10.5).

В устьевых участках рек, впадающих в моря с приливными явлениями, морская вода может при определенных соотноше-

ниях между расходом реки и интенсивностью прилива входить в речное русло и двигаться вверх по реке. Обладая большей плотностью, эта вода продвигается в придонной части русла. При этом распределение скоростей на вертикали может иметь вид, показанный на рис. 10.6.

При наличии ледяного покрова влияние шероховатости нижней поверхности льда обусловливает смещение максимальной скорости на некоторую глубину от поверхности, обычно на 0,3—0,4 глубины вертикали (рис. 10.7 *а*). Если имеется подледная шуга, то смещение максимальной скорости вниз может быть еще более значительным, до 0,6—0,7 глубины вертикали (рис. 10.7 *б*), а в отдельных слу-

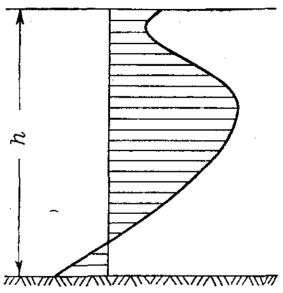


Рис. 10.6. Эпюра скоростей на вертикали в устьевом участке реки во время прилива.

чаях, как показали наблюдения на р. Ангаре, еще больше. Распределение скоростей по вертикали претерпевает значительные изменения и по длине реки, например при переходе от плеса к перекату (рис. 10.8).

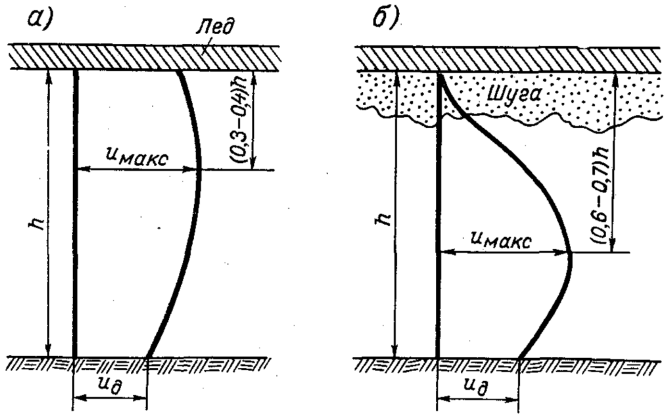


Рис. 10.7. Эпюры скоростей на вертикали при ледяном покрове (а) и подледной шуге (б).

Подобно эпюрам скоростей на вертикалях можно построить эпюру скоростей по ширине реки (рис. 10.9), например поверхностных или средних скоростей на вертикалях. Очертания эпюры обычно следуют очертаниям дна; местоположение наибольшей скорости приближенно совпадает с положением наибольшей глубины.

Представление о распределении скоростей в живом сечении дают линии равных скоростей — изотахи, которые вычерчиваются по данных измерений скоростей в отдельных точках. Ха-

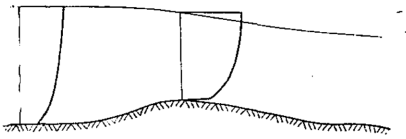


Рис. 10.8. Изменение эпюр скоростей на вертикалях от плёса к перекату.

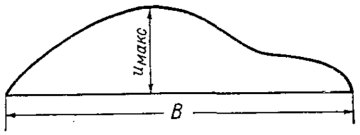


Рис. 10.9. Эпюра поверхностных скоростей по ширине реки.

рактер изотах для открытого потока и при наличии ледяного покрова показан на рис. 10.10. Для открытого потока изотахи

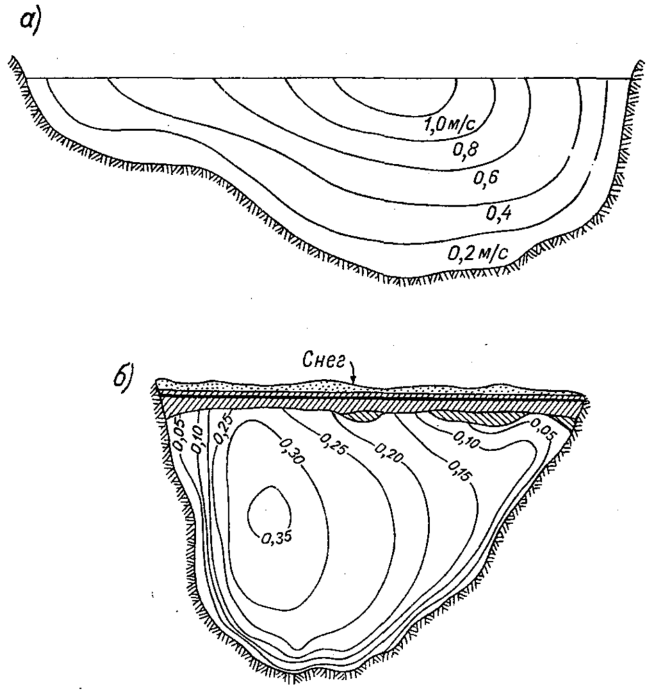


Рис. 10.10. Изотахи в открытом русле (а) и подо льдом (б).

обычно имеют вид плавных кривых, не замыкающихся в пределах живого сечения; по мере приближения ко дну расстояния между изотахами уменьшаются. При ледяном покрове часть изотах образует замкнутые кривые.

Глава 11

Методы и приборы для измерения скоростей течения воды

11.1. Классификация методов измерения

Существует большое количество методов для измерения скоростей течения воды и приборов, действие которых основано на различных физических принципах. Здесь остановимся только на тех из них, которые применяются или могут быть использованы в гидрометрических работах.

Метод, основанный на регистрации числа оборотов лопастного винта (ротора). Наиболее распространенные приборы для измерения скорости течения — гидрометрические вертушки. При измерении скорости регистрируется общее число оборотов лопастного винта и продолжительность измерения. Величина скорости определяется по тарировочному графику в зависимости от числа оборотов в секунду. Посредством гидрометрических вертушек обычно определяется местная скорость течения в отдельных точках потока, хотя вертушки применяются и для интегрального определения средней скорости на вертикали или, например, средней поверхностной скорости потока.

Метод, основанный на регистрации скорости плывущего тела. Для измерения скорости используются различного рода поплавки, которые могут запускаться как на поверхность потока, так и на требуемую глубину. Скорость течения принимается равной скорости движения поплавка, которая определяется по времени прохождения поплавком определенного расстояния. Отсюда видно, что при поплавочных измерениях получаем значение скорости, осредненное для участка потока по траектории движения поплавка.

Метод, основанный на регистрации скоростного напора. Для измерения скорости используются гидрометрические трубки различной конструкции, прообразом которых является трубка Пито́ (1732 г.). Скорость определяется в зависимости от скоростного напора, для этого трубка вводится в поток отверстием навстречу течению. Скоростной напор измеряется непосредственно по высоте подъема уровня в трубке. Гидрометрические трубки дают местную скорость в отдельных точках потока.

Метод, основанный на регистрации силового воздействия потока. Для измерения скорости используются приборы, в которых имеется чувствительный элемент, воспринимающий силовое воздействие потока. В настоящее время подобные приборы применяются главным образом для научно-исследовательских работ с целью измерения и непрерывной записи значений скоростей в отдельных точках потока. Они позволяют исследовать пульса-

цию скоростей. Ранее применявшиеся приборы для измерения в естественных потоках описаны в литературе [12 и др.].

Метод, основанный на принципе теплообмена. Для измерения скорости используются приборы, имеющие в качестве рабочего органа нагретый элемент, вводимый в поток. Скорость течения определяется в зависимости от быстроты охлаждения чувствительного элемента: чем больше скорость, тем выше темп охлаждения. Подобные приборы применяются для научных исследований, главным образом в лабораторных условиях; с их помощью измеряют скорости, обычно с непрерывной записью.

Метод, основанный на измерении объема воды, вошедшей в прибор за время наблюдения. В поток вводится прибор — батометр, входным отверстием навстречу течению, и выдерживается определенное время, после чего вынимается; измеряется объем воды, вошедшей в прибор. Скорость определяется по тарировочному графику в зависимости от объема воды, вошедшей за единицу времени. Этот способ почти вышел из употребления.

Метод, основанный на применении ультразвука. При распространении ультразвуковых колебаний в движущейся среде, в частности в воде, скорость ультразвука относительно неподвижной системы координат равна векторной сумме скорости звука и скорости самой среды. Ультразвуковой метод применяется в настоящее время для измерений в закрытых трубопроводах расходов различных жидкостей, в том числе загрязненных, агрессивных и кристаллизующихся, а также пульп. В гидрометрии он пока широко не применяется.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом проводятся исследования и разрабатываются ультразвуковые приборы для измерения скоростей течения и расходов воды как в лабораторных лотках, так и в реках.

В настоящее время при гидрометрических работах на реках, водохранилищах, каналах измерение скоростей течения производится чаще всего гидрометрическими вертушками. Реже применяются поплавки, но следует отметить, что в последнее время поплавки получили широкое применение для измерения скоростей течения аэрометодами (см. главу 33). Остальные из указанных выше методов и приборов употребляются главным образом при проведении научно-исследовательских работ, в основном в лабораторных условиях. Ввиду этого ниже главное место отводится описанию гидрометрических вертушек и работе с ними.

11.2. Гидрометрические вертушки

Краткие исторические сведения. Применение гидрометрических вертушек для измерения скорости течения воды позволило приступить к накоплению систематических сведений о режиме водных потоков. Идея прибора — измерение скорости в зависимости от числа оборотов ротора — впервые отражена в трудах

Леонардо да Винчи (XV век), но он применил этот принцип для прибора, служащего для измерения скорости ветра.

Изобретение гидрометрической вертушки во многих литературных источниках приписывается гамбургскому гидротехнику Р. Вольтману, издавшему в 1790 г. свой труд «Теория и употребление гидрометрических вертушек»[1]. Однако еще задолго до Вольтмана применялись приборы для измерения скоростей течения, основанные на том же принципе, что и вертушка. Н. Д. Тяпкин отмечает, что первый изобретатель вертушки неизвестен, а Вольтман лишь ввел в старой вертушке «изменения, выдвинувшие этот прибор на вид» [45].

Гидрометрическая вертушка прочно вошла в практику и до сих пор является наиболее распространенным и одним из лучших приборов для измерения скоростей течения воды.

Классификация гидрометрических вертушек. Имеется очень много различных типов и конструкций гидрометрических вертушек. Современные вертушки различаются по ряду признаков: направлению оси вращения, устройству лопастного винта или ротора, устройству контактного и счетного механизмов, способу опускания вертушки в воду и пр.

По направлению оси вращения различают вертушки с горизонтальной и с вертикальной осью. К первым относятся, например, ГР-21 и др., ко вторым — вертушка Прайса.

По устройству лопастного винта или ротора вертушки подразделяются на две группы: с лопастным винтом, образованным винтовой поверхностью, и с ротором, состоящим из конусообразных чашек; некоторые типы морских вертушек, например ВМ-М, снабжаются ротором в виде крылатки. Большинство современных речных вертушек имеют лопастные винты, образованные винтовой поверхностью с параболической образующей,— вертушка ГР-21 и др. Вертушки с чашечным ротором для речных гидрометрических работ применяются главным образом в США (вертушка Прайса). Форма лопастного винта или ротора имеет большое значение для правильного измерения скорости течения, о чем более подробно сказано ниже.

По устройству счетно-контактного механизма различают вертушки с механическим счетчиком числа оборотов и с электрической сигнализацией. Большинство современных вертушек имеет электрическую сигнализацию, преимуществом которой является то, что вертушку не надо вынимать из воды для отсчетов. Примером вертушек с механическим счетчиком является морская вертушка ВМ-М. Кроме указанных, применяются и другие типы счетно-контактных устройств, например с применением фотосопротивлений и с записью показаний на бумажной ленте. Такие

---

[1] Theorie und Gebrauch des Hydrometrischen Flügels oder eine zuverlässige Methode die Geschwindigkeit der Winde und strömender Gewässer zu beobachten von Reinhard Woltman. Hamburg, 1790.

приборы применяются для измерений скоростей и направлений морских течений, но некоторые из них с успехом используются для работ на крупных реках и водохранилищах, например печатающий самописец БПВ-2р.

Камеры контактного механизма вертушек с электрической сигнализацией в настоящее время делаются закрытыми и заполняются маслом.

По способу опускания в воду вертушки подразделяются на штанговые (опускаемые на штанге) и тросовые (опускаемые на тросе). Большинство речных вертушек в настоящее время делаются универсальными, пригодными для работы со штанги и с троса.

Основные части вертушек. Гидрометрическая вертушка состоит из следующих основных частей (рис. 11.1): 1) ходовой части с лопастным винтом и контактным механизмом, 2) корпуса вертушки, 3) стабилизатора направления, 4) сигнального устройства.

Ходовая часть является главным узлом вертушки и состоит из оси, лопастного винта, контактного механизма, находящегося во внутренней камере, заполняемой маслом. Замыкание контактов происходит при вращении лопастного винта через определенное число оборотов.

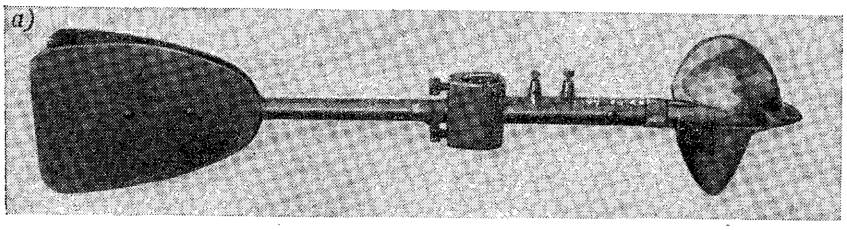
Корпус вертушки служит для сочленения частей и крепления ее на штанге или тросе; в последнем случае применяется вертлюг, входящий в комплект прибора. Ходовая часть укрепляется в корпусе в собранном виде с помощью стопорного винта. В задней части корпуса укрепляется стабилизатор направления. На корпусе имеются две клеммы для проводов сигнальной цепи.

Стабилизатор служит для установки прибора в потоке по направлению течения, лопастным винтом навстречу набегающему потоку.

Сигнальное устройство служит для передачи сигналов при замыкании контактов вертушки. Применяется звуковая сигнализация посредством звонка, к которому подводятся провода от клемм на корпусе вертушки. В некоторых типах вертушек применяются счетно-импульсные механизмы, например у вертушки ГР-99. У вертушек с механическим счетчиком, например у морской вертушки ВМ-М, определение числа оборотов ротора производится визуальным отсчетом по шкалам счетчика. Показания вертушек с электрической сигнализацией можно записывать на бумажной ленте с помощью хронографа, а при надобности — на ленте шлейфового осциллографа; последнее иногда бывает нужно при проведении научных исследований.

В комплект вертушки входят принадлежности для ее опускания в воду и обеспечения сигнализации, запасные части, отвертки, масло для заполнения контактной камеры, а также описание с правилами эксплуатации и тарировочное свидетельство.

Основы теории гидрометрической вертушки. Основные параметры и характеристики. Работа вертушки определяется взаимодействием потока и прибора. При измерении скорости используется зависимость между числом оборотов лопастного винта (ротора) в секунду и скоростью течения. В идеальном случае,



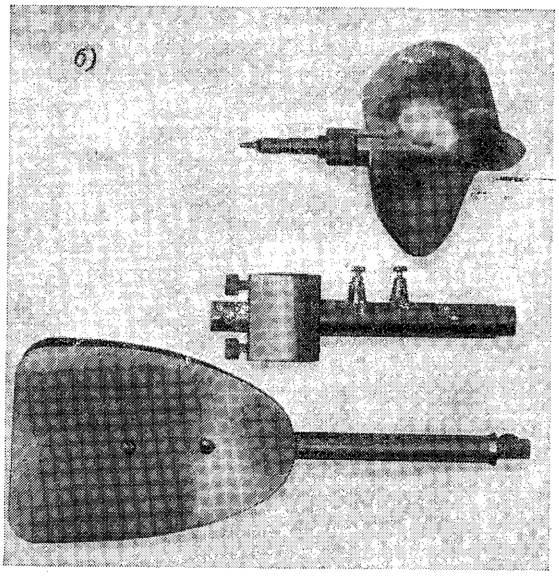


Рис. 11.1. Гидрометрическая вертушка ГР-21М и ее основные части.
а — общий вид; *б* — основные части: ходовая часть, корпус, стабилизатор направления.

т. е. при отсутствии трения в механизме вертушки и при отсутствии вязкости в жидкости, указанная зависимость выражается уравнением

$$u = k_г n, \qquad (11.1)$$

где u — скорость движения воды; n — число оборотов лопастного винта в секунду; $k_г$ — геометрический шаг лопастного винта,

При больших скоростях течения, когда можно принимать, что u_0 существенно меньше u, уравнение (11.3) можно записать так:

$$u=(a+\sqrt{b})n=kn. \qquad (11.4)$$

Здесь k имеет другое значение, чем в формуле (11.1), так как последнее уравнение отражает работу вертушки в реальных условиях. Поэтому будем называть этот коэффициент k гидравлическим шагом. Гидравлический шаг больше геометрического, так как в связи с наличием сопротивлений лопастный винт в водном потоке делает меньше оборотов в единицу времени при одной и той же скорости по сравнению с теоретическим числом оборотов. Гидравлический шаг определяется опытным путем при тарировании вертушек.

Параметры a и b, входящие в уравнение (11.3), определяются по следующим формулам:

$$a=k(0{,}99-\beta), \qquad (11.5)$$

$$b=(k\beta)^2, \qquad (11.6)$$

где β — параметр, определяемый по формуле В. Г. Железнякова,

$$\beta=6{,}9u_0-0{,}06+\sqrt{(2{,}3u_0-0{,}055)^2+0{,}00058}. \qquad (11.7)$$

Уравнение (11.3) отражает наличие на кривой зависимости $u=f(n)$ двух участков: криволинейного и прямолинейного, для которого оно принимает вид (11.4). Точку m на кривой (рис. 11.2), соответствующую переходу кривой в прямую, будем называть критической точкой. Скорость и число оборотов в секунду, соответствующие этой точке, также будем называть критическими.

Прямолинейная зависимость $u=kn$ сохраняется до некоторого предела, различного для разных вертушек. Затем линейность зависимости нарушается: при некоторой скорости кривая отклоняется вверх, как это показано на рис. 11.2. Скорость течения, соответствующую этой точке, в которой происходит поворот кривой вверх, будем называть верхней критической скоростью ($u_{вк}$). Установлено, что значение верхней критической скорости зависит от размеров канала (ширины и глубины), в котором испытывается вертушка, и от параметров лопастного винта (диаметра, геометрического шага и др.). Кроме того, значение верхней критической скорости зависит также от глубины погружения вертушки, что было установлено при испытаниях вертушки с чашечным ротором и вертикальной осью в большом буксировочном канале (по исследованиям А. В. Васильева). Следует иметь в виду, что зависимость $u=f(n)$ при $u>u_{вк}$ изучена еще недостаточно. Ориентировочно верхнюю критическую скорость можно принимать (по данным Н. П. Бурцева): для вертушки Ж-3 — 5 м/с (то же для ВЖМ-3 и ГР-55),

для вертушек ГР-21 и ГР-21М — 8 м/с (лопастный винт № 1). Причинами отклонения кривой $u=f(n)$ от прямолинейного направления при больших скоростях течения считают возникновение кавитации и интенсивное вихреобразование у ротора вертушки.

Нижним пределом применения вертушек следует считать скорость, большую, чем начальная скорость. При малых скоростях погрешности измерения могут достигать значительных величин из-за относительно большого влияния механических и гидравлических сопротивлений. Нижним пределом применения гидрометрических вертушек считают скорость, равную удвоенной начальной скорости для данной вертушки.

Как уже указывалось, лопастный винт начинает вращаться, когда силовое воздействие потока начнет превышать сопротивления. При дальнейшем увеличении скорости потока часть энергии будет затрачиваться на преодоление сопротивлений. В этом случае действительное число оборотов лопастного винта в единицу времени будет меньше теоретического. Это отставание называется скольжением лопастного винта; обозначим его Δn. Тогда можно написать

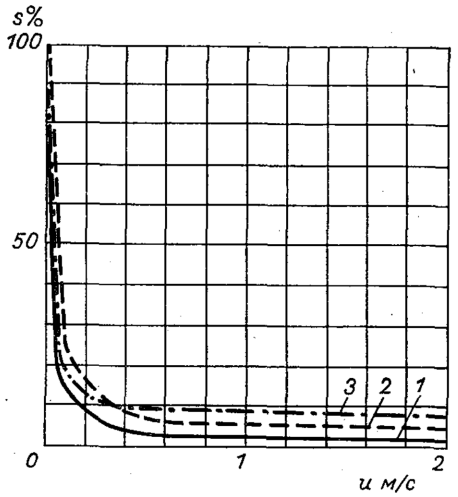


Рис. 11.3. Зависимость относительного скольжения лопастного винта от скорости.

1 — вертушка Ж-3; *2* — вертушки ГР-11, ГР-55; *3* — вертушка ГР-21.

$$\Delta n = n - n_д, \qquad (11.8)$$

где $n=\frac{u}{k_г}$ — теоретическое число оборотов винта в секунду; $n_д$ — действительное число оборотов винта в секунду.

В дальнейшем будем иметь дело с относительным скольжением винта, которое выражается зависимостью

$$S=\frac{n-n_д}{n}\cdot 100\%. \qquad (11.9)$$

Если скорость течения меньше начальной скорости вертушки, то относительное скольжение равно 100%, т. е. лопастный винт не вращается. При достижении критического значения скорости потока относительное скольжение лопастного винта становится постоянной величиной, различной для разных вертушек (рис. 11.3). По исследованиям П. Н. Бурцева, для вертушки Ж-3

относительное скольжение винта становится постоянным при скорости потока около 0,6 м/с и составляет 1,5—2,0%, для вертушки ГР-21 — соответственно 0,5 м/с и 7—8%. Данные рис. 11.3 относятся к случаю, когда ось вертушки параллельна направлению скорости. При непараллельности их относительное скольжение увеличивается при возрастании угла отклонения. Так, по данным Бурцева, при угле отклонения 40° относительное скольжение винта может достигать 30—35%. Увеличение относительного скольжения винта вызывается главным образом радиальным давлением потока.

Инерционностью вертушки называется способность лопастного винта следовать за изменениями скорости течения. Чем меньше инерционность лопастного винта или ротора вертушки, тем быстрее изменяется число оборотов при изменении скорости. Поэтому для регистрации пульсации скорости течения необходимо применять вертушки, обладающие малой инерционностью.

Лопастные винты существующих вертушек обладают различной инерционностью; размер последней зависит от момента инерции винта. Наименьшим моментом инерции обладают лопастные винты вертушек ГР-55 и ГР-99. Они являются малоинерционными, вследствие чего их наиболее целесообразно применять в потоках с большой турбулентностью и при необходимости регистрации пульсации скорости. В последнем случае лучше применять вертушку ГР-99 с контактом через один оборот и записывать ее показания на хронографе.

Лопастные винты вертушек ГР-21 и ГР-21М обладают относительно большой инерционностью, вследствие чего сглаживают пульсации скорости, поэтому применение их для регистрации пульсации скорости неэффективно. Зато применение их целесообразно в потоках с небольшой турбулентностью (равнинные реки).

Компонентные свойства гидрометрических вертушек. Гидрометрическая вертушка должна обладать весьма важным качеством — измерять составляющую скоростного вектора по направлению оси вертушки при кососструйном течении. При измерении расхода воды на гидрометрических створах вертушки располагаются (на штангах) так, чтобы ось вертушки была перпендикулярна направлению створа.

Гидрометрическая вертушка, способная измерять проекцию скоростного вектора (компонент вектора), называется компонент-вертушкой.

На рис. 11.4 изображен скоростной вектор u, направленный под углом α относительно нормали к створу. Компонент-вертушка, ось которой направлена по нормали к створу, будет в этом случае регистрировать проекцию скоростного вектора $u_н$

$$u_н = u \cos \alpha. \qquad (11.10)$$

Отношение этой проекции к скоростному вектору будет равно

$$\frac{u_н}{u} = \cos\alpha. \qquad (11.11)$$

Зависимость $u_н/u = f(\alpha)$ в этом случае графически будет выражаться линией косинуса (рис. 11.5). Ясно, что при совпадении направлений вектора скорости и оси вертушки последняя будет регистрировать значение самого скоростного вектора u.

Применяемые в настоящее время гидрометрические вертушки не являются в полной мере компонентными. В кососструйном потоке они занижают

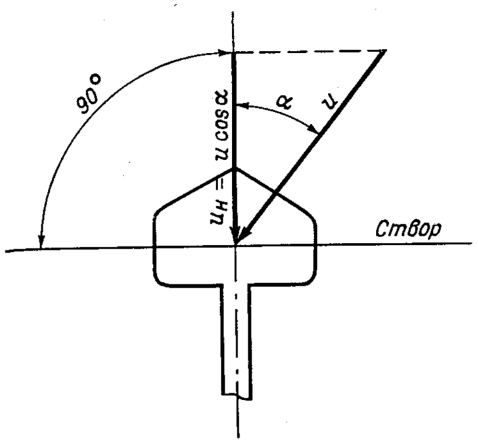


Рис. 11.4. Схема измерения скорости при кососструйном течении.

значение проекции скоростного вектора. На рис. 11.6 показана сплошной линией зависимость $u_н/u = f(\alpha)$ для вертушки ВЖМ-3

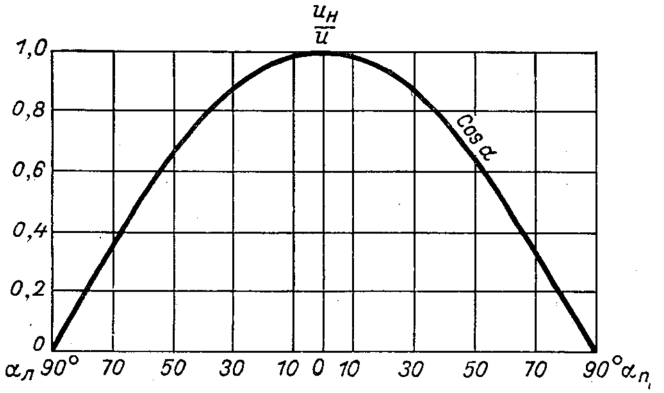


Рис. 11.5. Зависимость $\frac{u_п}{u} = f(\alpha)$ для компонент-вертушки (линия косинуса).

(по результатам испытаний в турбулентном потоке). Как видно, показания вертушки не следуют точно закону косинуса. В данном случае компонентные свойства сохраняются при углах отклонения вправо и влево до 20—25°, при бóльших углах вертушка дает заниженные величины проекции скоростного вектора.

Для определения компонентных свойств вертушек проводят специальные испытания их в тарировочных каналах. Для оценки компонентности применяется показатель $\Delta n\%$

$$\Delta n = \frac{n\cos\alpha - n_\alpha}{n\cos\alpha} \cdot 100\%, \qquad (11.12)$$

где n — число оборотов лопастного винта в секунду при нормальном расположении ее относительно сечения канала; n_α — число оборотов лопастного винта в секунду при той же скорости, но при повороте вертушки на угол α относительно направления скорости.

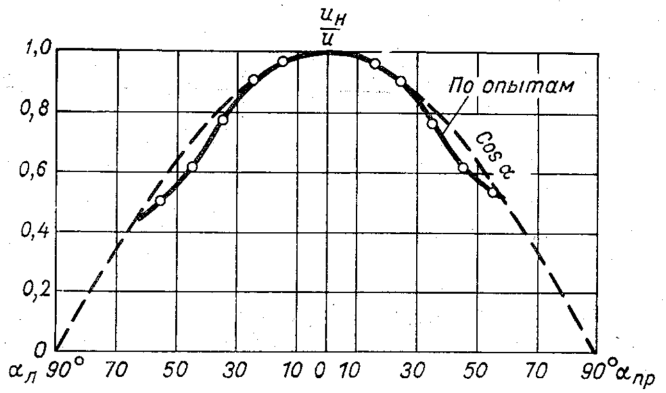


Рис. 11.6. Зависимость $\frac{u_n}{u} = f(\alpha)$ *для вертушки ВЖМ-3.*

Как показали испытания, проведенные ГГИ, применяемые у нас вертушки имеют следующие показатели компонентности (при $\alpha = 40°$): Ж-3, ВЖМ-3 — до 25%; ГР-21 и ГР-21М, ГР-55 и ГР-99 — до 5% (все данные относятся к лопастным винтам № 1). Как видно из приведенных данных, лучшими компонентными свойствами обладают вертушки ГР-21, ГР-21М, ГР-55 и ГР-99, что делает их наиболее пригодными для измерений скоростей течения в косоструйных потоках.

Компонентные свойства вертушек с чашечным ротором и вертикальной осью вращения отличаются от свойств рассмотренных выше вертушек с горизонтальной осью вращения. Так, например, для вертушки типа Прайса при отклонении ее влево от направления скорости линия зависимости $u_н/u = f(\alpha)$ проходит ниже линии косинуса (занижение скорости), а при отклонении вправо — выше линии косинуса (завышение скорости); это объясняется различными условиями обтекания потоком чашек ротора при его вращении в вилке, на которой укреплена ось вращения.

Описание основных типов гидрометрических вертушек. Выше уже указывалось, что общее количество различных типов и конструкций гидрометрических вертушек весьма велико. Здесь остановимся только на основных типах вертушек, применяемых в настоящее время в нашей стране, и дадим краткое описание некоторых вертушек, выпускаемых за рубежом, конструкции которых представляют интерес.

Наиболее распространенной на гидрологической сети была вертушка Ж-3 конструкции Н. Е. Жестовского. Этих вертушек еще много на сети и в изыскательских организациях, однако они сняты уже с производства и заменяются более совершенными вертушками ГР-21 и ГР-21М, а также малогабаритными вертушками ГР-55 и ГР-99.[1]

Гидрометрические вертушки ГР-21 и ГР-21М являются дальнейшим развитием вертушки конструкции Н. Е. Жестовского. Основные усовершенствования состоят в следующем:

1) улучшена форма лопастного винта, чем достигнуты лучшие компонентные свойства;

2) улучшена конструкция некоторых элементов ходовой части: увеличено расстояние между подшипниками и придана некоторая конусность оси, чем достигнута лучшая балансировка системы и устранена возможность появления трения скольжения;

3) улучшена форма стабилизатора направления, чем обеспечивается большая устойчивость прибора в потоке; этому же способствует новая конструкция вертлюга, снабженного шарикоподшипниками.

Вертушки ГР-21 и ГР-21М — одного класса, отличаются только конструкцией отдельных деталей.

Устройство вертушки ГР-21М показано на рис. 11.1 и 11.7. Вертушка снабжается двумя лопастными винтами: винт № 1 (основной) — компонентный, диаметром 120 мм с геометрическим шагом 200 мм, его применяют при работе со штанги без стабилизатора, при этом вертушка измеряет проекцию скоростного вектора на ось прибора; винт № 2 — некомпонентный, диаметром 120 мм с геометрическим шагом 500 мм, его применяют при работе с троса при больших скоростях течения, более 2 м/с. Сигнальная система вертушки укомплектовывается звонком.

Питание электрической цепи осуществляется от двух гальванических элементов общим напряжением 3 В.

В комплект вертушки входят: вертлюг для работы с троса, два карабина для подвески на тросе, указатель направления, применяемый при работе со штанги для установки вертушки по нормали к створу, когда ее не видно в воде, сигнальное устройство, масленка с трансформаторным маслом, две отвертки,

---

[1] Индекс «ГР» означает: гидрологический речной; им обозначаются все речные приборы (морские приборы обозначаются индексом «ГМ»).

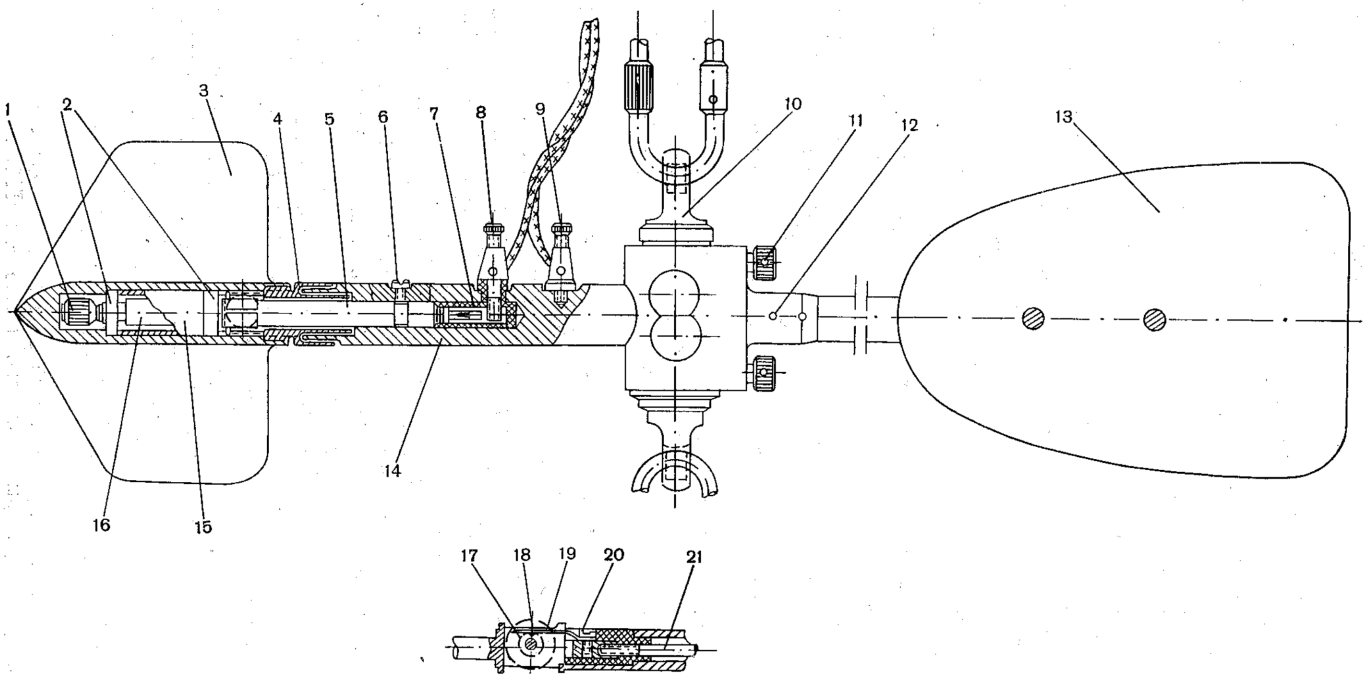


Рис. 11.7. Устройство гидрометрической вертушки ГР-21М.

1 — осевая гайка; *2* — упорные шарикоподшипники; *3* — лопастный винт; *4* — зажимная муфта; *5* — ось ходовой части; *6* — винт стопорный; *7* — гнездо штепселя; *8* — изолированная клемма; *9* — клемма, соединенная с корпусом; *10* — вертлюг; *11* — зажимные винты; *12* — винт стабилизатора; *13* — стабилизатор; *14* — корпус; *15* — наружная втулка; *16* — внутренняя распорная втулка; *17* — червячная шестерня; *18* — контактный штифт; *19* — контактная пружина; *20* — контактный винт; *21* — токопроводящий стержень.

запчасти — запасные контактные пружины, винты и пр. Штанга для вертушки состоит из двух звеньев общей длиной 3,0 м, диаметром 27 мм.

Стабилизатор направления вертушки ГР-21 (и ГР-21М) состоит из штока и двух плавно изогнутых пластин, укрепленных на его конце. Такое устройство обеспечивает устойчивую ориентировку вертушки навстречу течению даже при небольших скоростях. По сравнению со стабилизатором вертушки Ж-3 в виде плоской пластины стабилизатор ГР-21 обладает лучшим восстанавливающим моментом, но оказывает большее сопротивление потоку, вследствие чего требуется более тяжелый груз, чтобы уменьшить угол относа прибора.

Контактный механизм вертушки ГР-21 помещен во внутренней полости оси, заполняемой трансформаторным маслом. Масло заливают в полость лопастного винта при сборке ходовой части; шарикоподшипники, таким образом, находятся в масляной ванне, что способствует их лучшей работе. При вращении лопастного винта ось ходовой части остается неподвижной.

Гидрометрическая вертушка ГР-55. Внешний вид вертушки показан на рис. 11.8. По устройству ходовой части и контактного механизма она имеет сходство с вертушкой ГР-21. На рис. 11.9 показано устройство вертушки ГР-55 в разрезе.

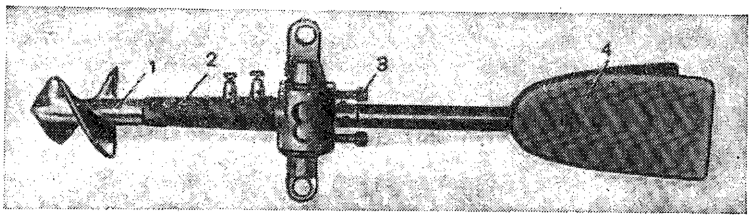


Рис. 11.8. Гидрометрическая вертушка ГР-55.

1 — ходовая часть; *2* — корпус; *3* — зажимные винты; *4* — стабилизатор.

Главным ее отличием является малый размер лопастного винта, вследствие этого и сама вертушка значительно меньше, чем ГР-21, поэтому она называется малогабаритной. Из-за небольших размеров она представляет большое удобство для измерений скоростей при малых глубинах, в небольших водотоках.

Вертушка снабжается двумя лопастными винтами. Лопастный винт № 1 — компонентный, диаметром 70 мм, с геометрическим шагом 110 мм; его рекомендуется применять при скоростях от 0,05 до 2,5 м/с, погрешность измерения в этом случае лежит в пределах 2%; при скоростях менее 0,1 м/с погрешность более 2%. Ошибка от влияния косых течений при косоструйности до 40° не превышает 5%. Лопастный винт № 2 имеет тот же диаметр, геометрический шаг 200 мм, применяется при скоростях от 2,5 до 5,0 м/с и предназначается для работы с троса. Оба

лопастных винта имеют прямолинейные образующие винтовой поверхности.

Контактный механизм состоит из червячной шестерни с 20 зубцами и штифтом, контактной пружины и винта, крепящего пружину к токопроводящему стержню. Замыкание контакта происходит через 20 оборотов лопастного винта.

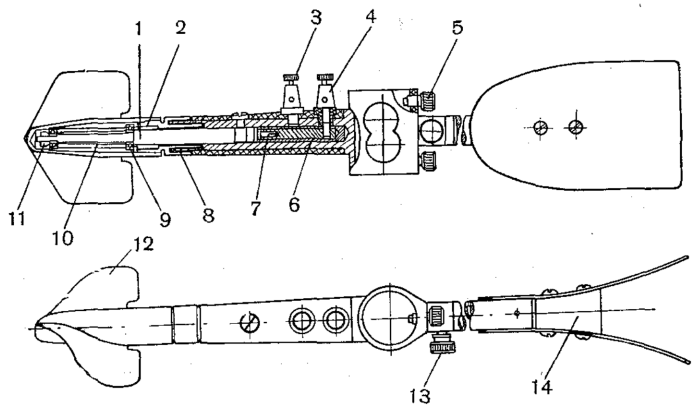


Рис. 11.9. Устройство гидрометрической вертушки ГР-55.

1 — ось с контактным механизмом; *2* — червячная шестерня с 20 зубцами и штифтом; *3* — клемма массовая; *4* — изолированная клемма (—); *5* — зажимные винты; *6* — штепсельное гнездо; *7* — токопроводящий стержень, изолированный от массы; *8* — зажимная муфта; *9* — радиальные подшипники (2 шт.); *10* — упорная втулка; *11* — осевая гайка; *12* — лопастный винт; *13* — крепежный винт стабилизатора; *14* — стабилизатор направления.

При вращении винта ось остается неподвижной. Лопастный винт с гильзой и зажимной муфтой вращается на двух шарикоподшипниках. Полость лопастного винта заполняется трансформаторным маслом.

В качестве кабеля сигнальной цепи используется гибкий двойной провод с полихлорвиниловой изоляцией. Сигналы вертушки принимаются на электрический звонок, а время между сигналами определяется по секундомеру.

Гидрометрическая вертушка ГР-99 существенно отличается от предыдущих. Прибор состоит из датчика скорости — вертушки и счетно-импульсного механизма.

Вертушка состоит из корпуса, ходовой части, контактного устройства и стабилизатора направления. Ходовая часть имеет лопастный винт с тремя лопастями. Лопастный винт — компонентный, диаметром 80 мм, с геометрическим шагом 130 мм; он позволяет измерять величину проекции скоростного вектора на ось прибора с погрешностью до 5% при косоструйности до 40°. Диапазон измерения скоростей от 0,06 до 5,0 м/с. Приборная погрешность при скоростях до 0,2 м/с не более 6%, при больших скоростях — в пределах 2%.

Лопастный винт отличается малым моментом инерции, что позволяет успешно применять вертушку в потоках с повышенной турбулентностью. Замыкание контакта происходит через один оборот винта, это позволяет при записи сигналов на ленте применять ее для изучения пульсации скорости. Контактный механизм помещается внутри корпуса (рис. 11.10) и состоит из постоянного магнита *16*, закрепленного в обойме *15* на оси ходовой части, и магнитоуправляемого контакта *14*, размещенного в изоляционной втулке *6*, закрепленной в корпусе вертушки. Постоянный магнит сделан со скошенным концом, благодаря чему при

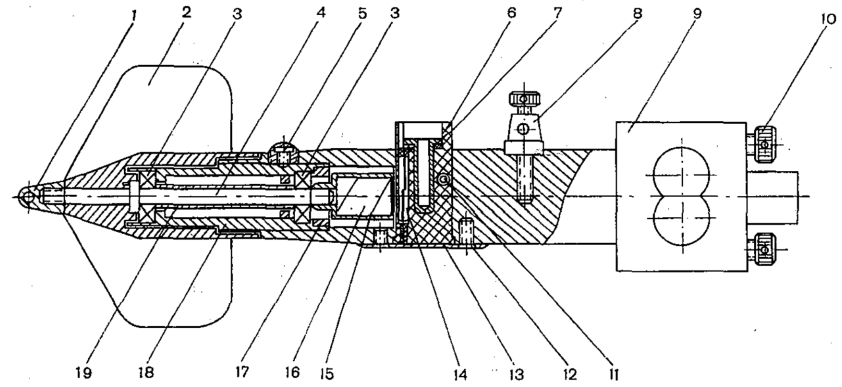


Рис. 11.10. Устройство гидрометрической вертушки ГР-99.

1 — гайка; *2* — трехлопастный винт; *3* — радиальные шарикоподшипники; *4* — ось; *5* — винт для крепления ходовой части к корпусу; *6* — изоляционная втулка; *7* — изолированная клемма; *8* — массовая клемма; *9* — корпус вертушки; *10* — винт для крепления вертушки к штанге; *11* — винт; *12* — стержень штепселя; *13* — упорная шайба; *14* — магнитоуправляемый контакт; *15* — обойма; *16* — постоянный магнит; *17* — гайка; *18* — гильза; *19* — распорная втулка.

каждом обороте лопастного винта происходит одно замыкание контакта.

Счетно-импульсный механизм состоит из электромагнитного счетчика импульсов, секундомера и рычажного устройства для включения и выключения прибора. При измерении скорости прибор включают на определенное время. Затем по шкале счетчика берут отсчет числа импульсов (т. е. оборотов винта), а по секундомеру — числа секунд. Делением числа импульсов на число секунд определяют количество оборотов в секунду, а затем по тарировочной зависимости получают значение скорости течения.

Для питания счетно-импульсного механизма применяют два источника питания постоянного тока: напряжением 30 В (цепь счетчика) и 1,6 В (цепь вертушки). Блок питания смонтирован в отдельный узел.

Мы рассмотрели применяемые в настоящее время основные типы гидрометрических вертушек. В табл. 11.1 дается сводка

основных параметров описанных вертушек, а также некоторых, не вошедших в описание. Таблица составлена по данным ГГИ[1] и приводится с сокращениями.

Таблица 11.1

Основные параметры и характеристики гидрометрических вертушек

Тип вертушки	Диаметр лопастного винта, мм	Геометрич. шаг, мм	Начальная скорость, м/с	Верхняя критическая скорость, м/с	Компонентность при $\alpha = 40°$ в %
Ж-3	№ 1 120 № 2 120	250 500	0,04 0,06	5,0 5,0	0—25 25—45
ВЖМ-3	№ 1 120 № 2 120	200 500	0,04 0,06	5,0 5,0	0—25 20—45
ГР-21	№ 1 120 № 2 120	200 500	0,04 0,06	8,0 ~5,0	0—5 20—45
ГР-21М	№ 1 120 № 2 120	200 500	0,04 0,06	8,0 ~5,0	0—5 20—45
ГР-55	№ 1 70 № 2 70	110 200	0,05 0,06	5,0 5,0	0—5 0—10
ГР-11	№ 1 60 № 2 60	110 200	0,06 0,10	5,0 5,0	0—5 0—10
ГР-11М	№ 1 70 № 2 70	110 200	0,05 0,08	8,0 8,0	0—5 0—10
ГР-99	80	130	0,06	5,0	0—5

Из приведенных в таблице вертушек в настоящее время рекомендуются к применению на государственной гидрологической сети и в проектно-изыскательских организациях ГР-21, ГР-21М, ГР-55 и ГР-99.

Вертушки ГР-21 и ГР-21М характеризуются большой добротностью и износоустойчивостью, отличаются хорошими показателями компонентности (лопастный винт № 1). Но в то же время их лопастные винты имеют относительно большие моменты инерции, вследствие чего менее пригодны для измерений в потоках с большой турбулентностью (по сравнению с ГР-55 и ГР-99). Оптимальные условия их применения — равнинные реки.

---

[1] Бурцев П. Н., Барышникова М. М. Анализ возможности использования гидрометрических вертушек для работы в турбулентных потоках.— «Труды ГГИ», 1969, вып. 172.

Вертушки ГР-55 и ГР-99 имеют более легкие лопастные винты, обладающие относительно малым моментом инерции и в то же время хорошими компонентными свойствами. Поэтому

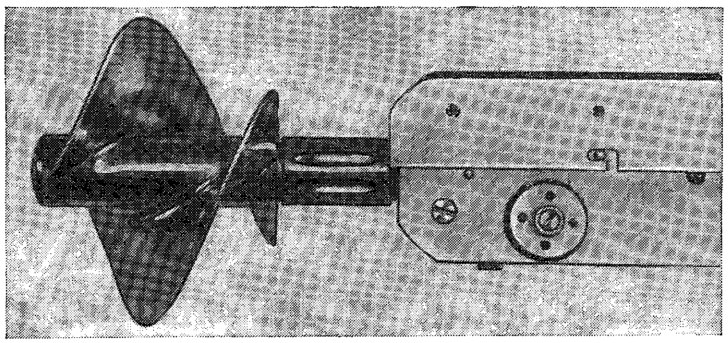


Рис. 11.11. Гидрометрическая вертушка Отта-V с лопастным винтом типа А, компонентным до 45°.

они пригодны для измерений в потоках с большой турбулентностью: на горных реках, в водоводах гидротехнических сооружений, в нижних бьефах. Они не менее эффективны и в условиях малой турбулентности, в частности на равнинных реках.

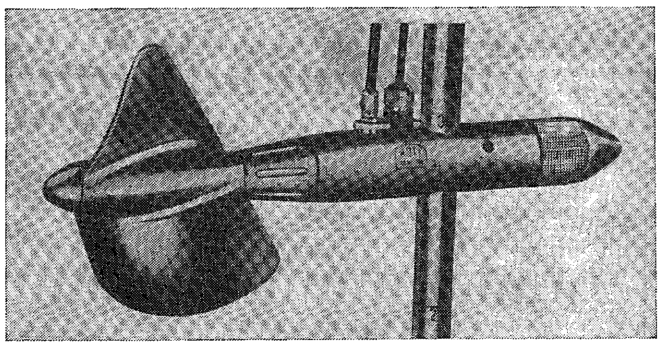


Рис. 11.12. Универсальная вертушка Отта С-31 (10.002).

Остановимся на некоторых типах иностранных вертушек.

Фирма А. Отт (город Кемптен, ФРГ) выпускает различные типы современных вертушек высокого качества и, кроме того, различные гидрометрические приборы и оборудование.

Вертушка типа Отта-V (рис. 11.11) выпускается очень давно, но конструкция ее непрерывно совершенствуется. В настоящее время выпускается модернизированный вариант этой вертушки — универсальная вертушка С-31 (рис. 11.12), в котором

применена магнитная система. Сигналы генерируются импульсным устройством, возбуждаемым постоянным магнитом в ходовой части через каждый оборот лопастного винта. К вертушке выпускается шесть лопастных винтов с различными характеристиками, диаметром от 80 до 125 мм, в том числе винт типа А диаметром 100 мм, компонентный до 45°.

Вертушка Прайса (рис. 11.13) применяется в США. Она состоит из ходовой части с чашечным ротором, корпуса и стабилизатора направления. Ротор из шести конусообразных чашек укреплен на оси, которая внизу опирается на подпятник,

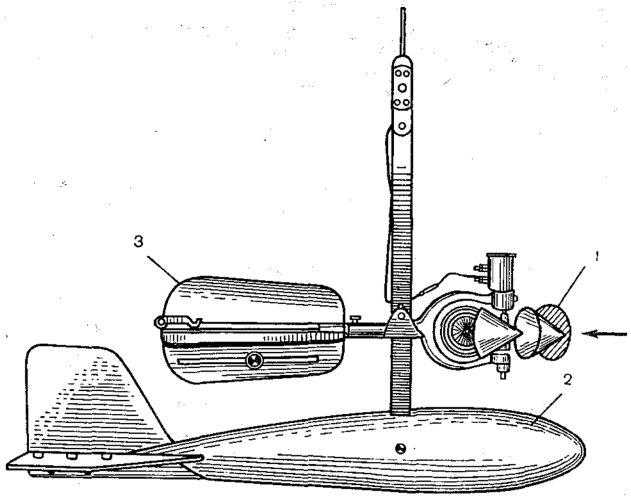


Рис. 11.13. Гидрометрическая вертушка Прайса.
1 — ходовая часть; *2* — груз; *3* — стабилизатор направления.

расположенный в нижней вилке корпуса, а вверху проходит в отверстие верхней вилки. Конец оси проходит в контактную камеру, где расположенный на оси червячный винт входит в зацепление с червячной шестерней контактного устройства. Имеющийся на шестерне штифт при вращении ротора замыкает контактную пружину. Контактная камера сверху плотно завинчивается, благодаря чему при погружении вертушки в воду в камере находится воздух, что предохраняет контактную систему от засорения.

Вертушка опускается на тросе, но может применяться и на штанге. При применении на штанге показания вертушки существенно зависят от угла между направлением оси вертушки и направлением скоростного вектора.

Следует отметить, что у нас производились и применялись вертушки типа Прайса, например вертушки ИВХ, САНИИРИ, Бахирева, а также лабораторная вертушка «Малютка». Вертушка Бахирева по устройству корпуса отли-

чалась от вертушки Прайса, благодаря чему условия подхода потока к ротору были значительно улучшены. Кроме того, вертушка Бахирева имела и другие конструктивные улучшения. Все эти вертушки сняты с производства.

Остановимся еще на одной вертушке — малогабаритной вертушке № 180 австрийской фирмы Р. и А. Рост (Вена). Эта вертушка предназначена для измерений скоростей в малых водотоках при загрязненной воде и наличии наносов. Как видно из рис. 11.14, лопастный винт защищен от механических воздействий дугой корпуса. Диаметр винта 30 мм, что позволяет применять прибор при очень малых глубинах. Ось лопастного винта своими центрами уложена в сапфировых подпятниках.

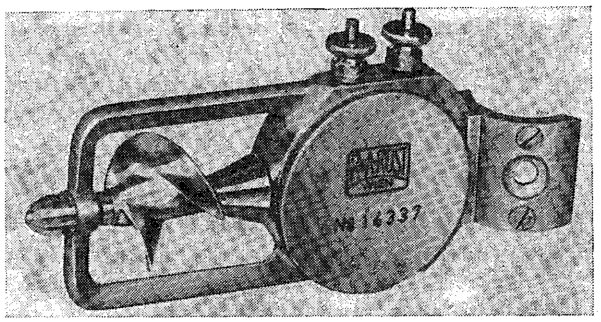


Рис. 11.14. Малогабаритная вертушка фирмы Рост (Австрия).

Контактный механизм помещен в камере корпуса с завинчивающейся крышкой. Замыкание контактов происходит через 50 оборотов винта. Вертушка применяется на штанге. Сигнализация звуковая или световая (лампочка). Прибор укладывается в два небольших ящичка (без штанги): в одном — вертушка, в другом — сигнальное устройство.

Лабораторные вертушки. Рассмотренные выше гидрометрические вертушки предназначены для измерений в полевых условиях. Для измерений в лабораторных условиях, где размеры потока значительно меньше, применяют специальные лабораторные вертушки малых размеров. Они обычно разрабатываются и изготовляются организациями, выполняющими те или иные лабораторные гидравлические исследования, в соответствии с размерами потоков и задачами работ. Имеется очень много различных конструкций лабораторных вертушек, отличающихся устройством и размерами ротора, системой сигнализации и регистрации сигналов вертушки.

В качестве примера приведем описание лабораторной микровертушки. Принципиальная схема работы прибора показана на рис. 11.15. Микровертушка состоит из ротора с крыльчаткой,

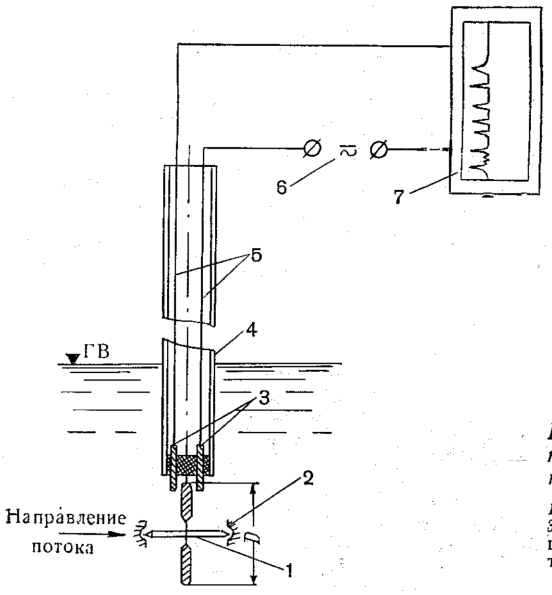


Рис. 11.15. Принципиальная схема микровертушки.

1 — ротор, *2* — подшипники; *3* — электроды; *4* — полая штанга; *5* — провода; *6* — питание; *7* — регистратор.

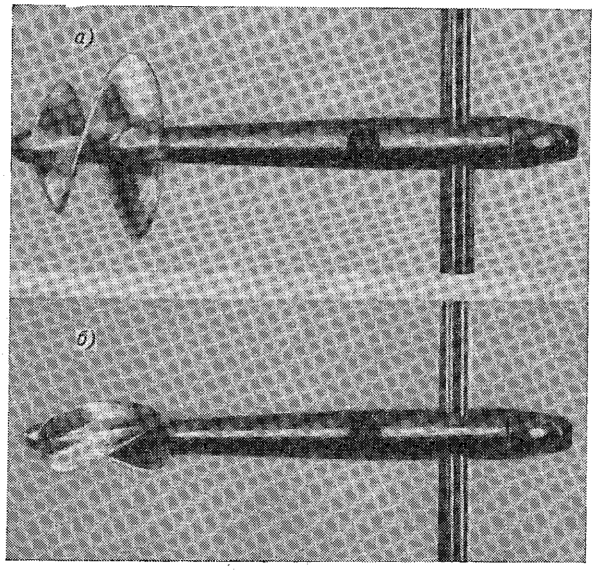


Рис. 11.16. Лабораторная гидрометрическая вертушка фирмы Отта.

а — с лопастным винтом диаметром 50 мм; *б* — с лопастным винтом диаметром 20 мм.

подшипников, двух электродов, полой штанги. Внутри штанги проходят изолированные провода от электродов к источнику питания и регистрирующему прибору — осциллографу, на котором осуществляется запись сигналов вертушки и отметок времени. Обработка записи позволяет получать скорости в различные моменты времени, т. е. изучать пульсацию скоростей, и, кроме того, определять местную скорость с требуемым осреднением во времени.

Диаметр ротора микровертушки 15—25 мм. Крыльчатка делается с восемью лопастями. При прохождении каждой лопасти между электродами ток в электрической цепи резко возрастает за счет увеличения проводимости в зазоре между электродами; на линии записи при этом получается пик. Частота расположения таких пиков характеризует значение скорости; чем больше скорость, тем чаще пики.

Из иностранных современных лабораторных вертушек отметим лабораторную вертушку фирмы Отта (рис. 11.16). Она применяется на штанге диаметром 9 мм и имеет горизонтальную ось вращения. В комплект вертушки входит счетчик числа оборотов и набор лопастных винтов (до 9 шт.), имеющих различные диаметры (от 20 до 50 мм), различный гидравлический шаг и хорошие компонентные свойства.

Укажем еще на новую малогабаритную вертушку — микровертушку ГР-96, разработанную в ГГИ. Она предназначена для измерения скоростей в малых водотоках — ручьях, поливных бороздах и пр., а также в лабораторных установках. Диаметр лопастного винта 30 мм. Диапазон измеряемых скоростей 0,05—2,0 м/с. При глубинах до 1,2 м применяется на специальной штанге диаметром 8 мм, а при бо́льших глубинах — на стандартной штанге. Сигналы вертушки регистрируются счетно-импульсным механизмом через один оборот лопастного винта. Лопастный винт обладает достаточно хорошими компонентными свойствами: при косоструйности до 30° погрешность не превышает 5% (по данным П. Н. Бурцева и А. Г. Левченко). Опыт применения этой вертушки еще не накоплен.

Оборудование и принадлежности для работы с вертушками. Для установки вертушки в потоке на нужной глубине применяют штанги и тросы.

Для вертушек ГР-21, ГР-21М, ГР-55, ГР-99 и других, указанных в табл. 11.1, выпускаются стандартные штанги диаметром 27 мм, длиной 3 м, состоящие из двух звеньев, соединяемых винтами. На поверхности штанги нанесены деления через 10 см. В нижнем конце штанги имеется плоская пластинка — поддон, служащий для предупреждения или уменьшения погружения штанги в мягкий грунт дна. Применение штанги для измерения скоростей вертушкой возможно при глубине потока менее 3 м. Применение штанги ограничивается также скоростью течения: при скоростях более 1,5 м/с и глубинах более 2 м работать

вертушкой на штанге становится затруднительно. Иногда при больших скоростях для облегчения удержания штанги применяют оттяжки из тонкого троса.

Существуют два способа работы вертушкой на штанге:

1) штанга при измерении скорости течения нижним концом упирается в дно (упорная штанга), верхний конец штанги при этом удерживается в руках; для установки вертушки в требуемой точке вертикали штангу надо вынимать из воды;

2) штанга закрепляется на мостике при помощи специального штангодержателя, а вертушка укрепляется на нижнем конце штанги (подвесная штанга); расположение вертушки в нужной точке вертикали достигается перемещением штанги в штангодержателе.

В Советском Союзе в настоящее время применяется преимущественно первый способ.

Для определения направления оси вертушки по нормали к линии створа применяют указатель направления, входящий в комплект вертушки. Он укрепляется на штанге выше уровня воды параллельно оси вертушки (иногда его располагают перпендикулярно оси вертушки, т. е. по направлению створа). Необходимость в применении указателя направления возникает при мутной воде и при большой глубине, когда вертушку не видно.

При глубинах больше 3 м, а также при работе с гидрометрических люлек и мостов, расположенных высоко над водой, вертушки опускают в воду на тросе с помощью гидрометрических лебедок. Для предотвращения или уменьшения сноса вертушки течением применяют гидрометрические грузы (рис. 11.17). Вес груза и диаметр троса подбирают в зависимости от скорости течения.

При подвешивании вертушки на тросе применяют вертлюг, который совместно со стабилизатором направления обеспечивает установку прибора в потоке в правильном положении — лопастным винтом навстречу скоростному вектору. Груз и трос крепятся к вертлюгу при помощи карабинов. Между вертушкой и грузом обычно делают вставку из отрезка троса, чтобы между вертушкой и грузом расстояние было примерно 20 см во избежание влияния нарушений скоростного поля на показания вертушки. Это особенно важно при больших грузах.

На рис. 11.18 показаны различные способы крепления вертушек к гидрометрическим грузам. Часто применяют крепление по схеме рис. 11.18 *а*. Недостатком его является большое расстояние вертушки от дна, вследствие чего недоучитываются малые скорости придонного слоя. Для учета этих скоростей более целесообразны устройства, показанные на рис. 11.18 *в*, *г*. Кроме того, такие формы грузов обеспечивают устойчивое положение прибора в потоке. Груз, показанный на рис. 11.18 *в*, применяется в дистанционных гидрометрических установках.

Для определения времени между сигналами вертушки чаще всего применяют секундомер.

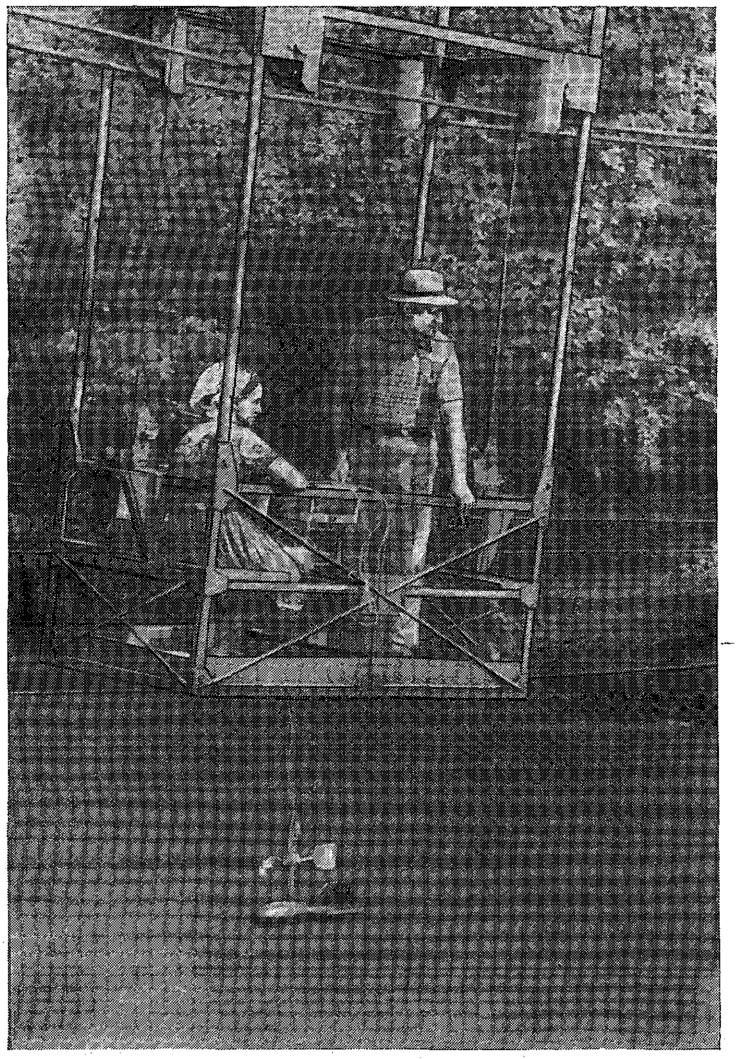


Рис. 11.17. Опускание вертушки на тросе с грузом с гидрометрической люльки.

При проведении научных исследований запись сигналов вертушки производится с помощью хронографа (рис. 11.19), применение которого целесообразно также при тарировании вертушек и при необходимости вести измерения одновременно несколькими

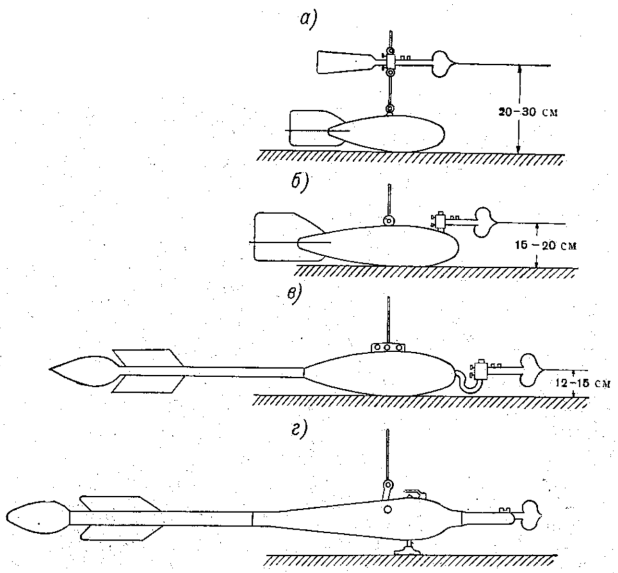


Рис. 11.18. Способы применения вертушки на тросе с грузом.

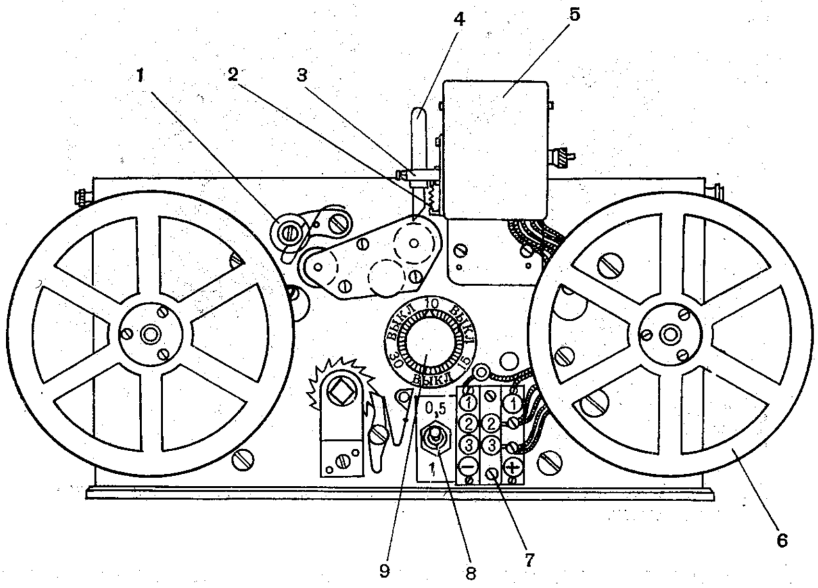


Рис. 11.19. Хронограф.

1 — прижимной ролик; *2* — пружина; *3* — поворотный рычаг пера; *4* — перья; *5* — пишущее устройство; *6* — кассета для бумажной ленты; *7* — клеммная панель; *8* — переключатель продолжительности импульсов 0,5—1,0 с; *9* — ручка управления.

вертушками. На ленте хронографа синхронно записываются сигналы вертушек и отметки времени. Как уже указывалось, показания вертушки при надобности можно записывать на ленте осциллографа.

Тарирование гидрометрических вертушек. Тарированием называется определение зависимости между скоростью течения и числом оборотов лопастного винта в секунду, производимое опытным путем. Тарированию подвергаются все вновь изготовленные вертушки, в результате для каждой составляется тарировочное свидетельство, являющееся необходимым документом вертушки. В процессе эксплуатации вертушек детали их механизмов изнашиваются, в связи с чем постепенно изменяются механические сопротивления, а следовательно, нарушаются данные первоначального тарирования. Кроме того, в процессе работы возможны повреждения отдельных частей вертушки и в первую очередь лопастного винта. При этом также изменяются тарировочные данные. В указанных случаях должно проводиться повторное тарирование.

В практике работ Гидрометслужбы установлены следующие сроки повторного тарирования вертушек, находящихся в условиях нормальной эксплуатации, независимо от количества проведенных измерений: вертушки с масляной камерой ГР-21, ГР-21М, ГР-55 — один раз в два года.

В случае явных повреждений вертушки сразу должны отправляться в ремонт и на тарирование.

Тарирование вертушек производится в неподвижной воде путем буксировки их с различными скоростями. Такой метод тарирования является общепринятым, хотя при этом вертушка работает в условиях, отличных от условий ее работы в турбулентном потоке. Силовое воздействие набегающего потока при турбулентном режиме отличается от воздействия неподвижной водной среды на перемещающуюся вертушку: в первом случае давление потока на лопастный винт больше, чем во втором. Однако эта разница мала, и практически считается допустимым тарировать вертушки не в турбулентном потоке, а путем буксировки их в неподвижной воде. Расхождения между результатами тарирования в потоке и неподвижной воде находятся в пределах принятых в гидрометрии погрешностей. Кроме того, тарирование в проточной воде вносит некоторую неопределенность, так как потоки обладают различной степенью турбулентности.

Тарирование вертушек производят в специальных каналах и бассейнах, которые называются тарировочными. Их устройство бывает различным: прямолинейные, круговые, кольцевые и т. д. Лучшими являются прямолинейные каналы. Для достижения достаточной точности тарирования эти каналы должны отвечать определенным требованиям. Длина канала определяется в соответствии с наибольшей скоростью, с которой должна

двигаться тележка с вертушкой, с учетом участков разгона и торможения.

На точность тарирования оказывает влияние размер поперечного сечения канала, при этом ширина оказывает большее влияние, чем глубина. Исследованиями установлено, что изменение ширины перестает влиять на результаты тарирования при ширине около 3 м. Однако для практических целей с учетом требуемой точности измерений скорости считается допустимым делать тарировочные каналы меньшей ширины.

На точность тарирования оказывает влияние расположение вертушки относительно поверхности воды, стенок и дна канала. Близость вертушки к стенкам и ко дну вносит погрешности в результаты; опытным путем определено, что прибор должен находиться в середине канала, на расстоянии не менее 60 см от поверхности, ото дна и от стенок.

Прямолинейные тарировочные каналы имеют прямоугольное поперечное сечение. Дно и стенки делаются бетонными, гладкими. Вдоль стенок прокладывается рельсовый путь, по которому двигается буксировочная тележка. Для повышения точности тарирования необходимо, чтобы рельсовый путь обеспечивал исключительно плавный ход тележки. Для этого рельсы укладывают весьма тщательно, стыки сваривают и зашлифовывают; горизонтальность поверхностей рельсов проверяется нивелировкой, а расстояние между ними — шаблоном.

Движение тележки осуществляется с различными скоростями с помощью электродвигателя. Для определения скорости применяется тахометр (специально для целей тарирования тахометр сконструирован С. К. Пукенисом); с помощью тахометра можно правильно назначать задаваемые скорости тарирования.

Тарируемая вертушка укрепляется на тележке с помощью штанги или, если это нужно, на тросе. Для регистрации пройденного расстояния вдоль рельсового пути устраиваются специальные выступы, служащие для замыкания контактов при движении тележки; расстояние между ними принимается 0,5—2,0 м. При каждом замыкании регистрируются отметки пути и, следовательно, пройденное расстояние.

Данные тарирования автоматически записываются на ленте хронографа. Синхронно регистрируются сигналы вертушки, отметки времени (секунды) и отметки пути. Обработка хронограммы позволяет получить скорость перемещения вертушки

$$u=\frac{l}{t} \tag{11.13}$$

(где l — путь, пройденный вертушкой; t — время, за которое пройден путь) и число оборотов лопастного винта в секунду

$$n=\frac{N}{t} \tag{11.14}$$

(где N — общее число оборотов лопастного винта за время t).

Для каждого заезда устанавливаются различные скорости, начиная от наименьших, для определения начальной скорости вертушки. Начальную скорость обычно определяют так. Тележку передвигают со скоростью, при которой лопастный винт начинает равномерно вращаться; затем скорость уменьшают до значения, при котором лопастный винт вращается неравномерно, с перебоями. Эта скорость и принимается за начальную скорость вертушки. Обычно начальную скорость определяют дважды: в начале и в конце тарирования; за окончательный результат принимают среднее значение.

Всего делают 12—15 заездов, при этом учитывают, что участок тарировочной кривой до критической скорости, т. е. криволинейный, должен быть освещен подробнее. Рекомендуются следующие скорости заездов: 0,06; 0,08; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00; 2,50 м/с. Чаще всего ограничиваются скоростью 2,5 м/с, так как этого достаточно для измерений на равнинных реках, тем более, что кривая может быть экстраполирована на прямолинейном участке вверх до скоростей примерно 5 м/с (см. табл. 11.1). В необходимых случаях производят тарирование до бóльших скоростей.

В Советском Союзе тарировочные каналы имеются в разных городах. Например, тарировочный канал тбилисского завода «Гидрометприбор» имеет длину 80 м, ширину 2 м и глубину 2 м (рис. 11.20). Рабочий участок канала, на котором производится тарирование, около 40 м, так как для разгона и торможения тележки при больших скоростях необходимо около 20 м.

Тарировочный канал ГГИ расположен в закрытом помещении и представляет собой железобетонный лоток длиной 150 м, шириной 4 м и глубиной 3,2 м. Канал имеет хорошо оборудованную тарировочную тележку, двигающуюся по рельсовому пути с заданной равномерной скоростью в диапазоне от 0,01—0,02 до 6 м/с.

В г. Каунасе тарировочная станция сделана на пруду. Вдоль берега устроена эстакада на бетонных опорах длиной 73 м с рельсовым путем, по которому движется тележка (рис. 11.21). Штанга с вертушкой укрепляется на консоли; подъем, опускание и повороты штанги механизированы и автоматизированы. Тележка может двигаться со скоростью от 0,03 до 4,00 м/с. Вдоль эстакады имеются две линии замыкателей контактов: для малых скоростей через 0,5 м и для больших скоростей через 2,0 м. Разгон тележки незначителен, заданная скорость устанавливается почти с места. Для торможения при скорости 2—3 м/с нужно расстояние 5 м (при сухих рельсах). За скоростью движения тележки тарировщик может следить по тахометру конструкции Пукениса.

В США большинство вертушек тарируется в бюро стандартов, тарировочный канал которого имеет длину 121,9 м, ширину 1,83 м и глубину 1,83 м; канал оборудован весьма совершенными

устройствами для регистрации сигналов вертушки, времени и пути.

Как уже указывалось, тарирование может производиться в круговых и кольцевых бассейнах. Первые из них представляют

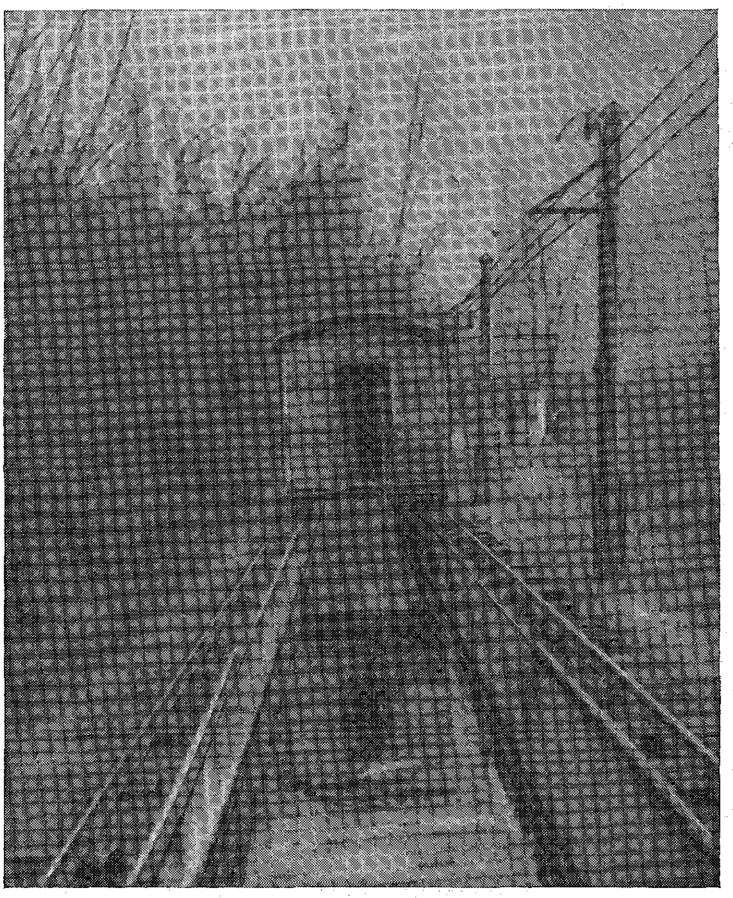


Рис. 11.20. Тарировочный канал тбилисского завода «Гидрометприбор».

собой заполненный водой цилиндрический бассейн. При тарировании вертушка опускается в воду на штанге, укрепленной на горизонтальной стреле, вращающейся вокруг оси, расположенной в центре бассейна. В настоящее время тарирование в таких бассейнах почти не производят.

Кольцевой бассейн состоит из двух концентрически расположенных цилиндров, пространство между которыми заполнено

водой (рис. 11.22). В центре бассейна на фундаменте укреплена карусель с несколькими штангодержателями, на которых за-

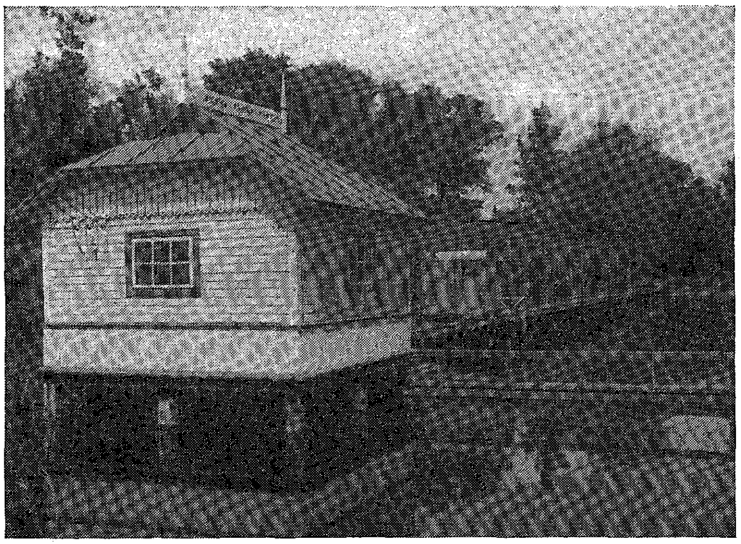


Рис. 11.21. Тарировочная станция в Каунасе.

крепляются штанги с тарируемыми и образцовыми вертушками. Карусель вращается с различными скоростями с помощью

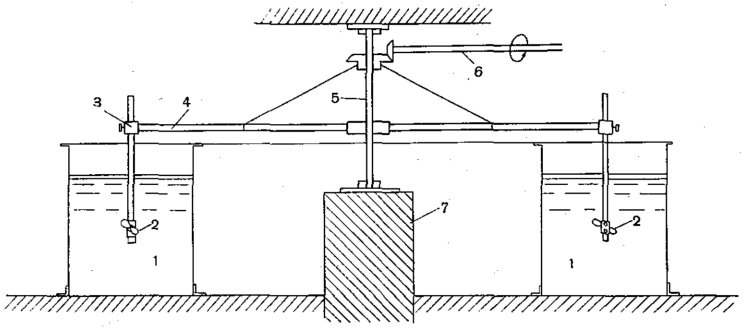


Рис. 11.22. Схема кольцевого тарировочного бассейна.

1 — кольцевой бассейн; *2* — вертушки; *3* — штангодержатель; *4* — карусель; *5* — вертикальная ось; *6* — горизонтальный вал; *7* — фундамент.

электродвигателя. Минимальные размеры бассейна для обеспечения требуемой точности тарирования: диаметр наружного цилиндра 5,0 м, внутреннего 3,0 м, высота цилиндров 1,3 м, глубина воды 1,0 м.

Тарирование в кольцевых бассейнах производится методом сравнения, т. е. путем сравнения показаний испытываемой вертушки с показаниями образцовой вертушки (эталона), которая предварительно подвергается тщательной поверке и тарированию в прямолинейном канале. В кольцевых бассейнах при движении вертушек возникает попутный поток, кроме того, направление оси вертушки не совпадает с направлением движения, так как вертушка направлена по касательной; все это не позволяет вести непосредственное тарирование. В этом случае следует применять указанный выше приём.

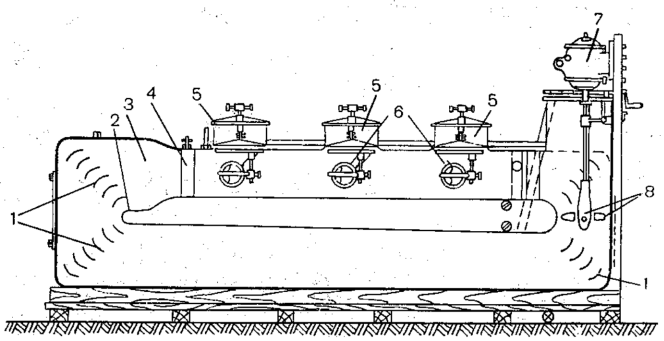


Рис. 11.23. Схема лотка Урываева.

1 — направляющие лопатки; *2* — горизонтальная перегородка; *3* — лоток; *4* — решетка; *5* — люк; *6* — смотровое окно; *7* — электродвигатель; *8* — гребной винт.

Тарирование методом сравнения производится также в лотке системы В. А. Урываева (рис. 11.23), в котором вода циркулирует по замкнутому трубопроводу. Для обеспечения равномерного движения воды в рабочей, верхней части лотка в нем устроены направляющие лопатки и решетки. Тарируемые и образцовые вертушки устанавливаются в рабочей части лотка через герметично закрываемые люки. Сигналы вертушек записываются на хронографе. Для более точного определения начальных скоростей вертушек в воду пускается краска; наблюдая в смотровое окно, можно при встрече красочного облачка с лопастным винтом легко заметить его первые подвижки.

К недостаткам лотка Урываева следует отнести то, что результаты тарирования зависят от расположения тарируемой вертушки относительно образцовой (слева или справа).

Обработка результатов тарирования вертушек может производиться графическим и аналитическим способами.

Данные тарирования представляют собой таблицу парных значений скоростей и соответствующих чисел оборотов лопастного винта в секунду.

В настоящее время у нас применяется преимущественно графический способ ввиду его простоты и наглядности. Он за-

ключается в том, что по данным тарировочной таблицы вычерчивается кривая $u=f(n)$. На оси абсцисс откладывают число оборотов в секунду, а по оси ординат — соответствующие скорости в м/с. Нижняя ее часть, соответствующая малым скоростям, вычерчивается дополнительно в более крупном масштабе (рис. 11.24). При тщательном тарировании и исправной вертушке точки ложатся очень правильно и по ним без затруднений проводится линия. Разброс точек может получиться или

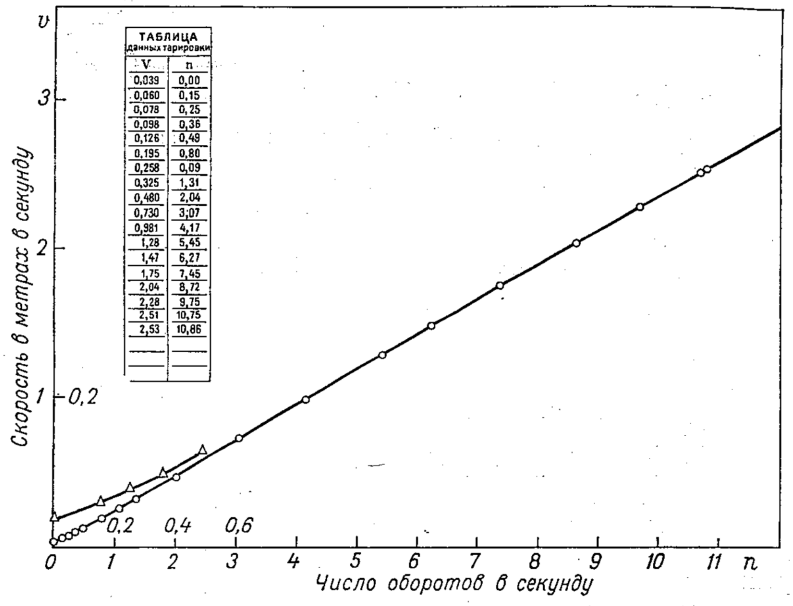


Рис. 11.24. Тарировочная кривая вертушки.

в результате недостатков тарирования, или при неисправности вертушки; такие данные бракуются.

Аналитический способ обработки заключается в подборе уравнений тарировочной кривой. Как было сказано ранее, тарировочная кривая разделяется на криволинейный и прямолинейный участки. Криволинейный участок аналитически описывается уравнением (11.3)

$$u = an + \sqrt{bn^2 + u_0^2},$$

где a и b — параметры, определяемые по формулам (11.5) и (11.6); u_0 — начальная скорость вертушки по данным тарирования.

Прямолинейный участок выражается уравнением прямой (11.4), проходящей через начало координат,

$$u = kn,$$

где k — гидравлический шаг лопастного винта; n — число оборотов в секунду.

Подбор уравнений начинают с определения коэффициента β по формуле (11.7). По найденному значению β можно определить критическую скорость,

соответствующую переходу криволинейного участка кривой в прямолинейный; для этого пользуются эмпирической формулой Г. В. Железнякова

$$u_к = 7{,}1\frac{u_0}{\sqrt{\beta}}. \qquad (11.15)$$

Зная $u_к$, можно по тарировочной таблице отобрать значения скоростей, бóльших $u_к$, относящиеся к прямолинейному участку, и соответствующее им значение числа оборотов в секунду. По этим данным определяют гидравлический шаг по формуле

$$k = \frac{\sum u}{\sum n}, \qquad (11.16)$$

где Σu — сумма значений скоростей, бóльших $u_к$; Σn — сумма значений числа оборотов при $u > u_к$.

Находят уравнение прямолинейного участка, подставляя полученное значение k в уравнение $u = kn$.

Для нахождения уравнения криволинейного участка определяют значения входящих в него параметров a и b по приведенным ранее формулам. Сделать это не трудно, так как входящие в них значения k и β известны.

Заметим, что гидравлический шаг равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка тарировочной кривой к оси абсцисс.

Тарировочная кривая является официальным документом вертушки. Для практических целей, например при измерении скоростей в полевых условиях, составляют специальную таблицу для определения скоростей по числу оборотов в секунду (табл. 11.2). Это удобно в работе и способствует сохранению тарировочной кривой. Таблица составляется на основе тарировочной кривой: основные значения берут непосредственно с кривой, а промежуточные значения определяют путем прямолинейной интерполяции. Таблица весьма проста. Например, если измеренное число оборотов лопастного винта в секунду $n = 0{,}35$, то скорость течения $u = 0{,}102$ м/с.

Таблица 11.2

Число об/с	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,065	0,067	0,069	0,072	0,074	0,076	0,078	0,080	0,083	0,085
0,3	0,087	0,090	0,093	0,096	0,099	0,102	0,104	0,107	0,110	0,113
и т. д										

Основные указания по уходу за вертушками. Гидрометрические вертушки являются точными измерительными приборами и требуют внимательного ухода.

По окончании измерений вертушку и принадлежности к ней следует протереть сухой тряпкой и уложить в ящик. Укладывать надо так, чтобы все детали и принадлежности вошли точно в свои места и крышка могла закрываться свободно, без дополнительного нажима.

В помещении вертушку надо просушить, корпус и стабилизатор смазать тонким слоем масла. Ходовую часть разобрать, кроме подшипников, и все части промыть бензином. При необходимости наружные поверхности прочищают зубной щеткой, а внутренние — щетинным ершом. Контактный механизм следует промывать очень осторожно, без крайней необходимости не трогать контактных пружин. При разборке следует обратить внимание на состояние шариков и обойм подшипников; при обнаружении на них заметных раковин ржавчины вертушку необходимо отправить в ремонт и на тарирование. После прочистки ходовую часть собирают, при этом в полость лопастного винта наливают трансформаторное масло. Если будут обнаружены существенные неисправности, например погнутость лопастного винта, неполадки в контактном механизме или другие дефекты, то вертушку отправляют в ремонт и на тарирование.

При работе зимой вертушка при извлечении ее из воды может обледенеть, что прекратит ее работу. В этом случае нельзя скалывать с вертушки лед, а следует погрузить вертушку в горячую воду или же опустить ее в реку и выждать, пока обледенение не исчезнет.

Внимательный уход требуется за всеми принадлежностями к вертушке, а также за оборудованием. Штанги, трос, трущиеся части лебедок, грузы, карабины следует очищать от грязи и ржавчины и смазывать маслом. Хранить вертушку и принадлежности к ней надо в сухом, проветриваемом месте.

Перед измерением расхода воды при малых, до 0,5 м/с, скоростях течения вертушку рекомендуется дополнительно испытать на постоянство трения в ходовой части. Трение может изменяться при ухудшении состояния оси и подшипников, появлении ржавчины, неправильной сборке. При этом трение может значительно увеличиться, и показания вертушки будут неверными, особенно при малых скоростях.

Испытание проводят методом выбега. Вертушку закрепляют на штанге на высоте 1,1 м над полом; на зажимную муфту навивают в один ряд нить длиной 1 м с прикрепленным на конце грузиком массой 100 г. Начало нити прижимают к муфте вторым витком. Когда вся нить до грузика будет навита на муфту, грузик отпускают, и в момент, когда вся нить сойдет с муфты, а грузик упадет на пол, пускают секундомер. Лопастный винт будет свободно вращаться. В момент прекращения его вращения останавливают секундомер и записывают продолжительность вращения винта в секундах. Испытания проводят дважды. Разность продолжительности вращения должна быть не более 20%. При бóльшей разнице вертушку надо разобрать и тщательно проверить, прочистить, вновь собрать, затем повторить испытание.

Полученную продолжительность свободного вращения винта (меньшую из двух) сравнивают со временем t_0, например:

$$\frac{t_0}{t} = \frac{25}{18} = 1{,}4,$$

где t_0 — продолжительность свободного вращения лопастного винта, определенная сразу после тарирования; t — продолжительность свободного вращения по испытаниям.

При уменьшении продолжительности свободного вращения более чем в 2,5 раза не допускается измерять скорости менее 0,5 м/с.

11.3. Поплавки

При определении скорости поплавком допускается, что скорость движения последнего равна скорости течения воды в месте нахождения поплавка. Такое допущение значительно упрощает

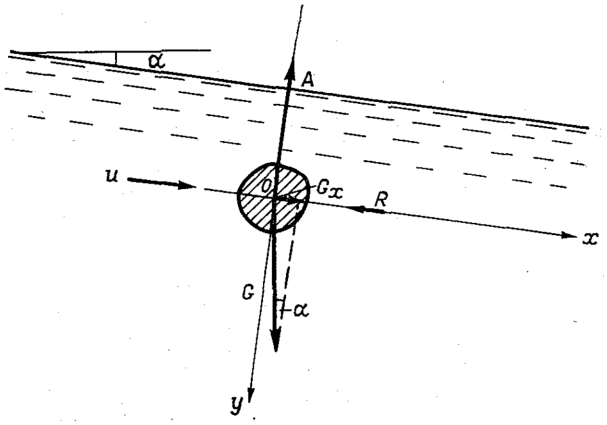


Рис. 11.25. Схема сил, действующих на плывущее тело.

определение скорости, хотя установлено экспериментально и теоретически, что тело, плывущее по течению, движется быстрее окружающих его частиц воды. Этот факт был отмечен еще Дюбуа в 1786 г.[1]

Причиной обгона является наличие неуравновешенной проекции веса тела на ось движения. Рассмотрим силы, действующие на плывущее в воде в состоянии безразличного равновесия тело (рис. 11.25). Проведем прямоугольную систему координат, расположив начало координат в центре тяжести тела, а ось абсцисс направим вниз по течению параллельно поверхности

[1] Du Buat. "Principes d'hydraulique".

воды. Архимедова подъемная сила действует перпендикулярно водной поверхности; ее проекция на ось движения равна нулю. Сила тяжести направлена вертикально вниз. Вес тела равен

$$G=\gamma V, \tag{11.17}$$

где γ — удельный вес; V — объем тела.

Проекция веса тела на ось движения

$$G_x=\gamma V \sin\alpha, \tag{11.18}$$

где α — угол наклона водной поверхности к горизонту; $\sin\alpha=I$ — уклон водной поверхности.

Сила G_x, т. е. проекция веса плывущего тела на ось движения, и вызывает ускорение плывущего тела. Под ее воздействием тело двигалось бы все время с ускорением, если бы не существовало сопротивление воды R.

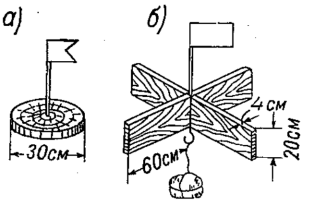


Рис. 11.26. Поверхностные поплавки.

Опущенное в поток тело не приобретает сразу скорость, равную скорости движения воды. В течение некоторого времени скорость тела возрастает от нуля до скорости, равной скорости окружающих частиц воды. Далее тело начинает обгонять их, пока сила сопротивления воды не уравновесит движущую силу. После этого движение тела продолжается со скоростью, превышающей скорость потока. Превышение скорости плывущего тела над скоростью потока зависит от веса, формы тела и уклона водной поверхности. Чем тяжелее плывущее тело, чем меньше площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную оси движения (мидель), чем более обтекаема форма тела и больше уклон водной поверхности, тем больше величина обгона. Для больших и тяжелых тел величина обгона получается довольно большая. Например, еще В. М. Лохтин наблюдал, что сплавные суда на р. Чусовой двигались со скоростью, на 20—30% превосходящей скорость текущей воды. По опытам в лотке получалось, что обгон бревна при уклоне 0,0014 достигал 40% по сравнению со средней скоростью воды.

Размеры обычно применяемых поплавков незначительны, вследствие чего ошибки из-за указанного превышения скорости малы, как правило, в пределах точности измерений. Однако из сказанного выше следует сделать вывод, что размеры поплавков для гидрометрических измерений должны быть по возможности меньшими. Если на больших реках приходится делать сравнительно большие поплавки, то им следует придавать плохо обтекаемую форму, например в виде крестовин из досок (рис. 11.26).

В речной гидрометрии применяются преимущественно поверхностные поплавки, но в отдельных случаях применяют также глубинные поплавки и поплавки-интеграторы. Последние применяют в настоящее время при измерениях расхода воды с самолета. Существуют еще двойные поплавки, которые применяются в основном для изучения течений на морях, а также на озерах и водохранилищах; о них будет сказано в разделе VIII. Ранее применялся еще один вид поплавков — гидрометрические шесты; в настоящее время они почти вышли из употребления.

Широко применяются различного рода поплавки при проведении научных исследований как в натурных, так и особенно в лабораторных условиях. Иногда в качестве поплавков используют жидкий индикатор — раствор краски или радиоактивный изотоп.

Поверхностные поплавки применяются для измерения скоростей и направлений течений на поверхности. Эти поплавки изготовляют обычно из дерева. Для рек шириной до 100 м можно делать поплавки в виде кружков, отпиленных от сухого бревна (рис. 11.26 *а*); толщина их 3—5 см, диаметр 15—25 см. Для рек шириной 100—300 м поплавки изготовляют в виде крестовин из досок (рис. 11.26 *б*); для лучшей видимости их иногда снабжают флажком, а для устойчивости снизу подвешивают грузик.

К недостаткам поверхностных поплавков следует отнести ограниченность их применения в ветреную погоду, особенно при небольших скоростях течения, менее 0,5 м/с. При ветре скоростью более 6 м/с применять поверхностные поплавки не рекомендуется.

Следует учитывать некоторые особенности работы с поплавками:

1) при подъеме уровня воды в реке наблюдается отклонение траекторий движения поплавков от середины потока к берегам (при спаде явление обратное); в этом случае возможна ошибка в определении длины пути поплавка, если она определена как расстояние между створами, тогда как она больше этого расстояния;

2) при измерении скоростей поплавками полученная в каждом случае скорость течения есть средняя скорость на траектории поплавка; эта скорость принимается за местную скорость в точке пересечения линии створа и траектории поплавка. Действительная местная скорость в этой точке может отличаться от измеренной поплавком.

Глубинные поплавки применяются для измерения скорости и направления течения на некоторой глубине. Глубинный поплавок состоит из двух связанных нитью или тросом поплавков, из которых верхний находится на поверхности воды, а нижний — на заданной глубине. Верхний поплавок делается намного меньше нижнего (глубинного) и является только указателем,

поэтому скорость движения всей системы приблизительно равна скорости течения на той глубине, на которую погружен нижний поплавок.

На рис. 11.27 показаны типы глубинных поплавков, применяемые для измерения малых скоростей течения, менее 0,15 м/с, которые недостаточно точно могут быть измерены гидрометрической вертушкой. Нижний поплавок опускается на глубину, где требуется измерить скорость, а верхний оставляется на поверхности в качестве указателя. Такие поплавки употребляются при измерении расходов воды, а также для определения границ мертвого пространства. Верхний поплавок делают из пробки или поролона, а нижний — из проваренного в олифе деревянного шарика диаметром 4—5 см, стеклянного пузырька, частично заполненного водой, или из двух пластмассовых пластинок, соединенных накрест.

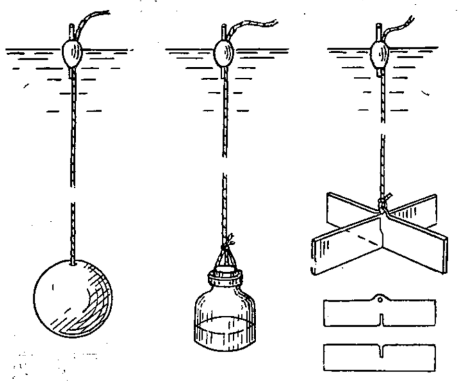


Рис. 11.27. Типы глубинных поплавков.

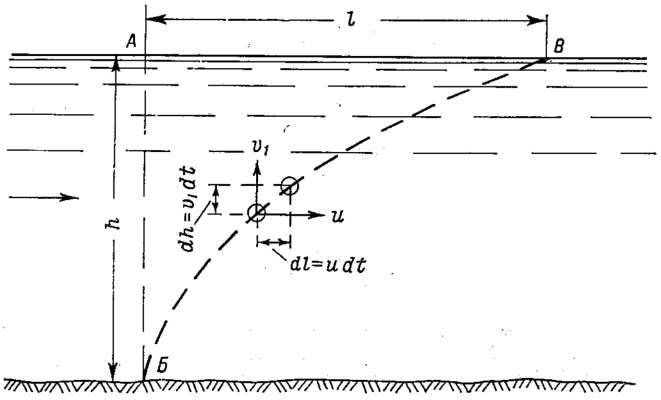


Рис. 11.28. Схема всплытия поплавка-интегратора.

Поплавки-интеграторы применяются для определения средней скорости течения на вертикали. Поплавок погружают на дно, затем в определенный момент выпускают, и он начинает всплывать. Подъем поплавка-интегратора со дна на поверхность происходит под действием силы Архимеда. Под действием скорости течения поплавок сносится вниз по течению. Рассматривая перемещение поплавка при всплытии (рис. 11.28) за

время dt, можем написать:

$$dl = u\,dt, \tag{11.19}$$

$$dh = v_1\,dt, \tag{11.20}$$

где l — расстояние от вертикали до точки всплытия поплавка; u — местная скорость течения (переменная по глубине); v_1 — скорость вертикального подъема поплавка; приближенно принимаем ее за постоянную; h — глубина вертикали.

Из приведенных формул получаем:

$$l = \int_0^t u\,dt, \tag{11.21}$$

$$h = v_1 t. \tag{11.22}$$

Принимая во внимание, что $dt = \frac{dh}{v_1}$, получим

$$l = \int_0^h \frac{u}{v_1}\,dh. \tag{11.23}$$

Выражение $\int_0^h u dh$ определяет собой, как известно, площадь эпюры скоростей течения на вертикали, поэтому можно написать

$$\int_0^h u\,dh = v_в h, \tag{11.24}$$

где $v_в$ — средняя скорость течения на вертикали; тогда получим

$$l = \frac{1}{v_1} v_в h, \tag{11.25}$$

откуда

$$v_в = \frac{v_1}{h} l. \tag{11.26}$$

Из последней формулы видно, что для определения средней скорости на вертикали требуется измерить глубину вертикали h и расстояние l от вертикали до точки всплытия поплавка.

Скорость вертикального подъема поплавка v_1 должна быть определена предварительно для каждого поплавка путем испытаний в стоячей воде. Следует иметь в виду, что в турбулентных потоках из-за наличия восходящих и нисходящих токов величина v_1 не является строго постоянной, как это имеет место в неподвижной воде или ламинарном потоке. Поэтому зависимость (11.26) надо рассматривать как приближенную.

В качестве поплавков-интеграторов применяют деревянные, пластмассовые или другие легкие шарики, а иногда масляные капли, например при измерении расхода воды с самолета.

Гидрометрические шесты дают возможность определять среднюю скорость по глубине на некотором участке потока. Шест, пригруженный на одном конце, пускается по течению так, чтобы он плыл с небольшим наклоном, почти вертикально, нижним концом как можно ближе ко дну, не касаясь последнего. Гидрометрический шест позволяет определять среднюю по вертикали скорость течения по линии его движения при условии, что длина его подводной части составляет $0{,}94h$ (h — глубина вертикали). При меньшей длине шеста скорость получается завышенной.

Применение гидрометрических шестов ограничено тем, что сравнительно редко встречаются реки с достаточно ровным дном.

Применение радиоактивного индикатора для измерения скоростей течения. Этот способ основан на том же принципе, что и измерения поплавками: скорость определяется по времени прохождения раствором индикатора расстояния от места выпуска до места расположения датчика, регистрирующего присутствие индикатора. В качестве поплавка здесь используется облако раствора индикатора.

Данный способ применяется преимущественно для измерений малых скоростей течения, а также для измерений в потоках, имеющих очень малые размеры, т. е. в условиях, в которых вертушечные измерения невозможны. Этим способом можно измерить скорости движения: талой воды по склону при снеготаянии, воды в почвах и грунтах и др.

Поплавочные измерения в настоящее время широко применяются в лабораторных исследованиях: при изучении скоростного поля потоков, различных гидравлических явлений, гидротехнических сооружений и т. д. Эти исследования проводят в гидрологических лотках со стеклянными стенками, что позволяет вести наблюдения за пущенными в воду поплавками как на поверхности, так и в толще его.

В качестве поплавков применяют обычно шарики из эмульсии с удельным весом, равным удельному весу воды. Выпуск шариков производят с помощью специальной трубки; каждый шарик выпускается в той точке потока, где это необходимо. Движение шарика в потоке точно воспроизводит траекторию соответствующей струйки. Кроме эмульсионных шариков, применяют шарики из пластических веществ с удельным весом, равным удельному весу воды.

Движение шариков регистрируют с помощью фото- или киносъемки. Обработка полученных снимков или кинограмм дает возможность определить скорость движения воды на различных участках и направление траекторий струй.

11.4. Гидрометрические трубки

Измерение скорости течения гидрометрическими трубками основано на определении высоты скоростного напора. Для определения зависимости между местной скоростью течения и высотой скоростного напора применим уравнение Д. Бернулли к струйке воды AB (рис. 11.29)

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{u_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{u_2^2}{2g}, \qquad (11.27)$$

где $z_1=z_2$ — высота положения, одинаковая для обеих точек, поэтому ее в дальнейшем не учитываем; p_1 — давление в точке A;

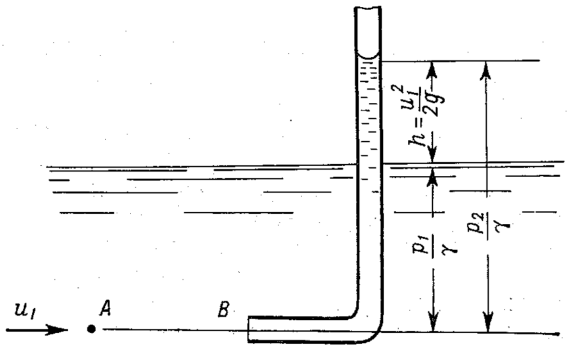


Рис. 11.29. Схема гидрометрической трубки.

p_2 — давление в точке B; u_1 — местная скорость в точке A; $u_2=0$ — скорость в точке B; γ — удельный вес воды.

Из уравнения (11.27) получаем высоту скоростного напора

$$\frac{p_2-p_1}{\gamma}=\frac{u_1^2}{2g}=h, \qquad (11.28)$$

откуда получаем формулу для определения местной скорости

$$u_1=\sqrt{2gh}. \qquad (11.29)$$

Приведенный вывод справедлив для идеальной жидкости. Для реальной жидкости — воды — при турбулентном движении скоростной напор получается несколько меньшим. Кроме того, оказывает влияние форма приемной части трубки. Для учета этих факторов вводится поправочный коэффициент, который определяется путем тарирования. Тогда уравнение (11.29) будет иметь вид

$$u=\varphi\sqrt{2gh}. \qquad (11.30)$$

Для применяемых в настоящее время трубок с плавным очертанием приемной части значение поправочного коэффициента φ близко к единице.

Из формулы (11.30) видно, что для определения скорости течения требуется измерить высоту скоростного напора, т. е. высоту поднятия уровня в трубке над уровнем воды в потоке.

Приемная часть трубки (рис. 11.30) имеет динамическое отверстие, направленное навстречу скоростному вектору, и статические отверстия, направленные перпендикулярно скоростному вектору; они делаются на боковой поверхности приемной части трубки. В некоторых трубках, например

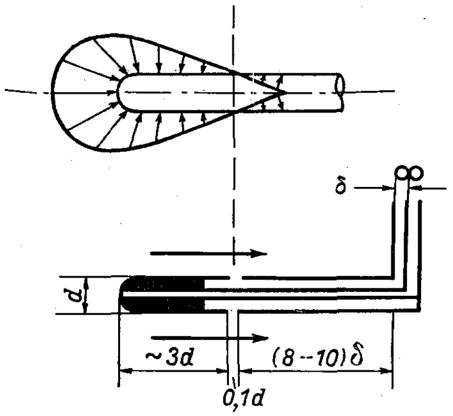
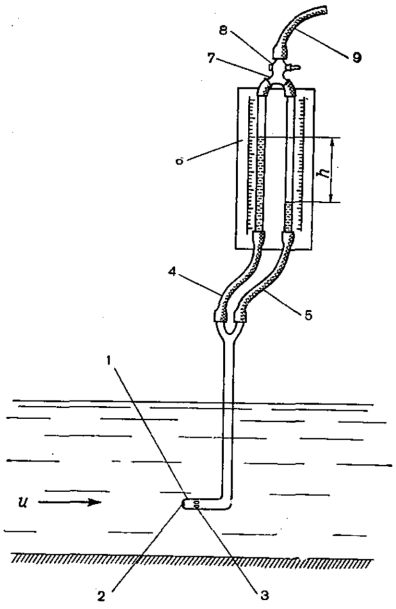


Рис. 11.30. Схема приемной части гидрометрической трубки и эпюра гидродинамического давления.

в трубке Прандтля, статические отверстия заменены кольцевой щелью. Статические отверстия располагаются на таком расстоянии от носка трубки, где гидродинамическое давление на поверхность трубки равно нулю, поэтому вода в эти отверстия попадает под действием только гидростатического давления. Для ослабления влияния пульсации скорости диаметр динамического отверстия принимается 0,5—1,0 мм.



Вертикальная часть трубки имеет два канала, один из которых сообщается с динамическим отверстием *2* приемной трубки *1*, другой — со статическими отверстиями *3* (рис. 11.31). В первом из них уровень воды поднимается выше, чем во втором, на высоту скоростного напора. Для удобства отсчетов уровни воды в обеих трубках поднимаются вверх с помощью насоса. Для этого к ним подсоединяют резиновые шланги *4* и *5*, посредством которых соединяют их со стеклянными трубками

Рис. 11.31. Схема устройства для измерения скорости гидрометрической трубкой.

манометра *6*, в верхней части которого имеется тройник *7*. Тройник соединяется шлангом *9* с воздушным насосом, при помощи которого из манометра откачивается воздух. При этом уровни в обеих трубках поднимаются. Когда они достигнут такой высоты, при которой удобно делать отсчет по шкале манометра, откачку воздуха прекращают и в тройнике закрывают кран *8*; первоначальная разность уровней при этом остается неизменной. Манометр снабжается шкалой, указателем и верньером.

Обычная гидрометрическая трубка не позволяет измерять скорости менее 0,2 м/с, так как при меньших скоростях разность уровней очень мала. Имеется ряд способов повышения чувствительности трубок: 1) применение специальных мерных жидкостей в манометре (эфир, бензол и др.), имеющих плотность меньше плотности воды, благодаря чему увеличивается разность уровней в трубках; при этом оказывается возможным измерять скорости до 0,1 м/с; 2) применение наклонных трубок, по которым производится отсчет, а также другие способы.

Гидрометрические трубки широко используются для измерения скоростей течения при научных исследованиях, главным образом в лабораторных условиях. Для этой цели имеется большое число различных конструкций трубок со всевозможными усовершенствованиями для установки трубки в потоке, удобства отсчетов и т. д.

При полевых гидрометрических работах трубки в настоящее время не применяются, хотя ранее были созданы образцы трубок для полевых условий. Непопулярность трубок для полевых работ объясняется их непортативностью, сложностью установки в потоке, невозможностью использования в реках с большим количеством наносов и в зимних условиях.

11.5. Определение скорости течения путем регистрации силового воздействия потока на тело

Между скоростью течения и давлением, оказываемым потоком на находящееся в нем тело, существует зависимость

$$R = C_x \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \omega, \qquad (11.31)$$

где R — сила давления потока на тело; C_x — коэффициент сопротивления, значение которого зависит от формы тела и числа Рейнольдса (Re); ρ — плотность воды; u — скорость течения; ω — площадь проекции тела на плоскость, нормальную направлению скорости (мидель).

Из приведенной формулы определяется скорость

$$u = \sqrt{\frac{2R}{C_x \rho \omega}}. \qquad (11.32)$$

Таким образом, измерив давление потока на тело, можно определить и скорость течения.

В приведенной формуле величина ω известна. Коэффициент C_x, как уже отмечалось, зависит от формы тела и числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re}=\frac{ud}{\nu}, \qquad (11.33)$$

где u — скорость течения; d — линейный размер, характерный для условий обтекания, например: для шара — диаметр и т. п.; ν — кинематический коэффициент вязкости воды, зависящий от температуры воды.

Для различных тел, которые могут быть употреблены в качестве приемников давления, как-то: шар, плоская пластинка в виде диска и др., зависимость $C_x=f(\mathrm{Re})$ хорошо изучена; эти данные имеются в справочниках.

Наиболее простым прибором, основанным на рассматриваемом принципе, является гидрометрический флюгер, рабочим органом которого, воспринимающим давление потока, является плоская пластинка. Скорость течения определяется в зависимости от отклонения пластинки. Эта зависимость получается путем тарирования. Пластинка флюгера воспринимает пульсации скорости течения, поэтому отдельное измерение дает мгновенную скорость. Для получения достаточного осреднения во времени необходимо брать несколько отсчетов и определять среднее значение. Но чаще всего теперь показания флюгера записывают на осциллографе, на ленте которого получается непрерывная линия пульсации, по которой можно путем обработки получить мгновенные скорости, необходимые характеристики пульсации и местные скорости с требуемым периодом осреднения. Гидрометрический флюгер находит применение главным образом при проведении научных исследований в лабораторных установках, хотя были, и в свое время применялись, образцы флюгера для полевых измерений (так называемый гидроспидометр).

В настоящее время большое распространение имеют приборы для измерения скоростей течения, в которых давление потока на чувствительный элемент — приемник давления — определяется электрическими методами. Такие приборы применяются главным образом в лабораторной гидрометрии, но имеются образцы подобных приборов для измерений в натурных условиях, правда, они предназначены для научных исследований, а не для производственных целей.

Схема измерителя скорости, основанного на рассмотренном принципе, состоит из следующих основных элементов:

1) приемника давления, который вводится в поток и располагается в требуемой точке. В качестве приемника давления чаще всего применяют шар или диск; последний часто оказывается лучше, так как зависимость коэффициента C_x от числа

Рейнольдса для диска выражается прямой линией, в то время как для шара эта зависимость более сложная;

2) датчика, преобразующего измеряемую величину в электрическую; применяют датчики разных типов: тензометрические, индуктивные и др.;

3) усилителя, служащего для усиления слабого напряжения электрического тока, снимаемого с датчика;

4) осциллографа, служащего для регистрации показаний датчика в виде записи на бумажной ленте или кинопленке;

5) источников питания электрической цепи.

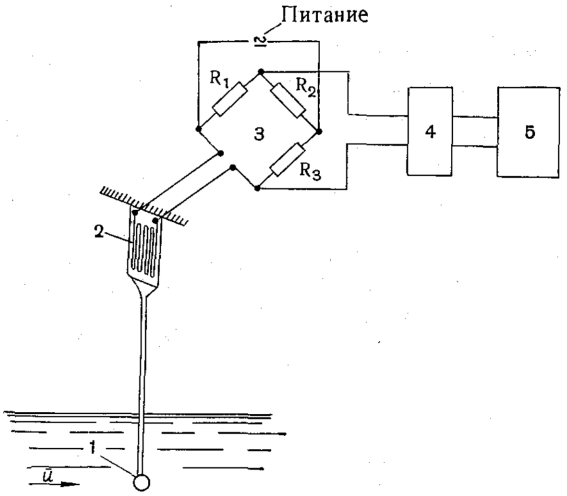


Рис. 11.32. Схема измерения скорости течения с применением тензометрического датчика.

На рис. 11.32 показана принципиальная схема измерения скорости течения рассматриваемым методом. Приемник давления *1*, имеющий вид шара или диска, вводится в требуемую точку потока; тонкий стержень соединяет приемник давления с упругим элементом — пластинкой *2*, жестко заделанной вверху. Для исключения давления на стержень он закрывается обтекателем, не показанным на схеме. Давление потока на шар передается упругому элементу: чем больше скорость, тем больше деформация пластинки. На пластинку наклеивается тензометрический датчик[1], состоящий из нескольких витков проволоки диаметром 0,02—0,03 мм, помещенных между тонкими слоями бумаги. Сопротивление такого датчика обычно порядка 200 Ом. При изгибе пластинки проволочки датчика деформируются — растягиваются или сжимаются, в результате чего изменяется

[1] Тензометр — прибор для измерения деформации элемента, воспринимающего воздействие какой-либо силы.

электрическое сопротивление датчика, что вызывает разбаланс измерительного моста Уитстона *3*. Далее сигнал поступает в усилитель *4*, а затем на осциллограф *5*, где осуществляется запись процесса.

Все подобные приборы требуют предварительной тарировки.

11.6. Измерение скоростей течения приборами, основанными на принципе теплообмена

Между телом, введенным в поток, и водной средой устанавливается теплообмен, интенсивность которого зависит от скорости течения; эта зависимость положена в основу действия рассматриваемых приборов.

Впервые эта зависимость была использована для прибора, измеряющего скорость ветра (термоанемометр Кинга, 1913 г.). Затем принцип теплообмена был использован для измерения скорости течения воды. Рабочим органом употребляемого для этой цели прибора — термогидрометра — была тонкая платиновая проволока, по которой пропускался электрический ток, нагревающий проволоку. В потоке проволока охлаждается в зависимости от скорости течения, вследствие чего изменяется ее сопротивление электрическому току. Измеритель скорости

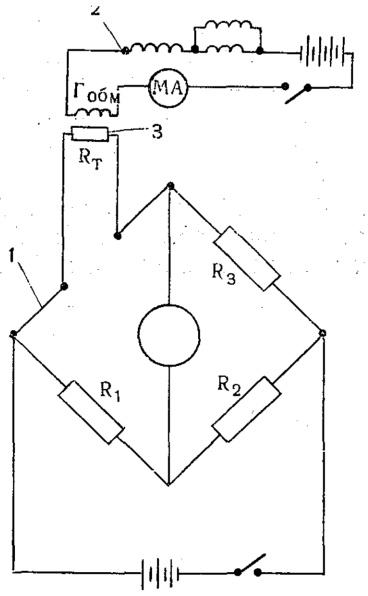


Рис. 11.33. Схема измерителя скорости течения с полупроводниковым термосопротивлением.

присоединяется к одному из плеч измерительного моста, в диагональ которого включается регистрирующий прибор; по нему определяется скорость течения. Прибор предварительно должен тарироваться.

Описанная схема термогидрометра теперь не применяется ввиду существенных недостатков: платиновая проволока требует частой тарировки, обладает недостаточной механической прочностью.

В современных термогидрометрах вместо проволоки применяется, например, платиновая пленка, наносимая в виде очень тонкого слоя платины на стеклянное или кварцевое основание в виде клина. Такой клиновой пленочный зонд, как его называют, отличается большой механической прочностью и лучшими характеристиками при измерении скоростей по сравнению с платино-

вой проволокой. Электрическая схема прибора значительно усовершенствована, в частности применяется автоматическая стабилизация температуры датчика. В таком виде термогидрометр позволяет производить точные измерения скорости. Обладая малой инерцией, он дает возможность изучать пульсацию скоростей с большой разрешающей способностью. Начальная скорость прибора 1—2 мм/с.

Другой разновидностью прибора, основанного на рассматриваемом принципе, являются датчики с полупроводниковыми термосопротивлениями. Датчики состоят из термосопротивления и подогревателя. Электрическая схема состоит из двух самостоятельных цепей: измерительной *1* и подогревной *2* (рис. 11.33). Термосопротивление *3* включается в одно из плеч измерительного моста. Подогревная цепь предназначена для создания температурного перепада между поверхностью датчика и потоком.

Описанные выше датчики применяются в основном в лабораторных условиях. В натурных условиях их используют только при проведении научных исследований.

11.7. Определение скоростей течения по объему воды, вошедшей в прибор, и продолжительности наблюдения

Сущность метода заключается в том, что измеряется время заполнения движущейся водой некоторого объема внутри введенного в поток прибора; объем вошедшей воды также измеряется. Приборы, используемые при таких измерениях, требуют предварительной тарировки, в результате которой получают зависимость между скоростью течения и объемом воды, вошедшей в прибор в единицу времени.

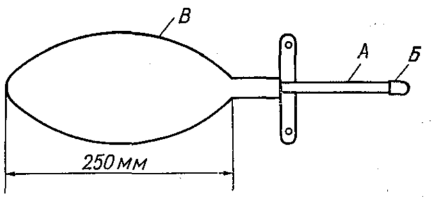


Рис. 11.34. Батометр-тахиметр.
А — трубка, *Б* — наконечник, *В* — баллон.

Наиболее известным прибором является батометр-тахиметр В. Г. Глушкова (рис. 11.34), состоящий из плоско складывающегося резинового баллона и металлической трубки. При измерении скорости прибор устанавливается в точке

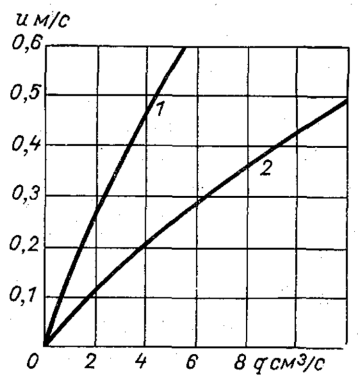


Рис. 11.35. Тарировочная характеристика батометра-тахиметра.
1 — с наконечником; *2* — без наконечника.

наблюдения на штанге сначала трубкой по течению, а в момент включения секундомера поворачивается трубкой навстречу потоку. Выждав время, достаточное для наполнения баллона прибора на $^1/_4$—$^3/_4$ его объема, батометр поворачивают трубкой по течению, останавливают секундомер и вынимают прибор из воды. Измеряют объем вошедшей воды, полученную величину делят на время выдержки. По полученному объему воды, вошедшей в секунду, пользуясь тарировочной кривой (рис. 11.35), определяют скорость течения. Батометр-тахиметр одновременно может использоваться для взятия проб воды на мутность.

11.8. Измерение скоростей течения ультразвуковым методом

Скорость течения может быть определена по разности времени распространения ультразвуковой волны по течению и против течения на участке потока определенной длины l. Для этого в потоке создают два звуковых канала. По первому из них ультразвуковая волна распространяется по течению, по второму — против течения. В первом канале пьезоэлемент-излучатель И располагается в верхнем створе, а пьезоэлемент-приемник П — в нижнем. Во втором канале, наоборот, излучатель располагается в нижнем, а приемник в верхнем створе (рис. 11.36 *1*).

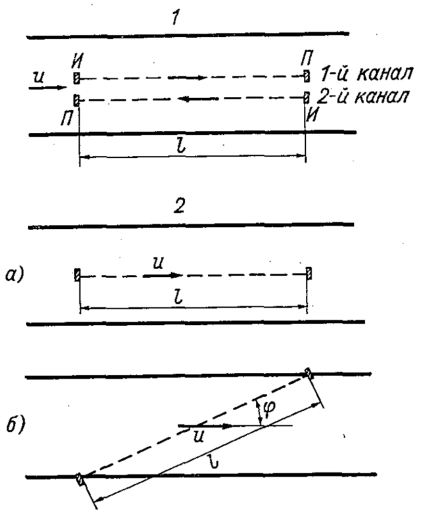


Рис. 11.36. Схемы расположения звуковых каналов.

1 — два звуковых канала; *2* — один звуковой канал; *а* — по направлению потока; *б* — под углом к потоку.

Но можно создать только один звуковой канал, при этом пьезоэлементы попеременно выполняют функции излучателя и приемника. В применяемых в настоящее время ультразвуковых измерителях скоростей и расходов жидкостей часто используется одноканальный способ. Звуковой канал может быть расположен в потоке по схеме *а* или *б* (рис. 11.36 *2*); в схеме *б* пьезоэлементы располагаются на противоположных берегах.

Время распространения ультразвуковой волны по схеме *а*: по течению:

$$t_1 = \frac{l}{c + u}, \qquad (11.34)$$

против течения

$$t_2 = \frac{l}{c - u}. \qquad (11.35)$$

Время распространения ультразвуковой волны по схеме *б*: по течению

$$t_1 = \frac{l}{c + u\cos\varphi}, \qquad (11.36)$$

против течения

$$t_2 = \frac{l}{c - u\cos\varphi}, \qquad (11.37)$$

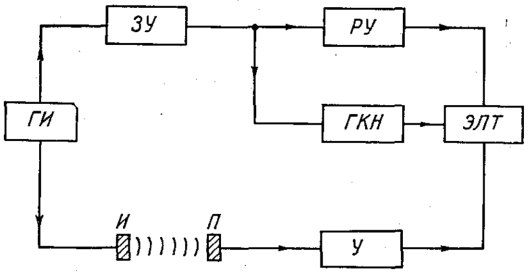


Рис. 11.37. Блок-схема осциллографического устройства для измерения импульсным методом времени распространения ультразвуковой волны.

где c — скорость распространения ультразвука в воде, берется из таблиц или графиков в зависимости от температуры и солености воды; u — скорость течения, средняя на длине l.

Из приведенных уравнений получаем формулы для определения скорости течения воды:

по схеме *а*

$$u = \frac{(t_2 - t_1)\,c}{t_1 + t_2}, \qquad (11.38)$$

по схеме *б*

$$u = \frac{(t_2 - t_1)\,c}{(t_1 + t_2)\cos\varphi}. \qquad (11.39)$$

Время t прохождения ультразвуковой волной расстояния l может быть определено импульсным, фазовым и другими методами. Рассмотрим в основных чертах импульсный метод.

На рис. 11.37 показана упрощенная схема осциллографического устройства для измерения импульсным методом времени распространения ультразвуковой волны. Генератор импульсов ГИ вырабатывает короткий импульс затухающих колебаний, возбуждающий пьезоэлемент И, который при этом излучает импульс ультразвуковых колебаний. За время t ультразвуковой импульс достигает приемного пьезоэлемента П, преобразуется

им в импульс высокочастотного напряжения и поступает в усилитель У. Усиленный импульс подается на вертикально отклоняющие пластины электроннолучевой трубки ЭЛТ. Одновременно с возбуждением излучателя импульсный генератор запускает задерживающее устройство ЗУ с регулируемым временем задержки $t_з$. Задним фронтом импульса задержки запускается развертывающее устройство РУ, вырабатывающее пилообразное напряжение (рис. 11.38) для отклонения по горизонтали луча электроннолучевой трубки, и генератор калибровочного напряжения ГКН высокой частоты. Для повышения точности отсчета длительность развертки выбирается малой, достаточной лишь для изображения двух-трех полупериодов переднего фронта принятого импульса.

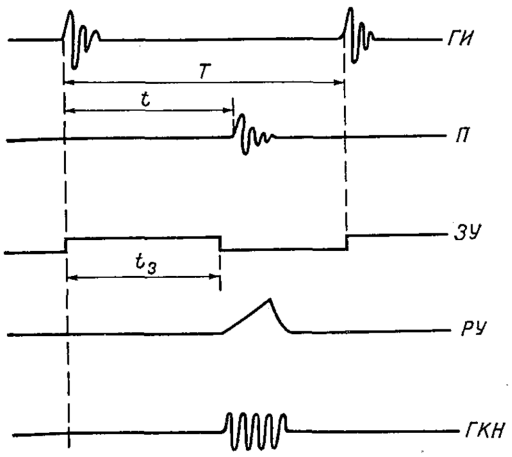


Рис. 11.38. Диаграмма импульсных сигналов в отдельных узлах осциллографического устройства.

Если калибровочное напряжение подвести к катоду электроннолучевой трубки, то оно будет управлять яркостью луча трубки, периодически усиливая яркость или гася ее.

Время распространения ультразвуковой волны определяется по формуле

$$t = t_з + \frac{n}{f_к}, \qquad (11.40)$$

где n — количество яркостных меток от начала развертки до первого полупериода импульса; $f_к$ — частота калибровочного напряжения.

Частота калибровочного напряжения выбирается обычно на порядок выше частоты ультразвукового импульса. Практически отсчет меток производится при помощи сетки на экране до десятых долей метки.

Точность измерения этим методом порядка 0,05—0,10% [8].

Опыты по применению ультразвука для измерения скоростей и расходов воды были проведены в гидрологической лаборатории МГУ. Скорости измерялись с помощью прибора УБ-1, схема и действие которого аналогичны описанным выше. Измерение скоростей производилось параллельно гидрометрической вертушкой ГР-11 с записью на хронографе. Отмечено хорошее соответствие значений скоростей, измеренных обоими методами.

Раздел V

Измерение расходов воды

Глава 12

Общие понятия о применяемых методах. Модель расхода

12.1. Методы определения расходов воды

Расходом воды называется объем ее, протекающий через поперечное сечение потока в единицу времени. Для крупных водотоков: рек, каналов, водосбросов гидротехнических сооружений и т. п.— расход выражается в кубических метрах в секунду ($м^3/с$); расходы малых водотоков: родников, ручьев, лабораторных лотков и пр.— в литрах в секунду (л/с).

Расход воды является одним из основных гидравлических элементов потока. Для рек расход воды — важнейшая характеристика, определяющая другие ее параметры, как, например, уровень воды, скорость течения, уклон водной поверхности и др. На основании систематических определений расходов воды вычисляют средние суточные расходы, максимальные и минимальные расходы, а также объемы стока реки за тот или иной интервал времени.

Существующие методы определения расхода воды можно разделить на две основные группы: непосредственное измерение и косвенное определение.

К первой группе относится так называемый объемный метод, основанный на измерении расхода посредством мерных сосудов, подставляемых под струю воды. При этом измеряется время наполнения мерного сосуда. Расход определяется делением объема воды в сосуде на время наполнения. Этот метод применяется обычно на малых водотоках — ручьях, родниках, лабораторных лотках и т. п. Объемный метод отличается относительно большой точностью.

Косвенное определение расхода воды может выполняться различными методами, общей характерной особенностью которых является то, что в них измеряется не сам расход (объем воды), а отдельные элементы потока, при этом расход получается путем вычислений. К таким методам относятся:

1) определение расхода по измеренным скоростям течения и площади поперечного сечения потока, сокращенно называемый методом «скорость—площадь»;

2) определение расхода с помощью мерных устройств: гидрометрических лотков, водосливов. В данном случае измеряемой величиной является напор на водосливе или во входной части лотка, при этом расход определяется по гидравлическим зависимостям;

3) определение расхода методом смешения; он имеет несколько разновидностей (электролитический, тепловой, колориметрический). В настоящее время применяется преимущественно электролитический метод, в котором расход воды определяется в зависимости от изменения электропроводности вводимого в поток раствора электролита при смешении его с водной средой.

Метод «скорость—площадь» наиболее распространен в речной гидрометрии. Площадь поперечного сечения потока определяется по результатам измерений глубин, а скорости в отдельных точках живого сечения измеряются чаще всего гидрометрической вертушкой; реже для измерения скоростей применяют другие приборы или поплавки. К данному методу следует также отнести расчетный способ определения расхода по площади живого сечения и средней скорости потока, вычисленной по формуле Шези. В дальнейшем мы главное внимание обратим на способы определения расхода с применением гидрометрических вертушек, наиболее распространенные в настоящее время в речной гидрометрии.

Метод определения расхода с помощью мерных устройств применяется чаще всего при измерении небольших расходов воды — на малых речках, ручьях, логах, оросительных каналах. Кроме того, этим методом пользуются для определения расходов воды через водопропускные отверстия гидротехнических сооружений с целью учета стока воды на гидроузлах.

Метод смешения применяется главным образом на горных реках с большими скоростями течения, небольшими глубинами и сложным рельефом дна, где метод «скорость—площадь» не обеспечивает достаточную точность измерения скоростей течения и площади живого сечения. Необходимым условием успешного применения этого метода является хорошо выраженный турбулентный режим движения воды, при котором обеспечивается хорошее перемешивание вводимого в поток раствора с водной средой.

12.2. Метод «скорость—площадь». Модель расхода

Сущность метода «скорость—площадь» заключается в определении объема модели расхода, т. е. водяного тела объемом, численно равным расходу воды через поперечное сечение потока.

Рассмотрим поперечное сечение потока (рис. 12.1). Скорости течения в различных точках сечения неодинаковы: наибольшие

скорости у поверхности в середине потока, а у берегов и дна они меньше. Соответственно этому различны и расходы воды через элементарные площадки в различных частях поперечного сечения. Скорости в различных точках могут иметь разные направления. Чтобы определить расход воды через элементарную площадку, необходимо площадь этой площадки умножить на скорость течения. Но поскольку вектор местной скорости может быть направлен под углом к нормали, то следует учитывать не сам вектор, а его проекцию на нормаль. Тогда расход воды через элементарную площадку можно выразить формулой

$$dQ = u \cos \alpha \, d\omega, \tag{12.1}$$

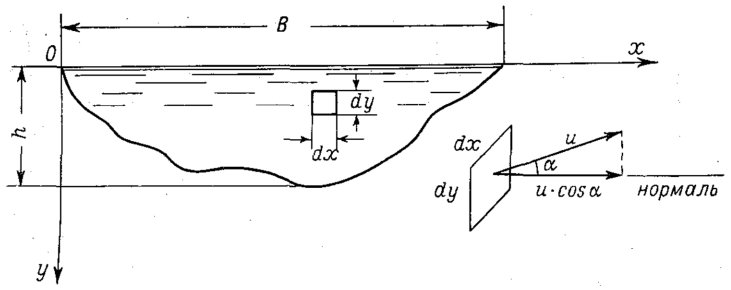


Рис. 12.1. Поперечное сечение потока.

u — скоростной вектор; $u \cos \alpha$ — проекция скоростного вектора на нормаль к площадке.

где u — скорость в пределах элементарной площадки; α — угол между направлением скорости и нормалью; $d\omega$ — площадь элементарной площадки.

Расход воды через всю площадь поперечного сечения потока будет

$$Q = \int_{\omega} u \cos \alpha \, d\omega = \int_{x=0}^{x=B} \int_{y=0}^{y=h} u \cos \alpha \, dx \, dy. \tag{12.2}$$

Если бы угол α сохранял свое значение для всех элементарных площадок, то предыдущее выражение можно было бы представить так:

$$Q = \cos \alpha \int_0^B \int_0^h u \, dx \, dy. \tag{12.3}$$

Если на всех элементарных площадках скоростной вектор направлен по нормали, т. е. $\alpha = 0$, то

$$Q = \int_0^B \int_0^h u \, dx \, dy = \int_{\omega} u \, d\omega. \tag{12.4}$$

Полученная формула выражает объем модели расхода воды, или водяного тела, вид которого показан на рис. 12.2. Это тело

ограничено сзади поперечным сечением потока, сверху — поверхностью, представляющей собой эпюру поверхностных скоростей течения, и снизу — криволинейной поверхностью, определяемой зависимостью $u=f(x, y)$.

Из сказанного видно, что определение расхода воды методом «скорость—площадь» сводится к определению указанного выше интеграла. Однако такой способ не применим ввиду того,

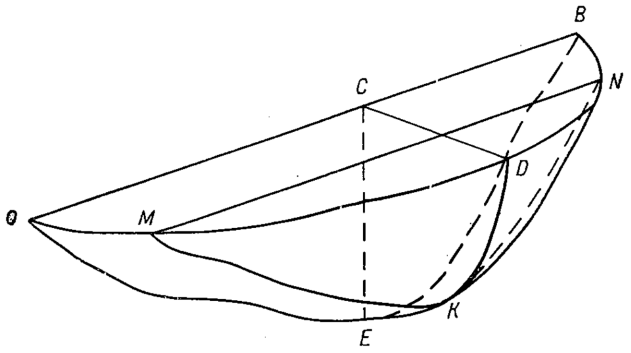


Рис. 12.2. Модель расхода.

OEB — живое сечение; *OMDNB* — эпюра поверхностных скоростей; *CDE* — эпюра скоростей на вертикали; *MKN* — изотаха.

что не известен вид функции $u=f(x, y)$. На практике при определении расхода поступают так: измеряют площадь поперечного сечения потока и скорости течения на вертикалях, затем производят вычисление расхода по приближенной формуле, в которой интегрирование заменяется суммированием. Способ вычисления расхода, основанный на применении формулы (12.4) с указанным выше упрощением, называется аналитическим.

Определить расход можно также следующими способами.

Во-первых, если известны расходы воды на вертикалях (в гидрометрии их принято называть элементарными расходами), то расход определится по формуле (рис. 12.3 *а*).

$$Q=\int_0^B q\,dx, \tag{12.5}$$

где q — элементарный расход, равный произведению средней скорости на вертикали и глубины вертикали, т. е. $q=v_в h$; B — ширина реки.

Во-вторых, если в сечении потока провести (на чертеже) изотахи (линии равных скоростей) и определить площади, заключенные между каждой изотахой и линией уровня воды, то объем модели расхода (рис. 12.3 *б*) будет равен

$$Q=\int_0^{u_{макс}} \omega_u\,du, \tag{12.6}$$

где ω_u — площадь, ограниченная изотахой со скоростью u и линией уровня воды; $u_{макс}$ — наибольшая скорость в сечении потока.

Объем модели расхода воды двумя последними способами определяется практически также путем измерения скоростей течения на вертикалях в возможно большем количестве точек с последующим вычислением расхода по двум последним формулам. Решение интеграла (12.5) выполняется графическим способом, решение же интеграла (12.6) — методом конечных

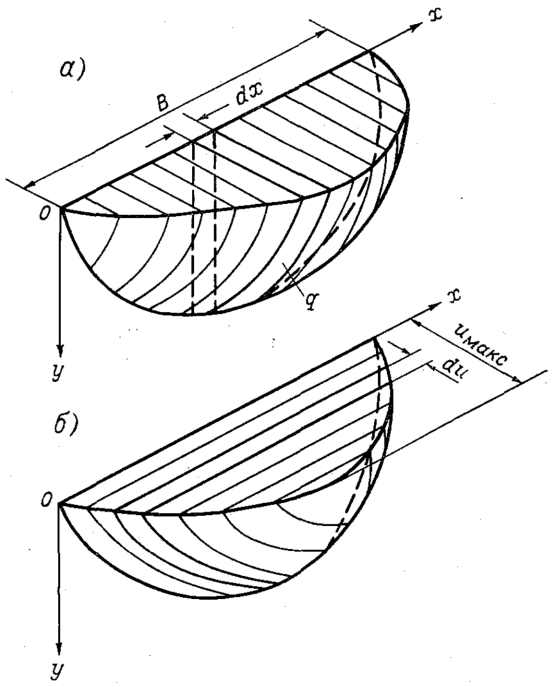


Рис. 12.3. Схема к вычислению расхода: а — по формуле (12.5), б — по формуле (12.6).

разностей. Вычисление расхода всеми тремя способами рассматривается ниже.

Остановимся на некоторых свойствах модели расхода.

Если модель расхода рассечь плоскостями, параллельными поверхности воды, то площади сечений будут представлять собой эпюры распределения скоростей течения по ширине реки на соответствующих глубинах.

Если рассечь модель расхода вертикальными плоскостями, перпендикулярными плоскости живого сечения, то площади сечения будут представлять собой эпюры распределения скоростей на вертикалях.

Если рассечь модель расхода вертикальными плоскостями, параллельными плоскости живого сечения, то линии пересечения будут представлять собой линии равных скоростей, т. е. изотахи.

Глава 13

Измерение расходов воды с помощью гидрометрических вертушек

13.1. Выбор участка реки

Основные требования к участку реки для измерения расхода воды совпадают с требованиями, предъявляемыми к участку для водомерных наблюдений (см. главу 5), но имеются и дополнительные требования.

Для обеспечения достаточной точности измерения расхода необходимо, чтобы на выбранном участке наблюдалось равномерное движение воды. Как в коренном русле, так и на пойме течение воды должно иметь общее направление по всей ширине. Скорости течения в межень не должны быть менее 0,15—0,25 м/с, чтобы их можно было измерять вертушкой с достаточной точностью. В периоды половодий и паводков желательно, чтобы скорости течения не превышали 3,0—4,0 м/с. На участке не должно быть зон со стоячей водой или обратными течениями.

Зимой на участке должен образовываться сплошной ледяной покров, без полыней, или же река не должна замерзать вовсе. Кроме того, по возможности надо выбирать участок, где в зимний период не образуется шуга, скапливающаяся под ледяным покровом.

Следует обращать внимание на то, чтобы на участке не наблюдалось неустановившееся движение воды[1] от расположенных выше гидротехнических сооружений, а также чтобы участок не находился в условиях переменного подпора от сооружений, расположенных ниже по течению.

В реальных условиях трудно найти участок реки, где бы выполнялись все эти условия, но во всех случаях необходимо стремиться к возможно более полному соответствию участка перечисленным требованиям. При выборе участка для проведения временных работ достаточно, чтобы участок был удобным для выполнения измерений в данном сезоне года.

[1] Неустановившееся движение воды — движение, при котором расход изменяется во времени.

13.2. Определение направления гидрометрического створа

Гидрометрическим створом называется поперечник через реку, в котором измеряются расходы воды.

Для правильного определения расходов воды требуется на выбранном участке реки назначить направление гидрометрического створа так, чтобы поперечное сечение потока по линии створа было расположено нормально к среднему направлению течения. В первом приближении этому условию удовлетворяет створ, разбитый на глаз перпендикулярно общему направлению реки, ориентируясь на направления берегов.

В экспедиционных условиях разбивка гидрометрического створа, служащего для разовых определений расходов на прямолинейных участках рек шириной приблизительно до 100 м с видимо параллелоструйным течением, может производиться глазомерно.

Направление створа, предназначенного для систематических измерений, должно быть определено более точно.

На реках, имеющих широкую пойму, направление меженного створа (в основном русле) может не совпадать с общим направлением течения на пойме, образуя с ним некоторый угол. При угле менее 10° можно назначать одно направление створа для русла и для поймы; при угле более 10° направление створа назначают в виде ломаной линии, каждый отрезок которой перпендикулярен направлению течения пересекаемой им части русла.

На участках, имеющих русло, расчлененное на протоки, створы разбиваются отдельно в основном русле и в протоках, при этом полный расход определяется как сумма частичных расходов.

Как правило, на участке измерений стараются назначить один гидрометрический створ, совпадающий со створом водомерного поста или находящийся вблизи него. Однако в некоторых случаях возникает необходимость иметь два, а иногда и три створа. Это связано с тем, что в различные периоды года могут существенно изменяться условия протекания воды, например в период половодья, при развитии водной растительности, при возникновении ледяных образований и т. п. Каждый створ в этом случае назначается с соблюдением указанных выше условий, а также с учетом того, чтобы между створами не было увеличения или потерь стока, например впадения притоков, водозаборных сооружений и пр.

Если гидрометрический створ будет удален от створа основного водомерного поста, то необходимо устроить водомерный пост при гидрометрическом створе. За нуль графика поста на створе желательно принимать ту же отметку, что и на основном водомерном посту.

Ввиду того что условия протекания воды могут со временем изменяться, необходимо проверять правильность направления гидрометрического створа. На реках с устойчивым руслом изменение направления или перенос створа производится сразу же, как только гидрометрический створ перестает удовлетворять требованиям достаточно точного измерения расхода.

Следует иметь в виду, что с изменением уровня воды изменяется косоструйность течения, причем эти изменения бывают различны в разных местах потока. В основном русле изменения косоструйности обычно меньше, а при выходе воды на пойму — больше, особенно на пойменных участках.

Выбирать направление створа рекомендуется из условия, чтобы косина струй не превышала 30° по отношению к нормали к направлению створа. Если косина струй на отдельных вертикалях больше, то целесообразно выбрать новый створ.

При измерении скоростей течения на вертикалях компонентными вертушками (ГР-99, ГР-21, ГР-55) на штанге вертушку располагают нормально к линии створа, при этом косина струй учитывается автоматически соответственно компонентности применяемой вертушки (см. табл. 11.1).

При применении для измерения скоростей вертушек на тросе необходимо измерять также угол между осью вертушки и нормалью к линии створа, при этом проекция скорости определяется умножением измеренной скорости на косинус угла. Не останавливаясь здесь на способах определения углов, укажем, что в подобных случаях лучше всего применять измеритель течений ГР-42, позволяющий одновременно измерять скорость и угол; описание этого прибора приведено в разделе VIII.

Косина струй менее 10°, как правило, не учитывается, так как при этом ошибка измерения расхода не превысит 1,5%.

Определение направления гидрометрического створа с применением измерителя течения ГР-42. Этот способ является более точным по сравнению с описываемым ниже способом разбивки створа с помощью поверхностных поплавков, кроме того, он требует меньшей затраты времени. Работа по определению направления створа выполняется в такой последовательности:

1) на предварительно выбранном створе производят промеры глубин, после чего, сообразуясь с шириной реки и очертанием линии дна, намечают скоростные вертикали в количестве не более 10—12;

2) на всех скоростных вертикалях измеряют скорости и направления течения на глубине $0{,}6h$ от поверхности; полученное значение скорости принимается за среднюю скорость на вертикали;

3) вычисляют элементарные расходы на вертикалях путем умножения средней скорости на глубину

$$q = v_в h; \qquad (13.1)$$

4) вычисляют частичные расходы по формуле

$$q_ч = qb, \qquad (13.2)$$

где q — элементарный расход на вертикали; b — расстояние между серединами участков профиля, примыкающих к данной вертикали.

Для частичного расхода, относящегося к первой вертикали, величина b будет определяться как сумма расстояний от уреза воды до вертикали и от нее до середины расстояния между первой и второй вертикалями. Для частичного расхода, относящегося к последней вертикали, величина b определяется аналогично;

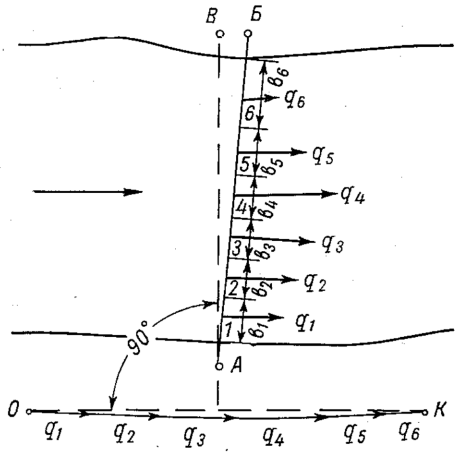


Рис. 13.1. Схема к определению направления створа.

АБ — предварительно выбранный створ; *АВ* — искомое направление створа.

5) на план участка реки наносят в определенном масштабе в виде векторов значения полученных частичных расходов; направления их накладывают на плане по азимутам, определенным при измерении направлений течения (рис. 13.1);

6) полученные таким образом векторы суммируют по правилу графического сложения векторов от произвольно выбранной точки *О*. Их геометрическая сумма и является линией направления движения основной массы воды в реке. Перпендикуляр к суммарному вектору даст искомое направление гидрометрического створа.

Выбранное направление створа закрепляют на местности прочными столбами-реперами.

Определение направления гидрометрического створа с помощью поверхностных поплавков. Этот способ является приближенным, так как направление створа определяется только в зависимости от среднего направления поверхностного течения, а не всей массы воды реки. Тем не менее этот способ применяют, но, конечно, при условии правильного распределения скоростей течения в потоке.

На выбранном участке разбивают три—пять вспомогательных створов через реку; расстояние между створами принимают в пределах от половины до двух ширин реки. Расстояние между верхним и нижним створами (рис. 13.2) тщательно измеряют лентой.

На берегу устанавливают мензулу так, чтобы с ее стоянки была хорошо видна поверхность реки на всем участке работ. С помощью кипрегеля на мензульном планшете наносят створы и линии урезов воды обоих берегов, получая план русла реки на участке.

Полевые работы по определению направления створа производят так:

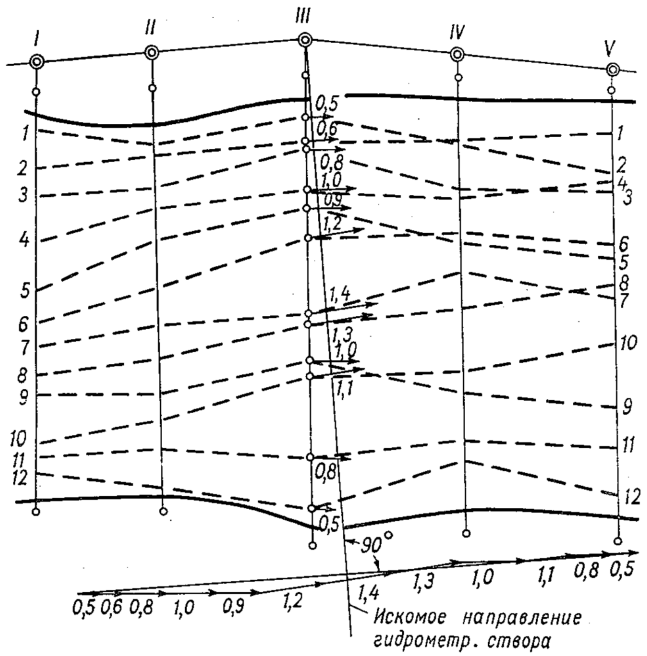


Рис. 13.2. Схема к определению направления створа с помощью поверхностных поплавков.

1) на пусковом створе, назначаемом на 5—10 м выше первого створа, в реку забрасывают последовательно 10—15 поплавков, равномерно распределяемых по ширине реки;

2) по сигналам наблюдателя производят засечки кипрегелем на мензульном планшете мест пересечений поплавками всех створов;

3) с помощью секундомера определяют продолжительность хода каждого поплавка от верхнего до нижнего створа.

Обработку наблюдений производят в поле непосредственно на мензульной стоянке. Для каждого поплавка вычисляют среднюю скорость его движения

$$v = \frac{l}{t}, \qquad (13.3)$$

где l — расстояние между верхним и нижним створами; t — продолжительность хода поплавка.

Засечки поплавков в створах, сделанные на мензульном планшете, соединяют последовательно прямыми пунктирными линиями, которые представляют собой траектории движения поплавков.

На линии среднего створа в точках пересечения его поплавками откладывают в избранном масштабе векторы скоростей. Длина каждого вектора определяется скоростью поплавка, а направление принимается параллельным линии, соединяющей точки пересечения поплавком створов, соседних со средним (см. рис. 13.2).

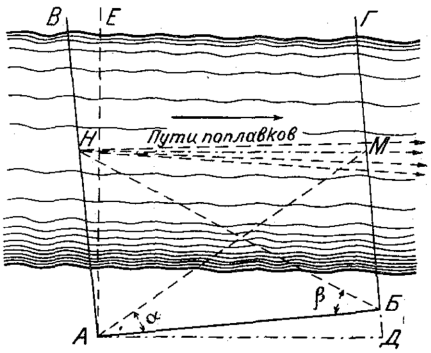


Рис. 13.3. Схема к определению направления створа на горной реке.

Полученные векторы суммируют по правилу графического сложения векторов от произвольно выбранной точки. Геометрическая сумма векторов и будет представлять собой среднее направление поверхностного течения на данном участке.

Перпендикуляр к суммарному вектору принимается за направление искомого гидрометрического створа.

На некоторых реках с быстрым течением, чаще всего на горных, не удается запустить поплавки по всей ширине, ввиду того что струи течения сваливаются к стрежню. В таких случаях можно применять следующий способ.

На берегу разбивают базис *АБ* (рис. 13.3) и перпендикулярно к нему два створа *АВ* и *БГ*. Из постоянной точки *Н* на стрежне реки в створе *АВ* выпускают последовательно 5—7 поплавков, а место их прохождения через створ *БГ* засекают угломерным инструментом, установленным в точке *А*. В результате получают пять—семь значений угла α, из которых вычисляют среднее значение (на рис. 13.3 угол *МАБ*). Направление линии *НМ* принимается за среднее направление течения на участке.

Если длина базиса $АБ = l$, то $АН = l \operatorname{tg} \beta$, а $БМ = l \operatorname{tg} \alpha$. Для получения направления линии *АД*, параллельной *НМ*, из точки *Б* на продолжении створа *БГ* откладывают расстояние $БД = АН - БМ = l(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)$.

Направление гидрометрического створа *АЕ* разбивается перпендикулярно линии *АД* и закрепляется на местности реперами.

13.3. Оборудование гидрометрического створа

Гидрометрический створ обычно оборудуется следующими устройствами:

1) створным водомерным постом, если основной пост находится далеко от створа;

2) реперами, а при надобности — створными вехами;

3) гидрометрической переправой для измерений глубин, скоростей течений и др.;

4) уклонными водомерными постами.

Водомерные и уклонные посты, реперы и створные вехи были описаны в разделе II. Ниже рассмотрим устройство гидрометрических переправ.

Гидрометрические створы, предназначенные для систематических и долговременных наблюдений, оборудуются гидрометрическими переправами, устройство которых зависит от ширины и глубины реки, а также от скорости течения. Проектирование и строительство их производится в соответствии с типовыми проектами [3].

В качестве гидрометрических переправ применяются мостики, подвесные люльки, лодки, катера, паромы. Наиболее совершенным устройством для гидрометрических измерений на створе реки шириной до 100 м являются дистанционные гидрометрические установки.

Гидрометрические мостики применяются на малых реках и каналах. При ширине реки до 15 м рекомендуется применять балочные мостики с дощатым настилом шириной 0,75—1,00 м. Для более широких рек, до 30 м, применяются шпренгельные мостики, в которых основная несущая конструкция (балка) дополнительно усиливается тросом, натягиваемым снизу.

На реках шириной до 50 м можно применять подвесные мостики (рис. 13.4). Настил мостика подвешивается к двум несущим тросам, перекинутым через береговые опоры и закрепленным на бетонных якорях, заложенных в грунт.

Гидрометрические люльки (рис. 13.5) применяются на реках с быстрым течением и высокими берегами, главным образом в горных районах. В зависимости от нагрузки люльки могут устраиваться на одном или двух ездовых тросах, подвешиваемых с надлежащим провесом на блоках, укрепляемых на береговых опорах. Концы тросов закрепляются на тягах, заделанных в бетонные якоря, заложенные в грунт. В некоторых системах люлька снабжается приспособлением, позволяющим ей перемещаться не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении, что удобно при работе с приборами на штанге. Перемещение люльки вдоль створа осуществляется при помощи лебедки и тягового троса или вручную.

Дистанционные гидрометрические установки предназначены для дистанционного проведения гидрометрических измерений.

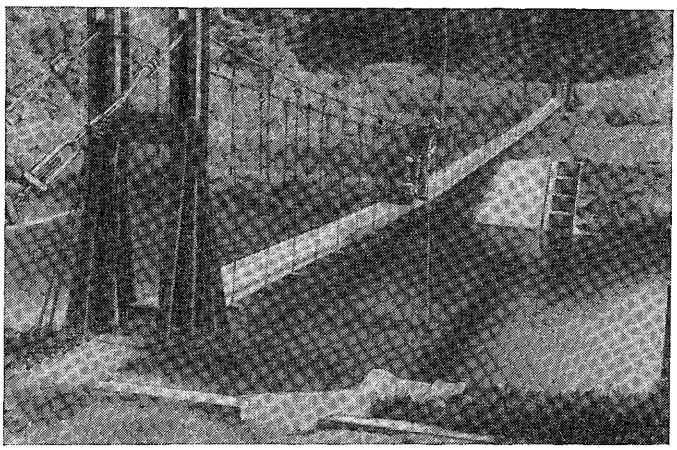


Рис. 13.4. Подвесной гидрометрический мостик.

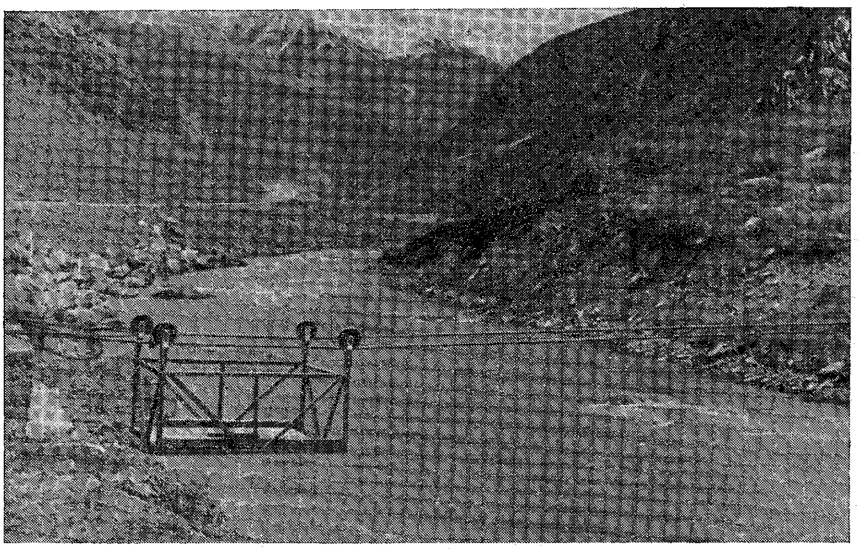


Рис. 13.5. Гидрометрическая люлька на горной реке.

С их помощью можно производить промеры глубин, измерения скоростей течения, взятие проб воды со взвешенными наносами и другие операции.

Дистанционная установка состоит из береговых опор и трособлочной системы, с помощью которой вертушка с грузом или иной прибор может перемещаться по створу на заданную вертикаль и погружаться в поток на требуемую глубину. Для перемещения прибора и регистрации его показаний на берегу оборудуется будка с пультом управления и механизмами.

В настоящее время имеются дистанционные установки ГР-64 и ГР-70, рассчитанные на применение на реках шириной до 100 м и глубиной до 12 м, а также ГР-64М для рек шириной до 200 м.

Дистанционная гидрометрическая установка ГР-64 с электрическим приводом позволяет выполнять гидрометрические измерения при скоростях течения до 5 м/с. Для работы установки необходим переменный ток 50 Гц и напряжением 220—380 В.

Установка состоит (рис. 13.6, 13.7) из береговых опор *1*, переброшенных между ними тросов *2—4*, двухбарабанной лебедки *5* с электроприводом, каретки *6*, блока счетчиков *7*, специального гидрометрического груза *8* (100 кг), оптического угломера и пульта управления *9*. Верхний трос *2* является несущим, по нему перемещается каретка, передающая нагрузку от веса груза с прибором. Перемещение каретки, а также опускание и подъем груза осуществляются с помощью двух тросов: троса *3* перемещения каретки и троса *4* подъемного, намотанных на различных барабанах лебедки. Раздельным или одновременным включением барабанов лебедки можно производить перемещение груза с прибором вдоль створа, а также подъем и опускание его.

Гидрометрический груз имеет форму, схематически показанную на рис. 13.8. Для определения глубины груз снабжен поверхностным и донным контактами, позволяющими определять моменты касания поверхности воды и дна. При соприкосновении груза с водной поверхностью или дном он автоматически останавливается, при этом на пульте управления загораются сигнальные лампочки «Поверхность» или «Дно». Груз имеет стабилизатор направления на длинном выносе, на конце которого укреплен обтекаемый поплавок. Такое устройство обеспечивает правильное и устойчивое положение груза в потоке. Угол относа подъемного троса течением измеряется оптическим угломером.

Горизонтальное и вертикальное перемещение груза регистрируется механическим счетчиком с ценой деления 1 см.

Гидрометрическая вертушка укрепляется на кронштейне (или штыре) в передней части груза. Обороты лопастного винта регистрируются счетчиком импульсов, который включается при измерении скорости синхронно с секундомером. По истечении

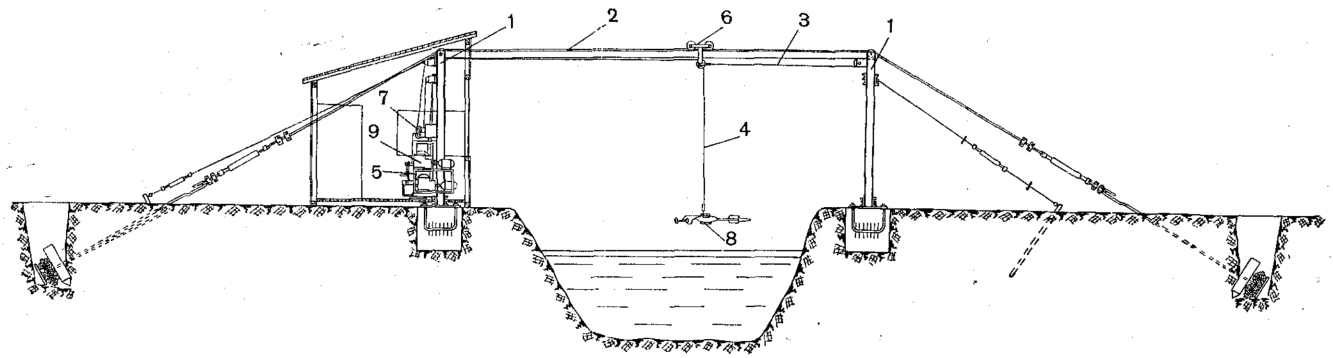


Рис. 13.6. Дистанционная гидрометрическая установка ГР-64 (схема).

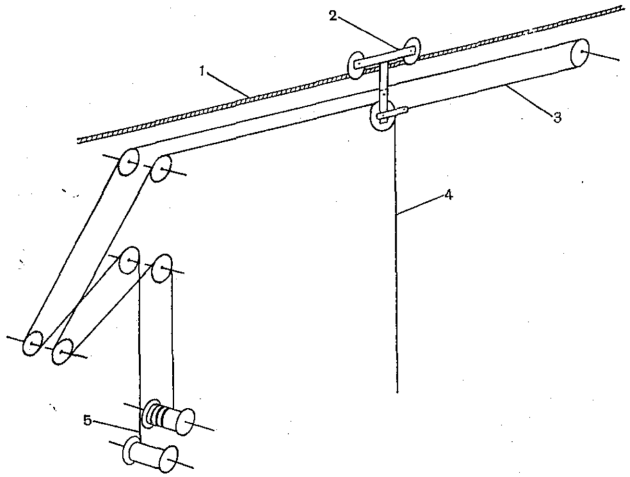


Рис. 13.7. Кинематическая схема дистанционной установки.

1 — несущий трос; *2* — каретка; *3* — трос перемещения каретки; *4* — подъемный трос; *5* — лебедка.

заданного промежутка времени счетчик и секундомер выключаются также автоматически.

Подъемный трос имеет одну изолированную токопроводящую жилу, служащую для передачи на пульт управления сигналов вертушки и контактов груза. Разделение сигналов вертушки от сигналов поверхностного и донного контактов груза производится по фазе, а разделение сигналов поверхностного контакта груза от сигналов донного контакта — по величине тока.

Управление установкой сосредоточено на пульте, на котором размещены также элементы электрической схемы, обеспечивающие работу установки. Лебедка может приводиться в действие также и от ручного привода.

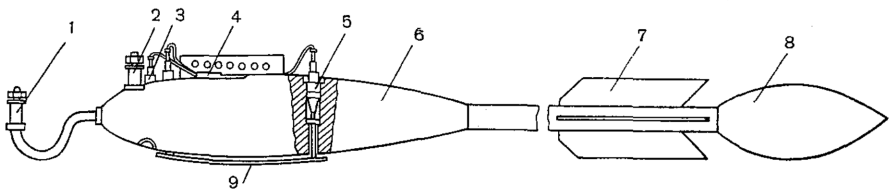


Рис. 13.8. Схема устройства груза установки ГР-64.

1, 2 — кронштейн и штырь для крепления приборов; *3* — поверхностный контакт; *4* — делитель сигналов; *5* — донный контакт; *6* — тело груза; *7* — стабилизатор; *8* — поплавок; *9* — поддон.

Установка ГР-64М — модернизированная. Основное отличие ее состоит в том, что ее можно применять на более широких реках (пролет между опорами до 200 м).

Дистанционная гидрометрическая установка ГР-70 имеет только ручной привод. Для питания сигнальной электрической цепи установка снабжается батареей гальванических элементов напряжением 12 В. Установка рассчитана на проведение измерительных работ при скоростях течения до 2,0—2,5 м/с, при этом употребляются грузы весом 25 или 50 кг, по своему устройству и действию такие же, как и груз установки ГР-64. На рис. 13.9 показана принципиальная электрическая схема установки ГР-70.

Гидрометрические тросовые переправы. На несудоходных реках шириной до 150—200 м со спокойным течением устраиваются гидрометрические тросовые переправы с лодкой. Выше створа натягивается ездовой трос, закрепляемый на одном берегу за столб, а на другом — на лебедке. По линии створа натягивается второй трос, на котором размечается положение вертикалей. Измерения производят с лодки, закрепляемой поводком с карабином за ездовой трос.

Для проведения гидрометрических работ на реках шириной до 100 м в ГГИ разработан комплекс приспособлений для

тросовых лодочных переправ, значительно облегчающих выполнение работ[1]. В комплекс приспособлений входит:

1) подвесная вьюшка для переброски и натяжения створного троса, а также стойка для установки вьюшки в лодке;

2) механизм гибкого крепления лодки к створному тросу с устройством для мгновенного отсоединения;

3) механизм жесткого крепления лодки к створному тросу;

4) откидная рама для выноса гидрометрических приборов, подвешиваемых на тросе, с носа лодки;

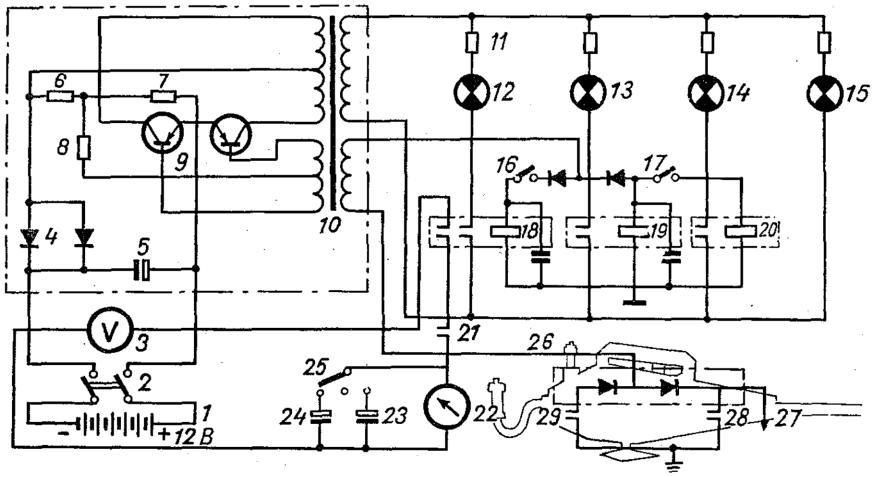


Рис. 13.9. Принципиальная электрическая схема установки ГР-70.

1 — батарея; *2* — выключатель; *3* — вольтметр; *4* — диод; *5*, *23*, *24* — конденсаторы; *6—8*, *11* — сопротивления; *9* — триод; *10* — трансформатор; *12* — сигнальная лампа вертушки; *13* — сигнальная лампа донного контакта; *14* — сигнальная лампа поверхностного контакта; *15* — сигнальная лампа генератора; *16* — переключатель вертушки; *17* — переключатель поверхностного и донного контактов; *18* — реле вертушки; *19* — реле донного контакта; *20* — реле поверхностного контакта; *21* — выключатель счетчика вертушки; *22* — счетчик контактов вертушки; *25* — переключатель двухпозиционный; *26* — трос с токоведущей жилой; *27* — контакт поверхностный; *28* — контакт донный; *29* — контакт вертушки.

5) штангодержатель с подвесной штангой для выноса приборов с носа лодки.

На больших и средних реках с сильным течением, где приборы необходимо опускать с тяжелым грузом, устраиваются гидрометрические тросовые переправы с понтоном (паромные).

Гидрометрический понтон (рис. 13.10) представляет собой две большие лодки или два металлических сигарообразных поплавка, соединенных жесткой рамой, на которой настилается палуба. Между лодками должен быть просвет 1,5—2,0 м во избежание влияния лодок на поверхностные скорости между ними. На па-

[1] Риммар Г. М. Комплекс приспособлений для производства гидрометрических работ на лодочной тросовой переправе.— «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 145—154.

лубе понтона устраивается каюта; в передней его части над просветом между лодками делается стрела с блоком для опускания приборов в воду (рис. 13.10 *а*). На палубе устанавливаются гидрометрические лебедки и лебедки для четырех якорей, кнехты для причала и прочее судовое оборудование.

При перемещении понтона по тросу он должен быть оборудован направляющими стойками с роликами. На быстрых реках понтон по тросу может перемещаться течением (понтон-самолет, рис. 13.10 *в*), в этом случае, действуя рулем, понтону придают

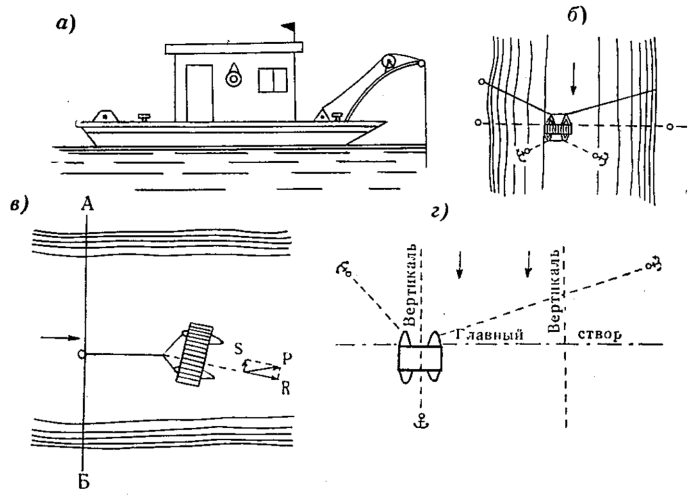


Рис. 13.10. Гидрометрические понтоны.

а — общий вид; *б* — понтон на тросе и двух якорях; *в* — понтон-самолет; *г* — понтон на трех якорях.

косое положение по отношению к направлению течения, вследствие чего давление потока P на понтон разлагается на две силы: параллельную продольной оси понтона силу R и параллельную тросу силу S, которая и перемещает понтон по створу. На широких реках понтоны по створу буксируют катером. Применяют также самоходные понтоны и, кроме того, специально оборудованные катера.

В точке наблюдения понтон или катер устанавливают на двух (рис. 13.10 *б*) или на трех якорях (рис. 13.10 *г*). Последний способ удобен тем, что позволяет без перестановки передних якорей проводить наблюдения на ряде вертикалей, перемещая только один задний якорь. Для якорей применяют пеньковые или капроновые тросы, которые при надобности (при аварии) можно легко перерубить.

Приспособления для зимних работ. В зимнее время, когда имеется ледяной покров, для проведения гидрометрических работ применяют будки-теплушки на полозьях.

Будка (рис. 13.11) представляет собой деревянный или металлический каркас, обшитый фанерой или брезентом и утепленный войлоком; для отопления в ней имеется печка. В полу для опускания приборов в воду устраивают люк. При отсутствии будки можно пользоваться палаткой.

Назначение и закрепление скоростных вертикалей на створе. Количество скоростных вертикалей и распределение их по створу назначается в зависимости от ширины реки и очертания линии дна.

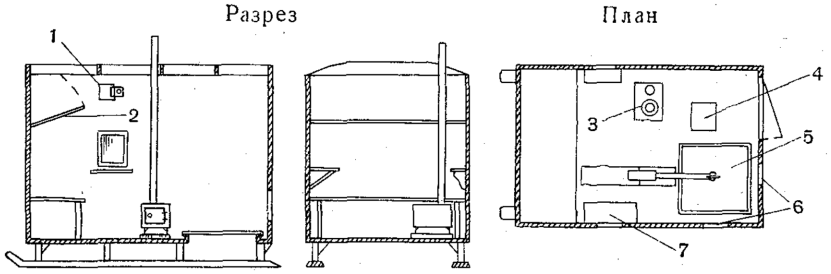


Рис. 13.11. Схема устройства зимней гидрометрической будки.

1 — форточка; *2* — подъемная койка; *3* — печка; *4* — рабочий столик; *5* — люк; *6* — окна; *7* — полка.

При измерении расхода воды применяют следующие способы: детальный, основной, сокращенный и ускоренный.

Детальный способ предусматривает многоточечное измерение скоростей на большом числе вертикалей. Он применяется для изучения особенностей скоростного поля потока и на вновь открываемых створах в первые два-три года. При детальном способе расстояния между скоростными вертикалями назначаются через равные промежутки по ширине реки (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Зависимость расстояний между скоростными вертикалями от ширины реки

Ширина реки, м	Расстояние между вертикалями, м	Ширина реки, м	Расстояние между вертикалями, м
Менее 20	0,5—2,0	100—200	10
20—30	2,0	200—300	20
30—40	3,0	300—500	30
40—60	4,0	500—800	40
60—80	6,0	Более 800	50
80—100	8,0		

При наличии резких переломов профиля дна скоростные вертикали необходимо приурочивать к этим переломам. На пойме реки при спокойном рельефе вертикали располагают реже, чем

в основном русле, но в руслообразных понижениях поймы, где могут быть обособленные потоки, скоростные вертикали располагают через одну-две промерные вертикали.

Основной способ предусматривает измерение расхода при возможно меньшем количестве скоростных вертикалей (но не менее пяти) и точек на вертикали (две-три) при условии, что результаты измерения расходов основным способом будут отличаться от расходов, измеренных детальным способом, на более чем на ±3%.

Количество скоростных вертикалей и их распределение по створу устанавливается на основании анализа 20—30 расходов, измеренных детальным способом в разные сезоны года при различных уровнях.

Для анализа строят для каждого расхода эпюры распределения средних скоростей на вертикалях по ширине реки. На основании анализа эпюр намечают сокращенное число вертикалей с таким расчетом, чтобы построенные по ним эпюры распределения средних скоростей по ширине реки не отличались существенно от эпюр, построенных по всем вертикалям. В результате анализа количество скоростных вертикалей уменьшается примерно вдвое по сравнению с предварительно установленным их числом.

Сокращенный способ предусматривает определение расхода при одной или двух точках на вертикали при свободном русле и двух-трех точках при ледоставе или заросшем русле. Количество и расположение скоростных вертикалей и точек измерения скоростей на них устанавливается на основании тщательного анализа данных, полученных в результате измерений расходов воды детальным и основным способами.

Применение сокращенного способа целесообразно на реках с устойчивым руслом, когда необходимы частые и быстрые измерения расходов при неустановившемся движении воды.

Если в последующем будет обнаружено изменение формы поперечного профиля или же изменение формы эпюры распределения скоростей по ширине реки, то необходимо провести повторное исследование и при необходимости изменить расположение и количество скоростных вертикалей.

Ускоренное измерение расхода применяется в случаях, когда необходимо произвести измерения как можно быстрее: при резких колебаниях уровня (более 10 см в час), интенсивной деформации русла. Такие явления обычно наблюдаются при прохождении паводков. При этом продолжительность измерения скорости в точке сокращается до 30 с. При малых скоростях течения, когда сигналы поступают реже, чем через 30 с, выдержка вертушки в точке ограничивается временем между двумя сигналами.

Ускоренное измерение можно применять при детальном, основном и сокращенном способах.

Способ закрепления положения скоростных вертикалей на створе зависит от ширины реки и оборудования створа.

Местоположение скоростных вертикалей на створе определяется расстоянием от постоянного начала (репера), от которого им дается порядковая нумерация. Это необходимо для получения сопоставимых результатов измерений.

Если река неширокая и створ оборудован мостиком, то положение скоростных вертикалей закрепляется непосредственно на настиле мостика штрихом и номером вертикали, написанным масляной краской.

Если река неширокая и створ оборудован люлькой, лодкой или понтоном на тросе, то по линии створа натягивается размеченный трос, а положение скоростных вертикалей на нем закрепляется специальными марками с выбитыми на них номерами вертикалей. Отмечать положение вертикалей на ездовом тросе не следует.

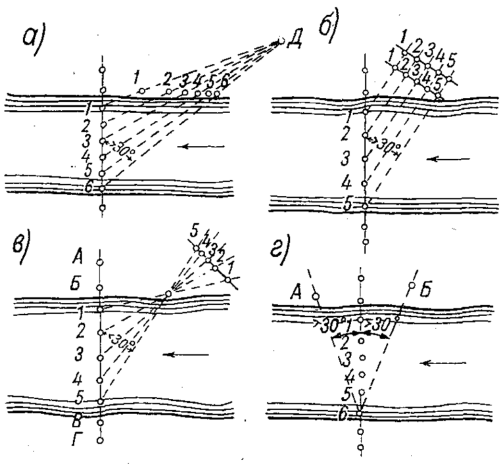


Рис. 13.12. Схема косых и веерных створов для закрепления скоростных вертикалей.

Если река широкая и тросовая переправа на створе отсутствует, то положение скоростных вертикалей определяется засечками по постоянным косым и веерным створам (рис. 13.12) или засечками с берега угломерными инструментами: теодолитом, кипрегелем на мензуле, или же засечками с судна секстантом.

Для нахождения положения, например вертикали *4* по схеме *а* (рис. 13.12), гидрометрический понтон или катер должен быть в створе вех *А* и *Б* или *В* и *Г* по линии створа и одновременно в створе вех *Д* и *4*. Определение положения вертикалей по схемам *б* и *в* ясно из рис. 13.12. По схеме *г* положение на вертикали определяется с помощью секстанта с понтона или катера, находящегося на линии створа, по углам, составляемым направлением створа и направлениями на вехи *А* и *Б*.

При применении способа засечек скоростных вертикалей теодолитом или кипрегелем необходимо выбрать и закрепить на местности постоянную стоянку инструмента, а для теодолита вычислить таблицу горизонтальных (и вертикальных) углов, составленных лучами визирования на скоростные вертикали и на постоянные ориентиры базиса.

Места вертикалей на широкой пойме закрепляют прочно установленными столбами, на которых надписывается номер вертикалей.

13.4. Измерение расходов воды

До проведения измерения расхода воды необходимо проверить исправность гидрометрической вертушки и принадлежностей к ней, а также наличие и исправность спасательных средств для обеспечения безопасности работ, состояние всего оборудования гидрометрического створа.

При измерении расхода воды выполняются следующие работы:

1) описание состояния реки, погоды и других факторов, определяющих условия работ;

2) наблюдения за уровнем воды;

3) промеры глубин на гидрометрическом створе;

4) измерение скоростей в отдельных точках живого сечения на скоростных вертикалях;

5) наблюдения на уклонных водомерных постах за уровнем воды.

Результаты всех измерений и наблюдений записывают в «Книжку для записи измерения расходов воды» стандартного образца с учетом перенесения информации на перфоленту (см. главу 35).

Наблюдения за уровнем воды ведут на основном посту, а при наличии поста на гидростворе — одновременно на обоих постах. При устойчивом положении уровня или незначительном и плавном его изменении высота уровня определяется только в начале и конце измерения расхода. Если во время измерения расхода можно ожидать подъема или спада уровня более чем на 10 см, то измерения уровня делают учащенно. При этом наиболее целесообразно иметь самописец уровня.

Промеры глубин на гидростворе делают, как описано в разделе III. При работах в периоды половодий и паводков, когда измерения могут производиться через короткие интервалы времени — 1—2 дня и менее, при устойчивом русле расходы воды могут относиться к предыдущим промерам.

Измерения скоростей течения на вертикалях обычно выполняют одной вертушкой, последовательно перемещаемой в различные точки вертикали. Иногда делают измерения сразу несколькими вертушками, укрепляемыми на одной штанге в требуемых точках вертикали; такой способ — многовертушечный — применяется главным образом при проведении научных исследований, при этом показания вертушек записываются на хронографе.

При измерении скоростей на каждой вертикали выполняются следующие работы:

1) определяется (при значительных изменениях) уровень воды на водомерном посту для начала и конца работы на вертикали;

2) измеряется глубина на вертикали; зимой дополнительно

измеряется толщина снега, льда, погруженного льда и подледной шуги;

3) вычисляется рабочая глубина на вертикали и делается расчет глубин погружения вертушки для измерения скоростей;

4) измеряются скорости течения.

Рабочей глубиной на вертикали называется глубина от поверхности до дна, а при ледяном покрове — от нижней поверхности льда до дна; при наличии подледной шуги — от нижней поверхности шуги.

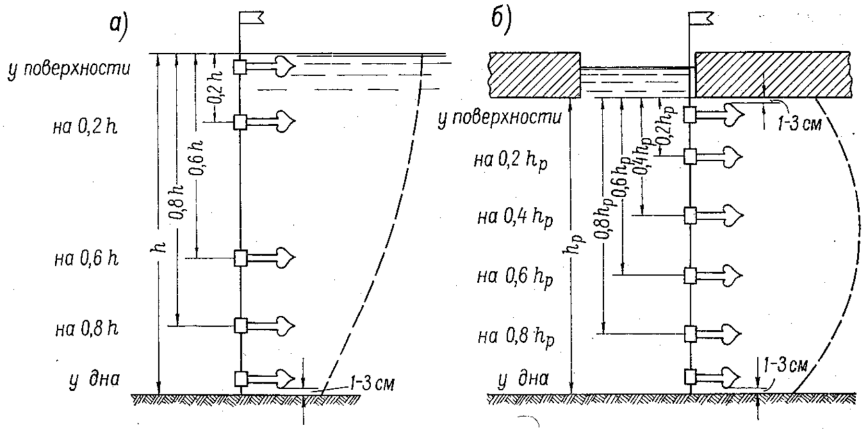


Рис. 13.13. Расположение вертушки на вертикали при детальном способе измерения.

а **— в свободном русле;** ***б*** **— при ледяном покрове.**

При детальном способе измерения расхода и при свободном от ледяного покрова и водной растительности русле принято измерять скорости в пяти точках на вертикали, располагая их, как показано на рис. 13.13 *а*. При ледяном покрове или водной растительности добавляется точка на глубине $0{,}4h$ (рис. 13.13 *б*). Как показал большой практический опыт, а также теоретические данные, принятое расположение точек измерения скоростей на вертикалях хорошо характеризует форму профиля скоростей, что позволяет с достаточной точностью определить среднюю скорость на вертикали.

При малых глубинах принимается иное расположение точек измерения скоростей. При использовании вертушек с диаметром лопастного винта 12 см (ГР-21 и др.) предельной глубиной, при которой скорости измеряются в указанных на рис. 13.14 точках, является глубина 1 м. При использовании вертушек с лопастным винтом диаметром 7 см (ГР-55 и др.) предельной глубиной является глубина 0,6 м. При меньших глубинах вертушку на вертикали располагают так, чтобы лопастный винт охватывал по слоям всю глубину вертикали (рис. 13.14).

Минимальные глубины, при которых можно измерять скорости в открытом русле: для вертушек с лопастным винтом диаметром 12 см — 10 см, для вертушек с винтом диаметром 7 см — 6 см. При ледяном покрове минимальные рабочие глубины составляют соответственно 15 и 8 см.

При основном способе измерения расхода, помимо сокращения числа вертикалей, уменьшается и число точек измерения скоростей на вертикали. При свободном ото льда и водной растительности русле скорости измеряются в двух точках на вертикали: 0,2 и 0,8 рабочей глубины, при недостаточных глубинах измерение производится в одной точке — 0,6 рабочей глубины.

При ледяном покрове или водной растительности скорости измеряются в трех точках на вертикали: 0,15; 0,50 и 0,85 рабочей глубины, а при малых глубинах — в одной точке: 0,50 рабочей глубины.

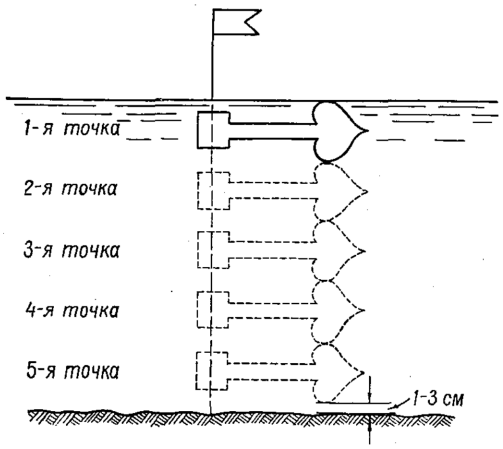


Рис. 13.14. Расположение вертушки на вертикали с недостаточной глубиной (при детальном способе измерения).

При сокращенном способе измерения расхода скорости на вертикали измеряются в двух точках: 0,2 и 0,8 рабочей глубины или же в одной точке — 0,6 рабочей глубины (допускается измерять скорость в точке $0{,}2h$).

Продолжительность измерения скорости течения в каждой точке вертикали должна быть достаточной для осреднения во времени пульсационных изменений. Как уже указывалось, в СССР принято время осреднения не менее 100 с (при ускоренном измерении 30 с), что в большинстве случаев позволяет достаточно точно определить местную скорость. Но в потоках с большой степенью турбулентности следует проверять достаточность времени осреднения, для чего выработан простой практический прием, описываемый ниже.

При детальном способе измерения расхода, измеряя скорости течения, производят запись времени поступления отдельных сигналов вертушки. При больших скоростях течения сигналы следуют друг за другом очень часто, поэтому отсчеты времени по секундомеру берут через 2—5 сигналов. Число сигналов, а следовательно, и соответствующее им количество оборотов лопастного винта между записями времени называют приемом.

Общее число приемов за время измерения в точке принимают четным, обычно не более восьми и не менее двух, с таким расчетом, чтобы общая продолжительность измерения была не менее 100 секунд.

Практический прием проверки достаточности осреднения во времени пульсационных изменений заключается в следующем: сопоставляют продолжительности первой и второй половины наблюдения; они должны отличаться друг от друга не более чем на 5 с. Если они отличаются более чем на 5 с, то измерения продолжают еще на 2, 4 или 6 приемов.

Пример

Номер приема	1	2	3	4	5	6
Отсчет по секундомеру	20	39	59	80	100	121

Продолжительность первой половины периода измерений составляет 59 с, следовательно за весь период, т. е. по шести приемам, должна бы получиться продолжительность 59+59=118 с; получилась же продолжительность 121 с. Разница составляет 3 с, что меньше 5 с, поэтому в данном случае измерения можно прекратить.

Если расхождение больше 10 с, при общей продолжительности измерения более 160 с, необходимо вынуть из воды вертушку и проверить ее работу. Подобные большие расхождения обычно вызываются неисправностью вертушки.

При основном способе измерения расхода ограничиваются записью общего числа сигналов (числа оборотов) и общей продолжительности измерения. Измерения прекращают на четном сигнале по истечении 100 с.

При сокращенном способе измерения расхода воды также ограничиваются записью общего числа сигналов (числа оборотов) и общей продолжительности измерения скорости.

При каждом измерении скорости течения рекомендуется прежде чем начать отсчет времени поступления сигналов первые два-три сигнала пропустить без записи, чтобы лопастный винт набрал скорость вращения, соответствующую скорости течения.

13.5. Интеграционный способ измерения скоростей течения и расходов воды

Сущность интеграционного способа заключается в следующем. Если гидрометрическую вертушку, установленную лопастным винтом навстречу течения, медленно перемещать в плоскости живого сечения по какому-либо направлению и при этом регистрировать общее число оборотов винта N и время t, то средняя

скорость течения на данном отрезке пути вертушки определится по числу оборотов n в секунду, т. е.

$$n=\frac{N}{t},\quad v=f(n),$$

и может быть найдена по тарировочной кривой.

Интеграционное измерение скорости можно производить по вертикали, по горизонтали и по всему живому сечению.

Интеграционное измерение по вертикали делается для определения средней скорости на данной вертикали. Для этого вертушку медленным равномерным движением опускают от поверхности до дна и затем без остановки поднимают с той же скоростью до поверхности. Суммарное число оборотов винта, деленное на время измерения, дает число оборотов в секунду, соответствующее средней скорости на вертикали.

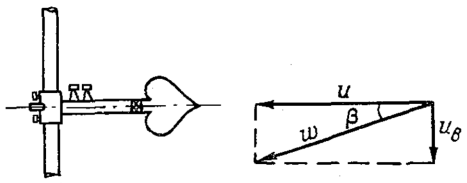


Рис. 13.15. Скорости, действующие на лопастный винт при интеграции по вертикали.

Следует иметь в виду, что при опускании вертушки лопастный винт переходит из слоев воды с большими скоростями в слои с меньшими скоростями, при этом из-за инерционности винта число оборотов, а следовательно, и скорость течения будут завышены. При подъеме вертушки, наоборот, скорость будет занижена. Для правильного определения средней скорости на вертикали необходимо вертушку опустить и поднять, как сказано выше.

При интеграционном измерении на вертикали лопастный винт вращается под действием суммарного вектора w, равного геометрической сумме векторов местной скорости u и скорости вертикального перемещения вертушки $u_в$ (рис. 13.15). Если измерение производится компонентной вертушкой, то она будет регистрировать проекцию суммарного вектора на ось вертушки, т. е. местную скорость u (конечно, при условии, что угол β меньше угла, при котором сохраняются компонентные свойства вертушки). Для некомпонентных вертушек чем меньше угол β, тем точнее результаты измерений, поэтому скорость перемещения вертушки должна быть возможно меньшей.

На точность интеграционных измерений оказывает влияние недостаточное осреднение во времени пульсационных изменений скорости. Влияние турбулентности на показания вертушки при интеграционном измерении скорости рассмотрено в работе И. Ф. Карасева [1], при этом установлено, что для повышения

[1] Карасев И. Ф. Влияние турбулентности потока на точность интеграции скоростей по вертикали.— «Труды ГГИ», 1973, вып. 202, с. 64—73.

точности измерения необходимо уменьшать скорость перемещения вертушки; точность измерения, равная 3—4,5%, достигается при скорости перемещения по вертикали 0,02 м/с. Однако этот вопрос требует дальнейших исследований. Кроме того, при опускании вертушки она не доводится до самого дна, что приводит к некоторому завышению средней скорости. По этим причинам точность интеграционного измерения средней скорости на вертикали несколько ниже, чем точность измерения точечным способом (как показали исследования, на 1—3%).

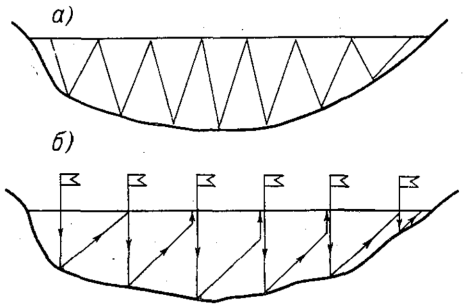


Рис. 13.16. Схемы передвижения вертушки при интеграции скорости по живому сечению.

а — непрерывное равномерное движение по горизонтали и по вертикали; *б* — непрерывное движение по вертикали и прерывистое по горизонтали (с остановкой на вертикалях; между вертикалями движение равномерное).

Интеграционный способ применяется также для определения средней скорости на поверхности по ширине реки и средней скорости в живом сечении потока.

Интеграционное измерение средней поверхностной скорости течения может применяться для определения расхода воды аналогично измерению расхода поверхностными поплавками. Такое измерение требует меньшей затраты времени по сравнению с поплавочным методом. Этот способ пока еще недостаточно исследован и распространения не получил. В отдельных случаях он представляется перспективным, например при измерении расходов в паводки, так как позволяет весьма быстро выполнить работы.

Интеграционное измерение средней скорости в живом сечении потока преследует цель определить среднюю скорость всего потока для получения расхода воды, при этом расход вычисляется умножением средней скорости на площадь живого сечения.

Интеграционное измерение средней скорости потока можно производить, перемещая вертушку в живом сечении по зигзагообразной траектории от поверхности ко дну и обратно от одного берега до другого (рис. 13.16). При этом регистрируется общее число оборотов лопастного винта и продолжительность измерения, по ним находится число оборотов винта в секунду и по тарировочной зависимости — средняя скорость течения. При таком способе лопастный винт будет находиться под воздействием трех скоростей: скорости течения u, скорости вертикального $u_в$ и скорости горизонтального $u_г$ перемещения вертушки

(рис. 13.17). По правилам геометрического сложения векторов эти векторы можно заменить суммарным вектором w, величина которого определяется по формуле

$$w=\sqrt{u^2+u_в^2+u_г^2}. \qquad (13.4)$$

Таким образом, на лопастный винт действует суммарный вектор, т. е. вертушка будет работать в условиях косоструйности.

Точность регистрации вертушкой скоростного вектора u будет зависеть от компонентности применяемой вертушки и от скоростей горизонтального и вертикального перемещений вертушки.

Теоретические основы интегрального определения расходов воды были рассмотрены Н. А. Гирилловичем [16], который ука-

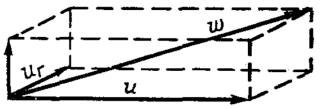


Рис. 13.17. Схема скоростных векторов при интеграции скорости по живому сечению.

зал на два основных условия применения этого способа: 1) средняя скорость по траектории движения вертушки может быть определена по полному числу оборотов лопастного винта и соответствующему времени при наличии прямолинейной тарировочной зависимости и передвижении вертушки с небольшой скоростью; 2) для получения путем интеграции истинной средней скорости в живом сечении необходимо, чтобы вертушка проходила через равные элементы площади за равные промежутки времени.

Из первого условия вытекает, что при малых скоростях течения ($u<u_к$) интеграционный способ применять не следует.

Для соблюдения второго условия требуется соответствующим образом построить зигзагообразную траекторию движения вертушки. Это можно сделать по-разному. В. В. Дементьев предложил производить перемещение вертушки по схеме, показанной на рис. 13.16 *б*. Скоростные вертикали назначаются на равных расстояниях друг от друга. Лодка с вертушкой перемещается вдоль тросовой переправы с равномерной скоростью, но на каждой вертикали останавливается до момента касания грузом дна или до момента поднятия вертушки к поверхности воды, в зависимости от направления движения. При такой схеме получается, что продолжительность прохождения вертушкой отсеков живого сечения приблизительно пропорциональна глубинам.

Если измерения производятся с помощью дистанционной гидрометрической установки, то описанная схема может быть

применена. В ГГИ В. Ф. Ермаковым были проведены специальные исследования для оценки возможности и точности измерения расхода воды на дистанционной гидрометрической установке ГР-64 путем интеграции скорости в живом сечении потока по схеме рис. 13.16 *б*, а также путем интеграции скорости на вертикалях. Была подтверждена возможность измерения расхода интеграцией скорости по живому сечению. Но было также установлено, что способ измерения расхода с определением средних скоростей на вертикалях путем интеграции имеет преимущество в быстроте и простоте производства работ (его удобно применять также и на дистанционной установке с ручным приводом ГР-70).

В заключение надо обратить внимание еще на одно обстоятельство. В гидрометрических створах часто наблюдается естественная косоструйность течений. Если интеграционное измерение производится вертушкой на штанге, ось которой нормальна к створу, то при перемещении ее по вертикали или по живому сечению вертушка будет работать в условиях как бы двойной косоструйности. В этом случае точность определения проекции скорости течения на нормаль к гидроствору или на ось вертушки будет зависеть от компонентных свойств вертушки. Еще менее точным будет измерение в том случае, когда естественная косоструйность имеет одинаковое направление с косоструйностью, создаваемой перемещением вертушки.

Интеграционное измерение скорости чаще производят вертушкой на тросе с грузом. В этом случае стабилизатор устанавливает груз с вертушкой по направлению струй; лопастный винт будет вращаться под воздействием суммарного вектора w (см. рис. 13.17). Вертушка будет регистрировать проекцию вектора w на ее ось (если она компонентная), но не проекцию скорости течения на нормаль к гидроствору.

Естественная косоструйность в потоке может достигать больших значений, причем различных в разных точках живого сечения. Учесть ее влияние на точность измерения скорости интеграционным способом затруднительно. При косоструйности более 10—15° применение интеграционного способа нецелесообразно.

Для измерения средней скорости течения на вертикали имеется гидрометрическая интеграционная установка ГР-101, состоящая из: 1) измерительного пульта, 2) грузов гидрометрических 25 и 50 кг, 3) специальной гидрометрической вертушки. Пульт служит для регистрации числа оборотов лопастного винта и времени. Грузы имеют донные контакты и кронштейны для установки вертушки; по устройству они похожи на груз, показанный на рис. 13.8. Гидрометрическая вертушка в основном аналогична вертушке ГР-21М, но отличается конструкцией контактного механизма, который обеспечивает получение электрических импульсов через каждый оборот лопастного винта.

Установка ГР-101 применяется с гидрометрическими лебедками (с лодки или катера) или с гидрометрическими дистанционными установками. Постоянство скорости перемещения вертушки по вертикали достигается вращением рукоятки лебедки в такт сигналам метронома, установленного в измерительном пульте.

Следует отметить, что интеграционное измерение средней скорости на вертикали широко применяется за рубежом. Западно-германская фирма Отт уже много лет выпускает интеграционную установку.

13.6. Особенности измерения расходов воды в различных условиях

Зарастающие русла. В зарастающих руслах необходимо выкашивать водную растительность на участке гидрометрического створа — в пределах 5—10 м выше и ниже створа по всей ширине реки в течение всего периода вегетации. При наличии плывущих в воде растений возможно наматывание их на лопастный винт вертушки. Поэтому, если сигналы начнут поступать неравномерно, следует вынуть ее из воды и очистить.

Ледяной покров и зашугованность. Измерение расходов с ледяного покрова допустимо при толщине льда не менее 10 см и температуре воздуха не выше —5°С. В зависимости от местных условий можно измерять расходы и при меньшей толщине льда, при этом обязательно принимать меры предосторожности.

Для облегчения работ в зимних условиях применяют отапливаемую будку (см. выше).

Промеры глубин на гидростворе при каждом измерении расхода в случае устойчивого русла и отсутствия шуги не обязательны. Рабочие глубины на промерных вертикалях определяют при этом интерполяцией между глубинами на скоростных вертикалях с учетом погруженного в воду льда.

Урезы воды определяют по нижней поверхности льда в лунках, пробитых в прибрежных участках створа.

При наличии подледной шуги или многоярусного льда промеры глубин производить обязательно. При промерах измеряют толщину льда, снега на льду, погруженного в воду льда, слоя подледной шуги и глубину воды в лунке.

Скорости течения при ледяном покрове измеряют на постоянных скоростных вертикалях. При неравномерном распределении в створе шуги необходимо назначать дополнительные скоростные вертикали. Если шуга занимает более 25% водного сечения, целесообразно перенести створ на новое место, где шуги меньше.

При наличии нескольких ярусов льда в русле расходы воды измеряют в каждом подледном потоке (рис. 13.18), а общий расход получают суммированием частичных расходов. Промеры

глубин и измерение скоростей в каждом потоке производят самостоятельно.

В сильные морозы вертушку с одной вертикали на другую надо переносить в ведре с водой для предохранения от обмерзания.

На реках, перемерзающих в зимний период, до начала весеннего половодья производят подготовительные работы для измерений при весеннем возобновлении стока воды. Для этого в наиболее пониженной части русла в снегу и во льду разрабатывают продольную канавку шириной около 1 м, длиной около 20 м. Первые расходы весеннего половодья измеряют в этой канавке, русло которой постепенно увеличивается от размыва.

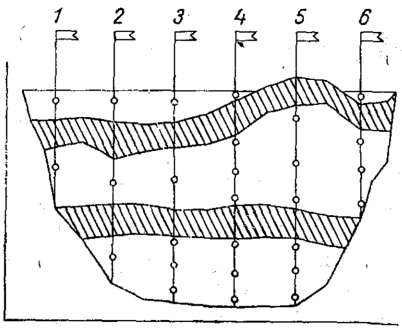


Рис. 13.18. Схема измерения скоростей при наличии двухъярусного льда.

Неустойчивые русла. Промеры глубин в таких руслах производят дважды: до и после измерения скоростей на вертикалях. Скорости на вертикалях измеряют начиная от дна к поверхности.

При значительной деформации русла необходимо периодически проверять, обеспечивает ли данное количество и расположение скоростных вертикалей достаточную точность измерения расхода. При необходимости вертикали перемещают и назначают дополнительные. В некоторых случаях створ переносят на новое место с более устойчивым руслом.

13.7. Вычисление расходов воды

Применяемые способы вычисления расхода воды основываются на приближенных решениях формул (12.4), (12.5) и (12.6). Первая из этих формул выражает аналитический способ, вторая — графический и третья — способ вычисления расхода по изотахам.

Наиболее употребителен аналитический способ. Он характеризуется относительной простотой вычислений и меньшей затратой времени. При правильном распределении скоростей течения по живому сечению он дает вполне удовлетворительную точность. В практике работ гидрологической сети аналитический способ вычисления измеренных расходов принят как основной.

Графический способ применяется при вычислении расходов, измеренных детальным способом. Он дает более точные результаты, поэтому применяется в случаях, когда нужна повышенная

точность вычисления, а кроме того, в сложных случаях, например при наличии подледной шуги, при широкой пойме с неправильным распределением скоростей течения и пр.

Способ вычисления расхода по изотахам применяется главным образом в сложных случаях: при большом количестве подледной шуги, при резко изменяющемся профиле дна и пр. Проведенные на профиле живого сечения изотахи позволяют наилучшим образом выявить распределение скоростей в сечении потока. Этот способ более трудоемок по сравнению с предыдущим.

Предварительное вычисление расхода воды аналитическим способом рекомендуется производить в поле, непосредственно после измерений, чтобы в случае обнаружения недочетов можно было сделать повторные измерения и наблюдения.

Аналитический способ. Расход воды вычисляется по приближенной формуле

$$Q = kv_1\omega_0 + \frac{v_1 + v_2}{2}\omega_1 + \ldots + \frac{v_{n-1} + v_n}{2}\omega_{n-1} + kv_n\omega_n, \quad (13.5)$$

где v_1, v_2, ..., — средние скорости на вертикалях; ω_0 — площадь живого сечения между берегом и первой скоростной вертикалью; ω_1 — площадь живого сечения между первой и второй вертикалями; ω_n — площадь живого сечения между последней скоростной вертикалью и берегом (или границей мертвого пространства); k — эмпирический коэффициент, значение которого для различных случаев принимается следующим:

	k
Пологий берег с нулевой глубиной на урезе	0,7
Обрывистый берег или неровная стенка	0,8
Гладкая стенка	0,9
Наличие мертвого пространства	0,5

В формуле (13.5) каждое слагаемое представляет собой частичный расход воды: первое слагаемое — частичный расход между берегом и первой скоростной вертикалью, второе слагаемое — частичный расход между первой и второй вертикалями и т. д. Каждый частичный расход вычисляется путем умножения средней скорости на соответствующий участок площади живого сечения (рис. 13.19). Таким образом, для вычисления расхода необходимо определить средние скорости на каждой скоростной вертикали и частичные площади живого сечения. Рассмотрим, как это делается практически.

Среднюю скорость на вертикали находят по эмпирическим формулам, подставляя в них скорости, измеренные в отдельных точках вертикали. В зависимости от числа точек и от состояния русла средняя скорость определяется по одной из следующих формул:

а) в случае определения расхода в открытом русле, не заросшем водной растительностью:

при измерении скорости в пяти точках на вертикали

$$v_в = 0{,}1\,(u_{пов} + 3u_{0{,}2} + 3u_{0{,}6} + 2u_{0{,}8} + u_{дон}), \qquad (13.6)$$

при измерении скорости в трех точках на вертикали

$$v_в = 0{,}25\,(u_{0{,}2} + 2u_{0{,}6} + u_{0{,}8}), \qquad (13.7)$$

при измерении скорости в двух точках на вертикали

$$v_в = 0{,}5\,(u_{0{,}2} + u_{0{,}8}), \qquad (13.8)$$

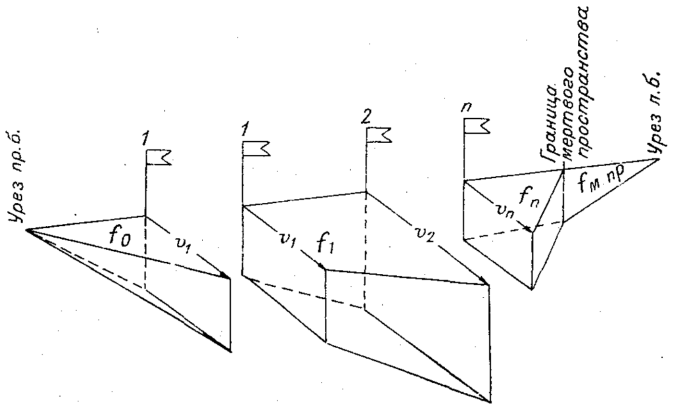


Рис. 13.19. Схема к вычислению расхода воды аналитическим способом.

при измерении скорости в одной точке на вертикали

$$v_в = u_{0{,}6}; \qquad (13.9)$$

б) в случае определения расхода в русле, заросшем водной растительностью, или наличии ледяного покрова:

при измерении скорости в шести точках на вертикали

$$v_в = 0{,}1\,(u_{пов} + 2u_{0{,}2} + 2u_{0{,}4} + 2u_{0{,}6} + 2u_{0{,}8} + u_{дон}), \qquad (13.10)$$

при измерении скорости в трех точках на вертикали

$$v_в = \frac{1}{3}(u_{0{,}15} + u_{0{,}5} + u_{0{,}85}), \qquad (13.11)$$

при измерении скорости в одной точке

$$v_в = k u_{0{,}5}, \qquad (13.12)$$

где коэффициент $k = 0{,}9$.

В приведенных формулах индексы «0,2», «0,4» и др. означают относительное положение точек измерения скоростей на вертикали, считая от поверхности воды.

Частичные площади живого сечения определяются с учетом глубин на скоростных и промерных вертикалях (рис. 13.20). Например, частичная площадь живого сечения между берегом и первой скоростной вертикалью

$$\omega_0 = \frac{1}{2} h_1 b_0 + \frac{h_1 + h_2}{2} b_1, \qquad (13.13)$$

частичная площадь живого сечения между первой и второй скоростными вертикалями

$$\omega_1 = \frac{h_2 + h_3}{2} b_2 + \frac{h_3 + h_4}{2} b_3 + \frac{h_4 + h_5}{2} b_4 \qquad (13.14)$$

и т. д. Обозначения в приведенных формулах ясны из рис. 13.20.

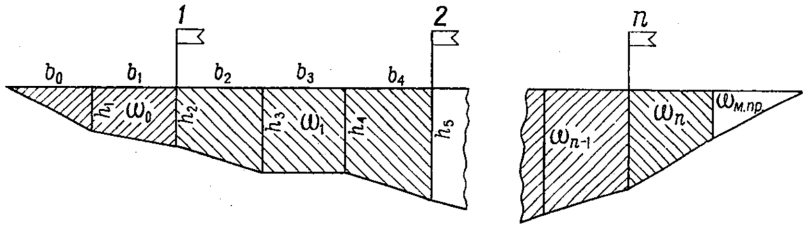


Рис. 13.20. Схема к вычислению частичных площадей живого сечения.

Если расход воды измерялся в размываемом русле, то при вычислении площадей живого сечения в расчет принимаются средние глубины по результатам промеров до измерения расхода и после него.

Вычисление расхода воды аналитическим способом по формуле (13.5) производится в табличной форме, в книжке стандартного образца. Обработка массового материала измерений расходов воды, например станций и постов государственной гидрологической сети, производится с помощью электронных вычислительных машин, для чего данные измерений расходов кодируются и затем наносятся на перфоленту, которая вводится в ЭВМ. Более подробно вопросы механизированной обработки рассматриваются в главе 35.

В случае если за время измерения расхода воды уровень в реке изменился, необходимо определить расчетный уровень, который принимается при вычислении расхода. Расчетный уровень необходим также при построении кривой расходов. При изменении уровня не более чем на 10 см за расчетный уровень принимают его среднее значение за время измерения расхода.

При быстром и значительном изменении уровня расчетный уровень определяется как средневзвешенный по формуле

$$H_{\text{расч}} = \frac{H_1 q_1 b_1 + H_2 q_2 b_2 + \ldots + H_n q_n b_n}{q_1 b_1 + q_2 b_2 + \ldots + q_n b_n}, \qquad (13.15)$$

где H_i — уровень над нулем графика для данной вертикали, относящийся по времени к моменту измерения скорости на глубине $0{,}6h$ (рис. 13.21); $q_i = v_i h_i$ — элементарный расход на данной вертикали; b_i — частичная ширина реки, относящаяся к данной вертикали.

Уточненный аналитический способ. Как уже указывалось, формула (13.5) является приближенной: в ней допускается линейная интерполяция средней скорости между соседними вертикалями. В действительности эпюра распределения средних скоростей по ширине реки имеет криволинейное очертание. Кроме того, объем части модели расхода между скоростными вертикалями вычисляется в указанной формуле как объем

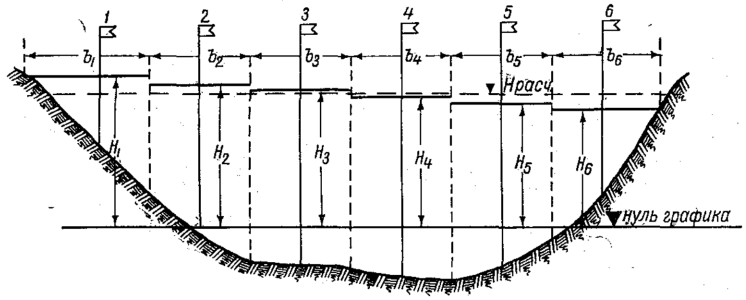


Рис. 13.21. Схема к вычислению расчетного уровня.

призмы, однако этот объем имеет более сложную форму и было бы правильнее определять его по формуле обелиска. В результате указанных допущений значение расхода, вычисленное по формуле (13.5), как правило, оказывается несколько заниженным.

А. П. Браславским [1] была предложена новая формула для аналитического вычисления расхода воды, правильнее учитывающая форму части модели расхода между соседними вертикалями, а также и наличие кривизны эпюры средних скоростей на вертикалях.

Не останавливаясь подробно на выводе формулы Браславского, покажем только сущность его предложения. Объем части модели расхода между двумя соседними вертикалями можно выразить формулой

$$\Delta Q = \int_{x=0}^{x=b} hv\,dx, \qquad (13.16)$$

где h — глубина; v — средняя скорость на вертикали; b — рас-

[1] Браславский А. П. К вопросу о формуле для вычисления расхода воды аналитическим способом.— «Сб. работ по гидрологии», № 1, ГГИ. Л., Гидрометеоиздат, 1959, с. 110—115.

стояние между вертикалями; x — текущая координата расстояния между вертикалями.

Величины h и v можно выразить как функцию x. Принимая линейное изменение глубины между вертикалями, причем $h_1 < h_2$, получим $h = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{b} x$. Выразив среднюю скорость по формуле Шези $v = C\sqrt{hI}$ и приняв по формуле Маннинга $C = \frac{1}{n} h^{1/6}$, где n — коэффициент шероховатости, получим

$$v = \frac{1}{n}\sqrt{I}\, h^{2/3} = a h^{2/3}. \qquad (13.17)$$

Если допустить, что на участке между соседними вертикалями шероховатость и уклон I неизменны, то величина a — постоянная. Тогда формула (13.16) может быть записана так:

$$\Delta Q = a \int_{x=0}^{x=b} \left(h_1 + \frac{h_2 - h_1}{b} x\right)^{5/3} dx. \qquad (13.18)$$

В результате интегрирования и преобразования последнего уравнения получается расчетная формула, имеющая в окончательном выражении весьма простой вид

$$\Delta Q = \omega K v_б, \qquad (13.19)$$

где ω — площадь живого сечения между соседними скоростными вертикалями; $v_б$ — бóльшая из средних скоростей на соседних вертикалях; K — коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $v_м/v_б$; $v_м$ — меньшая из средних скоростей на соседних вертикалях.

Полный расход определяется как сумма частичных расходов

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i K_i v_{iб}. \qquad (13.20)$$

Практически расчет выполняется в табличной форме (пример расчета см. в табл. 13.2).

Таблица 13.2

№ скоростной вертикали	Средняя скорость на вертикали, м/с	$\frac{v_м}{v_б}$	K	$v_б$, м/с	$v_{ср} = Kv_б$, м/с	ω м²	$\Delta Q = v_{ср}\omega$ м³/с
Урез л. б.	0,38						
1	0,47	0,80	0,91	0,47	0,42	3,84	1,64
2	0,64	0,74	0,88	0,64	0,56	5,72	3,32
3	0,55	0,85	0,93	0,64	0,60	5,81	3,46
4	0,36	0,66	0,85	0,55	0,47	6,05	2,80
Урез п. б.	0,18	0,55	0,80	0,36	0,29	5,84	1,67
							$Q = 12{,}89$ м³/с

Величина коэффициента K определяется по табл. 13.3.

Таблица 13.3

$\frac{v_м}{v_б}$	K	$\frac{v_м}{v_б}$	K	$\frac{v_м}{v_б}$	K	$\frac{v_м}{v_б}$	K
0,00—0,17	0,75	0,54—0,57	0,82	0,72—0,74	0,88	0,89—0,90	0,95
0,18—0,30	0,76	0,58—0,60	0,83	0,75—0,77	0,89	0,91—0,92	0,96
0,31—0,36	0,77	0,61—0,64	0,84	0,78—0,79	0,90	0,93—0,94	0,97
0,37—0,42	0,78	0,65—0,66	0,85	0,80—0,81	0,91	0,95—0,96	0,98
0,43—0,46	0,79	0,67—0,69	0,86	0,82—0,84	0,92	0,97—0,98	0,99
0,47—0,50	0,80	0,70—0,71	0,87	0,85—0,86	0,93	0,99—1,00	1,00
0,51—0,53	0,81			0,87—0,88	0,94		

Применение уточненного аналитического способа вычисления расхода воды наиболее эффективно при ровном корытообразном профиле дна реки. При этом эпюра средних скоростей течения на вертикалях имеет выпуклый вид по всей ширине реки. В таких условиях возможно значительное сокращение числа скоростных вертикалей до трех—пяти без понижения точности результатов определения расхода. Это бывает очень важно при необходимости быстро провести измерения, например при неустановившемся движении воды. Но и при неправильной конфигурации профиля дна реки применение рассматриваемого способа целесообразно, так как позволяет сократить некоторое число скоростных вертикалей. Число промерных вертикалей при этом сокращать нельзя.

По данным Браславского, формула (13.20) позволяет вычислять расходы с ошибкой не более 4,4% при сокращенном числе вертикалей, тогда как формула (13.5) при таком же уменьшенном числе вертикалей дает значительно большие ошибки, до 22%.

Графический способ. В этом способе интегрирование заменяется измерением площади эпюры элементарных расходов планиметром или палеткой.

Элементарный расход q выражается аналитически интегралом

$$q = \int_0^h u\,dh. \qquad (13.21)$$

Графически элементарный расход представляет собой площадь эпюры скоростей на вертикали (рис. 13.22 *а*). Элементарный расход на каждой вертикали может быть определен путем измерения площади эпюры скоростей планиметром или палеткой.

Средняя скорость течения для каждой вертикали определяется делением площади эпюры скоростей (или, что то же, элементарного расхода) на глубину вертикали.

Площадь эпюры элементарных расходов, построенная для всего живого сечения (рис. 13.22 *б*), равна полному расходу воды.

Для вычисления расхода выполняют ряд графических построений. Работа производится в такой последовательности:

1) на листе миллиметровки стандартного размера вычерчивают профиль поперечного сечения реки и наносят расчетный уровень (рис. 13.23, см. вклейку);

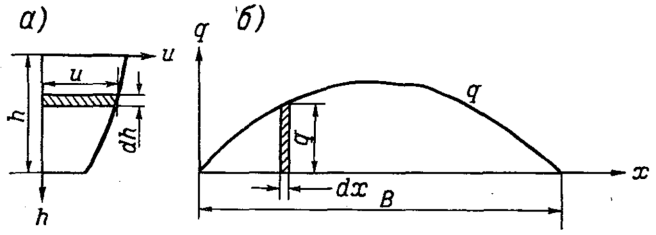


Рис. 13.22. Схема к аналитическим формулам определения элементарного (а) и полного расхода (б).

2) на том же листе вычерчивают эпюры скоростей для каждой вертикали в том же вертикальном масштабе, что и на профиле;

3) вычисляют средние скорости течения на вертикалях делением площади эпюры скоростей на рабочую глубину вертикали; площади эпюр определяют планиметром или палеткой;

4) строят эпюру средних скоростей; для этого над профилем по линиям соответствующих скоростных вертикалей откладывают от линии уровня воды значения средних скоростей и по полученным точкам проводят плавную линию; с эпюры снимают значения средних скоростей для каждой промерной вертикали и проставляют в соответствующую строку под профилем; масштаб скоростей на всех эпюрах принимается одинаковым;

5) вычисляют элементарные расходы для всех вертикалей, скоростных и промерных; для этого значения средних скоростей умножают на глубины; полученные значения элементарных расходов вписывают в соответствующую строку под профилем;

6) строят эпюру элементарных расходов, для этого полученные значения элементарных расходов откладывают вверх от линии уровня на каждой вертикали и по полученным точкам проводят плавную линию;

7) вычисляют расход воды, для этого измеряют площадь эпюры элементарных расходов планиметром или палеткой.

После вычисления расхода на чертеже составляют таблицу принятых данных.

Для наглядного представления о распределении скоростей в живом сечении на профиле вычерчивают изотахи.

Способ вычисления расхода воды по изотахам. Этот способ основан на использовании формулы (12.6) с заменой интегрирования суммированием конечного числа элементов, на которые разделяется модель расхода (рис. 13.24). Объем всей модели расхода, или расход воды, равен

$$Q=\frac{\omega_0+\omega_1}{2}a+\frac{\omega_1+\omega_2}{2}a+\ldots+\frac{\omega_{n-1}+\omega_n}{2}a+Q_k, \quad (13.22)$$

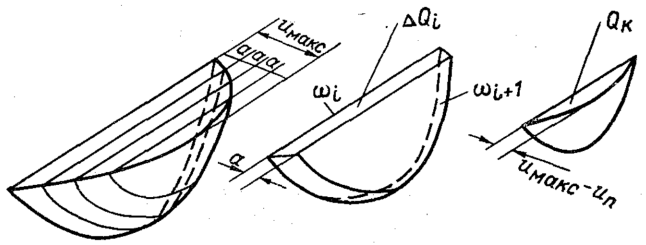


Рис. 13.24. Схема к вычислению расхода воды по изотахам.

где ω_0 — площадь живого сечения; ω_1, ω_2, ..., — площади, ограниченные первой, второй изотахой и т. д., a — интервал скорости между изотахами; Q_k — объем концевого отсека, равный

$$Q_k=\frac{2}{3}\omega_n(u_{макс}-u_n). \quad (13.23)$$

В формуле (13.23) ω_n — площадь, ограниченная последней изотахой; $u_{макс}$ — наибольшая скорость; u_n — скорость, соответствующая последней изотахе.

Изотахи проводят через равные интервалы скоростей, поэтому формула (13.22) может быть упрощена

$$Q=a\left(\frac{\omega_0}{2}+\omega_1+\omega_2+\ldots+\frac{\omega_n}{2}\right)+Q_k. \quad (13.24)$$

Вычисление расхода производится в такой последовательности:

1) на листе миллиметровки вычерчивают профиль поперечного сечения реки;

2) на том же листе вычерчивают эпюры скоростей на вертикалях в том же вертикальном масштабе;

3) на профиле поперечного сечения реки вычерчивают изотахи в количестве 6—10;

4) измеряют площади, ограниченные изотахами, применяя для этого планиметр или палетку;

5) вычисляют расход воды, для этого используют формулу (13.24); вычисления делают в табличной форме.

В заключение укажем, что вычислять расход можно с помощью тахиграфической кривой, для построения которой на оси абсцисс откладывают площади, ограниченные изотахами, по оси ординат — соответствующие им скорости; по полученным точкам проводят плавную кривую, которая и называется тахиграфической. Площадь, заключенная между кривой и осями координат, в масштабе чер-

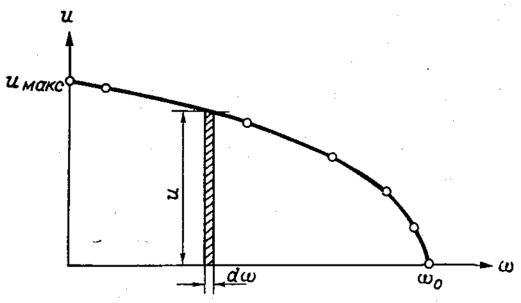


Рис. 13.25. Тахиграфическая кривая.

тежа равна расходу воды. Так, если расположить элементарную площадку $u\,d\omega$, как показано на рис. 13.25, то площадь, ограниченная тахиграфической кривой и осями координат, может быть представлена формулой

$$Q = \int_{\omega} u\,d\omega,$$

которая, как известно из предыдущего, выражает расход воды.

Можно расположить элементарную площадку в перпендикулярном предыдущему направлении, тогда ее площадь будет $\omega\,du$, а вся площадь тахиграфической кривой может быть представлена формулой

$$Q = \int_{0}^{u_{макс}} \omega\,du,$$

которая также выражает расход воды.

Практически расход воды определяется путем планиметрирования площади тахиграфической кривой.

13.8. Измерение расходов воды на малых реках и водотоках

На малых реках в период межени нередко встречаются затруднения при измерении расхода воды вертушкой вследствие малых скоростей течения и глубин. В таких случаях необходимо

улучшить условия протекания воды в русле, что может быть достигнуто различными способами.

Для успешного измерения расхода воды вертушкой требуется, чтобы глубина потока была не менее диаметра лопастного винта, а скорости течения воды были не менее удвоенной начальной скорости вертушки (см. табл. 11.1), так как при меньших скоростях возрастают погрешности измерения. При проведении мероприятий по улучшению протекания воды в русле надо обращать внимание на то, чтобы при этом не происходил размыв дна потока, а также чтобы створ не находился в зоне переменного подпора.

В зависимости от местных условий и технических возможностей расходы воды в малых водотоках можно измерять в естественных упорядоченных и канализированных руслах или искусственных контрольных руслах.

Измерение расходов в естественном русле. Для обеспечения удобства и требуемой точности измерения расхода естественное русло упорядочивается на длине, как правило, не менее десятикратной ширины. Работу производят в меженный период при низком уровне воды.

Упорядочение русла достигается следующими мероприятиями:

1) спрямлением русла;

2) планировкой береговых откосов и приданием им однообразного уклона, соответствующего углу естественного откоса грунта;

3) закреплением берегов. При скоростях течения до 1 м/с применяют одерновку откосов или засевание их травой. Если берега сложены легко размываемыми грунтами, то целесообразнее делать каменную отмостку;

4) расчисткой русла — уборкой камней и карчей, засыпкой ям и неровностей, при этом не должен быть нарушен естественный уклон дна;

5) канализацией русла, которая заключается в том, что на участке упорядоченного русла прокладывают канал прямолинейного направления с откосами, соответствующими углу естественного откоса грунта; канализацию русла обычно предпринимают при небольших расходах, не более 0,2 м^3/с.

Расходы воды в упорядоченном естественном русле измеряют гидрометрической вертушкой обычным способом.

Измерение расходов в искусственных контрольных руслах. Искусственные контрольные русла устраиваются в случаях, когда оказывается невозможным измерять расходы в естественном русле.

Необходимость устройства искусственного контрольного русла может возникнуть в следующих случаях:

1) при неустойчивости речного русла, выражающейся в деформациях дна как на самом гидрометрическом створе, так и ниже него;

2) при недостаточных скоростях течения, близких к начальной скорости вертушки;

3) при больших скоростях течения, но слишком малых глубинах, меньших, чем диаметр лопастного винта вертушки.

Искусственные контрольные русла бывают различных типов и представляют собой инженерные сооружения стационарного типа.

Контрольное русло типа, показанного на рис. 13.26, устраивается преимущественно на горных реках с большим уклоном и скальным руслом, заполненным крупным аллювием; особенно удобно в местах резкого перелома уклона — на порогах, перепадах, водопадах. Такое контрольное русло представляет собой

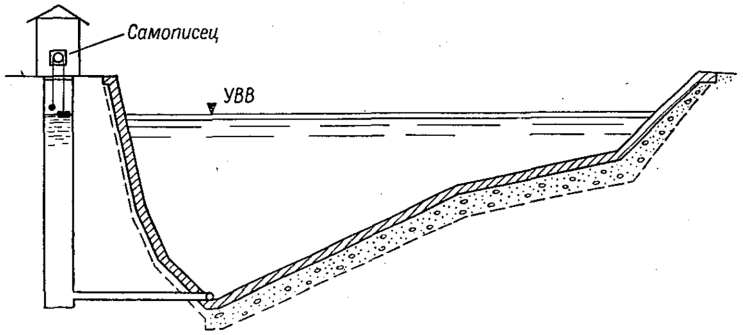


Рис. 13.26. Контрольное русло.

полосу бетонированного дна на протяжении 0,1—0,2 ширины реки, но не уже 2 м, возвышающуюся над естественным дном на 0,2—0,3 м. Впоследствии речное русло выравнивается заподлицо с порогом в результате отложения наносов.

Глубина заложения порога в дно реки принимается при скальном дне 0,5 м, а при рыхлом аллювиальном слое до 2 м.

Для регистрации колебаний уровня створ оборудуют самописцем, устанавливаемым, как показано на рис. 13.26. Нулевое деление рейки контрольного водомерного поста должно быть на одной отметке с наиболее пониженной частью порога.

Расходы воды измеряются вертушкой обычным способом.

На равнинных реках с малым уклоном дна применяют обычно контрольное русло с порогом. Устройство его на реке устраняет возможность деформаций дна от размывов, а также исключает влияние переменного подпора от нижележащего участка реки.

Контрольное русло с порогом представляет собой низконапорную глухую плотину из бетона или железобетона с заглублением в дно реки на 0,5—1,5 м. Превышение гребня порога над дном реки принимается порядка 0,5 м. В поперечном сечении порог должен быть закругленным или укреплен стальными

уголками, заделываемыми в бетон заподлицо с поверхностью порога. В средней части русла реки порогу придается плавное очертание в соответствии с естественным профилем русла, а сопряжение с берегами делается в виде вертикальных или наклонных стенок.

Гидрометрический створ для измерения расхода воды вертушкой оборудуется мостиком. Водомерный пост обычно размещают в 2—5 м выше порога, в пределах подпора, и оснащают самописцем уровня.

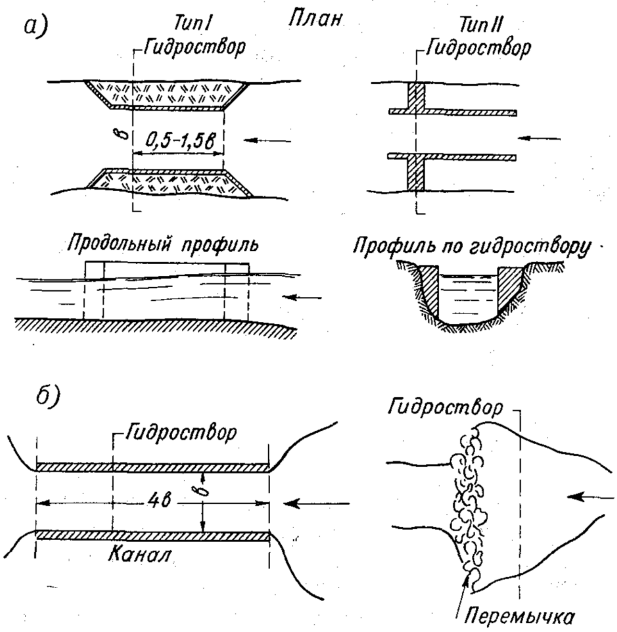


Рис. 13.27. Контрольные сечения временного типа.

а — в руслах с малыми скоростями течения; *б* — в руслах с недостаточными глубинами.

Если с помощью порога-контроля необходимо измерять как малые расходы воды, до нескольких литров в секунду, так и относительно большие расходы, до нескольких кубических метров в секунду, то он должен быть оборудован мерным водосливом.

Для устройства искусственного контрольного русла выбирают на реке наиболее подходящее место, производят там изыскания и составляют проект, по которому осуществляют строительные работы. При этом используют рекомендации Наставления [33] и типовые проекты, разработанные в ГГИ.

Контрольные сечения временного типа применяют в случае, если невозможно построить капитальное сооружение. Их устраи-

вают при слишком малых скоростях течения или при недостаточных глубинах.

Для увеличения скоростей течения делают сужение потока, при этом надо иметь в виду, что слишком сильное сужение может вызвать размыв русла, чего надо избегать. Сужение русла достигается устройством продольных ряжевых или шпунтовых стенок, примыкающих к берегам (рис. 13.27 *а*): пространство между стенками и берегами засыпают грунтом и утрамбовывают.

Для увеличения глубин контрольные сечения можно делать двух типов.

Первый представляет собой искусственно канализированный участок реки (рис. 13.27 *б*, левый). Длину суженной части принимают равной четырехкратной ширине. Гидрометрический створ и самописец уровня располагают на расстоянии 0,6—0,8 длины канала от входной части.

Второй представляет собой фильтрующую перемычку из камня (рис. 13.27 *б*, правый), которая создает подпор воды, чем и достигается увеличение глубин. Применяется на реках с незначительным содержанием наносов. Гидрометрический створ и самописец уровня располагают в зоне подпора.

В обоих типах при увеличении глубины должно быть обеспечено условие, чтобы скорости течения были бы не менее предельно допустимых для применяемой вертушки.

Измерение расходов в контрольных сечениях временного типа выполняют обычными способами.

13.9. О точности измерения расходов воды гидрометрической вертушкой

При измерении расхода воды гидрометрической вертушкой, как и при всяких измерениях, неизбежно возникают погрешности. Расход, определенный методом «скорость—площадь» с применением в качестве измерителя скорости гидрометрической вертушки, отличается от действительного расхода воды на какую-то величину ΔQ, которая включает в себя погрешности всех измерений при определении расхода. Можно записать, что

$$Q_{изм} = Q_д \pm \Delta Q, \qquad (13.25)$$

где $Q_{изм}$ — измеренный расход, $Q_д$ — действительный расход; ΔQ — погрешность измерения (абсолютная).

Погрешность измерения расхода выражают в процентах от действительного расхода

$$\Delta Q = \frac{Q_{изм} - Q_д}{Q_д} \cdot 100. \qquad (13.26)$$

Рассмотрим источники погрешностей в определении расхода воды и оценим их величины. На точность измерения расхода оказывают влияние:

1) свойства и качество измерительных приборов,
2) методы и условия производства измерений,
3) изменчивость измеряемых величин во времени.

Кроме погрешностей, возникающих при измерении, на точность определения расхода воды влияют способ вычисления расхода и ошибки, которые могут быть при этом допущены. При надлежащем контроле эти ошибки можно устранить. Однако применение того или иного вычислительного приема не может устранить погрешности, допущенные при полевых измерениях.

Все погрешности при измерении расхода можно разделить на случайные и систематические.

Случайные погрешности могут возникать как при измерении площади живого сечения, так и при измерении скоростей течения. При каждом измерении глубин, расстояний между вертикалями, скоростей погрешности могут быть как положительные, так и отрицательные.

Причины случайных погрешностей при измерении площади живого сечения следующие: 1) приближенность измерения глубин и расстояний между вертикалями, 2) невозможность строго выдержать постоянство положения промерных вертикалей. По данным полевых измерений случайная погрешность в определении площади живого сечения составляет около 3%.

Причины случайных погрешностей при измерении скоростей течения следующие: 1) приближенность определения продолжительности измерения (округление отсчетов времени по секундомеру до целой секунды, некоторая неопределенность моментов начала и конца сигнала из-за конструктивных особенностей контактных устройств вертушек и пр.), 2) недостаточное осреднение во времени пульсационных изменений скорости, 3) приближенность вычисления средней скорости на вертикалях.

Общая сумма случайных погрешностей при измерении расхода воды составляет около 3—4%.

Систематические погрешности, в отличие от случайных, оказывают одностороннее влияние на результат измерения, завышая или занижая значение измеряемой величины.

Причины систематических погрешностей при измерении площади живого сечения следующие: 1) невертикальное положение штанги или троса при промерах (глубины завышаются), 2) набегание воды на штангу или наметку, 3) влияние грунта дна при промерах — при мягком дне глубины завышаются, при каменистом иногда занижаются, и др. Суммарное влияние указанных причин чаще приводит к некоторому завышению площади живого сечения, до 2—3%.

Причины систематических погрешностей при измерении скоростей течения следующие: 1) погрешность в тарировании вертушки (в пределах прямолинейного участка тарировочной кривой погрешность обычно не превышает ±2%, на криволинейном участке — до ±5%); 2) различие условий работы вертушки

при тарировании и при измерении скорости в турбулентном потоке; 3) изменение трения в механизме вертушки в процессе ее эксплуатации (трение возрастает, вызывая занижение измеряемых скоростей, особенно при малых значениях последних); 4) влияние вязкости масла (при понижениях температуры вязкость возрастает, и наоборот); 5) неучитываемое влияние косоструйности; 6) погрешность, вносимая неопределенностью экстраполяции профиля скоростей по вертикали от нижней точки измерения до дна, и др.

Общая величина систематических погрешностей при определении расхода воды находится обычно в пределах — 1, +5%.

На точность измерения расхода воды значительное влияние оказывают условия производства работ, например наличие в русле значительного количества шуги, наличие водной растительности, заросшая пойма и пр. В табл. 13.4 приводятся ориентировочные значения погрешностей определения расхода воды при различных условиях измерения (см. в кн. «Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР»).

Таблица 13.4

Ориентировочные значения погрешностей определения расхода воды методом «скорость—площадь» (измерение гидрометрической вертушкой)

Условия измерения	Погрешность в %	
	средняя	предельная
Русло без поймы	1—2 / 2—4	2,5—5 / 5—10
Русло с поймой	3—5	7—12
Заросшее русло	3—5	8—12
Ледостав	1—3	2,5—8
Ледостав, русло зашуговано более чем на 20%	5—7 / 10—15	12—16 / 25—45
Горные реки с относительно чистым руслом и спокойным течением	2—4 / 3—5	5—10 / 7—12
Горные реки с валунным руслом и бурным течением	5—10	12—25

Примечание: в числителе указаны погрешности расхода воды, измеренного детальным способом, в знаменателе — основным способом.

Теоретические основы оценки погрешности определения расхода воды сформулированы Г. В. Железняковым и Б. Б. Данилевичем [20]. Вид формулы для определения погрешности измерения расхода воды ΔQ зависит от того, какая формула принята для определения расхода Q. Если, например, для определения

расхода принять формулу (12.5), то ее можно аппроксимировать в виде

$$Q = kq_1b_0 + \frac{q_1 + q_2}{2} b_1 + \ldots + \frac{q_{n-1} + q_n}{2} b_{n-1} + kq_nb_n, \quad (13.27)$$

где q — расход на вертикали, b — расстояние между вертикалями. Тогда, согласно [20], формула погрешности будет иметь вид

$$\Delta Q = \omega_v \Delta h + \omega \Delta v + \Delta b \sum q, \quad (13.28)$$

где Δh — абсолютная погрешность измерения глубин; Δv — абсолютная погрешность измерения скорости течения; Δb — абсолютная погрешность измерения расстояний между вертикалями; ω_v — площадь, ограниченная эпюрой распределения средних скоростей на вертикалях; ω — площадь живого сечения; $\sum q$ — сумма расходов воды на скоростных вертикалях.

Абсолютные значения погрешностей Δh, Δv, Δb определяются в зависимости от условий производства работ и применяемых приборов с учетом случайных и систематических погрешностей.

Площадь, ограниченная эпюрой распределения средних скоростей на вертикалях, определяется по формуле

$$\omega_v = \frac{1}{2} v_1b_0 + \frac{v_1 + v_2}{2} b_1 + \ldots + \frac{v_{n-1} + v_n}{2} b_{n-1} + \frac{1}{2} v_nb_n, \quad (13.29)$$

где v_1, v_2, ... — средние скорости на вертикалях; b_0 — расстояние между берегом и первой вертикалью; b_1, b_2 ... — расстояния между смежными вертикалями; b_n — расстояние между последней вертикалью и берегом.

Сумма расходов на вертикалях определяется по формуле

$$\sum q = h_1v_1 + h_2v_2 + \ldots + h_{n-1}v_{n-1} + h_nv_n, \quad (13.30)$$

где h_1, h_2, ... — глубины на вертикалях; v_1, v_2, ... — средние скорости на вертикалях.

Некоторые дополнительные теоретические положения о точности определения расходов воды по измеренным местным скоростям и глубинам приводятся в монографии [21]. Рассмотрение этого вопроса выходит за рамки учебника.

Глава 14

Измерение расходов воды поплавками

14.1. Измерение расходов воды поверхностными поплавками

Для измерения расхода воды выше и ниже основного гидрометрического створа на равных расстояниях разбивают дополни-

тельно два створа с таким расчетом, чтобы продолжительность хода поплавков между верхним и нижним створами была не менее 20 с. Такая продолжительность обусловливается тем, что при отсчетах времени по секундомеру при определении продолжительности хода поплавков могут быть допущены ошибки за счет округления до целой секунды, и, кроме того, за счет некоторой неточности определения моментов прохождения поплавка через линии створов. Наблюдения показали, что ошибки в определении продолжительности хода поплавков могут достигать 1—2 с. При больших скоростях течения ошибки в определении продолжительности хода поплавков оказывают меньшее влияние на точность измерения скорости. Поэтому при скоростях более 2 м/с принимают меньшую продолжительность хода поплавков, но не менее 10 с.

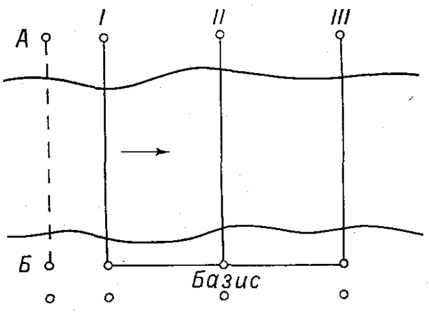


Рис. 14.1. Расположение створов для измерения расхода воды поплавками.

I — верхний створ; *II* — основной створ; *III* — нижний створ; *АБ* — пусковой створ.

Расстояние между верхним и нижним створами — базис — измеряют стальной лентой в два хода.

В 5—10 м выше верхнего створа разбивают пусковой створ, обозначая его вехами на берегах; он служит для запуска поплавков. Остальные створы также закрепляют вехами. На основном створе при ширине реки до 75—100 м натягивают размеченный трос. Расположение створов показано на рис. 14.1.

Определение высоты уровня, уклона водной поверхности, а также промеры глубин при измерении расхода поплавками производятся способами, описанными ранее.

Измерение скоростей течения поплавками производят в такой последовательности:

1) на пусковом створе забрасывают в реку последовательно 15—25 поплавков — на узких реках с берега, на широких с лодки; поплавки пускают из пяти—восьми мест по ширине реки так, чтобы через основной створ они проходили группами по две—четыре штуки;

2) при прохождении каждого поплавка через створы наблюдатели дают сигналы; продолжительность хода каждого поплавка от верхнего до нижнего створа определяется по секундомеру;

3) на основном створе в момент пересечения его поплавком отмечают расстояние от постоянного начала до поплавка в створе. На реках шириной до 20—30 м это можно делать

путем наблюдения с берега при наличии перетянутого через реку размеченного троса; при большой ширине реки наблюдения ведут с лодки, а при невозможности пользоваться размеченным тросом делают засечки на плане угломерными инструментами.

При измерении скоростей течения у берегов, где поплавки могут задерживаться прибрежной растительностью и где скорости течения малы, рекомендуется пускать поплавки на более коротком участке, разбивая для этой цели верхний и нижний створы на меньшем расстоянии между ними.

При невозможности пустить поплавки по всей ширине реки измеряют только наибольшую поверхностную скорость течения. Такой случай возможен, например, на горных реках с быстрым течением, где поплавки относятся к стрежню. При измерении расхода по наибольшей поверхностной скорости порядок и состав работ остается тот же, но со следующими изменениями:

1) поплавки забрасывают только на стрежень реки, где наблюдается наибольшая скорость течения;

2) количество поплавков уменьшается до 5—10;

3) положение поплавков в основном створе не определяют;

4) из всех запущенных поплавков отбирают три поплавка с наименьшей продолжительностью хода.

Вычисление расхода воды. Если измерение производили поплавками, запускаемыми по всей ширине реки, то вычисление выполняют в такой последовательности:

1) на клетчатку, помещенную в «Книжке для записи измерения расхода воды поплавками», наносят точки для каждого поплавка, для этого по оси абсцисс откладывают расстояние от постоянного начала до точки пересечения поплавком линии среднего створа, а по оси ординат — продолжительность хода поплавка между верхним и нижним створами. По нанесенным точкам проводят плавную эпюру продолжительности хода поплавков по ширине реки (рис. 14.2), при этом центры тяжести групп точек определяют глазомерно;

2) если эпюра имеет плавные очертания, то на ней через равные расстояния назначают скоростные вертикали, совмещая их с промерными; если эпюра имеет перегибы, приуроченные обычно к перегибам линии дна, то назначают дополнительные вертикали в местах перегибов;

3) для каждой скоростной вертикали снимают с эпюры продолжительность хода поплавка и вычисляют поверхностную скорость течения $v_i = l/t$, где t — продолжительность хода поплавка, l — расстояние между верхним и нижним створами;

4) по данным промеров глубин вычисляют площади живого сечения между скоростными вертикалями;

5) вычисляют фиктивный расход воды по формуле

$$Q_{\text{ф}} = kv_1\omega_0 + \frac{v_1 + v_2}{2}\omega_1 + \ldots + \frac{v_{n-1} + v_n}{2}\omega_{n-1} + kv_n\omega_n, \quad (14.1)$$

где v_i — поверхностные скорости на скоростных вертикалях; ω_i — площади живого сечения между скоростными вертикалями; k — коэффициент, учитывающий наличие течения воды на урезе, определяемый по данным, приведенным в п. 13.7;

6) вычисляют действительный расход воды по формуле

$$Q = Q_ф K_1, \tag{14.2}$$

где K_1 — переходный коэффициент от фиктивного расхода к действительному.

Переходный коэффициент может быть определен путем одновременного измерения расхода воды вертушкой и поплавками.

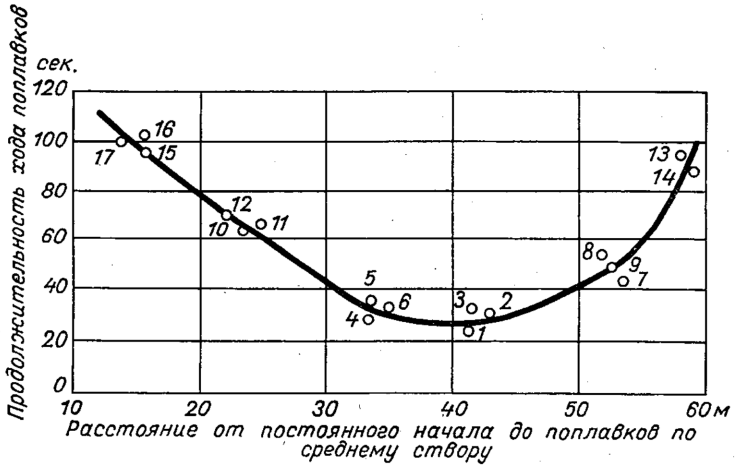


Рис. 14.2. Эпюра продолжительности хода поплавков.

Приняв расход, измеренный вертушкой, за действительный, значения переходного коэффициента находят из соотношения

$$K_1 = \frac{Q}{Q_ф}. \tag{14.3}$$

Для определения K_1 при других отметках уровня воды производят несколько таких одновременных измерений и строят график зависимости K_1 от уровня, используемый в дальнейшем при поплавочных измерениях расхода.

Значения переходного коэффициента часто выражают формулой

$$K_1 = \frac{v}{v_{пов}}, \tag{14.4}$$

которая получается из формулы (14.3) при сокращении на площадь живого сечения ω; $v_{пов}$ — средняя поверхностная скорость.

При отсутствии значений K_1, определенных описанным выше приемом, для получения его значения можно пользоваться эмпирическими формулами.

Следует отметить, что имеется большое количество эмпирических формул. Наряду с этим имеются формулы, выведенные на теоретической основе, в частности формулы Г. В. Железнякова [21]. Ввиду сложности скоростного поля естественных потоков и других факторов точное определение значения K_1 пока не представляется возможным. Определение его по имеющимся формулам производится с погрешностью до $\pm 10\%$. Поэтому выбор той или иной формулы для определения K_1 не имеет принципиального значения [28].

Приведем некоторые новые формулы.

Формула И. Ф. Карасева [1]

$$K_1 = 0{,}77 + 0{,}043\sqrt{C^* - 3{,}8}, \tag{14.5}$$

Формула Г. В. Железнякова (аппроксимированная) [21]

$$K_1 = 0{,}61\,(C^*)^{0{,}125}. \tag{14.6}$$

В этих формулах $C^* = \frac{C}{\sqrt{g}}$, где C — коэффициент Шези (см. приложение 4).

Если измерение расхода воды производили поплавками, запускаемыми только на стрежень реки, то вычисление расхода делают так:

1) вычисляют площадь живого сечения (по данным промеров);

2) определяют наибольшую поверхностную скорость течения как среднее арифметическое из показаний трех поплавков с наименьшей продолжительностью хода между верхним и нижним створами;

3) вычисляют фиктивный расход по формуле

$$Q'_{\text{ф}} = v_{\text{макс}}\omega, \tag{14.7}$$

где $v_{\text{макс}}$ — наибольшая поверхностная скорость течения;

4) вычисляют действительный расход по формуле

$$Q = Q'_{\text{ф}}K_2, \tag{14.8}$$

где K_2 — переходный коэффициент от фиктивного расхода к действительному.

Переходный коэффициент можно также выразить формулой

$$K_2 = \frac{v}{v_{\text{макс}}}, \tag{14.9}$$

где v — средняя скорость в живом сечении; $v_{\text{макс}}$ — наибольшая поверхностная скорость течения.

---

[1] Карасев И. Ф. Распределение продольных скоростей течения в поймах и руслах рек.— «Труды ГГИ», 1973, вып. 202, с. 3—38.

Переходный коэффициент K_2 определяют по данным одновременных измерений расхода вертушкой и поплавками, как было указано выше. При отсутствии опытных данных величину K_2 можно определить по аппроксимированной формуле Г. В. Железнякова

$$K_2 = 0{,}50\,(C^*)^{0{,}110}. \qquad (14.10)$$

Ориентировочные значения переходных коэффициентов K_1 и K_2 дает табл. 14.1.

Таблица 14.1

Значения K_1 и K_2

Характеристика русла (поймы)	K	Средняя глубина, м		
		<1	1–5	>5
Русла прямые, чистые земляные (глина, песок) галечные, гравийные	K_1	0,80	0,84	0,86
	K_2	0,64	0,66	0,67
Русла извилистые, частично заросшие травой, каменистые. Поймы, сравнительно разработанные с растительностью (трава, редкий кустарник)	K_1	0,75	0,80	0,83
	K_2	0,60	0,63	0,65
Русла и поймы значительно заросшие, с глубокими промоинами	K_1	0,65	0,74	0,80
	K_2	0,55	0,59	0,62
Русла извилистые, сложенные из крупных валунов. Поймы со сложными косоструйными течениями				
Поймы сплошь лесные, таежного типа	K_1	0,57	0,69	0,75
	K_2	0,46	0,56	0,60

14.2. Измерение расходов воды глубинными поплавками

Глубинные поплавки применяют при очень малых скоростях течения — меньше удвоенной начальной скорости вертушки. Применение глубинных поплавков в таких случаях позволяет повысить точность измерения скоростей течения.

При употреблении глубинных поплавков (см. рис. 11.27) принято измерять скорости течения на вертикалях в следующих точках:

— при свободном от водной растительности русле и глубине на вертикали менее 0,5 м в одной точке — $0{,}6h$; при глубине более 0,5 м в двух точках — 0,2 и $0{,}8h$;

— при наличии водной растительности в русле выше и ниже створа и глубине на вертикали менее 0,5 м в одной точке — $0{,}5h$; при глубине более 0,5 м в трех точках — 0,15; 0,5; $0{,}85h$.

Скорости измеряют с лодки, устанавливаемой на якоре в линии створа. Для определения пути, пройденного поплавком,

лодку оборудуют створными рейками, скрепленными жесткой рамой (рис. 14.3). Концы створных реек должны находиться друг от друга на расстоянии, равном 1 м, и располагаться на одной линии.

Поплавки запускают с помощью шеста на 0,25—0,5 м выше верхней створной рейки и не ближе 1 м от борта лодки. Продолжительность хода поплавков между створными рейками измеряют по секундомеру. В каждой точке вертикали измерения делают не менее трех раз, при этом расхождения продолжительности хода поплавков не должны отличаться более чем на 10%,

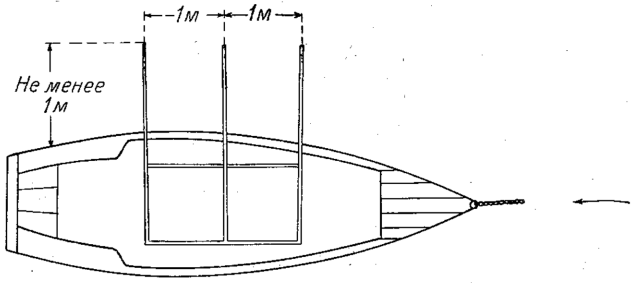


Рис. 14.3. Схема оборудования лодки для измерения скоростей глубинными поплавками.

в противном случае делают дополнительные измерения. В расчет принимают среднюю продолжительность. Результаты измерений записывают в «Книжку измерений расхода вертушкой», а обработку результатов измерений производят аналитическим способом, как при измерении скоростей вертушкой.

Глава 15

Расчетный способ определения расходов воды

15.1. Сущность способа

Сущность этого способа заключается в том, что площадь живого сечения определяется по имеющемуся поперечному профилю створа, а средняя скорость потока вычисляется по формуле Шези; значения расхода получаются умножением площади на среднюю скорость

$$Q = \omega v,$$

где ω — площадь живого сечения; v — средняя скорость течения реки, вычисленная по формуле Шези.

Формула Шези имеет вид

$$v = C\sqrt{RI}, \qquad (15.1)$$

где C — коэффициент Шези, имеющий размерность $м^{0,5}/с$; R — гидравлический радиус; I — уклон водной поверхности.

Формула Шези справедлива для равномерного движения воды, которое характеризуется тем, что гидравлические элементы потока: живое сечение, глубина, ширина, скорость, уклон, и пр.— не изменяются по длине потока. В естественных реках соблюдение указанных условий может наблюдаться далеко не всегда и то с некоторым приближением. В большинстве случаев в реках наблюдается неравномерное движение воды, характеризующееся непрерывным изменением по длине потока указанных гидравлических элементов. Кроме того, в реках может иметь место неустановившееся движение воды, характеризующееся изменением расхода воды во времени, при прохождении паводков, половодий. При выраженном неравномерном и неустановившемся движении воды формула Шези неприменима. В этих случаях определение расхода расчетным путем встречает большие трудности и в этом учебнике не рассматривается; соответствующие указания по подобным расчетам студенты получат при прохождении курса гидравлики.

Движение воды, близкое к равномерному, может наблюдаться в реках на прямолинейных участках с правильной формой поперечного сечения русла, не заросшего водной растительностью. Такие условия соблюдаются обычно только при движении воды в главном русле. При выходе потока на пойму условия его движения существенно изменяются, особенно если поверхность поймы неровная, с протоками, покрыта древесной и кустарниковой растительностью. В тех случаях, когда поверхность поймы ровная и незаросшая и, кроме того, соблюдается параллельность и прямолинейность осей главного русла и поймы, можно с некоторым приближением считать движение воды как в русле, так и на пойме равномерным и, следовательно, применять для расчетов формулу Шези.

Таким образом, мы рассмотрели случаи, в которых применима формула Шези для определения расхода воды расчетным способом. Теперь рассмотрим некоторые расчетные приемы.

15.2. Вычисление расходов воды в беспойменных створах

Если на данном створе производилось регулярное измерение расходов воды, но не было измерений при высоких уровнях, то для их определения можно применить формулу Шези. Площадь живого сечения определяется по поперечному профилю створа. Для определения коэффициента Шези применяют такой прием.

По данным измеренных ранее расходов воды определяют значения коэффициентов Шези по формуле

$$C = \frac{v}{\sqrt{h_{ср} I}}, \qquad (15.2)$$

где v — средняя скорость течения реки; $h_{ср}$ — средняя глубина, определяемая делением площади живого сечения на ширину реки (для равнинных рек гидравлический радиус с достаточной точностью принимается равным средней глубине); I — уклон водной поверхности, измеряемый на уклонных водомерных постах или путем нивелирования.

По полученным значениям коэффициентов Шези строят график зависимости этого коэффициента от уровня (рис. 15.1). При высоких уровнях часто, особенно на больших реках, коэффициент Шези принимает постоянное значение. Кривую $C = f(H)$ экстраполируют до уровней, при которых надо определить расходы воды, и таким путем находят значения C при высоких уровнях.

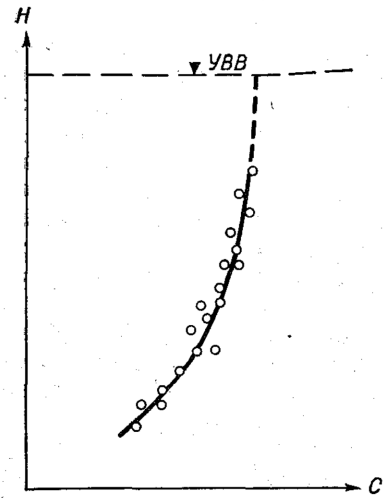


Рис. 15.1. График зависимости $C=f(H)$.

Для вычисления расхода при заданном высоком уровне применяют формулу

$$Q = \omega C \sqrt{h_{ср} I}, \qquad (15.3)$$

где ω — площадь живого сечения при заданном уровне; C — коэффициент Шези, определенный, как указано выше; $h_{ср}$ — средняя глубина при заданном уровне; I — уклон водной поверхности при заданном уровне.

Значение уклона при высоких уровнях определяется по наблюдениям на уклонных водомерных постах или путем нивелирования. В последнем случае при прохождении высокого паводка отметки уровня воды должны регистрироваться максимальными рейками, а при отсутствии их — уровенными кольями, забиваемыми одновременно выше и ниже створа, в котором определяется расход. Сразу после спада воды между максимальными рейками или уровенными кольями делается нивелировка двойным ходом по IV классу нивелирования, а при малых уклонах — по III классу.

Если на выбранном для определения расхода створе ранее не было систематических или даже отдельных измерений расходов воды и нельзя получить значение коэффициента Шези по данным натурных измерений, как указывалось выше, определяют этот коэффициент по эмпирическим формулам. Наиболее часто у нас для этой цели применяется формула Н. Н. Павловского

$$C=\frac{1}{n}R^{y}, \qquad (15.4)$$

где n — коэффициент шероховатости, определяемый по приложениям 2 и 3 в зависимости от характеристик русла; R — гидравлический радиус, за который на равнинных реках принимают, как уже указывалось, среднюю глубину; y — показатель степени, определяемый по формуле Павловского

$$y=2{,}5\sqrt{n}-0{,}13-0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n}-0{,}10). \qquad (15.5)$$

Для определения коэффициента Шези по формуле Павловского составлена таблица, которой и следует пользоваться при расчетах (приложение 4).

Для определения площади живого сечения делают нивелировку по линии створа до отметок, несколько превышающих уровень высоких вод на обоих берегах, и промеры глубин в русле. По этим данным вычерчивают поперечный профиль, на нем проводят линию уровня высоких вод, затем вычисляют ω и $h_{ср}$.

Отметки уровня высоких вод при отсутствии наблюдений за уровнем устанавливают по меткам (следам) уровня на береговых склонах — отложениям растительного мусора (травы, водорослей и пр.), илистых частиц, по размыву берегов, смыву наносной породы.

Положение высоких уровней за прошлые годы определяют по опросу местных жителей-старожилов. Во всех случаях определения отметок уровней высоких вод необходимо убедиться, что эти уровни не были вызваны подпором, например от затора, зажора или других причин.

Уклон водной поверхности определяют путем нивелирования меток уровня высоких вод. Однако предварительно необходимо очень внимательно осмотреть и отобрать наиболее достоверные метки и закрепить их пикетными кольями.

15.3. Вычисление расходов воды на пойменных створах

Применение формулы Шези для вычисления расходов на пойменных створах возможно только при указанных ранее условиях. Однако надо иметь в виду, что при подъеме уровня выше бровок главного русла и выходе воды на пойму (рис. 15.2) гидравлические условия протекания потока существенно

изменяются. Образуются как бы два потока при односторонней пойме или три при двусторонней пойме. Эти потоки не изолированы друг от друга, а взаимодействуют. Скорости течения в пойменных потоках меньше, чем в главном русле, вследствие чего в зонах соприкосновения этих потоков возникают значительные градиенты скоростей в поперечном направлении, результатом чего является образование вихрей в поверхностях раздела. Описанные явления исследованы экспериментально в лабораторных условиях (Г. В. Железняков, В. Н. Гончаров, И. П. Спицын и др.). Натурные наблюдения за гидравлическими явлениями при выходе потока на пойму проведены Д. Е. Скородумовым.

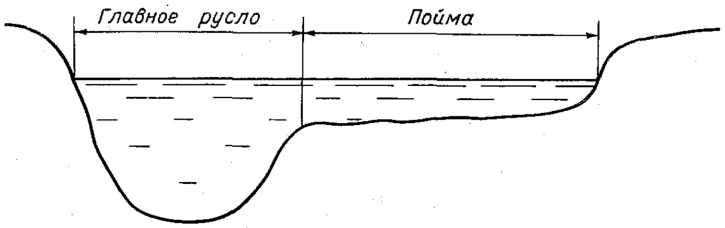


Рис. 15.2. Схема пойменного створа.

При широких поймах со сложным рельефом образуются кинематически обособленные зоны, т. е. как бы несколько потоков, находящихся во взаимодействии. Четкое выявление кинематически обособленных зон возможно по поперечному профилю пойменного створа только по данным измерения скоростей на достаточном количестве вертикалей и последующего проведения изотах на профиле.

Взаимодействие руслового и пойменного потоков приводит к некоторому уменьшению средней скорости в главном русле и увеличению скоростей в пойменных отсеках, особенно вблизи главного русла. Таким образом, пропускная способность главного русла соответственно уменьшается. Следует отметить, что при непараллельности осей главного русла и поймы степень взаимодействия увеличивается и пропускная способность русла еще более уменьшается.

На пойменных участках шероховатость больше, чем в русле. При расчете расхода в пойменных створах при высоких уровнях по формуле Шези учет взаимодействия потоков не производится, а допускается, что на поверхностях раздела шероховатость и сопротивление отсутствуют. Такое допущение вносит погрешность в результат расчета, величину которой трудно определить, но практика подобных расчетов показывает, что эта погрешность невелика.

Установлено, что для крупных рек при условии примерной параллельности и прямолинейности главного русла и поймы эффект взаимодействия пренебрежимо мал [38, с. 94].

Для вычисления расхода воды поперечное сечение створа разделяют на отсеки (см. рис. 15.2). Линии раздела проводят вертикально от бровок меженного русла. Если в пределах поймы имеются участки с различной шероховатостью, например на одном участке заросли кустарников или деревьев, а на другом ровная поверхность луга или пашни, то их выделяют в отдельные отсеки и расходы для них вычисляют отдельно. Для каждого выделенного участка поймы и русла определяют значение коэффициента шероховатости по таблице (приложение 2); для пойм больших рек рекомендуется пользоваться данными, полученными по результатам натурных наблюдений (приложение 3). Значения коэффициента Шези для каждого отсека определяют так, как это было указано выше. Площадь живого сечения для каждого отсека определяют по поперечному профилю створа, который должен быть предварительно составлен по данным нивелирования и промеров. Расход воды в каждом выделенном отсеке вычисляют по формуле (15.3). Общий расход воды получают суммированием расходов через все выделенные отсеки. Уклон водной поверхности принимают общим для всего живого сечения. Уклон определяют так же, как было описано ранее.

Глава 16

Определение расходов воды с помощью мерных устройств

16.1. Определение расходов воды с помощью гидрометрических лотков

Гидрометрические лотки применяются для измерения расходов воды на небольших водотоках, периодически действующих логах и т. п. Широко используются гидрометрические лотки для учета количества воды на оросительных каналах.

В гидравлическом отношении работа гидрометрического лотка подобна работе водослива с широким порогом. Поднятие порога над дном делается незначительным, а в отдельных случаях вообще отсутствует; при этом перепад уровня воды получается за счет сужения потока боковыми стенками лотка. Для измерения расхода используется зависимость между напором и расходом воды.

Более точное определение расхода возможно в случае незатопленного режима истечения, при этом расход определяется в зависимости от высоты уровня воды в верхнем бьефе, т. е.

$$Q = f(H),$$

где H — высота уровня верхнего бьефа над дном приемного раструба (рис. 16.1).

При затопленном режиме истечения точность измерения расхода понижается, при этом расход зависит от положения уровня воды в верхнем и нижнем бьефах

$$Q=f(H,\ h),$$

где h — высота уровня нижнего бьефа над дном приемного раструба.

Точность определения расходов воды гидрометрическими лотками несколько меньше, чем мерными водосливами, однако они имеют ряд преимуществ, к числу которых относятся: во-первых, свободный пропуск донных наносов, в связи с чем лотки применяют преимущественно на реках, водотоках и каналах с большим содержанием донных наносов; во-вторых, незначительный подпор воды в верхнем бьефе, благодаря чему лотки не нарушают естественного режима стока и установившегося соотношения между расходами поверхностного и подруслового (аллювиального) потоков.

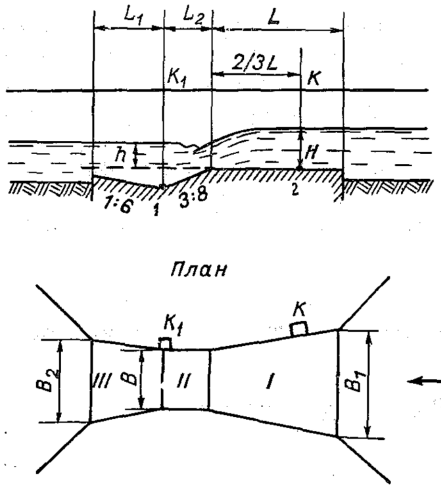


Рис. 16.1. Схема гидрометрического лотка типа Паршала.

K_1, K — места колодцев для самописцев уровня; *1*, *2* — отверстия для подвода воды в колодцы самописцев.

Гидрометрические лотки устанавливают на прямолинейном участке водотока длиной, равной примерно шести—восьмикратной ширине.

Для измерения расходов воды применяют обычно стандартные гидрометрические лотки типа Паршала, состоящие из трех основных частей: приемного раструба *I*, горловины *II* и отводящего раструба *III* (см. рис. 16.1). Размеры стандартных лотков указаны в Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, часть II, 1972. Имеется 14 размеров лотков, рассчитанных на пропуск расходов воды в определенных диапазонах. Например самый маленький лоток рассчитан на измерение расходов от 0,003 до 0,25 м³/с, а самый большой — от 0,392 до 47,50 м³/с.

При устройстве лотков должны строго соблюдаться размеры, указанные в Наставлении. Дно лотка в пределах приемного рас-

труба делается горизонтальным, дно горловины — с уклоном 3 : 8 в сторону течения воды, а дну отводящего раструба придается обратный уклон 1 : 6. Боковые стенки лотков делаются вертикальными, внутренние поверхности их должны быть гладкими. Лотки небольших размеров изготовляют из листовой стали, более крупные — из дерева или железобетона.

Уровень воды в приемном раструбе измеряют на расстоянии, равном $^2/_3L$ от начала горловины. В этом месте устраивают колодец, оборудуемый самописцем уровня или крючковой рейкой. Допускается определять уровень по рейке, укрепленной на боковой стенке лотка, при условии, что она не выступает за пределы внешней поверхности стенки.

Расход воды для стандартных лотков определяется по таблицам, приведенным в указанном выше Наставлении. При этом необходимо учитывать характер гидравлического режима протекания воды.

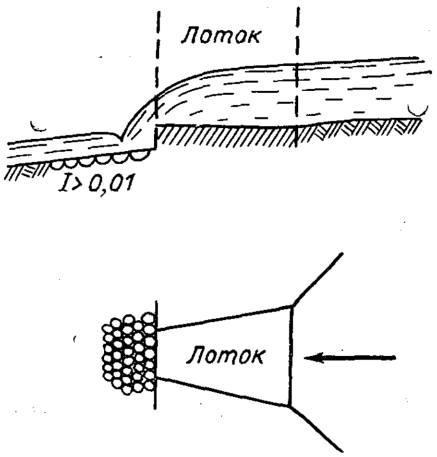


Рис. 16.2. Гидрометрический лоток для водотоков с большим уклоном дна.

Режим свободного истечения в стандартных лотках имеет место при соотношении $h < 0{,}7H$. При $h \geqslant 0{,}7H$ режим истечения будет затопленным. При затопленном истечении необходимо регистрировать положение уровней как в верхнем, так и в нижнем бьефах; нули обеих реек в этом случае располагают на отметке дна приемного раструба. Регистрация уровня в нижнем бьефе производится в конце горловины (см. рис. 16.1).

На водотоках с большим уклоном дна (I=0,01 и более) гидрометрические лотки устраивают только с одним приемным раструбом (рис. 16.2), без горловины и отводящего раструба; за лотком делается перепад не менее 0,2 м, а дно за ним укрепляют камнем. Расход определяется в зависимости от уровня воды в приемном раструбе, причем зависимость $Q=f(H)$ устанавливают тарированием.

Водомерный порог САНИИРИ (Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации) предназначается для определения расходов воды в каналах и водотоках, находящихся в зоне переменного подпора, а также на участках с неустойчивым руслом. Основным свойством и преимуществом водомерного порога является то, что он имеет режим незатопленного истечения при значительном подтоплении с нижнего бьефа, до $h=$

$= 0{,}80H$. Наличие большого количества донных наносов в потоке не влияет на работу порога; выполаживание дна верхнего бьефа наносами не сказывается на зависимости $Q=f(H)$, большая же часть наносов проходит через порог. Расход воды определяется в зависимости от высоты уровня в верхнем бьефе по кривой $Q=f(H)$ или по расчетной таблице, составленной по этой кривой. Регистрация уровня производится в верхнем бьефе самописцем; дополнительно устраивается водомерная рейка. Конструкция порога показана на рис. 16.3.

Зависимость $Q=f(H)$ для водомерного порога САНИИРИ устанавливается расчетом по формуле или путем тарирования — измерения расходов вертушкой.

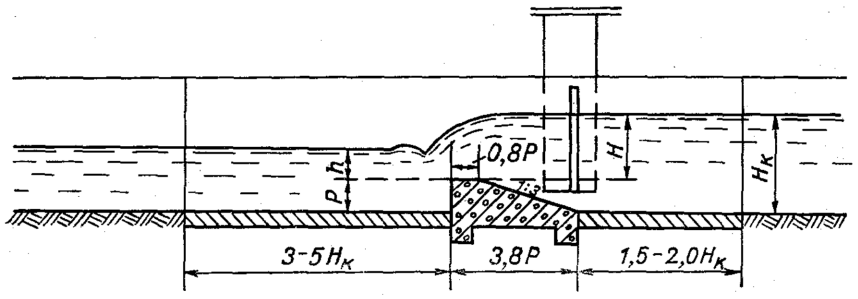


Рис. 16.3. Водомерный порог САНИИРИ.

Водомерный порог применяется для измерения расходов до 60 м³/с.

Водомерные сооружения и устройства, подобные описанному, широко распространены на каналах оросительных систем. Конструкции их хорошо отработаны и во многих случаях рассчитаны на автоматическое измерение уровней и расходов воды. Подробное описание водомерных устройств оросительных каналов имеется в книге И. Б. Хамадова и М. В. Бутырина [46].

16.2. Определение расходов воды с помощью гидрометрических водосливов

Для измерения расходов воды применяются водосливы с тонкой стенкой; вычисление расходов воды производится по формулам по величине напора. Гидрометрические водосливы должны работать при незатопленном режиме. Как измерительная установка водосливы очень удобны, когда требуется частое и точное определение расхода для учета стока малых рек, распределения воды по ирригационной системе и при исследовательских работах, связанных с изучением расхода и стока. Они также широко применяются в гидравлических лабораториях.

Рассмотрим типы водосливов, принятые для измерения расходов воды в гидрометрии.

Прямоугольный водослив без бокового сжатия (рис. 16.4 *а*) имеет горизонтальное водосливное ребро во всю ширину канала. Такой водослив устраивается на водотоках и в каналах прямоугольного сечения длиной, равной семи- восьмикратному наибольшему напору. Оптимальные условия для измерения расхода воды этим водосливом обеспечиваются при следующих условиях. Ребро водослива должно возвышаться над дном канала не менее чем на 0,2 м, а уровень воды в нижнем бьефе должен находиться не менее чем на 0,1 м ниже отметки ребра. Наибольший напор $H_{макс}$ должен быть не более 1,0 м. Наименьший напор, обеспечивающий достаточно точное определение расхода, не должен быть менее 0,05 м.

Расход воды определяется по формуле

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}, \qquad (16.1)$$

где m_0 — коэффициент расхода, учитывающий скорость подхода, определяемый по формуле

$$m_0 = \left(0{,}405 + \frac{0{,}0027}{H}\right)\left[1 + 0{,}55\frac{H^2}{(H+P)^2}\right]; \qquad (16.2)$$

b — ширина отверстия водослива; H — напор на водосливе, т. е. разность отметок уровня верхнего бьефа и гребня водослива; отметка уровня верхнего бьефа определяется вне влияния кривой спада, на расстоянии $3H$ от ребра водослива; P — высота порога водослива со стороны верхнего бьефа; g — ускорение свободного падения.

Практически расходы воды через водослив определяются с помощью таблиц в зависимости от напора, высоты порога и ширины отверстия. Подобные таблицы имеются в справочниках по гидравлике, а также в указанном выше Наставлении [33].

Прямоугольный водослив с боковым сжатием (рис. 16.4 *б*) имеет ширину порога, меньшую, чем ширина подводящего канала, поэтому при переливе воды через отверстие струя водослива испытывает сжатие с двух сторон, что вызывает некоторое уменьшение расхода по сравнению с водосливом без бокового сжатия.

Расход воды через прямоугольный водослив с боковым сжатием определяется по формуле (16.1) с той разницей, что коэффициент расхода находится по зависимости

$$m_0 = \left(0{,}405 + \frac{0{,}0027}{H} - 0{,}03\frac{B-b}{B}\right)\left[1 + 0{,}55\frac{b^2}{B^2}\frac{H^2}{(H+P)^2}\right], \qquad (16.3)$$

где B — ширина канала в верхнем бьефе (остальные обозначения те же).

Практически расход через водослив определяют с помощью таблиц. Напор на водосливе рекомендуется принимать в пределах 0,05—1,00 м.

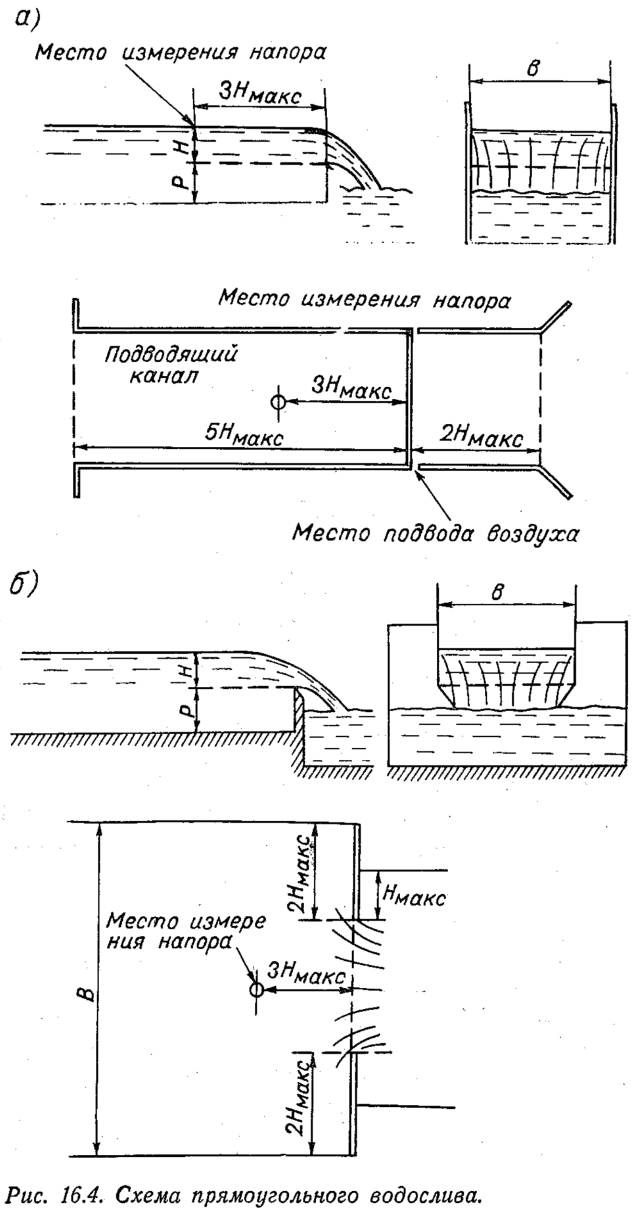


Рис. 16.4. Схема прямоугольного водослива.

а — без бокового сжатия; *б* — с боковым сжатием.

Трапецеидальный водослив имеет водосливное отверстие в форме равнобедренной трапеции. Наиболее распространены трапецеидальные водосливы с коэффициентом откоса боковых стенок m=0,25 и шириной порога, равной (3—4)H. Высоту порога со стороны верхнего бьефа рекомендуется принимать не менее 0,5 м. Напор на водосливе должен быть в пределах 0,05—1,0 м.

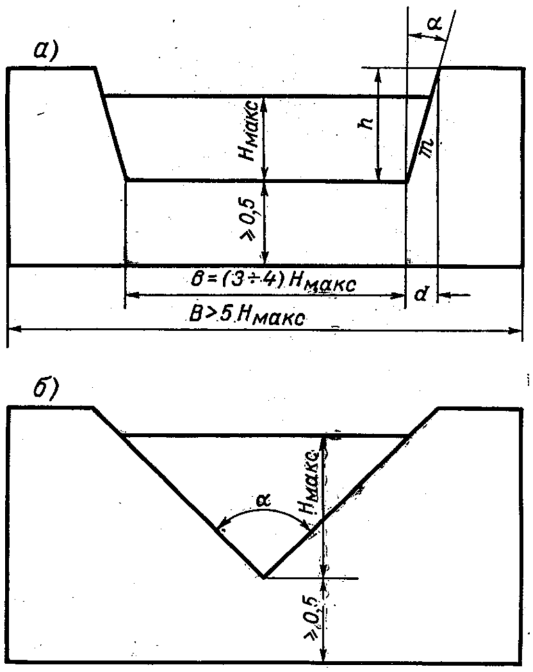


Рис. 16.5. Схемы трапецеидального (а) и треугольного (б) водосливов. $m=d/h=\operatorname{tg}\alpha$,

Расход воды через такой водослив определяется по формуле

$$Q=1{,}86bH^{3/2}, \qquad (16.4)$$

где b — ширина порога (ребра) водослива; H — напор.

Практически расход вычисляют с помощью таблиц. Схема трапецеидального водослива показана на рис. 16.5 *а*.

Треугольный водослив (рис. 16.5—16.7) устраивается с разными углами треугольного выреза (в пределах 20—120°) в зависимости от учитываемых расходов. Наиболее распространен треугольный водослив с углом выреза α=90°. Достаточно точно измерить расход можно при напоре не менее 0,05 м. Наибольший напор на водосливе с α=20° не должен превышать 0,5 м, а при большем угле выреза наибольший расчетный напор рекомендуется принимать не более 1 м.

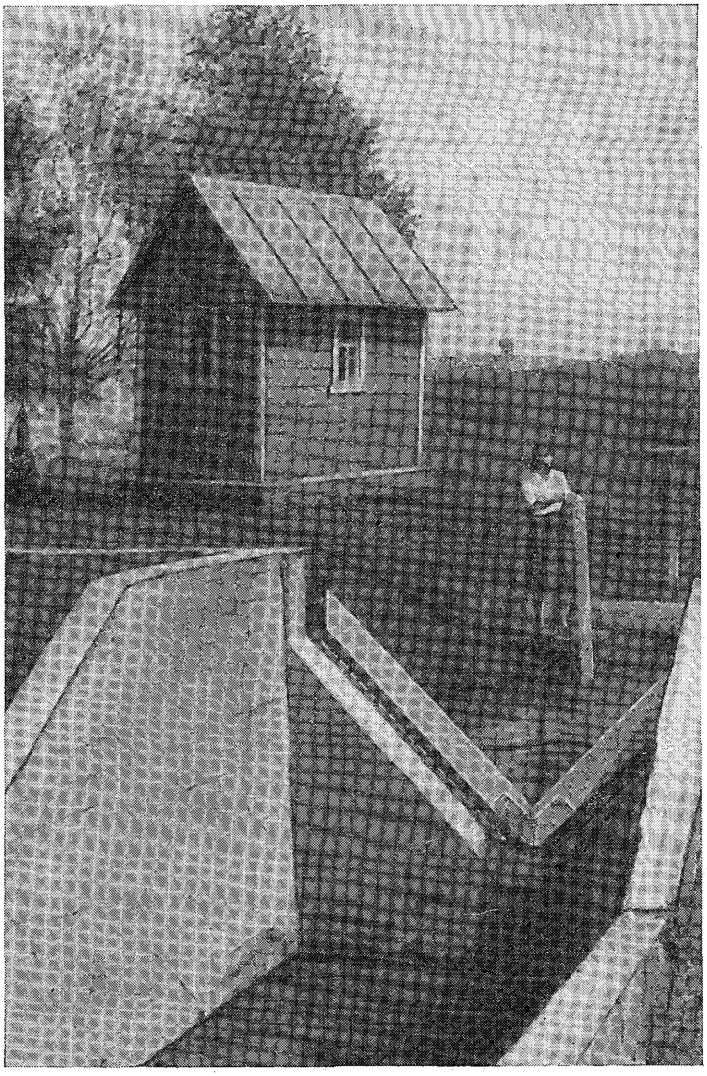


Рис. 16.6. Железобетонный треугольный водослив.

Расход воды через треугольный водослив определяется по формуле

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} H^{5/2}, \qquad (16.5)$$

где μ — коэффициент расхода, равный приблизительно 0,6; α — угол выреза.

Расход воды через треугольный водослив с углом выреза $\alpha = 90°$ определяется по формуле

$$Q = 1{,}4H^{5/2}. \qquad (16.6)$$

Практически расход воды через треугольный водослив определяют тоже по таблицам в зависимости от напора и угла выреза.

Параболический водослив (рис. 16.8 *а*) имеет вырез, очерченный по параболе, выражаемой уравнением $x^2 = 2py$.

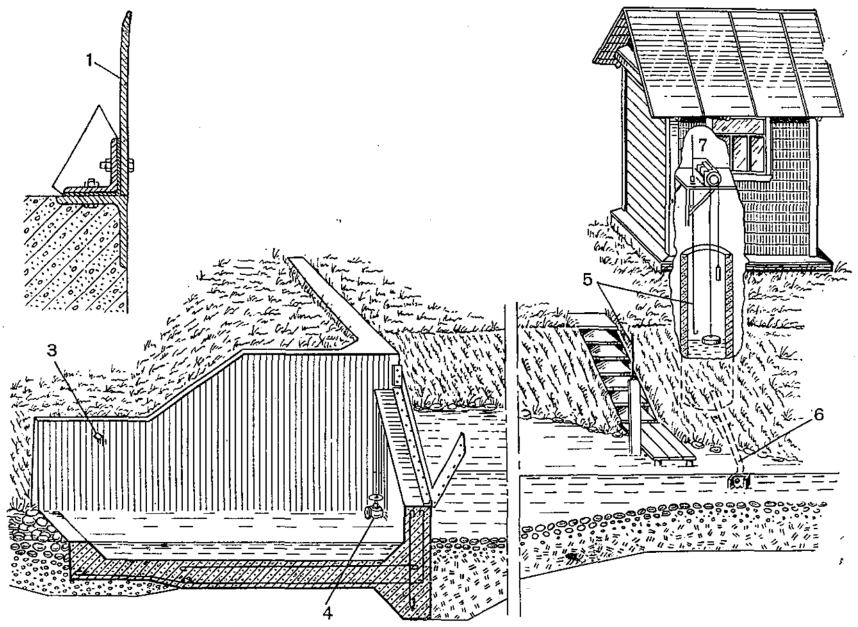


Рис. 16.7. Устройство железобетонного водослива.

1 — ребро водослива; *2* — резиновая прокладка; *3* — стенной репер; *4* — кран для спуска воды; *5* — крючковые рейки; *6* — соединительная труба; *7* — самописец уровня.

Для стандартного параболического водослива (при $p = 4$ см) расход воды определяется по формуле

$$Q = 0{,}576H^2. \qquad (16.7)$$

Напор для стандартного параболического водослива рекомендуется принимать от 0,02 до 0,50 м. Расход можно определить по таблицам.

При малых напорах параболический водослив позволяет определять расходы с большей точностью, чем треугольный водослив.

Радиальный водослив (рис. 16.8 *б*) имеет вырез, очерченный двумя круговыми дугами, сопряженными полу-

окружностью диаметром 5 мм. Радиусы дуг принимаются в пределах 20—60 см. Наименьший допустимый напор 5 см, а наибольший — до 0,8 радиуса выреза водослива. Радиальные водосливы позволяют весьма точно измерять малые расходы. Расход определяют по таблицам.

При значительной амплитуде колебаний расходов применяют комбинированные водосливы: для учета больших расходов устанавливают прямоугольный или трапецеидальный водослив, а для учета малых расходов — треугольный или параболический, порог которого располагается ниже порога большого водослива.

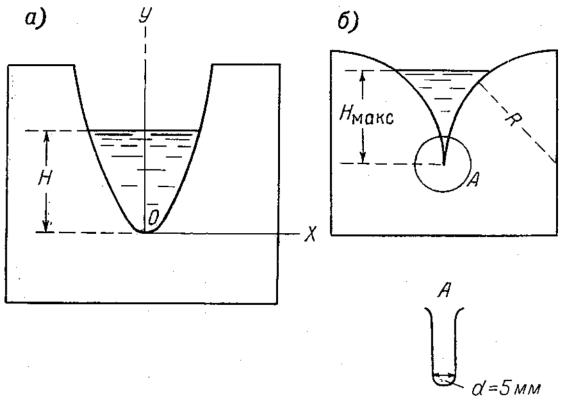


Рис. 16.8. Схемы параболического (а) и радиального (б) водосливов.

Чтобы получить надежные результаты измерений расходов, водосливы необходимо устанавливать с соблюдением следующих основных правил:

1) перед подходом к водосливу поток должен протекать прямолинейно во избежание перекоса водной поверхности в отверстии водослива; ось потока должна совпадать с осью водослива;

2) уровень нижнего бьефа всегда должен быть ниже ребра водослива во избежание его подтопления;

3) под струю переливающейся воды должен быть свободный доступ воздуха;

4) края водосливного отверстия должны быть заострены, без вмятин и зазубрин, фаска среза должна быть обращена в сторону падения струи;

5) ребро прямоугольного и трапецеидального водосливов должно быть установлено горизонтально, а сама рамка водослива вертикально;

6) перед стенкой водослива не должно быть скоплений наносов и мусора;

7) водомерная рейка для определения величины напора располагается выше рамки водослива на расстоянии не менее

$2H_{макс}$; нуль рейки должен быть на одной отметке с порогом водослива. Водослив может быть дополнительно оборудован самописцем уровня.

Общее представление о конструкции железобетонного водослива можно получить из рис. 16.6 и 16.7.

На вновь построенных гидрометрических водосливах, а также и лотках рекомендуется делать контрольные измерения, чтобы проверить соответствие фактических расходов и определенных по таблицам или формулам. Если отклонение получится более 5%, то производят тарирование водослива (или лотка) путем измерения 5—7 расходов при различных уровнях. Расходы измеряют вертушками (при малых расходах — объемным методом). По данным тарирования устанавливают зависимость $Q=f(H)$, которую используют в дальнейшем для определения расходов через водослив.

16.3. Регистрация расходов воды самописцами и расходоуказателями

Для автоматической регистрации расходов на малых водотоках иногда применяют самописцы расходов воды, или, иначе, расходографы. Самописцы расходов устанавливаются только при условии гарантированного постоянства и однозначности зависимости высоты уровня от расхода воды, а именно: 1) при водосливах и гидрометрических лотках и 2) при контрольных руслах.

Кроме приборов специальной конструкции, в качестве самописцев расходов воды могут применяться самописцы уровня воды с поплавковой системой. В этих случаях в них к поплавковому колесу посредством зубчатой передачи присоединяется гидрометрическая улитка, которая трансформирует поступательное движение поплавка в движение пера на ленте самописца в соответствии с видом кривой $Q=f(H)$. Передача движения от улитки к перу самописца может быть осуществлена различно (см. «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 6, ч. 2, 1945). Очертание гидрометрической улитки рассчитывают отдельно для каждой конкретной установки самописца в соответствии с видом зависимости уровня от расхода воды. Сначала это выполняют на чертеже. На графике $Q=f(H)$ проводят через равные интервалы уровня горизонтальные прямые до пересечения с кривой (рис. 16.9 *а*) и снимают соответствующие значения расходов. В результате получают парные значения H и Q, которые используют для построения улитки. Вычерчивают окружность, делят ее на принятое число интервалов и проводят из центра радиусы (рис. 16.9 *б*). Значения расходов воды откладывают в определенном масштабе по радиусам, полученные точки соединяют плавной кривой, которая и является очертанием гидрометрической улитки. Для установки на самописец улитку такого же очертания делают из металла.

В настоящее время расходоуказатели и самописцы расходов имеют широкое применение в оросительных системах для учета количества воды. К ним относятся расходоуказатели ВПГ-54, ВДГ-58, ДРС-60, самописец расхода САНИИРИ и др. Имеются

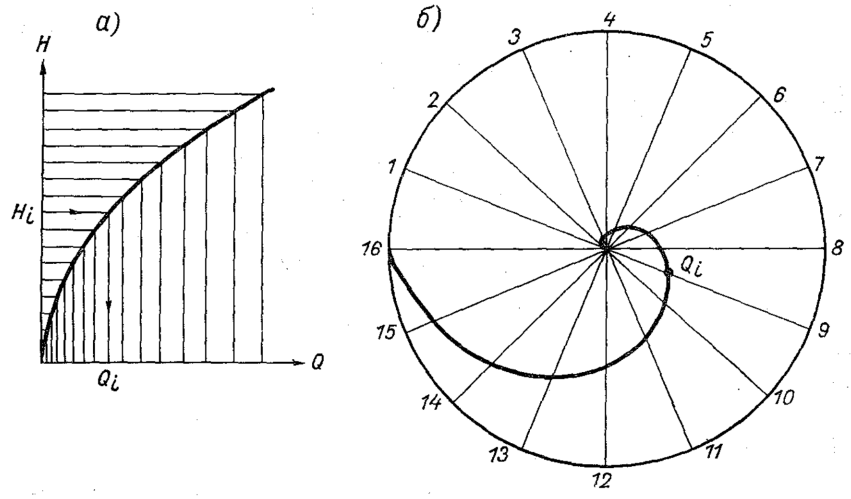


Рис. 16.9. Построение гидрометрической улитки.

расходоуказатели и самописцы расходов, рассчитанные на применение при автоматизации учета воды на оросительных каналах [7].

Глава 17

Определение расходов воды объемным методом

Объемный метод применяется обычно при расходах воды, не превышающих 5—10 л/с. Этот метод удобен для измерения расходов ключей, родников, а также применяется в качестве вспомогательного при тарировании малых лотков и водосливов.

Непосредственное измерение расходов воды дает высокую точность, что очень важно при малых расходах. Этим способом расход определяется из отношения объема воды V, накопившейся в мерном сосуде, к числу секунд t, в течение которых он был собран,

$$Q=\frac{V}{t}. \qquad (17.1)$$

Объем мерного сосуда подбирается в зависимости от: 1) наибольшего расхода, 2) степени точности определения объема воды

и учета времени его наполнения и 3) желаемой точности измерения расхода воды $\frac{dQ}{Q}100\%$.

Если dV — абсолютная ошибка при измерении объема мерного сосуда, $100\frac{dV}{V}$ — эта же ошибка в процентах, dt — абсолютная ошибка при измерении времени наполнения сосуда и $100\frac{dt}{t}$ — эта же ошибка в процентах, то

$$\ln Q = \ln V - \ln t;$$

дифференцируя, получим

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dV}{V} - \frac{dt}{t}.$$

Поскольку ошибка $\frac{dt}{t}$ может быть как положительной, так и отрицательной, то

$$100\frac{dQ}{Q} = 100\frac{dV}{V} + 100\frac{dt}{t}.$$

Полагая $100\frac{dQ}{Q} = q\%$, $100\frac{dV}{V} = V\%$ и $100\frac{dt}{t} = t\%$, найдем, что для определения расхода воды с точностью $q\%$ при имеющейся возможности определить объем мерного сосуда в литрах с точностью $V\%$ и измерить время в секундах с абсолютной ошибкой dt необходимое время наполнения сосуда составит

$$t_0 = \frac{100\,dt}{q\% - V\%},$$

а необходимый объем мерного бака

$$V = t_0 Q.$$

Например, при $q = 2\%$, $V = 0{,}1\%$, $dt = 0{,}2$ с

$$t_0 = \frac{100 \cdot 0{,}2}{2 - 0{,}1} = 11 \text{ с}$$

и

$$V = 11Q \text{ л};$$

при $q = 5\%$, $V = 1\%$, $dt = 0{,}5$ с

$$t_0 = \frac{100 \cdot 0{,}5}{5 - 1} = 12{,}5 \text{ с}$$

и

$$V = 12{,}5Q \text{ л}.$$

В качестве мерных сосудов употребляют для очень малых расходов ведра, а для более значительных — баки. Сосуды

должны быть точно прокалиброваны и снабжены государственным клеймом. Измерение уровня в мерном сосуде производится крючковой рейкой с точностью ±1 мм.

Для измерения расхода вода по желобу (трубе) направляется из потока в мерный сосуд; одновременно с этим пускают в ход секундомер. Расход вычисляют по формуле (17.1).

В качестве автоматически действующего мерного сосуда известна схема сосуда Мильнэ (рис. 17.1), который состоит из двух равновеликих по объему секций. При заполнении секции водой до определенного уровня она опрокидывается, а взамен ее наполняется следующая. Проведя наблюдения за числом опорожнений ковша за определенный период времени и зная объем секции ковша, расход воды можно определить по формуле (17.1).

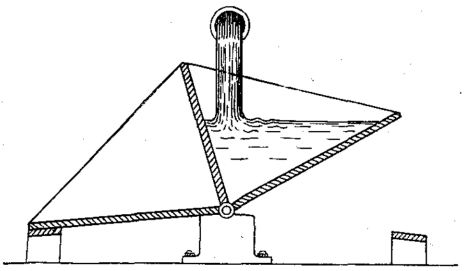


Рис. 17.1. Сосуд Мильнэ.

Учет стока может быть автоматизирован, если на ленте самописца записывать отметки времени и число качаний мерного ковша. В качестве примера на рис. 17.2 представлен объемный самописец расхода с объемом секции ковша 3 л.

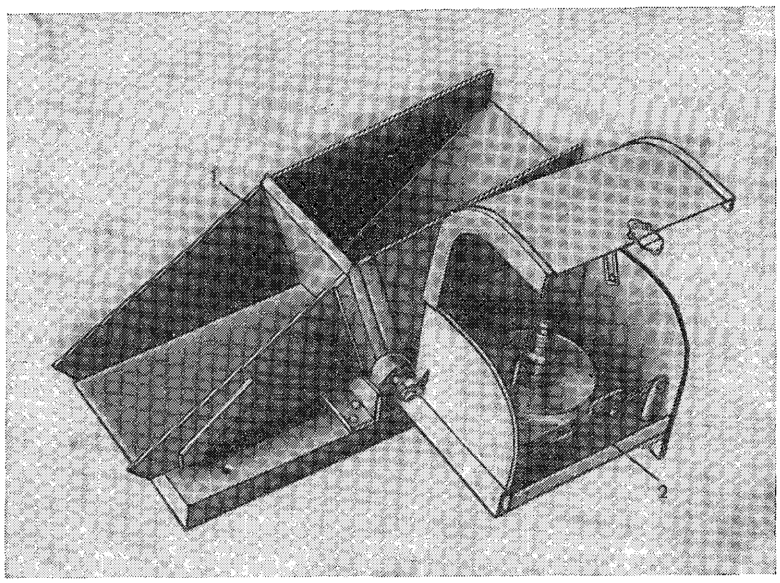


Рис. 17.2. Объемный самописец расхода воды.

1 — мерный ковш; *2* — самописец с часовым механизмом.

На пересыхающих потоках, оборудованных водосливной установкой, рекомендуется устраивать перед стенкой водослива мерный бассейн для учета стока в начальный период при его возобновлении. Устройство установки видно на рис. 17.3. Объем

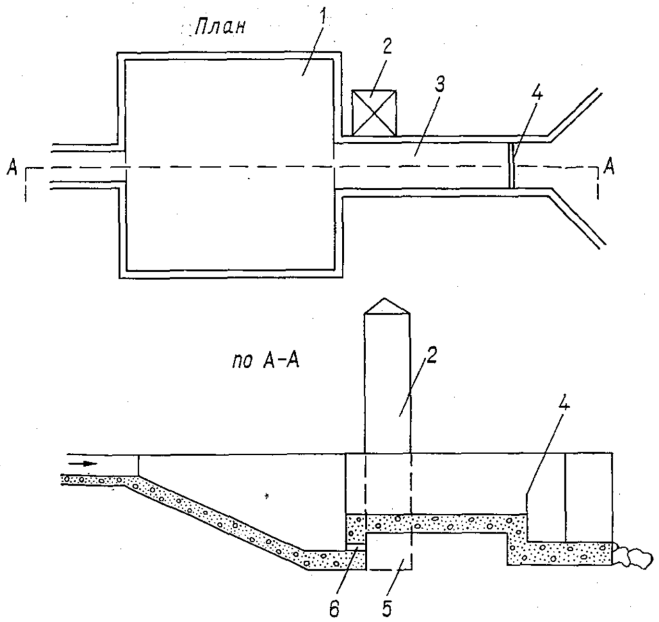


Рис. 17.3. Устройство для измерения расхода воды при водосливной установке.

1 — бассейн; *2* — будка самописца; *3* — подводящий канал; *4* — мерный водослив; *5* — колодец установки самописца; *6* — соединительная труба между бассейном и колодцем.

мерного бассейна вычисляют по данным точного обмера бассейна и установленной связи его объема с показаниями водомерной рейки и самописца уровня.

Уход за установкой сводится к периодической очистке бассейна от наносов и поверке связи его объема с показаниями водомерных устройств.

Глава 18

Определение расходов воды методом смешения

18.1. Сущность метода смешения

Определение расхода воды методом смешения сводится к следующему. В поток вводится раствор какого-либо вещества, чаще всего хлористого натрия, известной концентрации, затем на

створе, расположенном ниже по течению, после смешения этого вещества с речной водой берутся пробы воды и определяется концентрация вещества после смешения. Расход рассчитывается по формулам в зависимости от изменения концентрации и объема введенного индикатора или его расхода. При этом методе не требуется измерять скорости течения и площадь живого сечения.

Метод смешения применяется преимущественно в потоках с большими скоростями течения и большой степенью турбулентности, с малыми глубинами и сравнительно небольшими расходами воды. В подобных условиях измерения скоростей вертушкой, а площади живого сечения путем промеров не обеспечивают требуемой точности. Наиболее целесообразно применение метода смешения на горных реках с бурным течением и сложным рельефом дна.

Достаточная точность определения расходов воды методом смешения обеспечивается при условии, что на избранном участке реки отсутствуют боковая приточность, сбросы промышленных, канализационных и оросительных вод, а также отбор воды из реки. Между верхним (пусковым) и нижним (измерительным) створами должно быть обеспечено хорошее естественное перемешивание раствора индикатора с водой реки, чему способствует наличие поворотов реки между створами. На участке не должно быть застойных зон: ям, мертвых пространств, заводей, рукавов.

Известны два варианта метода смешения: 1) способ длительного пуска раствора индикатора с небольшим расходом; 2) способ ускоренного пуска раствора индикатора.

18.2. Способ длительного пуска раствора индикатора

На выбранном участке в пусковом створе производят пуск в реку раствора индикатора в одной или нескольких точках с небольшим постоянным расходом. Измерительный створ располагают на таком расстоянии от пускового, чтобы произошло полное смешение индикатора с речной водой; создается установившийся режим перемешивания.

Если выбранный участок отвечает указанным ранее требованиям, то должно выполняться условие, что весовые расходы вещества индикатора на пусковом створе и на измерительном створе должны быть равны между собой (рис. 18.1). Это можно выразить равенством

$$QC_0+qC_1=(Q+q)\,C_2, \qquad (18.1)$$

где Q — расход реки; C_0 — естественная концентрация вещества индикатора в речной воде; q — расход раствора индикатора; C_1 — концентрация раствора индикатора; C_2 — концентрация индикатора в измерительном створе.

Из формулы (18.1) получается

$$Q = q\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}. \qquad (18.2)$$

Если в речной воде не содержится вещество-индикатор, т. е. $C_0 = 0$, то

$$Q = q\frac{C_1 - C_2}{C_2}. \qquad (18.3)$$

Входящие в формулу (18.2) величины q и C_1 всегда бывают известны. Естественная концентрация индикатора в речной

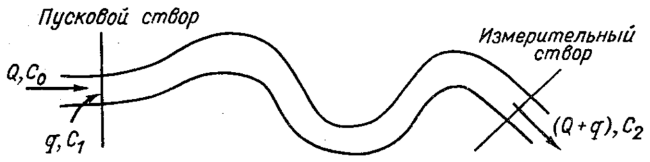


Рис. 18.1. Схема к способу длительного пуска.

воде C_0 и концентрация индикатора в измерительном створе C_2 должны быть определены.

Для пуска раствора индикатора применяются специальные устройства, на описании которых мы здесь не останавливаемся. Отметим только, что они достаточно сложны и непортативны. В Наставлении [33] описаны два типа устройств (баков), рекомендуемых для применения.

В качестве индикатора часто применяют поваренную соль из расчета примерно 15 кг на 1 м³/с расхода воды в реке. Концентрацию раствора принимают близкой к насыщению — 200—300 г/л. Кроме поваренной соли, применяют нитрит натрия, бихромат натрия и др., а также красители — флюоресцеин и пр. Основные требования к веществам-индикаторам: хорошая растворимость в воде, стойкость, химическая стабильность в растворах с водой, полное отсутствие или малое количество в естественных водах, дешевизна и доступность, безвредность для людей, животных и рыб.

Продолжительность пуска раствора индикатора принимается не менее времени добегания воды от пускового до измерительного створа; обычно ее определяют опытным путем.

На измерительном створе пробы воды отбирают в нескольких точках по ширине реки в несколько приемов. Обработку проб для определения концентрации производят в лаборатории. В расчет принимают среднюю концентрацию из отобранных проб.

При тщательном выполнении работы описанный способ характеризуется довольно высокой точностью измерения расхода

воды. Так, по данным французских исследователей, расхождения в измерениях расходов вертушкой и описанным способом не превышали 3% [49]. Расходы воды, определенные этим способом, как правило, несколько больше измеренных вертушкой, так как вертушка не улавливает очень малые скорости и, кроме того, метод смешения учитывает часть расхода, проходящую в аллювии, в придонных камнях.

К недостаткам способа длительного пуска следует отнести необходимость иметь сложное и, как правило, стационарное оборудование для пуска раствора индикатора с постоянным расходом, а также лабораторию для анализа отобранных проб. Кроме того, для измерения расхода воды требуется большое количество вещества индикатора. Видимо, по этим причинам способ длительного пуска не получил распространения у нас в стране, хотя он и отличается более высокой точностью по сравнению со способом ускоренного пуска. В некоторых странах, например во Франции, этот способ получил широкое распространение и развитие.

18.3. Способ ускоренного пуска раствора индикатора

При этом способе пуск раствора индикатора осуществляется не постоянным небольшим расходом, а кратковременным выпуском, путем опрокидывания бака, или с некоторой задержкой.

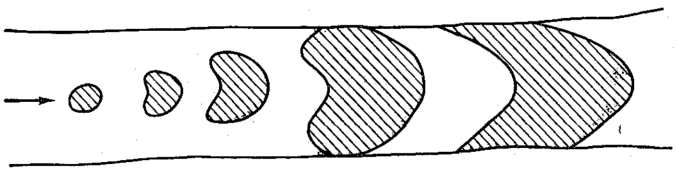


Рис. 18.2. Схема распространения облака раствора индикатора.

Как правило, это делают на середине реки. При таком приеме не создается установившегося режима перемешивания. Вылитый в реку раствор распространяется вниз по течению в виде облака, увеличивающего при этом свои размеры за счет молекулярной и главным образом турбулентной диффузии (рис. 18.2). Когда облако раствора достигнет измерительного створа, концентрация вещества-индикатора C_2 в речной воде начнет увеличиваться, затем после достижения максимума постепенно уменьшится до первоначального значения C_0 или же нулевого — при отсутствии в речной воде этого вещества.

Если участок был выбран правильно и длина его достаточна для смешения индикатора с речной водой, то в измерительном

створе будет наблюдаться достаточно равномерное распределение концентрации вещества-индикатора по живому сечению.

Выведем формулу определения расхода воды для рассматриваемого способа. Через элементарную площадку живого сечения $d\omega$ (рис. 18.3 *а*) проходит расход воды dQ. Вес вещества-индикатора m, проходящего через эту площадку за время t, можно выразить зависимостью

$$m=\int_0^t dQ\,C_2\,dt, \tag{18.4}$$

где C_2 — концентрация вещества-индикатора в речной воде (переменная во времени).

Вес вещества-индикатора, проходящего за время t через всю площадь живого сечения ω, будет равен

$$M=\int_\omega\int_0^t dQC_2\,dt. \tag{18.5}$$

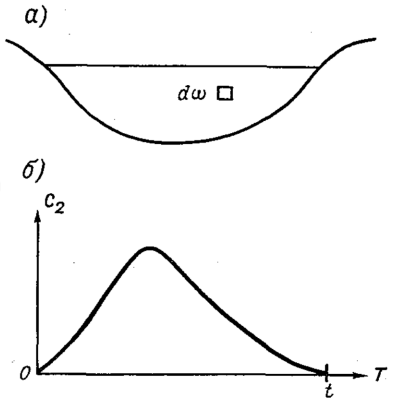


Рис. 18.3. Схема к выводу формулы (18.8).

Принимая, что расход через элементарную площадку не зависит от времени (движение воды установившееся), а $\int_0^t C_2dt$ не зависит от положения площадки, можно написать

$$M=\int_\omega dQ\int_0^t C_2\,dt. \tag{18.6}$$

Здесь $\int_\omega dQ=\int_\omega u\ \ d\omega=Q$. Тогда

$$M=Q\int_0^t C_2\,dt. \tag{18.7}$$

Вес вещества-индикатора выразим через объем раствора V и его концентрацию C_1, т. е. $M=VC_1$. Тогда значение расхода будет выражаться формулой

$$Q=\frac{VC_1}{\int_0^t C_2\,dt}. \tag{18.8}$$

Интеграл в знаменателе формулы (18.8) представляет собой площадь графика изменения концентрации воды во времени на измерительном створе (рис. 18.3 *б*).

Из формулы (18.8) видно, что для определения расхода воды требуется знать объем введенного в поток раствора, его концентрацию, а также по данным наблюдений в измерительном створе получить график изменения концентрации вещества-индикатора в речной воде во времени и определить его площадь. Практически измерение концентрации заменяется измерением электропроводности, что гораздо проще.

Для измерения расхода воды способом ускоренного пуска раствора-индикатора у нас имеется два типа аппаратуры — измеритель расхода воды ИРВ-52 и электролитический измеритель расхода воды (ЭИРВ)[1]. Приведем их краткое описание.

Определение расхода воды с применением ИРВ-52. Вылитый в поток раствор индикатора (электролит), хорошо перемешанный в водной среде, создает в нижнем, измерительном створе повышение и последующий спад концентрации ионов. Сходство очертаний графика изменений концентрации ионов во времени с очертанием паводка дало основание назвать этот способ измерения расхода воды способом ионного паводка.

В связи с повышением концентрации ионов увеличивается электропроводность речной воды, что регистрируется измерительным мостиком. Следовательно, в данном способе измерение концентрации раствора заменяется измерением электропроводности. Это вполне допустимо, потому что в сильно разведенных растворах концентрация пропорциональна электропроводности.

Комплект ИРВ-52 (рис. 18.4) предназначен для измерения расходов воды до 5 м^3/с и состоит из электроизмерительного мостика, электродной ячейки со шнуром, двух 10-литровых мерных баков (ведер), пипетки емкостью 1 мл. Кроме того, для измерения расхода необходимо иметь два мерных бака емкостью 60—70 л.

Электроизмерительный мостик представляет собой линейный равновесный мост (рис. 18.5), два плеча которого образованы реохордом; третьим плечом является магазин сопротивлений, а четвертым — электродная ячейка, погружаемая при измерении электропроводности в поток. На электродную ячейку подается переменный ток частотой 50 Гц, вырабатываемый вибропреобразователем ВП. Магазин сопротивлений служит для первоначального уравновешивания естественной электропроводности речной воды (до момента введения электролита в поток).

Индикатором при этом уравновешивании служит нуль-гальванометр НГ. Ток нулевой цепи, прежде чем попасть на нуль-гальванометр, выпрямляется при помощи того же вибропреоб-

[1] В настоящее время аппаратура ИРВ-52 и ЭИРВ не производится.

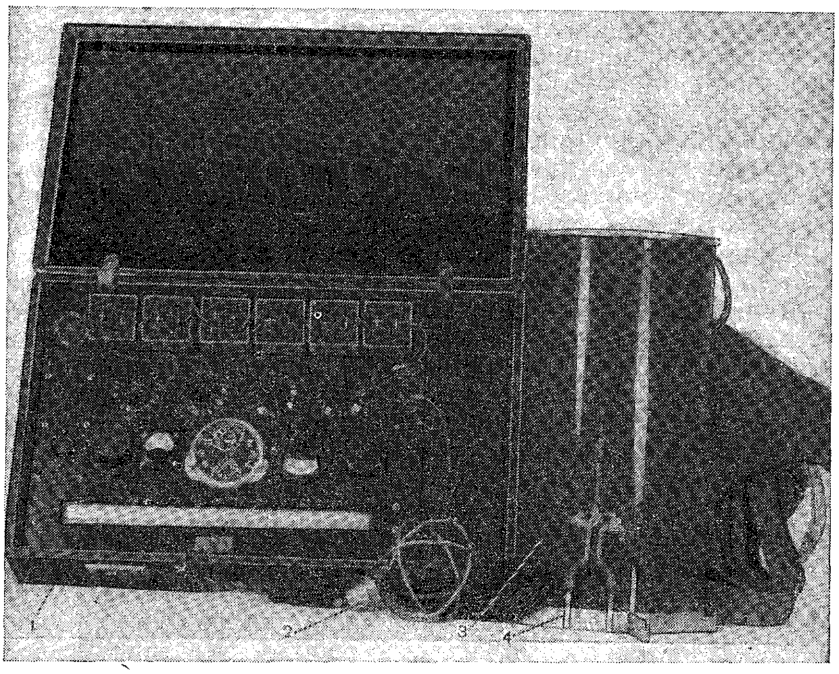


Рис. 18.4. Измеритель расхода воды ИРВ-52.

1 — электроизмерительный мостик; *2* — электродная ячейка; *3* — мерный бак; *4* — пипетка.

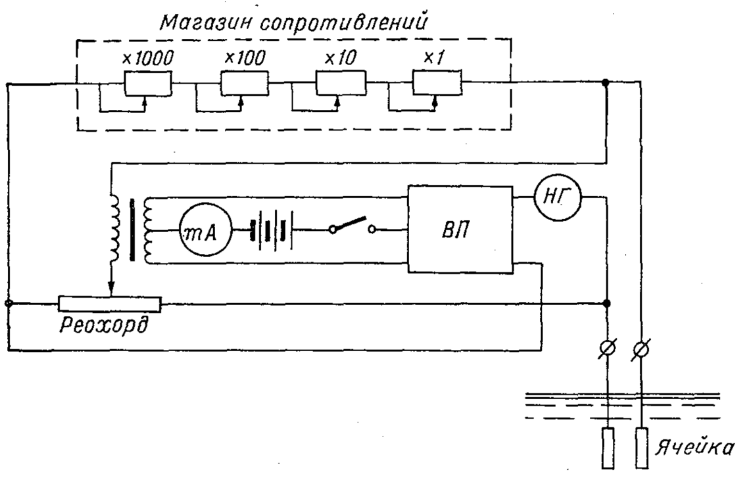


Рис. 18.5. Принципиальная схема электроизмерительного мостика.

разователя. Линейный реохорд служит для измерения прироста электропроводности воды при прохождении облака электролита. Шкала реохорда рассчитана на измерение относительной электропроводности от —50 до +500‰.

Электродная ячейка состоит из двух электродов из нержавеющей стали; наружный электрод перфорирован. Поверхность электродов покрыта активным слоем для поглощения продуктов электролиза. Электродная ячейка подключается к измерительному мостику посредством двухпроводного шнура.

Мерные баки служат для измерения объема выливаемого в поток раствора и для разбавления раствора в 10 000 раз, что необходимо для определения расчетной электропроводности раствора индикатора. Для точного отсчета уровня баки снабжены мерными иглами.

Пипетка служит для быстрого и точного отмеривания 1 мл раствора при разбавлении его в 10 000 раз при определении расчетной электропроводности раствора.

Перед измерением расхода воды на пусковом створе приготовляют раствор. Общее количество раствора берут с таким расчетом, чтобы на 1 м³/с измеряемого расхода пришлось бы 1—2 кг поваренной соли, а его концентрация — из расчета 2—3 кг соли на 10 л воды. Из приготовленного раствора отбирают пробу в чистую склянку с притертой пробкой объемом 20—30 мл. Затем приготовленный раствор выливают в реку. Для лучшего перемешивания это делают на середине реки.

На измерительном створе в удобном месте размещают на берегу измерительный мостик, к нему подсоединяют шнур от электродной ячейки, предварительно закрепленной в воде на середине реки.

После пуска в реку раствора по шкале реохорда измерительного мостика производят отсчеты относительной электропроводности воды через каждые 15 с и записывают в «Книжку для записи измерений расхода воды по способу ионного паводка» стандартного образца. По полученным данным строят график ионного паводка (рис. 18.6).

Для вычисления расхода воды необходимо знать расчетную электропроводность раствора-индикатора. Для этого из взятой пробы раствора пипеткой берут 1 мл и разбавляют в 10 000 мл речной воды в баке. Затем туда погружают электродную ячейку и берут отсчет по шкале реохорда — величину относительной электропроводности разбавленного в 10 000 раз исходного раствора. Расчетную электропроводность раствора индикатора $P_р$ получают умножением полученной величины на 10 000.

Вычисление расхода воды производят по формуле

$$Q = \frac{VP_р}{F}, \qquad (18.9)$$

где V — объем раствора индикатора, вылитого в реку, в м³;

$P_р$ — расчетная электропроводность раствора индикатора в ‰; F — площадь графика ионного паводка, определяемая по формуле $F=\Delta t \sum P‰ \cdot c$ (Δt — интервал времени, равный 15 с, $\sum P$ — сумма ординат графика ионного паводка).

Относительная электропроводность речной воды за время измерения расхода может измениться. В таком случае вводится поправка, с учетом которой расход вычисляется по формуле

$$Q=\frac{VP_р}{F \pm \Delta F}, \qquad (18.10)$$

где ΔF — поправка на площадь ионного паводка за счет изме-

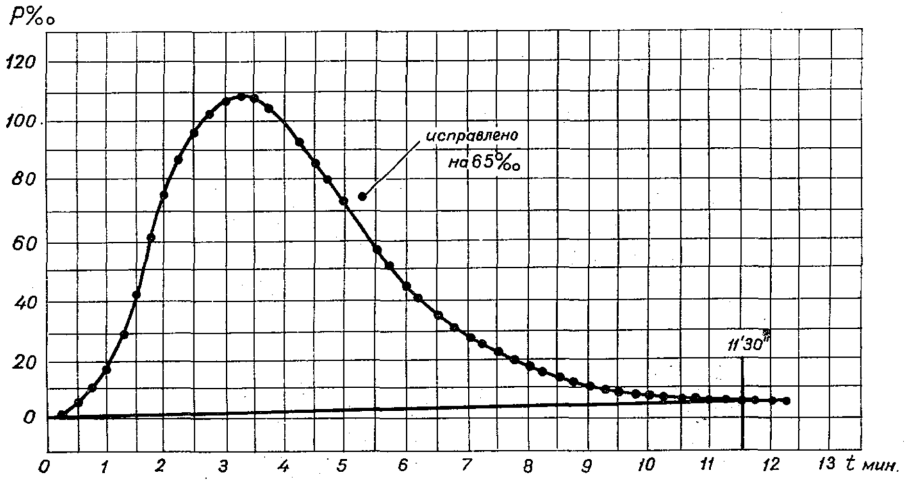


Рис. 18.6. График ионного паводка.

нения электропроводности речной воды, равная $\Delta F=\frac{\Delta P t}{2}$ (ΔP — величина, на которую изменилась относительная электропроводность воды за время измерения, в ‰; t — продолжительность измерения в секундах).

Определение расхода воды с применением ЭИРВ (ГР-54). Определение расхода воды с применением электролитического измерителя расходов воды (ЭИРВ) — электролитический способ — является дальнейшим развитием способа ионного паводка. Отличительные особенности его: необязательность полного перемешивания вводимого в реку раствора (электролита) с речной водой по всей ширине реки, уменьшение потребного количества вещества индикатора (поваренной соли), расширение диапазона применения (способ разработан Н. В. Пикушем).

Комплект ЭИРВ (рис. 18.7) рассчитан на измерение расходов воды [1] до 50 м³/с и состоит из измерителя электропроводности воды, цепочных электродов с катушкой и запасным шнуром, мерного бака емкостью 10 л, шприца емкостью 1 мл, ведра, стеклянной банки для проб. Дополнительно необходимо иметь один-два бака для разведения раствора.

Измеритель электропроводности воды (ИЭВ) собран по схеме измерительного моста, в одну диагональ которого включен микроамперметр, имеющий шкалу, разделенную на 100 делений, по которой производят отсчет электропроводности воды

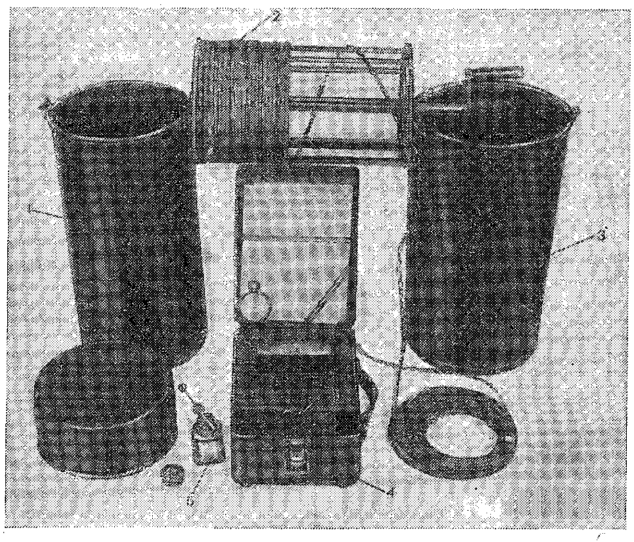


Рис. 18.7. Электролитический измеритель расхода воды ГР-54.

1 — мерный бак; *2* — катушка электродная; *3* — ведро; *4* — измеритель электропроводности воды; *5* — банка стеклянная.

в условных единицах. В другую диагональ моста подается напряжение от генератора звуковой частоты. Цепочные электроды включены в одно из плеч измерительного моста; таким путем в это плечо моста включается сопротивление речной воды.

Цепочные электроды представляют собой шнур из двух изолированных проводов, один конец которого имеет вилку для подключения к измерителю электропроводности воды, другой конец изолирован. В средней части шнура на расстоянии 15 см друг от друга расположены пары электродов, представляющие собой

[1] Как показали испытания, более целесообразно применять ЭИРВ при расходах до 10 м³/с.

оголенные участки на обоих проводах; в каждой паре электроды располагаются на расстоянии 8—10 мм друг от друга. Оголения изоляции делаются площадью не более 1 мм^2. Общее число пар электродов должно быть 50—70.

Участок реки для измерения расхода должен отвечать указанным ранее требованиям. Пусковой створ желательно располагать на суженном участке, а измерительный — в месте с более спокойным течением и равномерными глубинами.

Перед измерением расхода воды на пусковом створе приготовляют раствор. Концентрация его принимается из расчета 0,1 кг поваренной соли на 1 л воды, а объем — из расчета 0,1—0,8 кг соли на 1 м^3/с измеряемого расхода воды. После полного растворения соли отбирают пробу в стеклянную банку, а в раствор добавляют такое же количество воды. Одновременно с этим на измерительном створе через реку перебрасывают шнур цепочных электродов с таким расчетом, чтобы он не выходил из воды и не ложился на дно. Изолированный конец его закрепляют на противоположном берегу, а вилку подключают к измерителю электропроводности воды, располагаемому на берегу в удобном месте.

Раствор индикатора вводят в поток в зоне наибольших скоростей течения путем опрокидывания сосуда или с некоторой задержкой. Вслед за этим на измерительном створе приступают к измерению электропроводности воды, для чего берут отсчеты по шкале измерителя электропроводности E_i через каждые 5 секунд и записывают в «Книжку измерения расхода воды электролитическим способом».

Запись отсчетов прекращают после прохождения ионного облака.

Для вычисления расхода воды необходимо измерить электропроводность вводимого в поток раствора. Эта операция в данном способе носит название тарирования электродов и выполняется так. В мерный бак наливают речную воду в объеме $V_в \approx$ $\approx 10\,000$ мл, туда погружают намотанные на катушку электроды и берут отсчет по шкале измерителя электропроводности ($E_в$). После этого в мерный бак с помощью шприца вводят из взятой пробы примерно 1 мл раствора ($V_р$) и после перемешивания берут отсчет по шкале прибора ($E_р$). Расход воды вычисляют по формуле

$$Q = \frac{V_в}{V_р} \cdot \frac{V\,(E_р - E_в)}{\sum\limits_{0}^{t} (E_i - E_0)\,\Delta t}, \qquad (18.11)$$

где $V_в$ — объем речной воды в мерном баке при тарировке электродов; $V_р$ — объем электролита, введенного в мерный бак при тарировке; V — объем раствора, введенного в поток; $E_р$ и $E_в$ — отсчеты при тарировке электродов (см. выше); E_i — от-

счет по шкале прибора при измерении электропроводности воды в реке во время прохождения ионного паводка; E_0 — отсчет по шкале прибора при измерении естественной электропроводности речной воды; Δt — интервал времени (5 секунд).

Следует отметить, что самой трудоемкой операцией, в значительной мере определяющей точность результатов измерений, является полевая тарировка электродов, выполняемая при каждом измерении расхода воды. Н. В. Пикушем разработан прием, позволяющий упразднить полевую тарировку. Для этого каждый комплект ЭИРВ предварительно тарируют при определенных разбавлениях раствора и всевозможных сочетаниях параметров, влияющих на показания прибора (температура, числа пар электродов и т. п.). При этом для разбавления употребляют насыщенный раствор поваренной соли. По данным тарировки определяют приращение электропроводности разбавленного раствора при разных температурах и различном количестве пар электродов. Расход вычисляют по формуле

$$Q = \frac{\eta V_э \Delta E}{\sum_0^t (E_i - E_0)\,\Delta t}, \qquad (18.12)$$

где η — коэффициент разбавления насыщенного раствора; $V_э$ — объем насыщенного раствора, введенного в поток; ΔE — приращение электропроводности, полученное при тарировке. Остальные обозначения прежние.

Точность измерения расхода воды способом ускоренного пуска раствора индикатора вообще ниже, чем способом длительного пуска, однако при правильно выбранном участке и при тщательном выполнении измерений получается удовлетворительная точность. По имеющимся данным, отклонение значения расхода, измеренного ЭИРВ, от измеренного вертушкой или взятого с кривой расходов в большинстве случаев не превышает 10%.

Глава 19

Определение расходов воды на гидроузлах

19.1. Изменения условий протекания воды, вносимые гидроузлами

Быстрое развитие народного хозяйства СССР сопровождается осуществлением ряда крупных водохозяйственных мероприятий по водоснабжению, водному транспорту, гидроэнергетике, орошению земель и пр. В результате этого режим стока крупных

рек СССР значительно преобразован. Изменяется режим стока и ряда малых и средних рек юга Европейской части СССР в результате массового строительства прудов и водохранилищ.

Количество рек с искусственно измененным режимом стока в дальнейшем будет возрастать.

Учет стока зарегулированных рек и, в частности, измерение расходов воды обычными методами гидрометрии, изложенными выше, становится затруднительным, а во многих случаях невозможным.

Если гидрометрический створ после постройки на реке плотины оказался в верхнем бьефе, т. е. в зоне подпора, то на нем значительно увеличивается ширина, глубина и площадь живого сечения и в то же время уменьшаются скорости течения, обычно настолько, что их не улавливает гидрометрическая вертушка. Измерение расходов в верхних бьефах гидроузлов осложняется явлениями переменного подпора.

Если гидрометрический створ окажется в нижнем бьефе, то измерение расходов воды осложняется резко выраженным неустановившимся движением воды. При этом точность измерения расходов снижается.

В отдельных случаях возможен перенос гидрометрического створа выше зоны подпора или ниже гидроузла, где неустановившееся движение воды менее выражено. Однако следует иметь в виду, что в этих случаях площадь водосбора нового створа будет иной, чем первоначального.

В случае постройки на реке каскада гидроузлов, когда подпор от нижерасположенного гидроузла распространяется до вышележащего, перенос гидрометрического створа становится невозможным и обычные гидрометрические методы измерения расходов оказываются неприменимыми. В таких случаях наиболее целесообразно учитывать сток на гидроузлах, используя для измерения расходов воды турбинные тракты ГЭС, водопропускные отверстия плотин, судоходные шлюзы, а также водопропускные отверстия специального назначения — шугосбросы, промывные устройства и пр. При этом необходимо учитывать расход воды на фильтрацию под сооружениями и в обход их, а также расход утечек воды через неплотности затворов гидротехнических сооружений.

Опыт определения расходов воды на гидроузлах показывает, что при этом точность измерений не ниже, чем при применении обычных гидрометрических методов. Определение расходов воды на гидроузлах имеет даже преимущества по сравнению с обычными гидрометрическими методами, так как при этом исключается влияние таких неблагоприятных факторов, как зарастание и неустойчивость русла, переменный подпор, ледяные образования.

Методика определения расходов на гидроузлах зависит от их типа.

На рис. 19.1 показана схема гидроузла с приплотинной ГЭС, в состав которого входит земляная плотина, водосливная плотина, здание ГЭС, судоходный шлюз.

На рис. 19.2 показана схема гидроузла с деривацией. В этом случае здание ГЭС располагается не в створе плотины, а от-

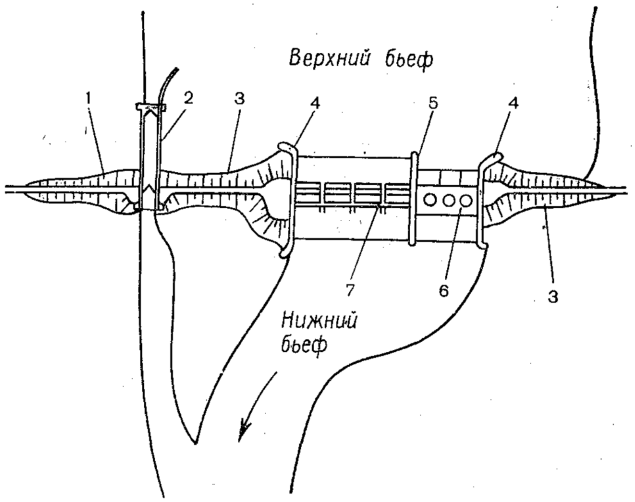


Рис. 19.1. Схема гидроузла с приплотинной ГЭС.

1 — земляная дамба; *2* — судоходный шлюз; *3* — земляная плотина; *4* — сопрягающие устои; *5* — раздельная стенка; *6* — здание ГЭС; *7* — водосливная плотина.

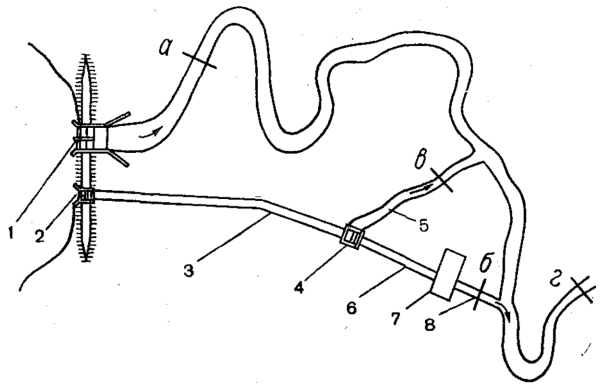


Рис. 19.2. Схема деривационной ГЭС.

1 — плотина; *2* — головное сооружение деривационного канала; *3* — деривационный канал; *4* — напорный бассейн; *5* — аварийный водосброс; *6* — трубопровод; *7* — здание ГЭС; *8* — отводящий канал ГЭС;

а — основной створ для тарирования отверстий плотины; *б* — створ в отводящем канале ГЭС; *в* — створ для тарирования отверстий аварийного водосброса; *г* — суммирующий (контрольный) створ.

дельно. Деривационные ГЭС строятся обычно на горных реках. Бывают смешанные типы гидроузлов.

Организация учета стока воды и приемы измерения расходов различны на малых и крупных гидроузлах. На малых гидроузлах обычно нет специальных подразделений и специалистов для учета стока — измерений уровней и расходов; эти работы организуются и проводятся Гидрометслужбой.

На крупных гидроузлах имеются специальные подразделения, в обязанности которых входят водомерные наблюдения и определение расходов воды; учет стока ведется систематически с применением современных методов и измерительных приборов.

В настоящей главе кратко освещены основные принципы и методы учета стока на гидроузлах; более подробные сведения по данному вопросу можно получить в специальной литературе, например из книги А. М. Гаврилова «Основы учета стока на гидроэлектростанциях» [14].

19.2. Определение расходов воды на малых ГЭС

К малым ГЭС относят обычно гидроэлектростанции мощностью менее 20 000 кВт.

Для учета стока на малых ГЭС необходимо произвести тарирование всех отверстий гидроузла: турбинных трактов ГЭС, водосливных отверстий плотины и пр.; в результате устанавливаются их водопропускные характеристики. При этом необходима организация регулярных наблюдений за уровнями верхнего и нижнего бьефов в характерных местах, так как тарирование предусматривает получение зависимостей расходов от уровней (или напоров). Расходы определяют по полученным тарировочным зависимостям. В дальнейшем бывают необходимы лишь периодические контрольные проверки полученных зависимостей.

Если учет стока на ГЭС организуется впервые, то в этом случае необходимо обследовать гидроузел, произвести тарирование турбин и водопропускных отверстий плотины, измерить расходы фильтрации и утечек, организовать гидрометрические работы и регулярные наблюдения на гидроузле.

Обследование гидроузла имеет целью выявить все его основные технические характеристики, состояние отдельных сооружений, устройств и агрегатов, назначение ГЭС и режим ее работы с целью разработки плана тарирования.

Гидрометрические работы проводятся с целью тарирования водопропускных отверстий гидроузла и заключаются в измерении расходов воды, проходящих через турбины ГЭС, отверстия плотины, шлюзовые камеры и пр. при различных напорах и различной степени открытия отверстий. Кроме того, отдельно определяют расходы воды на фильтрацию и утечки.

Суммарный расход воды через гидроузел может быть выражен формулой

$$Q = Q_т + Q_{пл} + Q_ф + Q_{пр}, \qquad (19.1)$$

где $Q_т$ — расход воды через турбины; $Q_{пл}$ — расход воды через плотину; $Q_ф$ — расход воды фильтрации и утечек; $Q_{пр}$ — расход воды на прочие нужды (шлюзование, орошение, лесосплав и др.).

Тарирование гидроузла заключается в определении всех слагаемых этой формулы при различных напорах и различной степени открытия турбин и водопропускных отверстий.

При организации гидрометрических работ необходимо выбрать и оборудовать тарировочные гидрометрические створы для измерения расходов воды, устроить водомерные посты.

Расположение тарировочных створов определяется типом ГЭС (приплотинная, деривационная). Лучше всего располагать створы в подводящих и отводящих каналах, выбирая прямолинейные участки.

На приплотинных ГЭС при тарировании отверстий плотины, а также при определении расходов фильтрации и утечек чаще всего гидрометрические створы располагают в русле реки в нижнем бьефе, по возможности ближе к сооружениям (100—400 м).

Примерное расположение тарировочных створов в случае деривационной ГЭС показано на рис. 19.2. В створах *а*, *б*, *в*, *г* расходы измеряют гидрометрическими вертушками.

Водомерные посты устраивают в верхнем и нижнем бьефах. Нуль графика обоих постов принимают общим, что дает возможность по разности отметок уровней получать значение напора. В необходимых случаях устанавливают самописцы уровня, это позволяет точнее регистрировать его изменения во времени при неустановившемся движении воды.

Каждый тарировочный створ оборудуется водомерным постом. Если тарировочный створ находится в русле реки ниже гидроузла, водомерный пост делают обычно свайного типа.

Регулярные наблюдения на гидроузлах для учета стока следующие:

1) регулярные (ежечасные) наблюдения за уровнями воды верхнего и нижнего бьефов;

2) регистрация времени открытия и закрытия турбин (при частичном открытии или закрытии регистрация производится ежечасно);

3) регистрация времени всех открытий и закрытий водопропускных отверстий плотины и других водопропускных отверстий;

4) регистрация всех изменений в режиме реки (вскрытие, ледостав, ледоход, шугоход и т. п.) и в работе гидроузла (аварийные остановки турбин, нарушения в работе затворов плотины, повреждения водопропускных устройств и др.). Записи уровней и открытий турбин производятся в журнале выработки

ГЭС, в котором регистрируются показания электроприборов и выработка энергии в киловатт-часах.

Записи об открытии и закрытии водопропускных отверстий плотины производятся в другом журнале, форма которого на каждом гидроузле устанавливается в соответствии с его конструктивными особенностями.

Тарирование турбин преследует цель получить зависимость между мощностью, напором и расходом воды. Если такая зависимость получена путем тарирования, то расход воды определяется по известным мощности и напору. Мощность на зажимах генератора определяется по счетчику, показания которого в киловатт-часах надо разделить на число часов. Напор определяется по водомерным наблюдениям.

Зависимость между мощностью N в киловаттах, расходом и напором определяется следующим соотношением:

$$N=\gamma QH=9{,}81QH, \tag{19.2}$$

где $\gamma=9{,}81$ кН/м^3 — удельный вес воды.

Фактическая мощность агрегата (т. е. турбины и генератора совместно) меньше, чем следует из этой формулы, ввиду потерь энергии, которые учитываются коэффициентом полезного действия (к. п. д.). Коэффициент полезного действия агрегата η равен произведению коэффициентов полезного действия турбины $\eta_т$, генератора $\eta_г$ и редуктора $\eta_р$ (если последний имеется):

$$\eta=\eta_т\eta_г\eta_р.$$

Мощность агрегата с учетом к. п. д. равна

$$N=9{,}81\eta QH,$$

откуда

$$Q=\frac{N}{9{,}81\eta H}, \tag{19.3}$$

или

$$Q=\frac{N}{kH}, \tag{19.4}$$

где $k=9{,}81\ \eta$.

Для малых ГЭС коэффициент k находится в пределах 6,5—7,5.

Тарирование турбин заключается в измерении ряда расходов, пропускаемых турбиной при различной степени ее открытия и различных напорах.

При работе турбин на базисной постоянной нагрузке при тарировании за основную независимую переменную принимают открытие турбины. При работе турбины с непостоянной нагрузкой за независимую переменную принимают среднюю часовую мощность в киловаттах, численно равную выработке за час в киловатт-часах.

Если ГЭС оборудована однотипными турбинами, то достаточно детально протарировать одну турбину и контрольными измерениями убедиться в возможности переноса полученных результатов на другие турбины. При разнотипных турбинах их тарируют раздельно.

Результаты тарирования турбин оформляют в виде графиков зависимости расхода от мощности и напора $Q=f(N, H)$ (рис. 19.3). Пользуясь графиком, по известным N и H определяют Q.

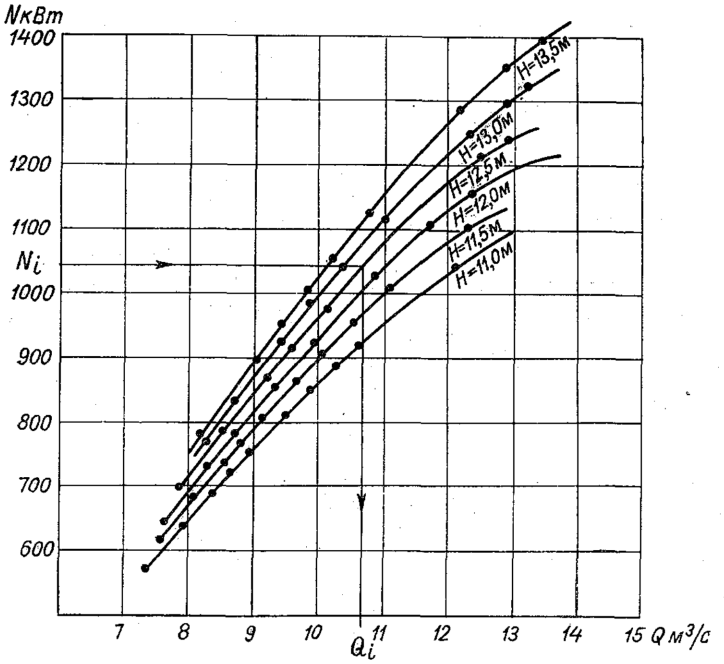


Рис. 19.3. Зависимость расхода воды через турбину от мощности на зажимах генератора N и напора H.

Тарирование водопропускных отверстий заключается в определении значений коэффициентов расхода в соответствующих гидравлических формулах, по которым расход воды через отверстия находится как функция напора и размеров отверстия. Водопропускные отверстия гидроузлов в гидравлическом смысле могут работать как водосливы или как отверстия в тонкой стенке. Основные случаи истечения через водосливы и отверстие в тонкой стенке показаны на рис. 19.4. Гидравлические формулы для основных случаев истечения воды через водопропускные отверстия следующие:

а) при истечении через водослив с тонкой стенкой (рис. 19.4 *а*)

$$Q=m_0 b\sigma_э \sqrt{2g}\, H^{3/2}, \qquad (19.5)$$

где m_0 — коэффициент расхода, учитывающий также скорость подхода и боковое сжатие струи, определяемый по формуле (16.2) или (16.3) и равный в среднем 0,42—0,50; b — ширина водослива; $\sigma_з$ — коэффициент затопления.

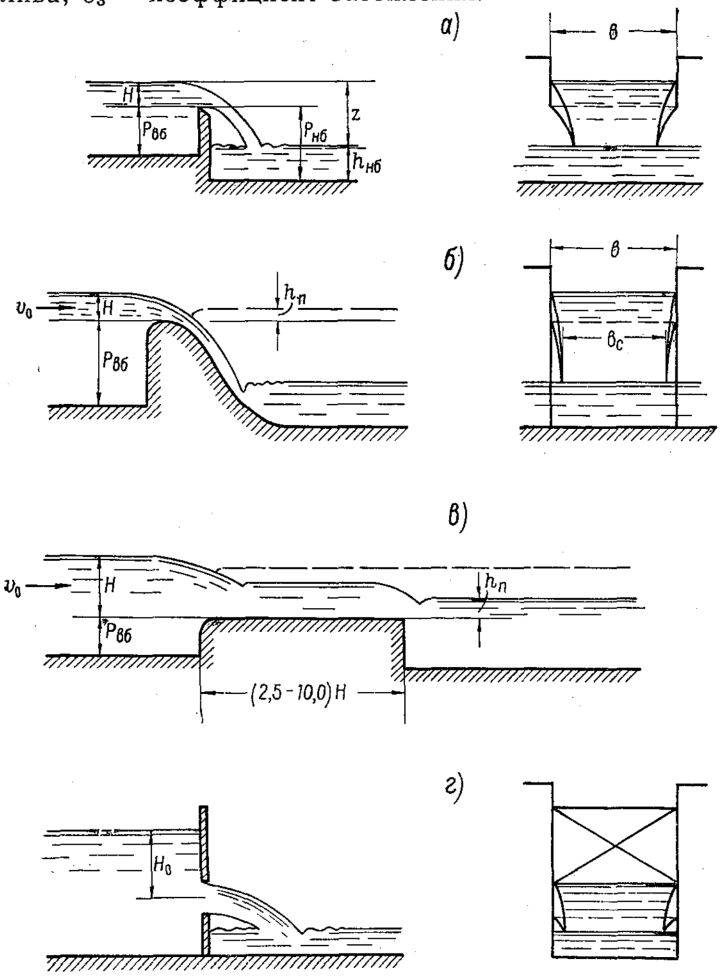


Рис. 19.4. Истечение через водосливы и отверстие.

а — водослив с тонкой стенкой; *б* — водослив практического профиля; *в* — водослив с широким порогом; *г* — отверстие в тонкой стенке (незатопленное).

Водослив работает как затопленный при выполнении следующих условий: 1) $h_{нб} > P_{нб}$, 2) $\frac{z}{P_{нб}} < 0{,}75$. Коэффициент затопления определяется по формуле

$$\sigma_з = 1{,}05\left(1 + 0{,}2\frac{H - z}{P_{нб}}\right)\sqrt[3]{\frac{z}{H}}, \qquad (19.6)$$

где H — напор на водосливе, т. е. разность отметок уровня верхнего бьефа и гребня водослива; z — перепад (рис. 19.4 *а*); $P_{нб}$ — высота водослива со стороны нижнего бьефа;

б) при истечении через водослив практического профиля (рис. 19.4 *б*)

$$Q = mb_c\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \tag{19.7}$$

где m — коэффициент расхода — берется по гидравлическим справочникам [39] (для водослива безвакуумного очертания $m \approx 0{,}49$); b_c — ширина водослива с учетом бокового сжатия струи; g — ускорение свободного падения; H_0 — напор с учетом скорости подхода, т. е.

$$H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}, \tag{19.8}$$

где v_0 — скорость подхода, т. е. скорость течения в верхнем бьефе перед водосливом.

Водослив практического профиля считается затопленным при условии $h_п/H_0 \geqslant 0{,}35 \div 0{,}50$ (рис. 19.4 *б*). Расход через затопленный водослив определяется по формуле

$$Q = \sigma_з m b_c\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \tag{19.9}$$

где $\sigma_з$ — коэффициент затопления, определяемый по гидравлическим справочникам в зависимости от $h_п/H_0$;

в) при истечении через незатопленный водослив с широким порогом (рис. 19.4 *в*) расход определяется по формуле (19.7), но коэффициент расхода m равен в среднем 0,32—0,38. Расход через затопленный водослив с широким порогом определяется по формуле (19.9); коэффициенты m и $\sigma_з$ определяются по справочникам;

г) при истечении через незатопленное отверстие в тонкой стенке (рис. 19.4 *г*)

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}, \tag{19.10}$$

где μ — коэффициент расхода, определяемый по справочникам; ω — площадь отверстия; H_0 — напор над центром отверстия с учетом скорости подхода v_0.

Непосредственное применение приведенных формул для определения расхода воды не всегда допустимо, так как значения коэффициентов расхода m и μ могут в конкретных случаях существенно отличаться от рекомендуемых в гидравлических справочниках ввиду конструктивных особенностей сооружений или нарушений характера перелива воды. В этих случаях коэффициенты m и μ находят в результате тарирования.

Тарирование водопропускных отверстий плотины заключается в измерении расходов, соответствующих определенной степени открытия того или другого отверстия в водосливной части плотины.

Коэффициенты определяют исходя из расхода воды, измеренного при тарировке, ширины отверстия (b_c) с учетом сжатия и напора (H).

На основе проведенных работ и вычислений составляют расчетные таблицы водопропускной способности водосливов и отверстий при различной степени открытия и различных напорах.

Измерение расходов фильтрации и утечки. Суммарный расход фильтрации и утечек на сооружениях гидроузла включает: а) расходы фильтрации через грунты под плотиной и зданием ГЭС, а также в обход плотины, б) расход утечек через неплотности направляющих аппаратов турбин (неработающих) и затворы водопропускных отверстий.

Расходы на фильтрацию через грунты под сооружениями и в обход их обычно весьма невелики и учитываются вместе с расходами утечек.

Расход фильтрации и утечек через неплотности направляющих аппаратов неработающих турбин проще всего измерить в отводящем канале ГЭС в то время, когда турбины не работают.

Расход фильтрации и утечек через водопропускные отверстия плотины может быть измерен двояким путем: непосредственно на створе, расположенном ниже плотины, но выше выхода в русло отводящего канала ГЭС, или в створе, расположенном ниже выхода отводящего канала ГЭС (при неработающих турбинах). В последнем случае из полученного значения расхода следует вычесть расход утечки через направляющие аппараты неработающих турбин.

Следует иметь в виду, что размеры потерь на фильтрацию и утечки могут изменяться с изменением напора, что вызывает необходимость исследовать этот вопрос при различных значениях напора в отдельные сезоны года.

19.3. Определение расходов воды на крупных ГЭС

Наблюдения за уровнем воды ведутся:

— на приплотинных ГЭС: в верхнем бьефе перед входом в водоводы ГЭС, в нижнем — в сбросном канале, на выходе из отсасывающих труб;

— на деривационных ГЭС: 1) на головном узле перед плотиной, 2) в напорном бассейне перед входом воды в трубопроводы, 3) в отводящем канале ГЭС при выходе из отсасывающих труб.

Наблюдения за уровнем производятся с помощью дистанционных приборов, показания которых передаются на пульт управления. В качестве первичных приборов (датчиков) для измерения уровня применяют поплавковые устройства или пьезометрические трубки. В первом случае показания поплавкового датчика передаются к регистрирующему устройству с помощью

сельсинов [1]. Во втором случае разность двух давлений в пьезометрических трубках, соответствующих уровням верхнего и нижнего бьефов, регистрируется с помощью дифференциального манометра, показывающего величину напора.

Наиболее часто применяют дистанционные уровнемеры с поплавочной системой и сельсинами. Датчики уровня ДСУ-1

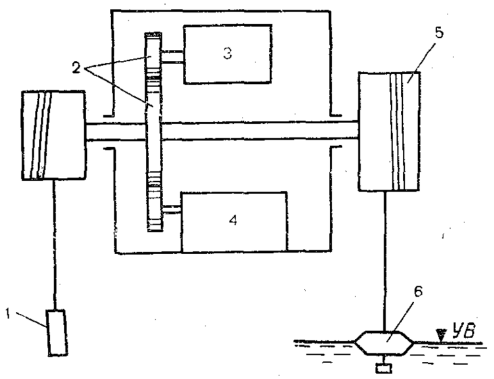


Рис. 19.5. Схема датчика уровня ДСУ-1.

1 — противовес; *2* — зубчатая передача; *3* — сельсин; *4* — счетчик местного отсчета; *5* — барабан; *6* — поплавок.

устанавливают в верхнем и нижнем бьефах. От них информация передается по проводам на пульт управления ГЭС, где устанав-

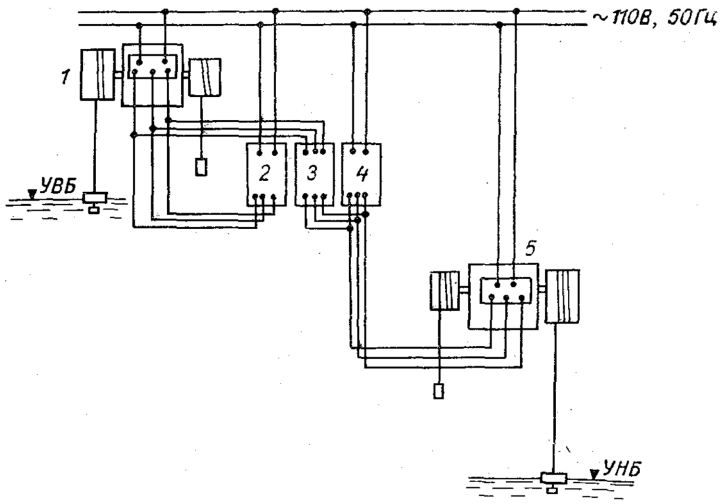


Рис. 19.6. Схема устройства для дистанционного измерения уровней и напора.

1 — датчик ДСУ-1 верхнего бьефа; *2* — указатель уровня УСП-1 верхнего бьефа; *3* — указатель напора УСП-2; *4* — указатель уровня УСП-1 нижнего бьефа; *5* — датчик ДСУ-1 нижнего бьефа.

ливаются указатели уровня верхнего и нижнего бьефов УСП-1 и указатель напора УСП-2.

[1] Сельсины — устройства для передачи на расстояние механических перемещений посредством электрического тока по проводам.

Устройство датчика ДСУ-1 показано на рис. 19.5. Колебания уровня воспринимаются поплавком и передаются посредством зубчатой передачи на ротор сельсина, от последнего по проводам — на сельсин приемного устройства, от которого приводится в действие указатель уровня УСП-1. На рис. 19.6 показана схема системы дистанционного измерения уровней верхнего и нижнего бьефов и напора.

На гидроузлах вода из верхнего бьефа в нижний может поступать через турбины ГЭС, водопропускные отверстия плотины, шлюзы, плотоходы, бревноспуски, рыбоходы, отверстия специального назначения (например, шугосбросы), промывные устройства и т. д. Кроме того, некоторое количество воды поступает в нижний бьеф путем фильтрации и утечек.

Главная масса воды проходит из верхнего бьефа в нижний через турбины ГЭС, т. е. используется для выработки электроэнергии. Остальные составляющие общего расхода воды через сооружения гидроузла незначительны. На ГЭС, имеющих относительно небольшое водохранилище, довольно значительную часть общего расхода может составлять расход через водопропускные отверстия плотины в период пропуска паводковых вод.

Определение расходов воды через турбины приплотинных ГЭС путем непосредственного измерения с помощью вертушек в водоводах крупных ГЭС представляет большие трудности, поэтому натурное тарирование турбин делают редко. Определение расходов через турбины проводится преимущественно при помощи эксплуатационных характеристик турбин, выражающих зависимость между напором и мощностью при различных к. п. д. (рис. 19.7). Расход через турбину вычисляют по формуле

$$Q=\frac{N}{9{,}81H\eta_{\text{т}}\eta_{\text{г}}}, \qquad (19.11)$$

где N — мощность, определяемая по счетчику генератора, средняя за определенный период времени (сутки и т. п.); H — напор воды, т. е. разность уровней верхнего и нижнего бьефов (рис. 19.8), с учетом скорости подхода и потерь напора в водоводах турбин (средний за тот же период, что и мощность); $\eta_{\text{т}}$ — к. п. д. турбины, определяемый по эксплуатационной характеристике в зависимости от H и N; $\eta_{\text{г}}$ — к. п. д. генератора, принимаемый постоянным, так как он мало зависит от изменения мощности. На крупных ГЭС генераторы помещаются на одном валу с турбиной, поэтому к. п. д. редуктора не вводится.

Расходы воды через турбины деривационных ГЭС по их эксплуатационным характеристикам, как правило, не определяются, ввиду того что к. п. д. турбин этих ГЭС непостоянны и уменьшаются в процессе эксплуатации. Это происходит в связи с истиранием лопаток рабочего колеса турбины наносами. Расход воды в этих условиях чаще всего находится путем расчета: 1) по кривым зависимости расхода от мощности $Q=f(N)$,

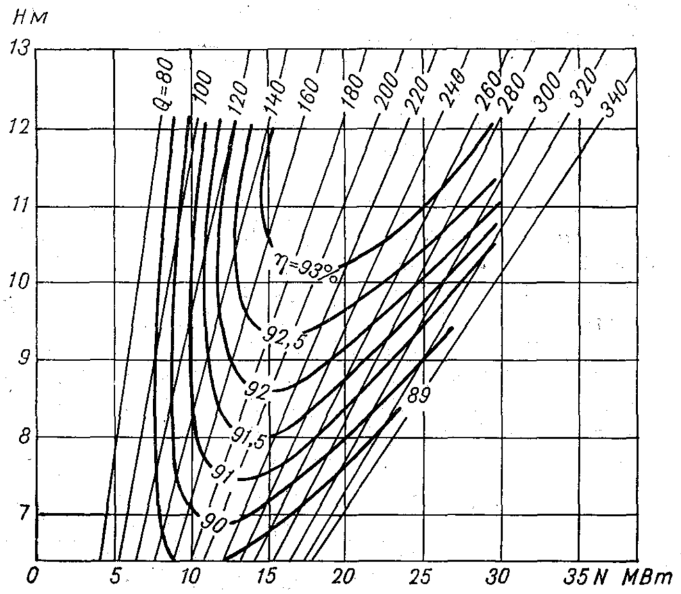


Рис. 19.7. Эксплуатационная характеристика турбины.

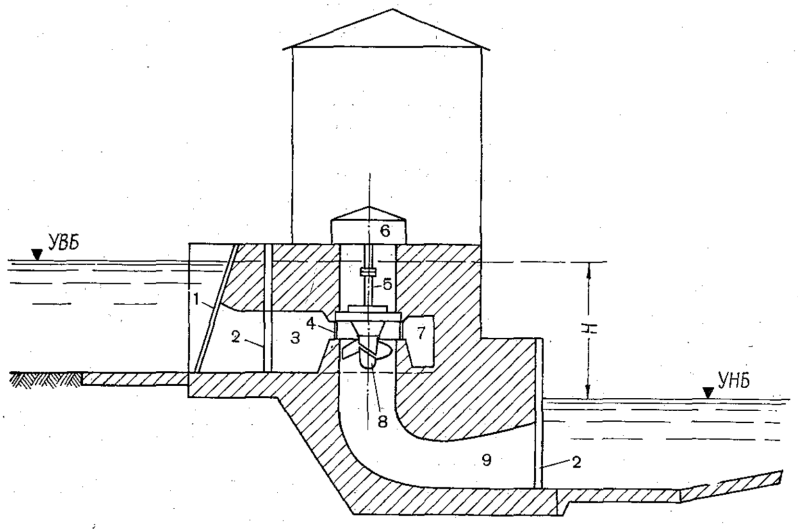


Рис. 19.8. Схема здания ГЭС.

1 — решетка; *2* — затворы; *3* — водовод; *4* — направляющий аппарат турбины; *5* — вал; *6* — генератор; *7* — спиральная камера; *8* — турбина; *9* — отсасывающая труба; *H* — напор (без учета потерь).

2) по кривым зависимости расхода от напора $Q=f(H)$, построенным для створа в деривационном канале.

Для получения зависимости $Q=f(N)$ проводится натурное тарирование турбин при нескольких значениях напора. Расходы воды измеряют вертушками в сбросном канале ГЭС, а мощность определяют по счетчику генератора.

Для определения зависимости $Q=f(H)$ для деривационного канала расходы измеряют вертушками при различных значениях уровня в условиях установившегося движения воды.

Расходы воды через турбины ГЭС можно определять посредством расходомеров, действие которых основано на зависимости между расходом через турбину и перепадом давления в различных точках спиральной камеры. При движении воды в спиральной камере турбины в потоке возникают центробежные силы, величина которых при одном и том же расходе зависит от радиуса поворота. Частицы жидкости потока у наружной поверхности спиральной камеры обладают большей центробежной силой, чем у внутренней. Вследствие этого в различных точках одного и того же сечения спиральной камеры, расположенных на различных расстояниях от центра, будут наблюдаться различные давления. В стенке спиральной камеры делают небольшие отверстия и по трубкам выводят воду к дифференциальному манометру, измеряющему разность двух давлений. На рис. 19.9 показана спиральная камера турбины и места расположения отверстий. Чем больше расстояние между отверстиями (по радиусу), тем больше перепад давления.

Зависимость расхода воды от перепада давления выражается формулой

$$Q=K(\Delta h)^n, \qquad (19.12)$$

где K — коэффициент расходомера; Δh — перепад давления; n — показатель степени, значение которого, по опытным данным, лежит в пределах 0,48—0,54. В большинстве случаев $n=0{,}5$, тогда

$$Q=K\sqrt{\Delta h}. \qquad (19.13)$$

Эта зависимость может быть выражена прямой линией (рис. 19.10).

Расходомеры тарируют обычно в натурных условиях, в результате чего определяется значение коэффициента K. Тарирование заключается в определении четырех-пяти значений расхода и соответствующих перепадов давления.

Показания расходомера передаются на стрелочный прибор со шкалой или на самописец. При надобности расходомеры снабжают интеграторами, дающими суммарный расход (объем) воды за определенный промежуток времени.

Расходомеры могут устанавливаться как на крупных, так и на малых ГЭС.

Определение расходов воды через водопропускные отверстия плотин. Вода сбрасывается из водохранилища через водопропу-

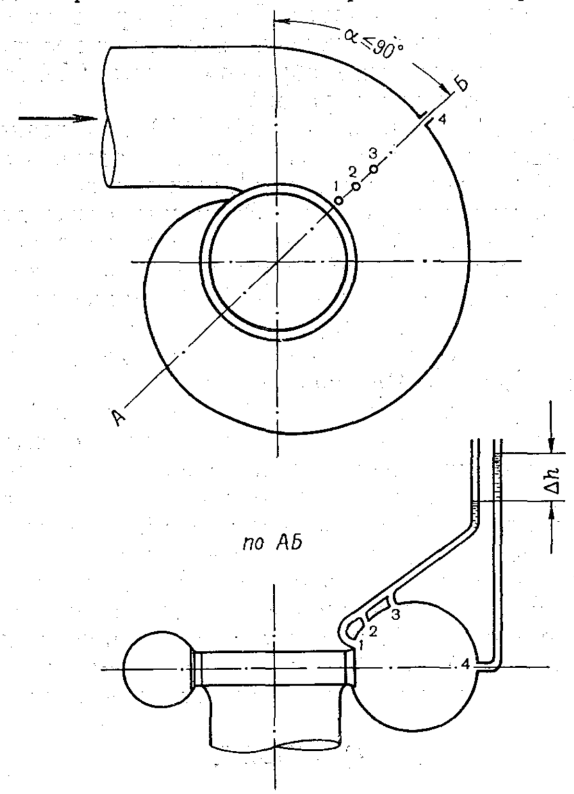


Рис. 19.9. Расположение отверстий расходомера в спиральной камере турбины.

скные отверстия плотин обычно в периоды половодий и паводков. Расход воды через плотину определяется по гидравлическим формулам в зависимости от напора, типа водослива и характера истечения. Рекомендуемые формулы для расчета сбросных расходов обычно указываются в проекте гидроузла. Для уточнения расчетных формул проводят модельные иссле-

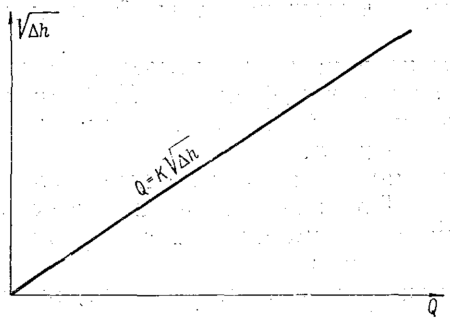


Рис. 19.10. График зависимости $Q = K\sqrt{\Delta h}$.

дования истечения воды через отверстия плотины. Натурное тарирование водопропускных отверстий осуществляется редко ввиду большой сложности и трудоемкости.

Для практического применения составляют графики пропускной способности отверстий плотины, по которым расход определяется в зависимости от напора или отметки уровня верхнего бьефа при различном открытии затворов.

Расход воды через водопропускные отверстия специального назначения — шугосбросы, промывные отверстия и пр.— определяется аналогично.

Определения расходов воды через шлюзы. Расход воды на каждое шлюзование определяется по объему сливной призмы, который равен объему воды в камере шлюза, сбрасываемому в нижний бьеф.

Средний суточный расход воды на шлюзование равен

$$Q_{шл} = \frac{Vn}{86\,400}, \qquad (19.14)$$

где V — объем сливной призмы; n — число шлюзований в сутки; 86 400 — число секунд в сутках.

Объем сливной призмы для однокамерного шлюза равен

$$V = \omega H_{ср},$$

где ω — площадь камеры шлюза; $H_{ср}$ — напор (средний за сутки).

Расход воды через плотоходы типа шлюзов рассчитывается аналогично.

Определение расходов фильтрации и утечек. Расходы фильтрационных вод измеряются по выходе их из сооружения объемным методом или по производительности насосов, откачивающих фильтрационные воды, а иногда с помощью мерных водосливов.

Фильтрация воды в теле бетонных плотин может также учитываться в потерне, т. е. галерее, проходящей внутри плотины.

Расход воды на фильтрацию предусматривается в проекте. Обычно он мал. При значительном увеличении фильтрационного расхода требуется принять меры к его уменьшению.

Расход воды через неплотности затворов и направляющих аппаратов неработающих турбин (утечка) обычно очень мал. Учитывается он приближенно, чаще всего путем визуальной оценки.

Расчет расхода воды через рыбоходы. Расход воды через рыбоходы зависит от их конструкции и обычно невелик. Так, например, в случае рыбоходов-лотков (Кегумская и Нижне-Туломская ГЭС) расход колеблется в пределах 0,5—1,5 м³/с. При расчете расхода учитывается продолжительность работы рыбохода.

При оборудовании гидроузла рыбоподъемниками расход воды зависит от размеров рыбоподъемника и запроектированного расхода (от 1 до 10—20 м³/с).

В случае рыбоходов-шлюзов расход воды рассчитывается по числу шлюзований.

Учет расхода воды на водоснабжение городов и промышленности. Водозабор на нужды коммунального хозяйства и промышленности учитывается на основе характеристик пропускной способности насосов и часов их работы или с помощью водомеров.

Учет расхода воды на орошение. Учет водозабора на орошение производится отделами эксплуатационной гидрометрии водхозов по водопропускным характеристикам головных сооружений на магистральных каналах.

Сводка данных о водном режиме реки на ГЭС. Все сведения о расходах воды через отдельные сооружения ГЭС, включая данные о заборе воды из водохранилища для водоснабжения и орошения, поступают в производственно-технический (или эксплуатационный) отдел управления ГЭС. Если в указанном отделе производится расчет водного баланса водохранилища, то дополнительно собирают (в управлениях Гидрометслужбы, гидрометеорологических обсерваториях или других организациях) сведения о водомерной сети постов на водохранилище для расчета режима его уровня, боковой приточности, испарении с водной поверхности, осадках, толщине ледяного покрова, а также об оседании и всплывании льда. Данные о расходах воды в створе гидротехнических сооружений заносятся в ведомость водноэнергетических показателей (характеристик) и месячный отчет. В последнем даются сведения о месячном объеме притока, общего стока через ГЭС, об объеме воды на выработку энергии, холостые сбросы, утечки, собственные нужды ГЭС и пр. Этот отчет ежемесячно представляется в районное энергоуправление.

Раздел VI

Определение зависимости между расходами и уровнями и подсчет стока воды

Глава 20

Построение кривой расходов при однозначной зависимости между расходами и уровнями

20.1. Основные понятия

Зависимость между расходами и уровнями выражается графически кривой расходов, которая строится для определения стока воды. Стоком называется количество воды, протекшей через поперечное сечение водотока за определенное время. Вычисление стока производится, как правило, ежегодно за прошедший год. Внутри годового цикла обычно выделяют отдельные периоды, для которых сток вычисляется различными методами, например период ледостава, период развития водной растительности и др.

Между расходом протекающей в реке воды и уровнем существует определенная гидравлическая зависимость, которая в общем случае приобретает очень сложный вид. Особенно сложной эта зависимость становится при неустановившемся движении воды в деформируемом, заросшем или зашугованном русле реки. Наиболее простой вид она приобретает в случае равномерного движения воды в недеформируемом русле с постоянной формой поперечного сечения, чего в естественных реках практически не бывает. Рассмотрение гидравлических основ зависимости между расходом и уровнем выходит за рамки этого учебника; для ознакомления с ними рекомендуется книга Г. В. Железнякова [21]. Практически определение зависимости между расходом и уровнем производится на основе материалов наблюдений; таким путем получается корреляционная зависимость.

В гидрометрии принято определять зависимость $Q=f(H)$, т. е. зависимость расходов от уровней, хотя физически независимым переменным является расход воды, а уровень — функцией. Так принято потому, что измерения уровней на гидрологических постах производятся ежедневно в стандартные сроки, а измерения расходов вследствие большой трудоемкости дела-

ются значительно реже. Частота измерения расходов различна для разных сезонов года и неодинакова для рек с различными режимами. Более часто измеряют расходы в периоды наибольших их изменений — в половодья и паводки. В весеннее половодье делают 4—5 измерений на подъеме и 5—8 на спаде; в межень — одно измерение через 7—10 суток; при прохождении дождевых паводков — 1—2 измерения на подъеме и 2—3 на

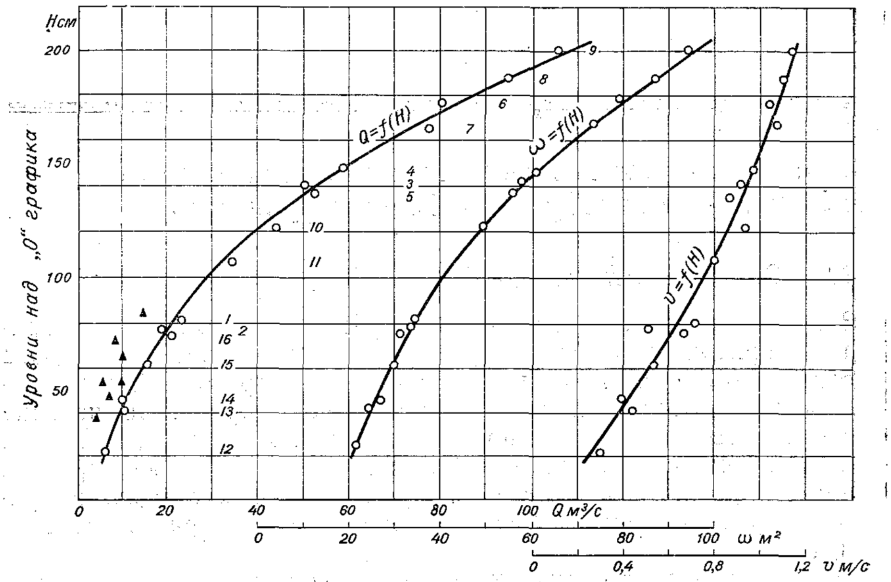


Рис. 20.1. Кривые расходов, площадей живого сечения и средних скоростей течения.

спаде. При устойчивом ледоставе и плавном изменении уровня расходы измеряют через 10—20 суток.

Для построения кривой расходов служат значения измеренных расходов и соответствующие им уровни воды. Эти материалы за годовой цикл сводятся в таблицу, носящую название «Измеренные расходы воды». Следовательно, для построения кривой расходов используется столько точек, сколько расходов воды было измерено в течение года.

Кривая расходов строится в прямоугольной системе координат (рис. 20.1); на том же чертеже проводятся кривые площадей живого сечения $\omega=f(H)$ и средних скоростей $v=f(H)$, назначение которых будет объяснено ниже.

Зависимость $Q=f(H)$ может выражаться графически в виде одной плавной кривой. В этом случае определенному значению уровня соответствует одно определенное значение расхода воды. Такая зависимость называется однозначной. Следует иметь

в виду, что в данном случае мы имеем дело с приближенно однозначной зависимостью, так как она не является функциональной: точки измеренных расходов всегда ложатся на графике с некоторым разбросом, что связано как с погрешностями измерений расходов и уровней, так и влиянием ряда причин, нарушающих связь расходов и уровней.

Однозначная связь охватывает нередко только ограниченный период времени. Для некоторых рек она может сохраняться в течение года или нескольких лет. Однозначная кривая расходов всегда направлена выпуклостью вверх.

Во многих случаях зависимость $Q=f(H)$ приобретает весьма сложный вид. Это объясняется влиянием различных причин, искажающих эту зависимость. К их числу относятся: 1) неустановившееся движение воды, 2) ледяные образования в русле, 3) зарастание русла водной растительностью, 4) неустойчивость русла — размывы и аккумуляция наносов, 5) переменный подпор. В подобных случаях однозначная зависимость нарушается: одному и тому же уровню соответствуют разные расходы воды. Например, при ледяном покрове при одном и том же уровне расход меньше, чем в открытом русле; при прохождении паводка при одном и том же уровне расход на подъеме больше, чем на спаде. Такая связь уровней и расходов называется неоднозначной. Определение зависимости $Q=f(H)$ при этом бывает сопряжено с большими трудностями.

20.2. Построение кривой расходов

Перед тем как приступить к построению кривой расходов, необходимо проанализировать исходные материалы. Расходы, измеренные детальным способом вертушкой, наиболее достоверны (вероятная ошибка при благоприятных условиях измерения 2—3%) и являются опорными. Расходы, измеренные вертушкой основным и сокращенным способами, а также измеренные поплавками, менее достоверны (вероятная ошибка 5% и более в зависимости от условий измерения). При анализе исходных материалов обращают внимание на обстановку работ при измерении расходов, так как, например, ветер, малые скорости течения, косоструйность и т. д. могут вызвать погрешности измерений. При анализе определяют уровень, при котором возможен выход воды из основного русла на пойму, выявляют наличие на пойме протоков, проверяют правильность определения расчетного уровня.

Для построения кривой расходов в координатной системе (Q, H) наносят на график точки измеренных расходов, которые обычно располагаются узкой полосой. Кривую расходов проводят на глаз плавной линией, по середине полосы рассеивания точек расходов, измеренных при свободном состоянии русла, т. е. при отсутствии ледяного покрова и водной растительности.

На том же чертеже строят кривые площадей живого сечения $\omega=f(H)$ и средних скоростей $v=f(H)$. Для построения их используется та же шкала уровней H по оси ординат, что и для кривой расходов. По оси абсцисс откладывают: для кривой площадей — площади живого сечения при соответствующих уровнях воды, а для кривой средних скоростей — средние скорости течения. Эти шкалы проводят с некоторым смещением вправо, как показано на рис. 20.1. Данные для построения кривых $\omega=f(H)$ и $v=f(H)$ берут из таблицы «Измеренные расходы воды».

Кривая площадей живого сечения $\omega=f(H)$ имеет выпуклость кверху, что объясняется расширением профиля сечения реки с повышением уровня. При уровне, соответствующем выходу воды на пойму, кривая площадей становится более пологой в связи с резким увеличением ширины потока (рис. 20.2).

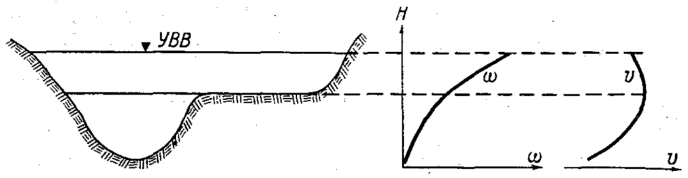


Рис. 20.2. Кривые $\omega=f(H)$ и $v=f(H)$ при выходе потока на пойму.

Кривая средних скоростей $v=f(H)$ обычно имеет выпуклость к оси v, а при выходе воды на пойму получает перелом в сторону оси H; это связано с уменьшением средней скорости ввиду значительного увеличения площади живого сечения.

Кривые площадей и средних скоростей необходимы для экстраполяции кривой расходов и для анализа надежности измеренных расходов; все три кривые (см. рис. 20.1) должны быть увязаны между собой по уравнению $Q=v\omega$. Сверка производится при определенных значениях уровня через равные интервалы путем умножения соответствующих значений площадей на среднюю скорость. При этом руководствуются правилом, что если полученный расход отличается от снятого с кривой $Q=f(H)$ больше чем на 1%, то надо выяснить причины этого и внести исправления.

При большой амплитуде изменения расходов ($Q_{макс}:Q_{мин}\geqslant 20$) нижнюю часть кривой, примерно 20—30% амплитуды уровней, вычерчивают в более крупном масштабе на том же чертеже.

После сверки и исправления кривые обводят тушью. Затем, пользуясь построенной кривой расходов, составляют расчетную таблицу расходов (табл. 20.1). Эта таблица используется в дальнейшем для определения средних суточных расходов воды.

Для составления таблицы значения расходов снимают с кривой $Q=f(H)$ через определенные интервалы уровня, например

Таблица 20.1

Расчетные расходы воды

Уровень над нулем графика, см	Расход, м³/с									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	20	26,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
20	25	25,7	26,4	27,1	27,8	28,5	29,2	29,9	30,6	31,3
30	32	32,8	33,6	34,4	35,2	36,0	36,8	37,6	38,4	39,2

через 10 см, с таким расчетом, чтобы отрезки кривой в пределах интервала можно было бы принимать за прямые для прямолинейной интерполяции промежуточных значений расхода. Снятые с кривой значения расходов проставляют в графу «0» против соответствующих уровней. Значения расходов для промежуточных уровней вычисляют по интерполяции и заносят в соответствующие графы.

20.3. Подсчет стока воды

Ежедневные (средние суточные) расходы воды определяют по средним суточным уровням. При очень резких суточных колебаниях стока вычисление средних суточных расходов производят как среднее арифметическое, взвешенное во времени, из срочных значений расходов воды, вычисленных для моментов, когда измерялся уровень воды. Такой порядок вычисления средних суточных расходов воды применяют, в частности, при подсчете стока с малых водосборов, оборудованных самописцами уровней, например на стоковых станциях.

Полученные значения средних суточных расходов воды записывают в таблицу «Ежедневные расходы воды», сокращенно ЕРВ. В ней помещают значения расходов за весь год, при этом указывают значения средних расходов за сутки, декады, месяцы, год, кроме того, указывают значения наименьшего и наибольшего расходов за месяцы и за год; экстремальные значения расходов за каждый месяц вычисляют по срочным измерениям уровня.

Таблицы ЕРВ публикуются в гидрологических ежегодниках. Они служат основой для определения стока воды за требуемые периоды времени.

Учет стока воды на гидроузлах. В главе 19 были описаны методы определения расходов воды на гидроузлах. Средний суточный суммарный расход воды через гидроузел определяется сложением всех средних суточных расходов через турбины, водосливную плотину, шлюзы и другие водопропускные отвер-

стия, а также утечек и фильтрации. Таким путем вычисляют средние суточные расходы за каждый день года.

Учет стока воды на крупных ГЭС, а также на головных сооружениях оросительных систем выполняют имеющиеся на них специальные подразделения, в обязанность которых входит организация и проведение измерений расходов воды через турбины и все водопропускные отверстия, эксплуатация водомерных устройств и вычисление стока. Сведения о средних суточных расходах воды через створ сооружений гидроузла ежемесячно передаются управлениям Гидрометслужбы, где они анализируются и подготавливаются к опубликованию в гидрологических ежегодниках.

Глава 21
Экстраполяция кривых расходов

Экстраполяцией кривой расходов называют продление ее вверх и вниз за пределы измеренных расходов воды. Экстраполяция необходима для подсчета стока воды на всю амплитуду колебания уровня. Расходы воды обычно бывают измерены не при всех наблюдавшихся уровнях. Это особенно относится к высоким уровням при прохождении паводков и половодий; измерение расходов в этих условиях связано с техническими трудностями, а также часто бывает невозможно из-за кратковременности периода пика паводка, а также при сплаве леса и ледоходе.

Принято считать кривую расходов надежной, если она обоснована измерениями расходов на 80% амплитуды уровней или более. При этом для остальной части амплитуды, не обоснованной измерениями расходов, должна производиться экстраполяция.

Наиболее часто в гидрометрической практике проводится экстраполяция кривой расходов вверх. Если не обоснованная измерениями расходов часть амплитуды уровней мала, то экстраполяция не вызывает затруднений. Кроме того, для гидрометрических створов без пойм, где движение воды при высоких уровнях близко к равномерному, для экстраполяции вверх разработаны достаточно простые и надежные способы. Наиболее трудна экстраполяция для пойменных створов, в которых при высоких уровнях происходит изменение и существенное усложнение скоростного поля потока. При этом, как правило, наблюдается неравномерное движение воды, картина которого бывает весьма сложна при наличии на пойме протоков, участков с различной шероховатостью и др.

Экстраполяция кривой расходов вниз обычно не вызывает затруднений.

Способов экстраполяции кривых расходов разработано много. Рассмотрим только основные, наиболее часто применяемые.

Следует отметить, что в некоторых случаях возникает необходимость экстраполяции кривых расходов вверх до отметок, значительно превышающих положение наблюденных высоких уровней. Это бывает, в частности, необходимо для расчета кривых подпора при проектировании крупных гидроузлов. При этом от точности расчета положения кривых подпора зависит правильное определение границ затопления территории создаваемым водохранилищем. Методы экстраполяции кривых расходов для подобных случаев разработаны еще недостаточно; обычно экстраполируют «по тенденции».

21.1. Экстраполяция кривых расходов для беспойменных створов

Беспойменным створом называется створ, в котором отсутствует пойма, т. е. при высоких положениях уровня воды поток остается в главном русле. С точки зрения методики экстраполяции кривой расходов сюда же можно отнести створы с неширокой ровной поймой, если гидравлические условия движения потока не претерпевают существенных изменений при выходе воды из главного русла.

Экстраполяция кривой расходов непосредственным продолжением. Этот способ применяют в случаях, если не обоснованная измерениями часть кривой расходов не превышает 10% амплитуды уровней и профиль поперечного сечения реки в пределах этой зоны не имеет резких переломов, а шероховатость русла существенно не изменяется.

В этом случае кривую расходов продолжают в том же направлении на глаз до отметки наивысшего уровня, осредненного ко всем точкам измеренных наибольших расходов. Экстраполированный участок кривой показывают обычно пунктиром.

Экстраполяция кривой расходов по элементам расхода. Этот способ заключается в том, что раздельно экстраполируют кривые $\omega=f(H)$ и $v=f(H)$. Экстраполированные участки этих кривых используют для продления кривой расходов до высшего уровня. Кривую $\omega=f(H)$ продолжают вверх, определяя площади живого сечения по поперечному профилю створа при заданных уровнях. Кривую средних скоростей экстраполируют непосредственным продолжением на глаз. Расход воды определяют умножением площади живого сечения на среднюю скорость течения. Чаще всего ограничиваются только определением наибольшего расхода; обоснованную измерениями расходов часть кривой $Q=f(H)$ продлевают вверх до полученного значения наибольшего расхода (рис. 21.1). Рассмотренный способ применяется при тех же условиях, что и способ непосредственного продолжения.

Если не обоснованная измерениями расходов часть амплитуды уровней превышает указанную величину и составляет 15—20%, а русло реки при высоких уровнях имеет более сложную конфигурацию и к тому же переменную шероховатость, то применяют другие способы экстраполяции. В этих условиях для успешной экстраполяции большое значение имеет наличие измеренных уклонов водной поверхности; при этом экстраполяция выполняется с помощью формулы Шези.

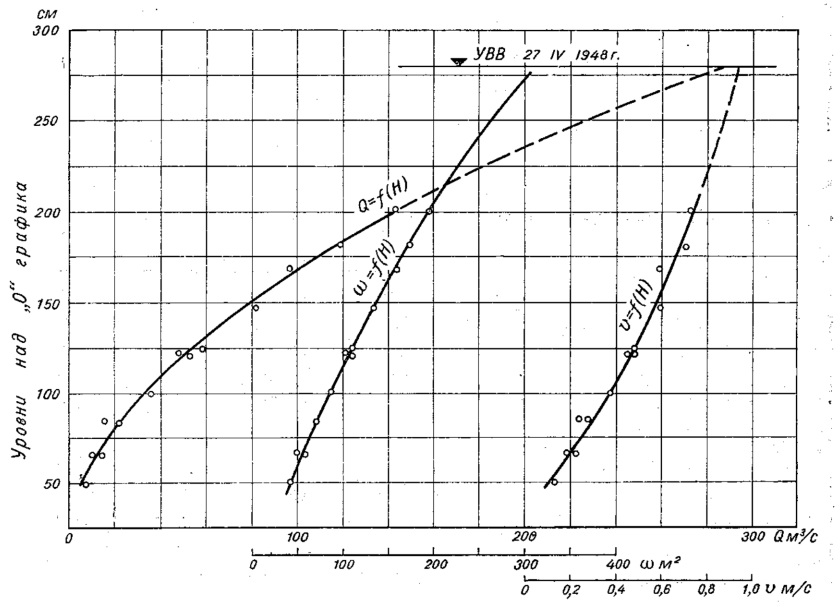


Рис. 21.1. Экстраполяция кривой расходов по элементам расхода.

При отсутствии измеренных уклонов применяют другой прием, основанный на эмпирически установленном факте, что зависимость $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ во многих случаях в верхней зоне амплитуды уровней принимает вид прямой линии, экстраполяция которой не представляет затруднений. На этом основан известный очень давно способ Дж. Стивенса (1907 г.). Возможность применения способа Стивенса в последнее время подтверждена работами Д. Е. Скородумова и Р. А. Шестаковой, при этом даже расширены пределы его применения.

Экстраполяция с помощью формулы Шези. Как уже указано, такую экстраполяцию производят только при наличии надежно измеренных уклонов водной поверхности. Хорошие результаты получаются для рек, в которых движение воды можно принимать за равномерное, для которого справедлива формула Шези. Установлено, что в этих условиях при высоких уровнях воды значение коэффициента Шези сохраняется постоянным $C\approx\text{const}$.

Эта закономерность подтвердилась на большом материале натурных наблюдений на равнинных, полугорных и горных реках со средними глубинами в паводок более 1—2 м.

Сущность экстраполяции заключается в том, что расходы в экстраполируемой части кривой $Q=f(H)$ вычисляют умножением площади живого сечения, определяемой по профилю створа, на среднюю скорость течения, определяемую по формуле Шези: $v=C\sqrt{h_{ср}I}$.

Величина $h_{ср}$ определяется по профилю створа. Значения уклона I и коэффициента Шези C для экстраполируемого участка определяют путем построения и экстраполяции кривых $I=f(H)$ и $C=f(H)$. Зависимость $I=f(H)$ строят по данным измерения уклонов водной поверхности, затем ее экстраполируют до требуемого высокого уровня непосредственным продолжением (рис. 21.2 *а*). При наличии измеренных уклонов при высоких уровнях кривая проводится без экстраполяции.

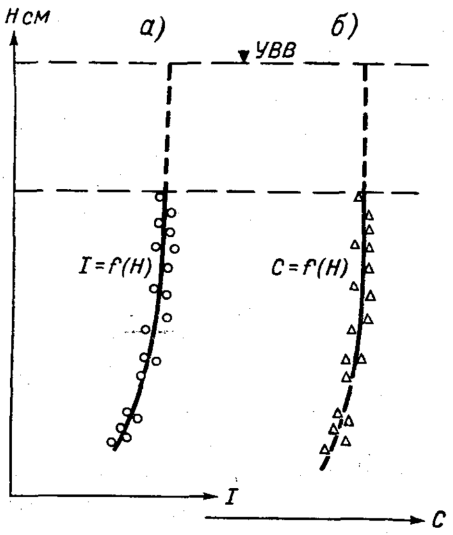


Рис. 21.2. Кривые $I=f(H)$ и $C=f(H)$ и их экстраполяция.

Для построения кривой $C=f(H)$ по измеренным расходам вычисляют значения коэффициентов Шези по формуле (15.2). Кривую $C=f(H)$ экстраполируют непосредственным продолжением до требуемого высокого уровня (рис. 21.2 *б*).

На реках, отвечающих указанным выше условиям, в большинстве случаев кривые $I=f(H)$ и $C=f(H)$ в верхних частях легко экстраполируются, а кривая $C=f(H)$ принимает вид прямой, параллельной оси H. Если же эти кривые будут иметь значительную кривизну или перегибы в верхней зоне, то от экстраполяции по формуле Шези следует отказаться.

Экстраполяция по способу Дж. Стивенса. Этот способ дает обычно хорошие результаты для сравнительно крупных рек со средней глубиной в паводок не менее 3,5—4,0 м и с движением воды, близким к равномерному. В таких условиях применима формула Шези, при этом расход воды выражается формулой (15.3). Опытом установлено, что в этих условиях величина $C\sqrt{I}$ практически не зависит от расхода. Основываясь на этом и

исходя из формулы (15.3), можно считать, что расход воды есть функция выражения $\omega\sqrt{h_{ср}}$, т. е.

$$Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}}). \qquad (21.1)$$

При этом принято, что $C\sqrt{I}\approx\text{const}$.

Зависимость (21.1) на графике выражается кривой, в верхней части обычно переходящей в прямую, что представляет большое удобство для экстраполяции. Характер кривой $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ определяет возможность применения способа Стивенса. Если в верхней части эта линия имеет большую кривизну или точки на графике ложатся с большим разбросом, то данный способ неприменим. При незначительной кривизне считается допустимым экстраполировать линию $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ по тенденции верхнего участка обоснованной измерениями расхода части. Если эта кривая имеет незначительную, но переменную по направлению кривизну, то ее экстраполируют, схематизируя в виде прямой; в подобных случаях эта прямая не проходит через начало координат, как это имеет место при прямолинейности верхнего участка кривой. Во всех случаях кривую $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ экстраполируют до значения $(\omega\sqrt{h_{ср}})_{макс}$, соответствующего наивысшему уровню $H_{макс}$.

Рассмотрим, как практически выполняют экстраполяцию. Для построения графика $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ по данным измерений расходов вычисляют величины $\omega\sqrt{h_{ср}}$. Это удобнее всего делать в табличной форме (табл. 21.1). В таблицу вписывают все измеренные расходы и соответствующие им уровни, для каждого расхода заполняют графы ω, B, $h_{ср}$ и вычисляют значения $\omega\sqrt{h_{ср}}$.

Таблица 21.1

№ расхода	Q	H	ω	B	$h_{ср}$	$\sqrt{h_{ср}}$	$\omega\sqrt{h_{ср}}$

По данным таблицы график зависимости $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$; значения Q откладывают по оси абсцисс, а значения $\omega\sqrt{h_{ср}}$ — по оси ординат. Это построение делают на том же листе, на котором построена и кривая расходов; ось абсцисс служит общей шкалой (рис. 21.3). Масштаб шкалы $\omega\sqrt{h_{ср}}$ выбирают произ-

вольно, но с учетом того, чтобы наибольшее значение $\omega\sqrt{h_{ср}}$ (при $H_{макс}$) находилось ниже наибольшего уровня шкалы H. По наложенным точкам проводят кривую, которую экстраполируют вверх до $(\omega\sqrt{h_{ср}})_{макс}$, как было указано ранее. По экстраполированному участку можно определить расходы, пользуясь общей для обеих кривых шкалой Q. Полученные таким путем расходы переносят графически вверх до пересечения с линиями соответствующих уровней; по полученным точкам проводят кривую расходов в зоне экстраполяции. Если зона экстраполяции

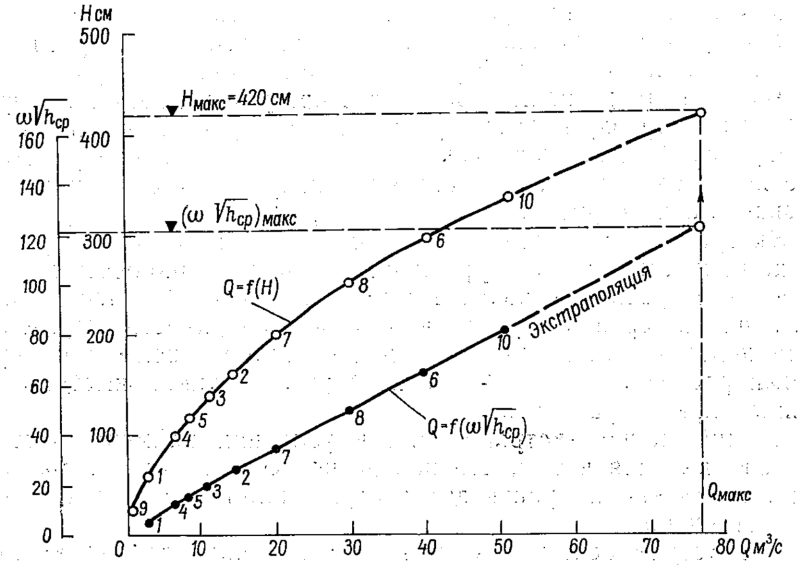


Рис. 21.3. Экстраполяция кривой расходов по способу Стивенса.

невелика, то нередко ограничиваются одной точкой — значением максимального расхода, как это показано на рис. 21.3.

Применяют другой прием экстраполяции по способу Стивенса. Вместо графика $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$ строят график $v=f(\sqrt{h_{ср}})$. Они вполне идентичны, так как во втором из них аргумент и функция разделены на одну и ту же величину ω. График $v=f(\sqrt{h_{ср}})$ строят обычно на отдельном листе и экстраполируют вверх до $(\sqrt{h_{ср}})_{макс}$. Пользуясь этим графиком, определяют средние скорости течения при высоких уровнях, в том числе и при $H_{макс}$. Значения расходов для экстраполяции кривой $Q=f(H)$ определяют, умножая полученные средние скорости на соответствующие площади живых сечений, определяемые по профилю

створа. При экстраполяции кривой $v=f(\sqrt{h_{ср}})$ следует учитывать сказанное выше об экстраполяции кривой $Q=f(\omega\sqrt{h_{ср}})$[1].

21.2. Экстраполяция кривых расходов для пойменных створов

К пойменным створам относят створы с односторонней или двусторонней поймой. При высоких уровнях вода выходит из главного русла на пойму. Особенности движения потока в условиях пойменных створов были описаны в главе 15. Там же было указано, что определение расхода воды расчетным способом при высоких уровнях производится по отсекам: выделяется русловой отсек, пойменные отсеки с различной шероховатостью, протоки.

Выход воды на пойму происходит при уровне, несколько превышающем бровку главного русла, а при двусторонней пойме — низшую из бровок. Различают надпойменную и русловую зоны уровней; надпойменная ограничена снизу отметкой нижней из бровок главного русла.

Экстраполяция кривых расходов облегчается в случаях, когда надпойменная зона уровней хотя бы частично освещена измерениями расходов воды. Кроме того, она облегчается при наличии измеренных уклонов водной поверхности. Русловая зона должна, как правило, быть достаточно освещена измерениями расходов, т. е. для главного русла должна иметься надежная кривая расходов.

Общий прием экстраполяции в условиях пойменных створов заключается в том, что поперечное сечение створа расчленяют на отсеки и производят экстраполяцию для каждого отсека отдельно.

Рассмотрим основные случаи экстраполяции для пойменных створов.

Экстраполяция при частичном освещении надпойменной зоны измерениями расходов воды.

а) Если имеются данные измерений уклонов водной поверхности, то экстраполяцию можно выполнять с помощью формулы Шези. На поперечном профиле створа намечают границы отсеков: главного русла, участков поймы с различной шероховатостью, протоков. Для каждого выделенного отсека строят кривые $I=f(H)$ и $C=f(H)$.

Кривые $I=f(H)$ строят по данным измерений уклонов; при этом обычно допускается, что уклон одинаков в русле и на пойме. Кривые $C=f(H)$ строят по данным измерений расходов; коэффициенты Шези C определяют при этом по формуле (15.2). Для пойменных отсеков при недостаточности данных измерений

[1] Вопрос об экстраполяции кривой $v=f(\sqrt{h_{ср}})$ для различных встречающихся в практике случаев подробно рассматривается в «Пособии по экстраполяции кривых расходов воды до наивысших уровней» [36].

расходов допускается вычислять значение C по формуле Павловского (см. главу 15).

Направление обеих этих кривых в надпойменной зоне нередко меняется. Кривая $I=f(H)$ может иметь поворот вправо (рис. 21.4), что связано с увеличением уклона при расширении долины реки ниже створа. Поэтому при экстраполяции надо учитывать морфологические особенности участка. Кривая $C=f(H)$ для главного русла в надпойменной зоне обычно имеет поворот влево, к оси H, что связано с уменьшением средней скорости течения. В пойменных отсеках эта кривая обычно имеет (приближенно) вид параболы.

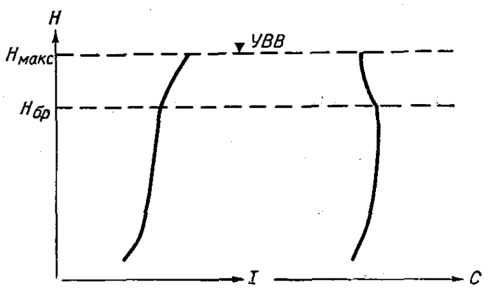


Рис. 21.4. Характерный вид зависимостей $I=f(H)$ и $C=f(H)$ для главного русла в условиях пойменных створов.

$H_{бр}$ — уровень выхода воды на пойму.

Используя построенные и экстраполированные кривые $I=f(H)$ и $C=f(H)$ для отсеков живого сечения, строят кривые расходов для каждого отсека, а на основе их — суммарную кривую для всего живого сечения.

б) Если данные измерений уклонов водной поверхности отсутствуют, то формулу Шези применять нельзя. В этом случае рекомендуется для экстраполяции использовать зависимость $M=f(H)$, где M — коэффициент, смысл и значение которого понятны из следующих преобразований:

$$v=C\sqrt{h_{ср}I}=C\sqrt{I}\,\sqrt{h_{ср}}=M\sqrt{h_{ср}},$$

$$M=C\sqrt{I}=\frac{v}{\sqrt{h_{ср}}}. \qquad (21.2)$$

Ранее указывалось, что для многих рек величина $C\sqrt{I}\approx\text{const}$, на этом основана экстраполяция по способу Стивенса.

При наличии измеренных расходов, но отсутствии значений уклонов водной поверхности, коэффициент можно определить по формуле $M=\frac{2}{\sqrt{h_{ср}}}$ и, следовательно, построить зависимость $M=f(H)$.

В этом случае экстраполяцию выполняют также по отсекам. Для главного русла величины M вычисляют по расходам воды, измеренным при различных уровнях. Затем вычерчивают график зависимости $M=f(H)$ и экстраполируют до наивысшего уровня. В пределах русловой зоны кривая $M=f(H)$ в большин-

стве случаев имеет в нижней части вид параболы, а выше часто переходит в прямую, параллельную оси уровней. В надпойменной зоне кривая может принимать различные направления (рис. 21.5) в зависимости от сочетания величин C и I [см. формулу (21.2)]. Экстраполяцию выполняют обычно по тенденции, определившейся по нанесенным на график точкам. Отклонение кривой вправо обычно связано с расширением долины ниже створа и увеличением в связи с этим уклона водной поверхности.

Для протоков и пойменных отсеков величины M вычисляют по данным измерений расходов. Кривые $M=f(H)$ проводят по нанесенным на график точкам и экстраполируют до наивысшего уровня по наметившейся тенденции. Какой-либо строгой закономерности в направлении этих кривых как для протоков, так и для пойменных отсеков не обнаружено.

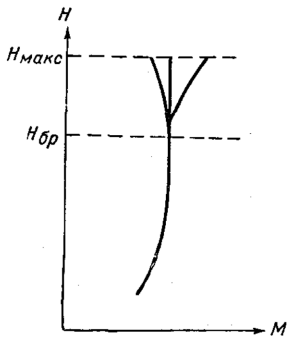


Рис. 21.5. Зависимость $M=f(H)$ и возможные варианты ее в надпойменной зоне.

Пользуясь построенными кривыми, определяют средние скоростей течения в главном русле и выделенных отсеках при высоких уровнях, включая $H_{макс}$, по формуле

$$v=M\sqrt{h_{ср}}.$$

Значения коэффициента M снимают с кривых, а величины $h_{ср}$ определяют по профилю створа.

Расходы вычисляют по формуле $Q=v\omega$. Далее, вычерчивают кривые расходов для главного русла, протоков и пойменных отсеков, а на их основе составляют суммарную кривую $Q=f(H)$ для всего живого сечения.

В створах с неширокой ровной луговой поймой можно экстраполировать кривую $M=f(H)$ для живого сечения в целом, без расчленения на отсеки. Надежная экстраполяция достигается при условии, если ширина поймы не более двух ширин главного русла, шероховатость на пойме существенно не изменяется по длине, участок долины приблизительно прямолинеен, а русло почти или совсем не меандрирует. Величины M вычисляют по данным измерений расходов. Строят график $M=f(H)$, вид которого определяет возможность его экстраполяции. Если получается хорошо выраженная зависимость, переходящая в верхней части в прямую линию, причем в нижней части надпойменной зоны направление ее не изменяется, то экстраполяцию выполняют непосредственным продолжением до

наивысшего уровня. При резком изменении направления кривой в надпойменной зоне достаточно надежная экстраполяция не может быть выполнена.

Вычисление расходов воды в зоне экстраполяции производят, как указано выше. По полученным значениям расходов строят кривую $Q=f(H)$ для всего живого сечения в целом.

Экстраполяция при отсутствии измерений расходов и уклонов водной поверхности в надпойменной зоне. При этих условиях достаточно надежная экстраполяция может быть выполнена только в случае неширокой ровной луговой поймы и при других сопутствующих признаках, описанных в предыдущем разделе. Экстраполируют зависимость $M=f(H)$ для всего живого сечения в целом, без разбивки на отсеки. Значения коэффициента M определяют по измеренным расходам в пределах русловой зоны и вычерчивают кривую $M=f(H)$, которая в данном случае является обоснованной только до уровня наибольшего измеренного расхода. Далее ее экстраполируют непосредственным продолжением по тенденции до наивысшего уровня. Экстраполированный участок кривой используют для определения расходов воды в надпойменной зоне. Затем строят кривую расходов для живого сечения в целом. Как ясно из предыдущего, применять описанный способ можно только при условии, если зависимость в русловой зоне достаточно хорошо выражена.

Для рек со сложной поймой — с протоками, переменной шероховатостью, поворотами и расширениями долины, а также при меандрировании русла достаточно обоснованных и надежных способов экстраполяции не имеется. Некоторые рекомендации по этому вопросу имеются в Пособии по экстраполяции [36].

21.3. Экстраполяция кривых расходов вниз

Экстраполяцию кривой расходов вниз выполняют в случаях, когда при низких уровнях, включая $H_{мин}$, не имеется измеренных расходов; для подсчета стока воды необходимо знать расходы при всех наблюдавшихся уровнях.

Экстраполяцию вниз производят двумя способами. Первый применяют в случае, если известна отметка нулевого расхода, т. е. уровень, при котором расход равен нулю. При этом кривую расходов проводят в точку на оси ординат, соответствующую отметке нулевого расхода. Отметку нулевого расхода не всегда удается установить.

На рис. 21.6 приведены два характерных случая, при которых отметка нулевого расхода может быть определена. Если гидроствор расположен на плёсе, то отметкой нулевого расхода будет отметка гребня переката, расположенного ниже створа. Если гидроствор расположен на перекате, то отметкой нулевого расхода будет низшая точка дна в створе. В обоих случаях при

понижении уровня вод до указанных отметок движение воды прекратится.

Для определения отметок нулевого расхода на местности необходимо провести промеры глубин с привязкой промерных точек к реперам посредством нивелировки.

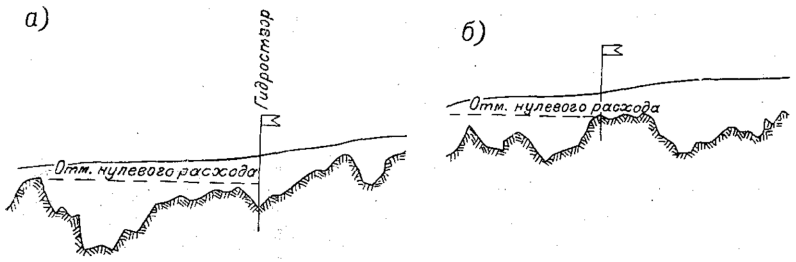


Рис. 21.6. Определение отметки уровня нулевого расхода.

а — по отметке переката, расположенного ниже створа; *б* — по отметке дна на гидростворе.

Второй способ применяют при невозможности установить отметку нулевого расхода. В этом случае кривую расходов экстраполируют вниз по элементам расхода. По профилю створа определяют площадь живого сечения ω; среднюю скорость v находят по экстраполяции кривой $v=f(H)$ непосредственным продолжением. Расход вычисляют по зависимости $Q=v\omega$.

Глава 22

Построение кривой расходов и подсчет стока воды при отсутствии однозначной зависимости между расходами и уровнями

22.1. Неустановившееся движение воды

Неустановившееся движение воды наблюдается в реках при прохождении весеннего половодья и паводков, а также на участках рек ниже гидротехнических сооружений при резком увеличении расхода воды: при попусках (т. е. сбросах воды через отверстия плотины) и регулировании сброса воды через турбины ГЭС в соответствии с заданной нагрузкой.

Неустановившееся движение воды проявляется в форме волны, перемещающейся по руслу и имеющей пологий фронт и еще более пологую тыловую часть. При прохождении волны паводка через гидроствор сначала уровень воды повышается, а затем падает. Уклон водной поверхности на подъеме больше, чем на спаде, поэтому при одном и том же уровне в период подъема наблюдается больший расход воды, чем на спаде.

Паводочные волны бывают наиболее резко выражены на длинных бесприточных участках равнинных рек. На гидростворах, расположенных на таких участках, расход быстро меняется во времени, т. е. наблюдается резко выраженное неустановившееся движение воды. При большом количестве притоков паводочные волны выражены значительно слабее и даже могут совсем не проявляться. На реках, имеющих большие уклоны, например на горных, паводочные волны выражены значительно слабее.

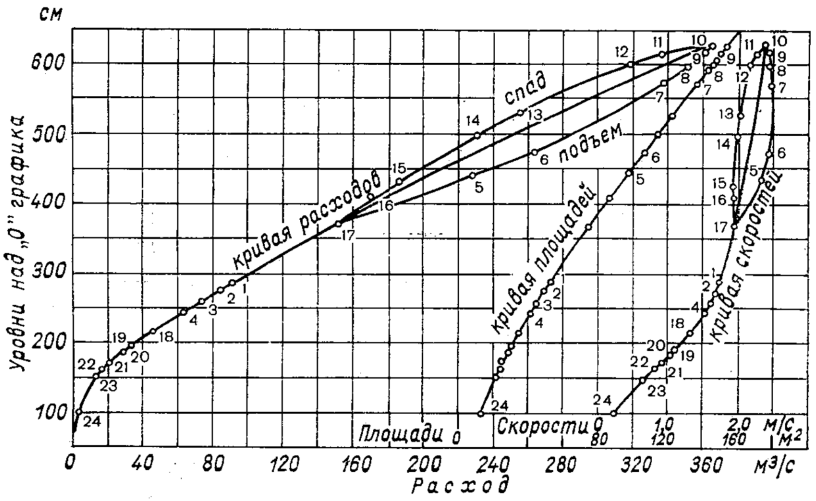


Рис. 22.1. Кривая расхода при неустановившемся движении воды.

При выраженном неустановившемся движении воды для кривой расходов характерно наличие нескольких ветвей: подъему и спаду соответствуют отдельные ветви, при этом ветвь подъема располагается правее ветви спада. То же наблюдается и при построении кривой скоростей $v=f(H)$, так как скорость зависит от уклона. Вид кривой площади $\omega=f(H)$ при этом не меняется, так как площадь водного сечения зависит только от высоты уровня воды (при недеформирующемся русле). На рис. 22.1 представлены кривые $Q=f(H)$, $\omega=f(H)$ и $v=f(H)$ для случая неустановившегося движения воды при прохождении паводка.

Рассмотрим более подробно петлеобразную кривую расходов — так называемую паводочную петлю. На рис. 22.2 *а* изображена в схематизированном виде паводочная петля и хронологический график хода уровня за период паводка. При начале интенсивного подъема уровня кривая расходов отходит вправо от основной кривой расходов установившегося движения. Начальный участок кривой подъема часто бывает не обоснован измерениями расходов ввиду ледохода, поэтому на рис. 22.2 *а*

он проведен пунктиром. Наибольший расход воды наблюдается несколько раньше момента наступления наивысшего уровня, поэтому кривая подъема, достигнув наибольшего значения по абсциссе, поворачивает влево. Достигнув максимума по ординате, она переходит в кривую спада. Точка примыкания кривой спада к основной кривой соответствует концу ясно выраженного спада паводка и наступлению установившегося движения воды в русле.

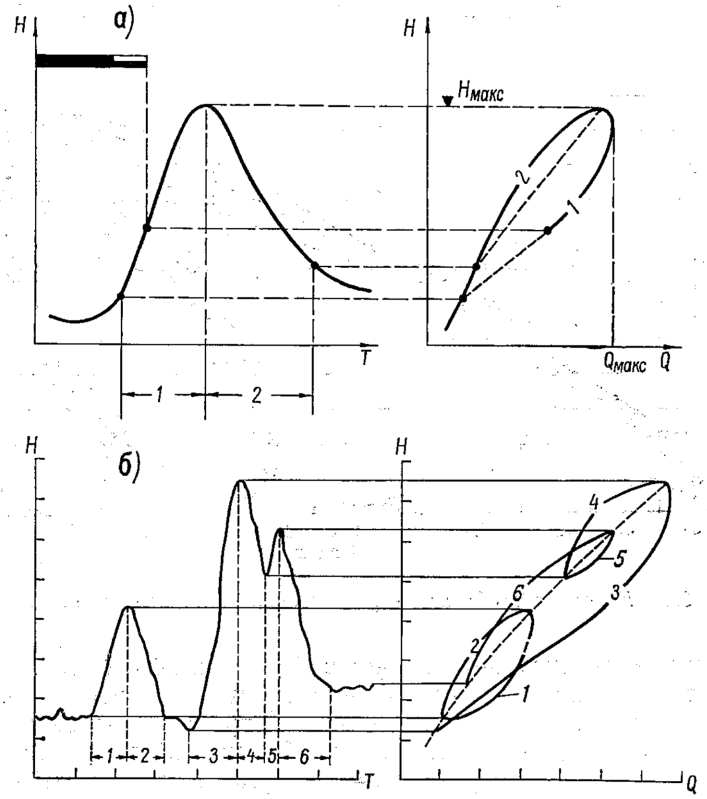


Рис. 22.2. Петли кривых расходов воды при подъеме и спаде уровня.

Кривая расходов установившегося движения проводится между кривыми подъема и спада пунктиром, в верхней части она доводится до наивысшего уровня; направление этой части кривой может быть определено путем экстраполяции.

Чем больше интенсивность изменения уровня во времени, тем больше отклонение по абсциссе кривых подъема и спада от основной кривой установившегося движения. Наибольшее изменение уровня во времени наблюдается на подъеме паводка, поэтому кривая подъема отклоняется по абсциссе больше, чем кривая спада.

На рис. 22.2 *а* показан наиболее простой вид кривой расходов с одной паводочной петлей. Если при прохождении паводка наблюдалось несколько подъемов и спадов, то кривая расходов принимает более сложный вид. Для правильного построения кривой расходов при таком неоднотактном паводке требуется осветить ее достаточным количеством измеренных расходов. На рис. 22.2 *б* показана кривая расходов паводка с более сложным ходом уровня; каждому пику соответствует своя петля, состоящая из кривой подъема, отвечающей периоду подъема уровня, и кривой спада, отвечающей периоду спада уровня.

Рассмотренная закономерность в очертании паводочных петель бывает хорошо выражена при недеформируемом русле. В размываемых руслах вид кривых расходов существенно меняется, о чем говорится ниже.

Подсчет стока воды за период паводка производят по кривым подъема и спада. Расходы определяют по средним суточным уровням по той ветви петлеобразной кривой, которая соответствует данному периоду.

Паводочные петли нередко бывают не обоснованы измерениями расходов до наивысшего уровня. В этих случаях выполняют их экстраполяцию; при этом необходимо предварительно провести кривую расходов установившегося движения и на ней наметить точку при наивысшем уровне, в которой происходит смыкание ветвей паводочной петли. Предварительная экстраполяция кривой установившегося движения может быть выполнена по элементам расхода, причем кривую $v=f(H)$ экстраполируют непосредственным продолжением, а кривую $\omega=f(H)$ — по профилю створа.

22.2. Ледовые явления

Ледовые явления нарушают гидравлический режим реки, имевший место при свободном ее состоянии. Ледяные образования — ледяной покров, подледная шуга и др.— уменьшают площадь живого сечения, увеличивают гидравлические сопротивления. Заторы и зажоры вызывают переменный подпор. Полыньи способствуют образованию внутриводного льда и скоплениям его на участках реки ниже створа. В этих условиях не удается получить достаточно устойчивую зависимость $Q=f(H)$, поэтому возникает необходимость в применении иных способов подсчета стока. Для вычисления стока воды наибольшее применение в этих случаях находит способ интерполяции между измеренными расходами воды и способ зимних переходных коэффициентов $K_{зим}$.

Интерполяция между измеренными расходами. Применение этого способа возможно при наличии частых измерений расходов — не менее пяти-шести в месяц. По данным измерений расходов составляют хронологический график изменения расходов

во времени: по нанесенным на график точкам расходов проводят плавную кривую — гидрограф. При резком отклонении отдельных точек от общего направления кривой следует проанализировать причины этого, используя комплексный график гидрометеорологических наблюдений (рис. 22.3); при этом бывает возможно установить причины отклонений. В частности, при повышении температуры воздуха до оттепели может происходить

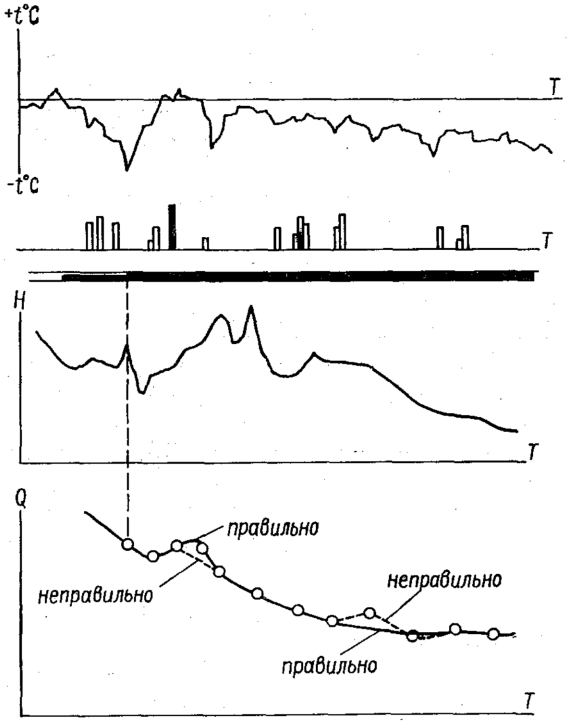


Рис. 22.3. Интерполяция между измеренными расходами.

увеличение стока и отклонение точек вверх, то же возможно при попусках. Ежедневные расходы воды определяют по полученному гидрографу.

Построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов. Вычисление ежедневных расходов воды с использованием зимних переходных коэффициентов $K_{зим}$ основано на эмпирически установленном факте несколько меньшей изменчивости во времени отношения $K_{зим}=\frac{Q_{зим}}{Q_{св}}$ по сравнению с изменением расходов воды. Коэффициент $K_{зим}$ характеризует уменьшение пропускной способности русла под ледяным покро-

вом. Значение зимнего переходного коэффициента определяют для каждого измеренного при ледяном покрове расхода. Для каждого данного расхода $Q_{зим}$ определяют при том же уровне расход $Q_{св}$ по кривой $Q=f(H)$ (рис. 22.4) или по расчетной таблице кривой расходов и вычисляют $K_{зим}$. За уровень, соответствующий зимнему расходу, принимается уровень воды в лунке.

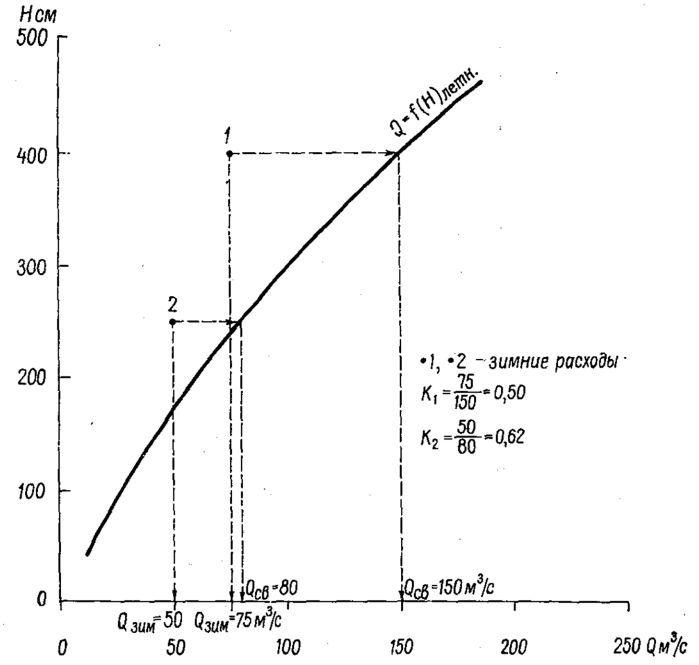


Рис. 22.4. Схема к определению $K_{зим}$.

Определив значения $K_{зим}$ для каждого измеренного при ледяном покрове расхода, строят хронологический график зимних переходных коэффициентов. Обычно его строят в составе комплексного графика, пример которого показан на рис. 22.5. На этом графике, помимо $K_{зим}=f(T)$, наносят кривые хода температуры воздуха, уровня воды и толщины льда. Это представляет удобство для анализа изменений коэффициента $K_{зим}$. При недостаточном количестве измеренных расходов в периоды осеннего и весеннего ледоходов кривую $K=f(T)$ экстраполируют на концах, при этом принимается, что в последний день редкого осеннего и первый день редкого весеннего ледоходов $K_{зим}=1$.

Ежедневные расходы воды определяются по летней кривой расходов с поправкой на $K_{зим}$

$$Q_{зим} = Q_{св} K_{зим}. \qquad (22.1)$$

Значения $K_{зим}$ берут с графика $K_{зим} = f(T)$ для каждого дня.

На практике расходы для зимнего периода определяют умножением летнего расхода при данном уровне, взятого из расчет-

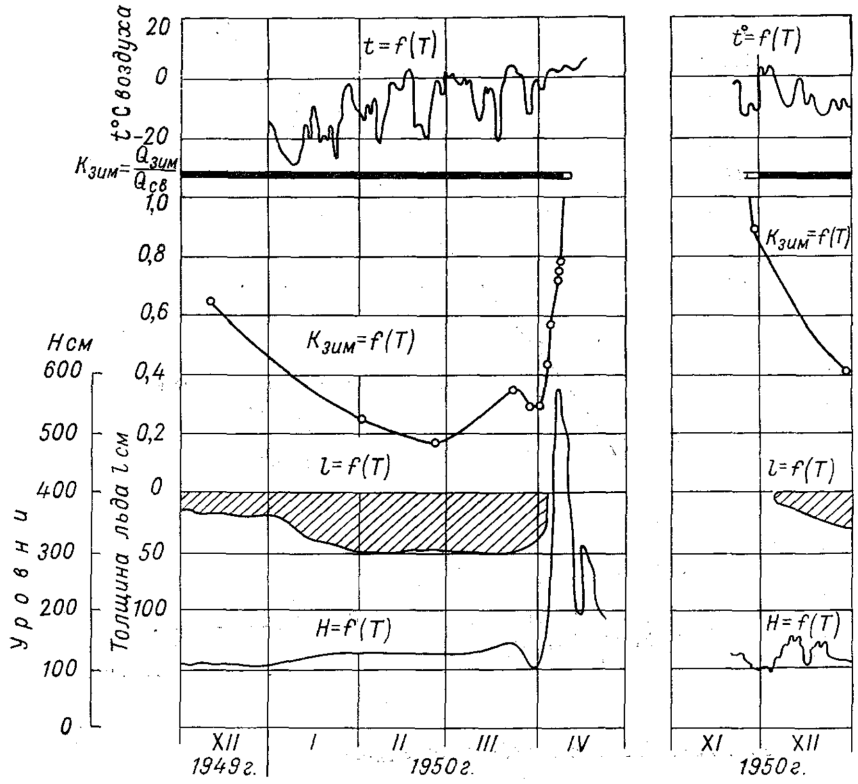


Рис. 22.5. Схема к построению и анализу графика $K_{зим}$.

ной таблицы, на коэффициент $K_{зим}$ для данного дня, снятый с хронологического графика $K_{зим}$.

Применять описанный способ можно в случаях, когда колебания уровня связаны с изменениями расхода воды и последние происходят плавно. Если же связь между расходом и уровнем нарушена, как, например, при явлениях переменного подпора от заторов и зажоров, то применять этот способ нецелесообразно — результаты могут быть неверными.

Уточнить значения зимних переходных коэффициентов $K_{зим}$ в периоды между измерениями расходов можно посредством по-

строения графика $K_{зим}=f(\alpha)$.[1] Величина α отражает степень стеснения живого сечения потока ледяным покровом

$$\alpha=\frac{\omega}{\omega_{полн}}, \qquad (22.2)$$

где ω — площадь живого сечения потока под ледяным покровом, равная $\omega=\omega_{полн}-\omega_{пл}$; $\omega_{полн}$ — площадь сечения потока, ограниченная уровнем воды в лунке; $\omega_{пл}$ — площадь погруженного льда. При вычислении указанных площадей площади мертвых пространств исключают.

По измеренным зимой расходам определяют значения α и $K_{зим}$. По этим значениям строят график $K_{зим}=f(\alpha)$, показанный на рис. 22.6. Для средних рек при постоянной шероховатости нижней поверхности льда и отсутствии подпора точки на графике

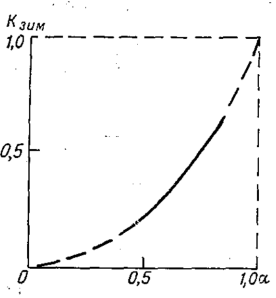


Рис. 22.6. Вид кривой $K_{зим}=f(\alpha)$.

ложатся достаточно тесно и проведенная по ним кривая имеет вид параболы. При полном промерзании реки $\omega=0$, $\alpha=0$ и $K_{зим}=0$. Если река свободна ото льда, то $\omega=\omega_{полн}$, $\alpha=1$ и $K_{зим}=1$. Поэтому, если кривая не освещена измерениями на конечных участках (что обычно имеет место), ее экстраполируют в точки $K_{зим}=\alpha=1$ и $K_{зим}=\alpha=0$.

Значения $K_{зим}$ для дней, когда расход не измеряли, получают с графика $K_{зим}=f(\alpha)$. Для этого в дни между измерениями расхода делают измерения толщины льда и погруженной части льда на створе в лунках и определяют ω и $\omega_{полн}$, а по ним вычисляют α. Зная α, по графику определяют $K_{зим}$.

Лучшие результаты при применении этого способа получаются для рек с небольшими глубинами и однообразной толщиной льда.

Зимние кривые расходов. Если для зимнего периода удается установить зависимость $Q_{зим}=f(H)$, то она используется для вычисления стока (рис. 22.7). Такие случаи встречаются редко, главным образом для больших рек с устойчивым ледоставом, где толщина льда незначительна по сравнению с глубиной реки.

Срезка подпорных уровней. Во всех случаях, когда для подсчета стока в зимний период используются сведения об уровнях воды (способ переходных коэффициентов $K_{зим}$, кривая зависимости $Q=f(H)$ и др.), необходимо подвергнуть тщательному анализу ход уровней за этот период и срезать те пики, которые не являются следствием возрастания водности. Срезку

[1] Способ предложен Л. М. Ковалевым.

уровней необходимо, в частности, производить в том случае, если они являются следствием заторов или зажоров. Для установления причин резких подъемов уровня в зимний период следует проанализировать графики метеорологических наблюдений. Если ход температуры и осадков показывает, что подъем уровня не мог произойти от увеличения расхода, то повышение уровня не принимается в расчет, а производится графическая интерполяция, ориентируясь на уровень воды до начала подпора и после него; по полученным уровням определяются расходы для подпорного периода.

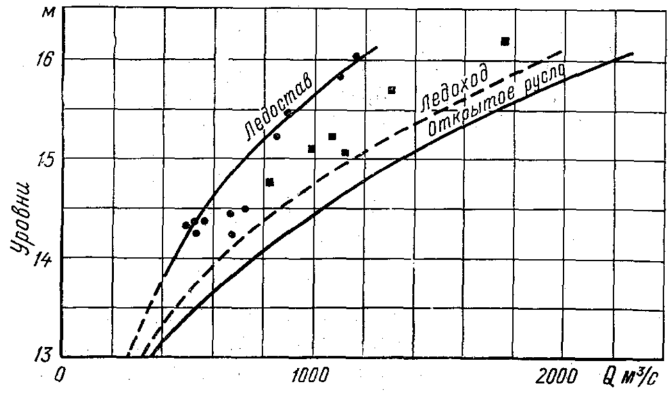


Рис. 22.7. Кривые зимних расходов.

Можно также воспользоваться данными близко расположенного водомерного поста при наличии графика связи уровней. Тогда за подпорный период уровни определяются по графику связи, а по ним и расходы. В этом случае необходимо убедиться, что на соседнем посту подпор отсутствует.

22.3. Зарастание русла

Водная растительность уменьшает площадь живого сечения и увеличивает сопротивление движению воды, вследствие чего пропускная способность русла уменьшается и возникает подпор. По сравнению с незаросшим руслом в русле, заросшем водной растительностью, при одинаковых уровнях проходят меньшие расходы. Наибольшее стеснение русла наблюдается в период полного развития растений; в периоды начального роста и отмирания водной растительности влияние ее на движение потока сказывается в меньшей степени. Начало вегетации наблюдается после спада весеннего половодья; полное отмирание водной растительности происходит только с момента начала ледовых явлений.

Основным способом вычисления стока в данном случае является применение хронологического графика переходных коэффициентов, выражающих отношение расходов в зарастающем русле к расходам в свободном русле при тех же уровнях. Коэффициент $K_{зар}$ характеризует уменьшение пропускной способности русла при зарастании.

Другим способом является вычисление стока по кривым расходов при зарастании русла. Кроме того, в отдельных случаях применяют интерполяцию между измеренными расходами.

Вычисление стока по хронологическому графику переходных коэффициентов. Этот способ применяют при малых колебаниях

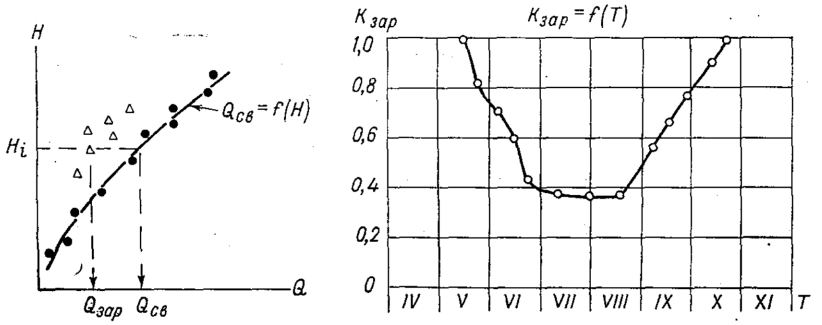


Рис. 22.8. Схема к способу переходных коэффициентов $K_{зар}$.

расхода воды. Для каждого расхода, измеренного при заросшем русле, вычисляют переходный коэффициент

$$K_{зар}=\frac{Q_{зар}}{Q_{св}}, \qquad (22.3)$$

где $Q_{зар}$ — измеренный расход; $Q_{св}$ — расход, снятый с кривой расходов свободного русла при том же уровне.

По полученным значениям $K_{зар}$ строят хронологический график $K_{зар}$ (рис. 22.8), обычно в составе комплексного графика.

Ежедневные расходы воды определяют по кривой расходов для свободного русла, а затем вводят поправку на зарастание

$$Q_{зар}=Q_{св}K_{зар}. \qquad (22.4)$$

Значение переходного коэффициента $K_{зар}$ для каждого дня берут с графика $K_{зар}=f(T)$.

Вычисление стока по кривым расходов. В некоторых случаях даже при зарастающем русле можно использовать для подсчета стока кривые расходов. Такие условия возникают, например, в периоды паводков, когда вследствие возрастания расходов воды влияние растительности становится несущественным. При этом могут оказаться пригодными даже однозначные кривые $Q=f(H)$. Иногда для таких периодов связь расходов и уровней может

выражаться в форме петлеобразной кривой. Кривые расходов строятся по точкам измеренных расходов и имеют сроки действия, соответствующие продолжительности паводков.

Интерполяция между измеренными расходами применяется при наличии большого числа измеренных расходов в период зарастания, когда все дождевые паводки освещены расходами, измеренными на подъеме и на спаде. По измеренным расходам строят (осредненно) зависимость $Q=f(T)$. Ежедневные расходы определяют по графику $Q=f(T)$ путем интерполяции.

22.4. Неустойчивые русла

Неустойчивость русла свойственна главным образом рекам горных и предгорных районов, режим которых характеризуется частными паводками. Деформации русла могут быть периодическими и непрерывными. Периодические деформации связаны с прохождением наиболее высоких паводков, в промежутках между которыми русло сравнительно стабильно. Непрерывные деформации, наблюдаемые на некоторых реках, происходят в течение всего годового цикла, меняется лишь их интенсивность.

Расходы, измеренные на реках с неустойчивым руслом, могут содержать погрешности за счет повышенной турбулентности потока, больших скоростей течения и резкого изменения их по ширине реки, деформации русла за время измерения расхода и др. Все это необходимо учитывать при анализе материалов для подсчета стока. Кроме того, необходимо проанализировать зависимость $\omega=f(H)$ и совмещенные поперечные профили русла.

Для вычисления стока рек с неустойчивым руслом применяются следующие способы:

1) построение системы временных кривых,
2) приведение кривой расходов к основному сечению,
3) способ Стаута,
4) интерполяция между измеренными расходами.

Построение системы временных кривых расходов производят в случае периодических изменений русла. Каждая кривая соответствует определенному состоянию русла. Отдельные кривые соединяют переходными кривыми, освещающими периоды неустойчивого состояния русла при прохождении паводков. Построение системы временных кривых производят в следующем порядке:

— выделяют хронологически связанные группы точек измеренных расходов, каждую из которых можно отнести к одной временной кривой;

— устанавливают сроки перехода с одной кривой на другую, а следовательно, и сроки действия кривых;

— проводят кривые.

Схема построения временных кривых показана на рис. 22.9. Кривая *1* соответствует устойчивому состоянию русла до па-

водка. При подъеме паводка происходил размыв русла; по измеренным в этот период расходам проведена кривая *2*. При высоких уровнях расходы не измерялись. По измеренным расходам на спаде паводка проведена кривая *3*. Обе ветви (*2* и *3*) соединены переходной кривой, показанной пунктиром (в этот период происходил дальнейший размыв русла). После спада паводка зависимость $Q=f(H)$ снова выражается однозначной кривой *4*, но положение ее иное, чем кривой *1*,— она располагается на графике ниже в связи с размывом русла.

Приведение кривой расходов к основному сечению применяется в случае, когда деформации русла носят характер лишь

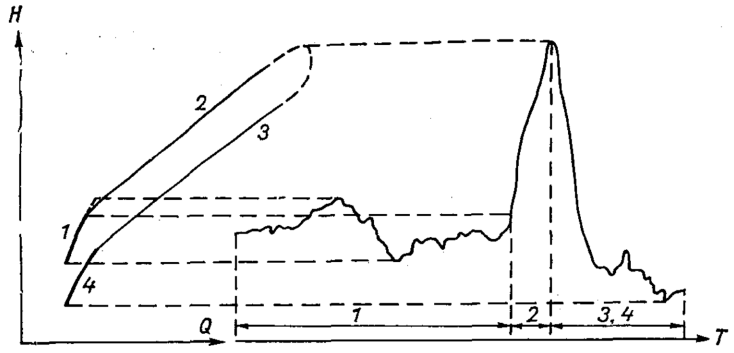


Рис. 22.9. Схема построения временных кривых расходов при неустойчивом русле.

вертикального смещения без изменения уклона водной поверхности (в этом случае возможно также применение временных кривых). Для удобства применения этого способа желательно иметь данные промеров в периоды между измерениями расходов. Профили створа, полученные при измерении расходов и по промерам, сопоставляют между собой и из них выбирают на глаз средний по глубинам, который принимают за основной и называют основным сечением. При выборе основного сечения необходимо учитывать, чтобы измеренные уровни воды не оказались ниже самой низкой точки дна на профиле.

Для основного сечения строят кривую площадей $\omega=f(H)$. На тот же график наносят точки площадей по данным измерений расходов и промеров глубин, проводившихся между измерениями расходов (рис. 22.10). По проведенной кривой и нанесенным точкам определяют значения поправок ΔH для каждой из нанесенных точек. Затем строят хронологический график поправок, который называется «кривая поправок уровня на деформацию водного сечения». Поправки на графике откладывают в сторону, противоположную отклонению соответствующих точек от кривой площадей основного сечения.

После этого для каждого измеренного расхода по кривой поправок определяют исправленный уровень

$$H_{\text{испр}} = H \pm \Delta H. \qquad (22.5)$$

Окончательно кривую расходов строят по измеренным расходам и исправленным уровням $Q = f(H_{\text{испр}})$; ее называют приведенной кривой расходов.

Ежедневные расходы определяют по исправленным уровням и приведенной кривой расходов.

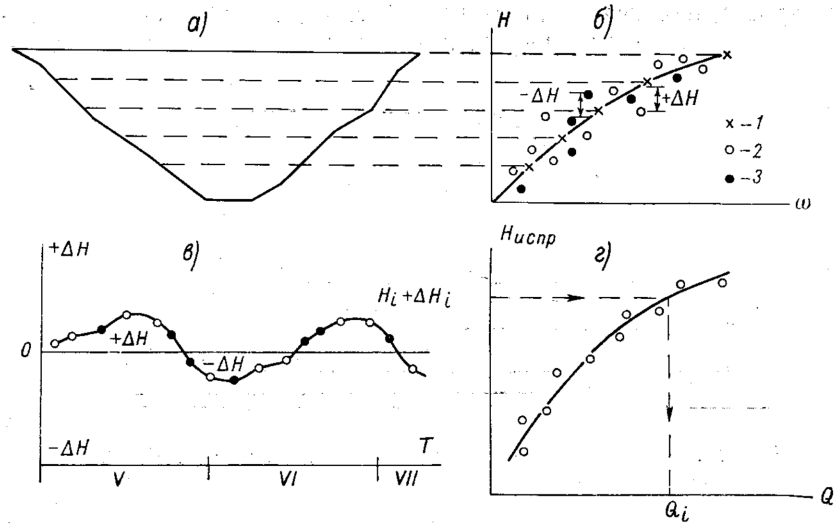


Рис. 22.10. Схема приведения кривой расходов к основному сечению.

а — профиль основного сечения; *б* — кривая площадей основного сечения; *1* — площади, вычисленные по профилю основного сечения; *2* — площади, определенные при измерениях расходов воды; *3* — площади, полученные по промерам; *в* — кривая поправок; *г* — кривая расходов с исправленными уровнями (приведенная кривая расходов).

Способ Стаута применяется, когда деформации русла связаны с частым чередованием паводков и происходят непрерывно, что затрудняет построение временных кривых расходов.

Для вычисления ежедневных расходов делают следующие построения (рис. 22.11):

— на график в координатной системе (Q, H) наносят точки измеренных расходов (рис. 22.11 *а*);

— по нанесенному полю точек проводят кривую, которая носит название стандартной; направление ее определяется путем построения двух-трех временных хронологических кривых $Q = f(H)$; высотное положение стандартной кривой особого значения не имеет — она проводится по середине поля точек;

— определяют отклонения точек измеренных расходов от стандартной кривой по ординате (поправки Стаута) $\pm\Delta H$; отклонения вверх считаются отрицательными, и наоборот;

— строят хронологический график поправок (рис. 22.11 *б*).

Ежедневные расходы определяют по стандартной кривой и по среднему суточному уровню H, исправленному на величину поправки Стаута ΔH для данного числа по хронологическому графику.

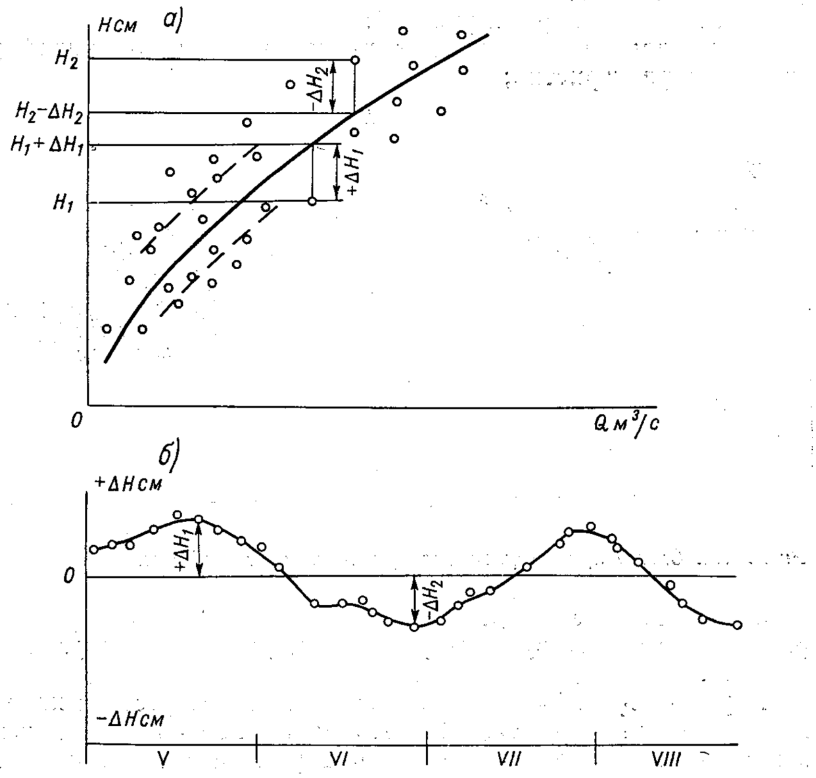


Рис. 22.11. Схема к построению стандартной кривой и графика поправок Стаута.

Интерполяцию между измеренными расходами применяют в случае непрерывной и интенсивной деформации русла и при достаточной частоте измерений расходов, позволяющей осветить характерные переломы на графике.

22.5. Переменный подпор

При наличии переменного подпора необходимо выявить его причину и характер.

Для вычисления стока в условиях переменного подпора важное значение имеют надежные данные об уклонах водной

поверхности; для определения ежедневных расходов в этом случае необходимо располагать данными об ежедневных уклонах.

Для вычисления стока применяются следующие способы:

1) интерполяция между измеренными расходами;

2) построение кривых расходов неустойчивой связи при переменном подпоре;

3) срезка подпорных уровней;

4) вычисление ежедневных расходов воды по кривой расходных характеристик;

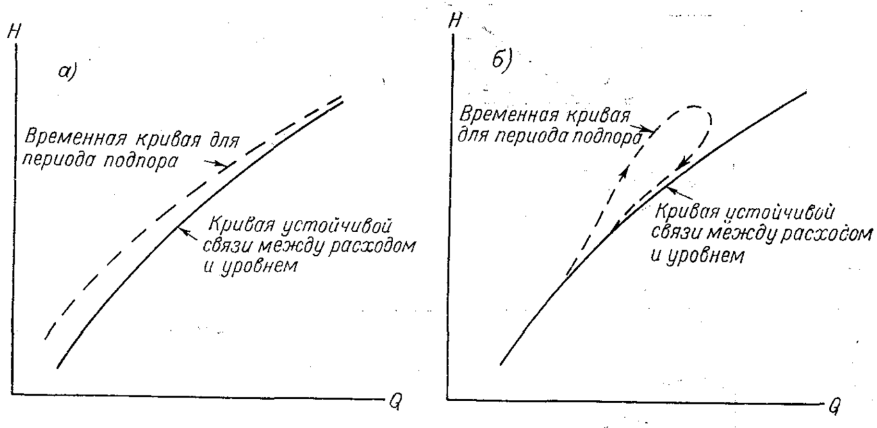


Рис. 22.12. Схемы кривых расходов при переменном подпоре.

5) вычисление ежедневных расходов по семейству кривых расходов, соответствующих различным уклонам или разностям отметок.

Первый—третий способы применяют при отсутствии надежно измеренных уклонов водной поверхности; при наличии надежно измеренных уклонов применяют четвертый и пятый способы.

Интерполяцию между измеренными расходами применяют при наличии частых измерений расходов.

Построение кривых расходов неустойчивой связи при переменном подпоре рекомендуется при медленно изменяющемся подпоре в сочетании с быстрыми изменениями расхода.

Кривые связи при этом могут иметь сугубо индивидуальные очертания, поэтому для надежного их обоснования необходимы достаточно частые измерения расходов.

На рис. 22.12 *а* приведен пример временной кривой при подпоре, вызванном стеснением живого сечения ниже створа и носящем устойчивый характер; в этом случае кривая для периода подпора в верхней части приближается к кривой устойчивой связи.

На рис. 22.12 *б* показан пример временной кривой при подпоре, вызванном зачительным, но постепенным повышением

уровня воды ниже створа, когда при прохождении паводка через гидроствор в нем был подпор от паводка на главной реке.

Если кривая расходов неустойчивой связи достаточно обоснована измеренными расходами, то за период подпора ежедневные расходы определяют по ней.

Срезка подпорных уровней применяется в случаях кратковременных подпоров, вызывающих значительные подъемы уровня при медленно изменяющемся расходе, что может наблюдаться при нагонах, заторах сплавного леса и т. д. В подобных

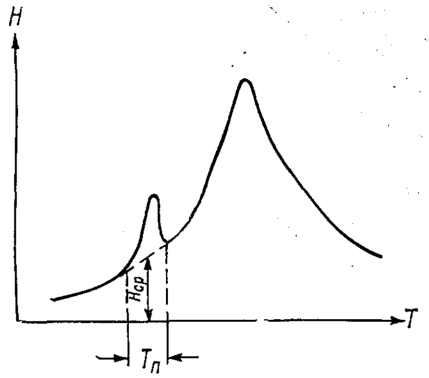


Рис. 22.13. Срезка подпорных уровней. $T_п$ — период подпора, $H_{ср}$ — срезанный уровень.

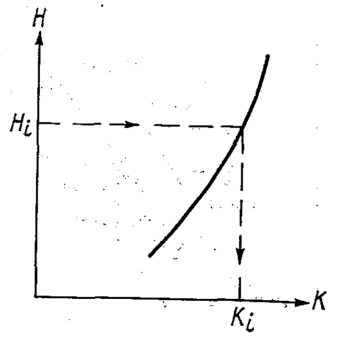


Рис. 22.14. Схема к определению расходной характеристики в зависимости от уровня по кривой $K=f(H)$.

случаях фактически измеренные в период подпора уровни заменяют фиктивными, «срезанными» уровнями (рис. 22.13); вычисление ежедневных расходов производят по срезанным уровням и кривой устойчивой связи между расходами и уровнями.

Вычисление ежедневных расходов воды по кривой расходных характеристик. Этот способ основан на эмпирически установленном факте — инвариантности расходной характеристики при изменении уклона. Расходная характеристика в большинстве случаев, особенно при подпертом состоянии потока, для данного наполнения русла, т. е. для данной отметки уровня, остается приблизительно постоянной при любых изменениях уклона и соответствующих изменениях расхода. Применить данный способ можно только при наличии надежно измеренных уклонов водной поверхности. Для каждого измеренного расхода вычисляют расходную характеристику

$$K=\frac{Q}{\sqrt{I}}. \qquad (22.6)$$

Затем строят график зависимости расходной характеристики от уровня $K=f(H)$ (рис. 22.14). На построенном графике отклонения точек от кривой по абсциссе не должны быть значитель-

ными, более ±10%. Если они превышают эту величину или же точки образуют обособленные замкнутые группы, то способ неприменим (т. е. неприменима формула Шези).

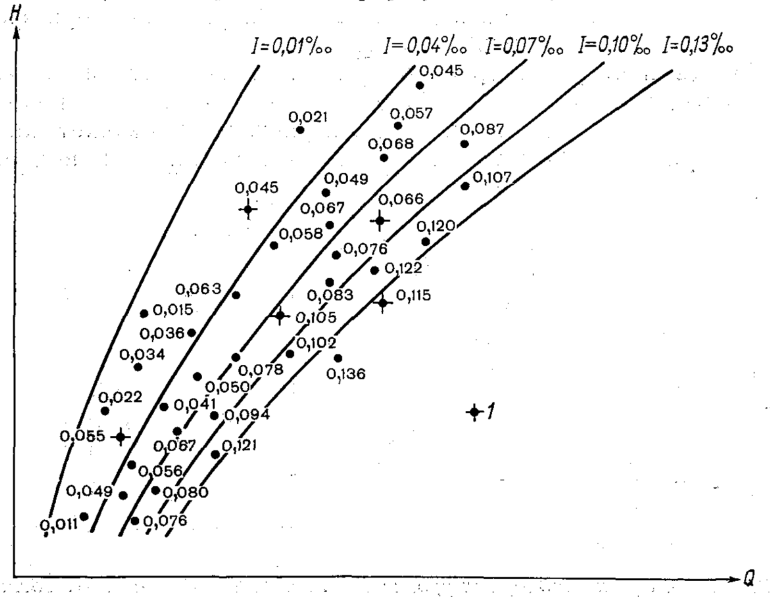


Рис. 22.15. Семейство кривых расходов для различных уклонов.
1 — точки расходов, выпадающих из соответствующего интервала уклона.

По кривой $K=f(H)$ и ежедневным уровням определяют ежедневные значения расходной характеристики, после чего вычисляют ежедневные расходы воды

$$Q_i=K_i\sqrt{I_i}. \qquad (22.7)$$

Вычисление ежедневных расходов по семейству кривых расходов, помеченных значениями уклонов. *Этот способ применим* при надежно измеренных уклонах водной поверхности. Значения измеренных расходов наносят на график (рис. 22.15) и около каждой точки проставляют значения измеренного уклона. В поле точек измеренных расходов проводят кривые расходов, отвечающие определенным значениям уклонов, через равные интервалы в зависимости от наблюдавшейся амплитуды колебания уклонов. Каждую проведенную кривую помечают значением уклона, которому она соответствует.

Ежедневные расходы определяют по ежедневным уровням и уклонам путем интерполяции на глаз между значениями расходов по двум смежным кривым.

Этот способ можно применять и тогда, когда зависимость $K=f(H)$, рассмотренная в предыдущем способе, не дает хороших результатов (на графике точки ложатся с большим разбросом вследствие неприменимости формулы Шези).

Раздел VII

Изучение твердого стока и донных отложений

Глава 23

Общие сведения о твердом стоке

23.1. Основные понятия

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

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

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

Твердый сток реки может быть определен в полном объеме только в результате учета всех указанных категорий наносов и растворенных веществ.

При гидрометрических измерениях отдельно учитывают расход взвешенных наносов R (кг/с), расход донных наносов G (кг/с) и расход растворенных веществ S (кг/с).

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

$$\rho = \frac{p_н \cdot 10^6}{V}, \qquad (23.1)$$

где $p_н$ — количество наносов в пробе в граммах; V — объем пробы воды в миллилитрах; тогда ρ — в г/м^3.

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

$$g = \frac{100 p_д}{tl}, \qquad (23.2)$$

где $p_д$ — количество наносов в пробе в граммах; t — продолжительность наблюдений в секундах; l — ширина входного отверстия прибора в сантиметрах; тогда g — в г/(м·с).

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

$$\alpha = \frac{p_с \cdot 10^6}{V}, \qquad (23.3)$$

где $p_с$ — сухой остаток в граммах; V — объем воды в миллилитрах; тогда α — в г/м^3.

Изучение твердого стока имеет целью получить следующие его характеристики: а) годовой сток взвешенных и донных наносов и растворенных веществ с распределением его внутри года; б) состав взвешенных и донных наносов по крупности частиц, содержание в них органических веществ; в) солевой состав растворенных веществ с внутригодовым распределением ионов.

Изучение твердого стока рек имеет большое научное и практическое значение. Знание режима движения, состава и объема стока наносов позволяет решать ряд весьма важных проблем народного хозяйства. Например, большое значение этот вопрос приобретает в связи с проектированием и эксплуатацией водохранилищ, расчет заиления которых не может быть выполнен достаточно точно без фактических данных о стоке наносов. В районах орошаемого земледелия учет стока и режима движения наносов необходим для разработки мероприятий по предупреждению заиления каналов и водохранилищ. Большое значение изучение режима движения наносов и их отложений имеет для судоходства. Для улучшения судоходных условий рек ежегодно ведутся в большом объеме выправительные и дноуглу-

бительные работы. Учет количества и состава наносов весьма важен при проектировании гидроэлектростанций: под действием наносов могут истираться лопатки турбин, стенки водоводов и т. п.

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

23.2. Крупность и гидравлическая крупность наносов

Водный поток транспортирует наносы различной крупности и формы. В гидрометрии принято подразделять наносы по размеру частиц (табл. 23.1). За размер частицы принимают ее средний диаметр.

Таблица 23.1

Классификация речных наносов по размеру частиц (мм)

	Глина	Ил	Пыль	Песок	Гравий	Галька	Валуны
Мелкие	<0,001	0,001—0,005	0,01—0,05	0,1—0,2	1—2	10—20	100—200
Средние	—	—	—	0,2—0,5	2—5	20—50	200—500
Крупные	—	0,005—0,01	0,05—0,1	0,5—1	5—10	50—100	500—1000

Приведенная классификация наносов по размеру частиц используется при проведении механического анализа наносов и донных отложений.

Относительный вес речных наносов составляет в среднем 2,65, изменяясь от 2,45 до 2,76.

Кроме классификации наносов по размеру частиц, применяют еще деление их по гидравлической крупности. Такое деление оказывается необходимым, в частности, при механическом анализе наиболее мелких частиц наносов.

Гидравлической крупностью называется скорость равномерного падения частиц в неподвижной водной среде. Гидравлическая крупность измеряется в сантиметрах в секунду или в миллиметрах в секунду. Чем мельче частица, тем меньше ее гидравлическая крупность. В табл. 23.2 приведена гидравлическая крупность частиц при температуре 15°С.

Таблица 23.2

Диаметр частиц, мм . .	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
Гидравлическая крупность, мм/с	100	60	21	8	2	0,08	0,03	0,0008

Гидравлическая крупность зависит от температуры воды. При понижении температуры гидравлическая крупность уменьшается в связи с увеличением вязкости воды, и наоборот. Для получения значения гидравлической крупности при другой температуре применяют поправочный коэффициент (табл. 23.3).

Таблица 23.3

Значения поправочных коэффициентов к гидравлической крупности

Диаметр, мм	0—4°С	5—8°С	9—12°С	13—16°С	17—20°С
1,0	0,83	0,90	0,95	1	1,04
0,5	0,74	0,84	0,92	1	1,07
0,2	0,68	0,80	0,89	1	1,10
0,1	0,66	0,78	0,86	1	1,12
0,05	0,66	0,77	0,85	1	1,15
0,01	0,66	0,77	0,85	1	1,15
0,005	0,66	0,77	0,85	1	1,15

Данные табл. 23.2 и 23.3 используются при выполнении лабораторных анализов мелких наносов на гидрологических станциях Гидрометслужбы. Следует иметь в виду, что имеются другие таблицы значений гидравлической крупности. В частности, отметим обобщенную таблицу, составленную в ГГИ, в которой приведены уточненные значения гидравлической крупности частиц диаметром от 0,005 до 80 мм [25].

23.3. Движение наносов в реках

Движение донных наносов. Силовое воздействие потока приводит к раскачиванию отдельных частиц и перемещению их по дну, а иногда и к отрыву ото дна. При отрыве частица может приобретать вращательное движение и при этом подниматься на некоторую высоту, падая затем на дно; такое скачкообразное движение называется сальтацией. Чаще наблюдается движение наносов перекатыванием и скольжением по дну, реже — сальтацией.

В равнинных реках дно обычно бывает сложено песком, при этом на дне образуется характерный рельеф — так называемые песчаные гряды. Они могут быть различных размеров в зависимости от скорости течения. При больших расходах и скоростях течения формируются более крупные гряды. На поверхности таких гряд могут образовываться мелкие гряды — рифели. При изменении расходов и скоростей потока гряды переформировываются. Перемещение частиц донных наносов происходит по поверхности гряд. Перемещаясь по лобовому пологому откосу гряды, частицы доходят до гребня, затем сваливаются в подвалье. Таким образом происходит смыв частиц с лобового от-

коса и наращивание гряды с низовой стороны, т. е. постепенное перемещение всей гряды вдоль потока (рис. 23.1). При увеличении скорости течения частицы с одной гряды могут переноситься на вторую, на третью и далее.

На рис. 23.2 приведена фотография песчаных гряд, сделанная в лабораторных условиях. На ней хорошо видна структура потока, обтекающего гряды.

У горных рек дно обычно бывает сложено крупным гравием, галькой или булыжником. В таких случаях гряды на дне не



Рис. 23.1. Донные гряды.

образуются. Движение крупных частиц при этом происходит путем перекатывания и сальтации (рис. 23.3).

Донные наносы перемещаются, как правило, не по всей ширине дна потока. Наблюдаются так называемые активные зоны, где и происходит преимущественно движение наносов.

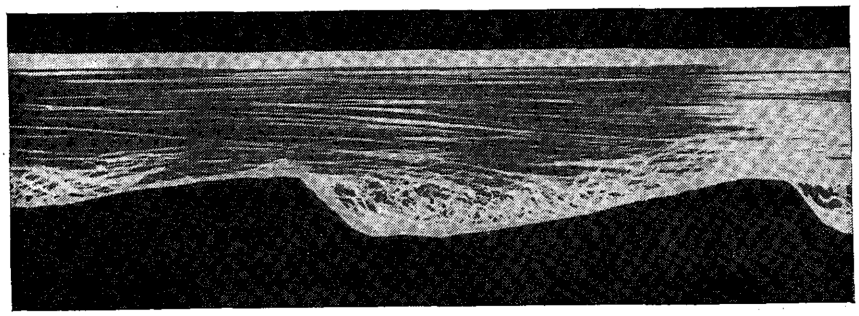


Рис. 23.2. Скоростное поле потока у песчаных гряд (фото Н. А. Ярных).

Движение взвешенных наносов. Наносы во взвешенном состоянии перемещаются вследствие турбулентного характера движения воды. Частицы наносов, имеющие относительный вес, значительно превышающий вес воды, могут находиться во взвешенном состоянии только благодаря наличию вихревых токов воды, направленных вверх. Подъем частицы вверх возможен при условии, что вертикальная составляющая скорости движения воды больше гидравлической крупности частицы. Для поддержания частицы во взвешенном состоянии необходимо равенство вертикальной составляющей скорости движения воды и гидравлической крупности частицы.

В турбулентном потоке на выступах дна зарождаются вихри с горизонтальной осью вращения, они срываются и поднимаются вверх, одновременно перемещаясь по течению. Такие поднимающиеся вихри могут захватывать со дна частицы наносов и перемещать их в толщу потока. При установившемся движении воды наблюдается равновесие между количеством твердых частиц, поднимающихся со дна и опускающихся под действием силы тяжести.

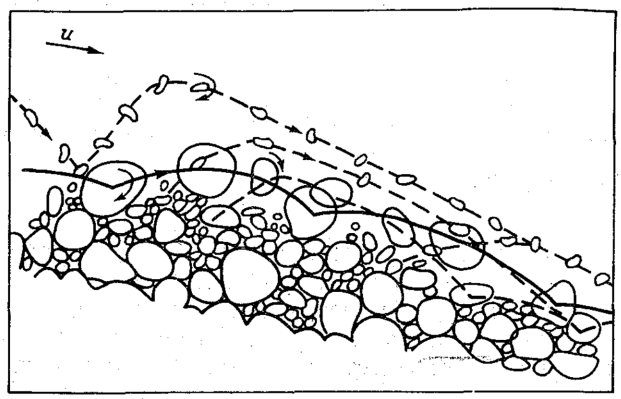


Рис. 23.3. Движение донных наносов в горной реке (по О. А. Умарову).

Количество взвешенных наносов в реке зависит от скорости течения и главным образом от поступления наносов с водосборного бассейна.

На участках рек с большими скоростями течения — перекатах — часть наносов, перемещавшихся до этого по дну, переходит во взвешенное состояние. На участках, где скорости уменьшаются — плёсах,— происходит отложение (аккумуляция) более крупных частиц.

Распределение взвешенных наносов в живом сечении потока неравномерное. Более насыщены наносами нижние слои, где преобладают более крупные частицы. Кроме того, наблюдается так называемое жильное движение наносов: вдоль потока протягивается полоса, в которой концентрация наносов больше, чем в остальной части потока. Жильное распределение взвешенных наносов наблюдается обычно на участках рек, где происходят активные процессы переформирования русла, например на перекатах.

Движение взвешенных наносов носит пульсирующий характер, соответствующий пульсации скорости течения воды.

Следует остановиться на наносах придонного слоя потока. Этот слой, как было указано, наиболее насыщен наносами.

В нем присутствуют мелкие частицы взвешенных наносов и наряду с ними крупные частицы, поднимающиеся со дна путем сальтации или же захватываемые восходящими вихревыми образованиями. Гидрометрическими измерениями наносы этого слоя нередко недоучитываются. Как взвешенные они недоучитываются, во-первых, в связи с тем, что их крупность часто больше отверстия батометра для взвешенных наносов, во-вторых, в связи с тем, что входное отверстие батометра находится обычно на сравнительно большом расстоянии ото дна. Как донные они недоучитываются потому, что при движении путем сальтации частицы могут проноситься выше, чем высота приемного отверстия донного батометра.

Взвешенные наносы составляют основную часть расхода наносов на равнинных реках, достигая 90—95% всего количества наносов. На горных реках содержание взвешенных наносов также иногда доходит до 70—80% общего количества. Но бывают горные реки, в которых сток донных наносов значительно превышает сток взвешенных наносов. В этих реках значительная часть наносов представлена крупным аллювием, который не переходит во взвешенное состояние даже при больших скоростях течения. К таким рекам относятся реки, водосборы которых расположены в областях распространения неразмываемых горных пород (гранитов и т. п.).

23.4. О режиме мутности и стока наносов в реках

Мутность воды, а также и сток наносов в разных реках весьма различны. Содержание наносов в реках изменяется в различные фазы гидрологического режима. Наибольшее количество их переносится во время половодий и паводков, а наименьшее — в межень. Возрастанию водности обычно сопутствует увеличение мутности. Однако полное совпадение фаз подъема, пика и спада водности и мутности наблюдается в основном только на малых реках. На больших реках пик мутности обычно опережает пик расходов воды. В районах многолетнемерзлых пород наблюдается обратное явление: пик расходов бывает раньше пика мутности. На горных и малых равнинных реках наблюдаются внутрисуточные изменения мутности, при этом суточный максимум мутности наступает раньше суточного максимума расхода.

Значение мутности в реках, содержащих мало наносов, составляет несколько десятков граммов в кубометре воды. Например, в р. Ангаре (до зарегулирования) средняя годовая мутность у пункта Буреть составляла 24 г/м^3. При большом содержании наносов мутность достигает нескольких десятков килограммов в кубометре воды. Например, в р. Куре у с. Дзегви максимальная наблюденная мутность составила 48 800 г/м^3.

Наибольшее значение мутности наблюдается в селях — потоках, возникающих в горных местностях при выпадении сильных ливней. Например, мутность р. Каттасай у г. Ура-Тюбе 14 июня 1957 г. на гребне селевого паводка составила 310 000 г/м³.

Таблица 23.4

Мутность, расходы и сток наносов некоторых рек

Река — пункт	Средние годовые		
	мутность, г/м³	расход, кг/с	сток, млн. т
Амударья—Керки	3500	6900	217
Кубань—Краснодар	660	270	8,5
Ока—Новинки	63	66	2,1
Ангара—Буреть	24	60	1,9

В табл. 23.4 приведены данные по мутности, расходу и годовому стоку наносов некоторых рек (до зарегулирования).

Средний годовой сток наносов также не остается неизменным. Он зависит от годовых колебаний водности, связанных с метеорологическими условиями.

23.5. Минерализация речных вод и сток растворенных веществ

Растворенные в воде вещества транспортируются потоком во всей толще его. Благодаря турбулентному перемешиванию наблюдается сравнительно равномерное распределение минерализации в живом сечении потока.

Поступление растворенных веществ в реки происходит главным образом с грунтовыми водами, имеющими высокую минерализацию. Поэтому наиболее высокая минерализация речных вод наблюдается в период зимней межени, когда грунтовое питание играет преобладающую роль. Высокая минерализация бывает также в летнюю межень. Наименьшая минерализация наблюдается в периоды паводков и особенно весенних снеговых половодий, когда в реки поступают большие количества дождевых или талых вод, характеризующихся незначительным содержанием растворенных веществ (рис. 23.4).

Несмотря на уменьшение минерализации воды в периоды половодий и паводков, общее количество выносимых рекой солей, т. е. сток растворенных веществ, в эти периоды, как правило, увеличивается.

Годовой сток растворенных веществ в различных реках весьма различен. В табл. 23.5 приводятся примерные данные среднего годового стока растворенных веществ для четырех крупных рек Советского Союза.

Таблица 23.5

Средний годовой сток растворенных веществ некоторых рек

Река — пункт	Площадь бассейна, тыс. км²	Средний годовой сток	
		воды, км³	растворенных веществ, млн. т
Лена	2425	488	41,3
Енисей	2599	548	29,5
Северная Двина	360	111	17,2
Амударья	277	42	17,7

Сток растворенных веществ зависит от водности; на нее оказывают также значительное влияние почвенно-геологические условия водосборного бассейна.

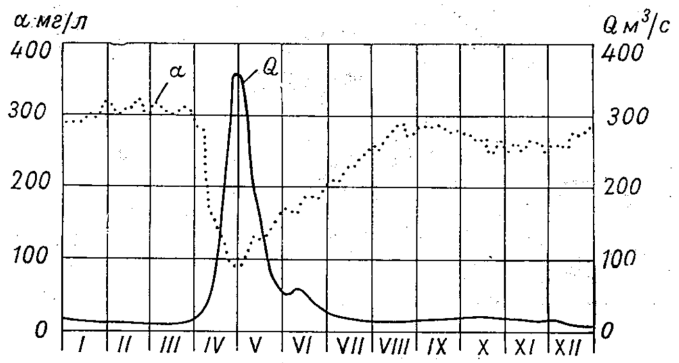


Рис. 23.4. Изменение минерализации воды α р. Луги (по О. А. Алекину).

В настоящее время на состав и размер стока растворенных веществ в реках оказывает большое влияние сброс сточных вод промышленных предприятий. Это влияние в наибольшей степени сказывается на реках, протекающих в густо населенных районах с развитой промышленностью.

Глава 24

Изучение стока взвешенных наносов

24.1. Приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами

Для учета взвешенных наносов берут пробы воды приборами, называемыми батометрами. Различают батометры мгновенного и длительного наполнения. При отборе проб батометрами

мгновенного наполнения необходимо брать пробы воды в каждой точке с некоторой повторностью. Из приборов этого типа наиболее известен батометр Н. Н. Жуковского (рис. 24.1). В настоящее время батометры мгновенного наполнения на гидрологической сети не применяются. Батометры Жуковского могут использоваться при проведении научных исследований для определения мгновенных значений мутности.

Батометры длительного наполнения при взятии пробы воды выдерживают в каждой точке в течение времени, необходимого

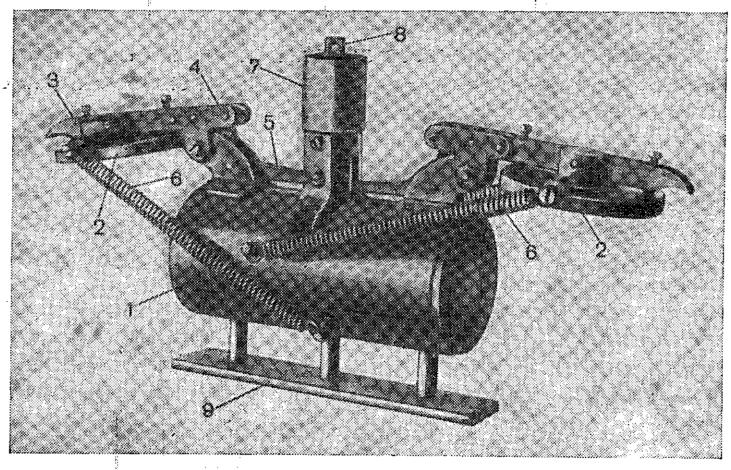


Рис. 24.1. Батометр Н. Н. Жуковского (штанговый).

1 — полый цилиндр; *2* — крышки с резиновыми прокладками; *3, 4, 5* — элементы спускового устройства; *6* — пружины; *7* — муфта для штанги; *8* — спусковой рычаг; *9* — поддон.

для наполнения прибора водой, следовательно, в той или иной степени учитывают пульсацию мутности. В настоящее время применяют батометры длительного наполнения следующих типов: а) батометр-бутылка на штанге и в грузе, б) вакуумный батометр. Кроме того, в отдельных случаях применяют обыкновенную бутылку из прозрачного стекла на штанге и в грузе.

В последние годы получает развитие фотометрический метод определения мутности, однако широкого распространения он пока не имеет ввиду недостаточно разработанной методики и аппаратуры.

Батометр-бутылка на штанге. В настоящее время на сети Гидрометслужбы и в изыскательских организациях применяют два типа таких батометров.

Батометр-бутылка старого типа ГР-16 (рис. 24.2) состоит из литровой широкогорлой бутылки, укрепляемой на штанге при помощи специальной обоймы. При вертикальном положении

штанги продольная ось бутылки образует угол с горизонтальной линией, равный 25°. Такое наклонение бутылки улучшает условия входа воды в нее и выхода воздуха через воздухоотводящую трубку. Бутылка снабжена металлической головкой, через которую проходят водозаборная и воздухоотводящая трубки. Нако-

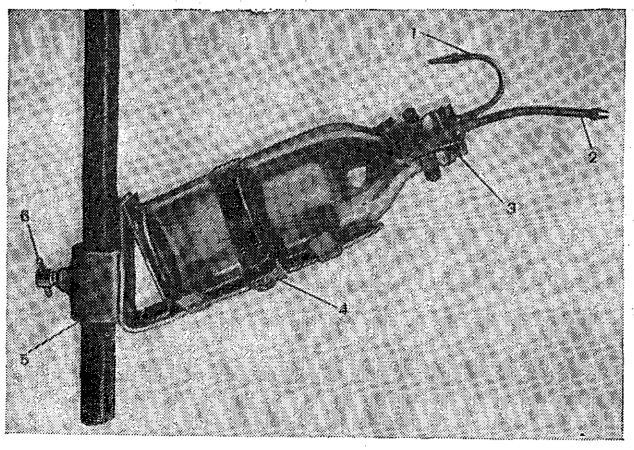


Рис. 24.2. Батометр-бутылка на штанге.

1 — воздухоотводящая трубка; *2* — водозаборная трубка; *3* — металлическая головка; *4* — обойма; *5* — муфта для штанги; *6* — зажимной винт.

нечники (насадки) этих трубок подбирают с различными диаметрами отверстий в соответствии со скоростью течения воды (табл. 24.1).

Таблица 24.1

Диаметры насадок в зависимости от скорости течения

Скорость течения, м/с	Диаметр насадки, мм	
	водозаборная трубка	воздухоотводящая трубка
1	6	1,5
1—2	4	2
2	4	4

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

Батометр-бутылка на штанге модернизированный ГР-16М (рис. 24.3) отличается наличием стабилизатора, обеспечивающего установку прибора по течению. Кроме того, батометру придается горизонтальное положение при закреплении его на штанге, что позволяет брать пробы в придонных слоях потока, на расстоянии 10 см ото дна. При таком устройстве прибор может применяться при бóльших скоростях течения по сравнению с батометром старого образца. Однако при небольших скоростях, менее 0,5 м/с, лучшие результаты при взятии проб воды получают батометром старого образца, так

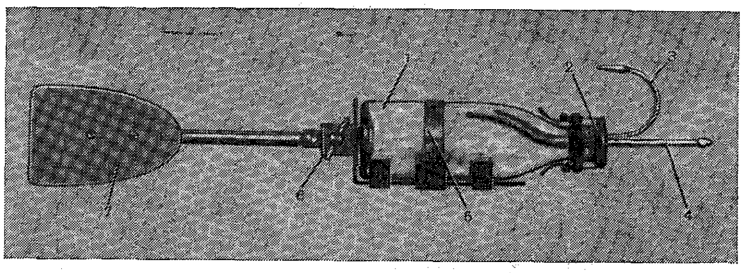


Рис. 24.3. Модернизированный батометр-бутылка на штанге.

1 — бутылка; *2* — металлическая головка; *3* — воздухоотводящая трубка; *4* — водозаборная трубка; *5* — обойма; *6* — муфта для штанги и зажимной винт; *7* — хвост.

как при горизонтальном положении бутылки заполнение ее водой при таких скоростях затруднено. В комплект модернизированного батометра-бутылки входят насадки согласно табл. 24.1.

Время выдержки батометра-бутылки при точечном, а также и при интеграционном способе подбирается опытным путем из расчета, чтобы объем бутылки был заполнен не полностью. При точечном способе это свидетельствует, что проба собрана за все время выдержки прибора в точке, а при интеграционном — что проба собрана со всей глубины вертикали.

Батометр-бутылка в грузе. В настоящее время применяется модернизированный батометр-бутылка в грузе. Ранее выпускавшийся батометр-бутылка в грузе ГР-15 снят с производства ввиду присущих ему недостатков, главным из которых является недостаточная устойчивость его в потоке: при больших скоростях течения при опускании прибор зарывается носом в воду, при этом наблюдается рыскание, продолжающееся и при погруженном состоянии.

Модернизированный батометр-бутылка в грузе ГР-15М (рис. 24.4) снабжен хвостовым оперением специальной формы — стабилизатор вынесен назад на круглой штанге, а на конце ее укреплен поплавок обтекаемой формы. Прибор подвешивается на тросе с таким расчетом, чтобы в воздухе центр тяжести ба-

тометра был несколько смещен к хвосту. Этим достигается правильное направление прибора при соприкосновении с водной поверхностью. В воде же батометр принимает горизонтальное положение благодаря наличию поплавка. Рыскание сводится к минимуму благодаря большой длине хвостовой части и наличию четырехлопастного стабилизатора.

Во внутреннюю полость батометра вставляется литровая широкогорлая бутылка с головкой и трубками, как у батометра на штанге. Надежное поступление воды в бутылку наблюдается

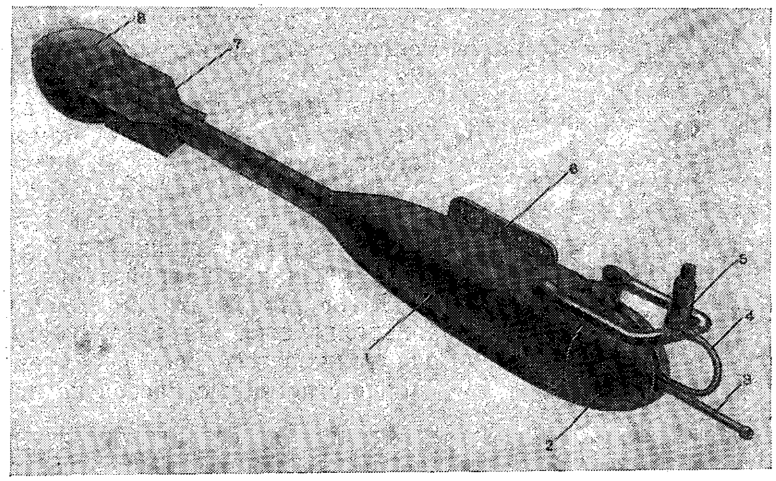


Рис. 24.4. Модернизированный батометр-бутылка в грузе.

1 — корпус груза; *2* — передняя откидная часть груза; *3* — водозаборная трубка; *4* — воздухоотводящая трубка; *5* — кронштейн для вертушки; *6* — гребенка для подвески к тросу; *7* — хвостовое оперение; *8* — поплавок.

при скоростях не менее 0,5 м/с; при меньших скоростях батометр неприменим.

Конструкция модернизированного батометра ГР-15М рассчитана на применение с дистанционных гидрометрических установок, но его можно применять и при работе с гидрометрическими лебедками.

Взятие проб батометром в грузе может производиться точечным и интеграционным способами. Применение интеграционного способа рекомендуется при глубинах не менее 1 м, так как при меньших глубинах возрастает погрешность из-за недоучета мутности нижних слоев потока. Так же как и при работе с батометром на штанге, должно соблюдаться условие, чтобы объем бутылки заполнялся не полностью.

Следует отметить, что опыт применения батометра ГР-15М на горных реках с крупновалунным дном выявил неудобство, а иногда и невозможность взятия проб в нижних слоях потока.

Вакуумный батометр ГР-61. Действие прибора основано на создании вакуума в камере батометра, благодаря чему вода из реки засасывается в камеру по шлангу, на конце которого имеется наконечник, располагаемый в требуемой точке потока (рис. 24.5). В настоящее время выпускается модернизированный вакуумный батометр ГР-61. Он состоит из камеры емкостью 3 л, водозаборной трубки, ручного насоса, крана-тройника, шлангов и вакуумметра. Батометр может применяться на штанге и на тросе с грузом. В последнем случае на грузе, кроме того, может укрепляться гидрометрическая вертушка для одновременного измерения скорости течения.

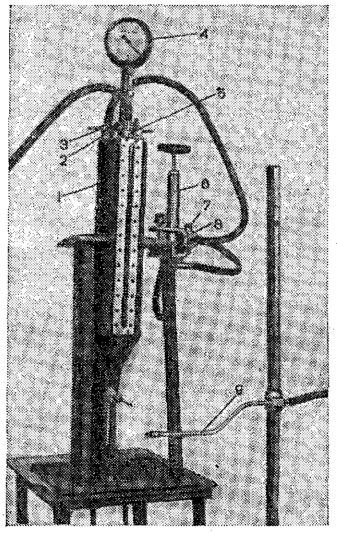


Рис. 24.5. Батометр вакуумный ГР-61.

1 — камера вакуумная; *2, 3, 5* — краны для присоединения шлангов; *4* — вакуумметр; *6* — насос; *7* — кран-тройник; *8* — струбцина; *9* — водозаборный наконечник со съемной насадкой.

При взятии проб воды в камере батометра создается с помощью насоса начальный вакуум, величина которого должна быть такой, чтобы скорость поступления воды в водозаборную трубку равнялась бы скорости течения в данной точке потока. Величина создаваемого вакуума контролируется по вакуумметру и поддерживается на необходимом уровне с помощью насоса на протяжении всего времени забора пробы воды. Необходимая величина вакуума зависит от высоты камеры над поверхностью воды. Прибору придается таблица, в которой указана необходимая величина вакуума для получения требуемой скорости течения в водозаборной трубке в зависимости от высоты камеры над водой при различных диаметрах насадок и длинах шланга (10 и 20 м).

Вакуумный батометр ГР-61 применим при высоте местности над уровнем моря не более 2000 м, при бóльших высотах создаваемый насосом вакуум недостаточен для надежной работы прибора. Кроме того, применение батометра ограничивается диапазоном скоростей течения от 0,2 до 3,5 м/с. Высота установки вакуумной камеры над поверхностью воды не должна превышать 4 м. Как показал опыт работы с прибором, наиболее эффективно его применение на реках с большими глубинами, где водозаборный наконечник опускается в воду на тросе с грузом, на котором укрепляется вертушка для одновременного измерения скоростей течения.

После взятия пробы, перед взятием последующей, необходимо выгнать оставшуюся в шланге воду обратно в реку, для чего нагнетают насосом воздух в камеру и на короткое время открывают кран, соединяющий камеру с водозаборным шлангом. Этим также достигается удаление осевших на стенках шланга наносов. Особенно важно заботиться об удалении осевших на шланге наносов в случае перехода от придонной точки одной

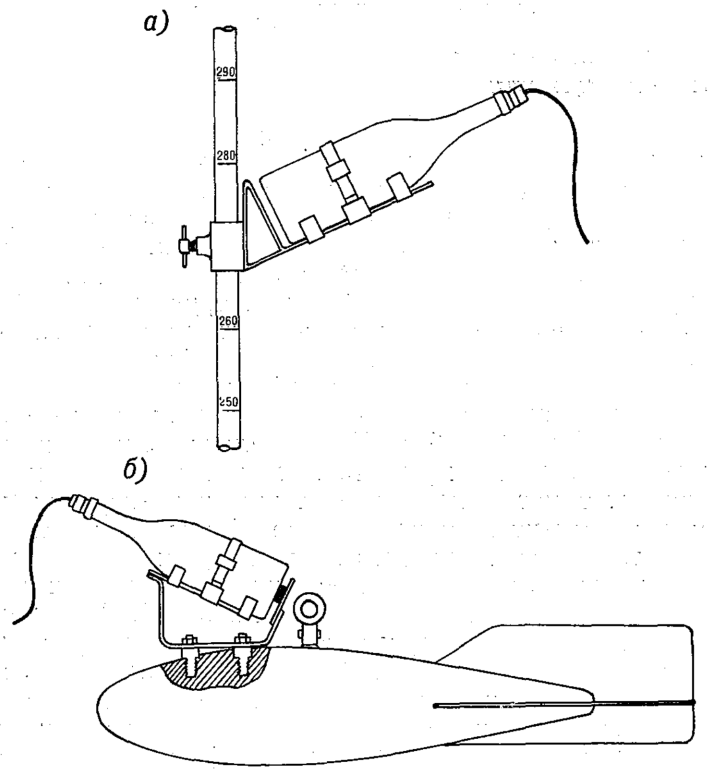


Рис. 24.6. Бутылка на штанге (а) и на грузе (б).

вертикали к поверхностной точке последующей вертикали. Наблюдения показывают, что оставшиеся на стенках шланга наносы, если их не удалить, могут в указанном случае завысить мутность в поверхностной точке потока.

Пробы воды на мутность берут вакуумным батометром точечным или интеграционным способом. Интеграционный способ применяют при глубинах более 1 м.

Как уже указывалось, для взятия проб воды на мутность в отдельных точках применяют простые литровые бутылки из прозрачного стекла (рис. 24.6). Их укрепляют на штанге или на грузе под углом 25° к горизонтальной плоскости при помощи

специальных обойм: в вертикальном положении опускать бутылки нельзя, так как в этом случае, как показал опыт, получается заниженное значение мутности. Пробы берут точечным способом. В нужную точку потока опускается бутылка, закрытая пробкой, которая вынимается шнурком после установки бутылки в правильное положение — горлышком навстречу течению. Время выдержки бутылки определяется по прекращению выхода пузырьков воздуха на поверхность воды.

24.2. Фотометрический метод определения мутности

Рассмотренные приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами в настоящее время широко применяются и обеспечивают получение удовлетворительных результатов на равнинных и отчасти на горных реках. Однако они обладают существенными недостатками: не позволяют производить дистанционные измерения, непортативны, неудобны в эксплуатации. Кроме того, для определения мутности необходима трудоемкая лабораторная обработка проб. В связи с этим делаются попытки применить новые физические принципы определения мутности. Одним из перспективных методов является фотометрический, основанный на измерении ослабления светового луча взвешенными в воде наносами. В 1923 г. Н. Н. Калитин одним из первых предложил определять мутность фотоэлектрическим методом и применил этот метод для определения концентрации мелких однородных частиц в морской воде. Дальнейшим развитием этого метода является оптический регистратор наносов М. М. Архангельского, предназначенный для записи концентрации наносов и определения мутности. М. М. Архангельским и Л. А. Букиной [2] дано физическое обоснование фотоэлектрического метода. Позднее В. Г. Савиным был разработан прибор аналогичного действия, но обладавший большей чувствительностью. К настоящему времени имеются многочисленные разработки приборов для измерения мутности фотоэлектрическим методом. Эти приборы носят общее название фотомутномеры. Они изготовляются пока только отдельными организациями, промышленное производства их не налажено.

Работа фотомутномера основана на измерении тока, возникающего в фотоэлементе под действием светового луча, проходящего через воду, содержащую взвешенные наносы (рис. 24.7). Для регистрации тока может применяться чувствительный зеркальный гальванометр, но чаще применяют запись на шлейфном осциллографе предварительно усиленного сигнала.

При однородной крупности частиц наносов коэффициент ослабления света k выражается зависимостью

$$k = 0{,}43\pi r^2 N, \qquad (24.1)$$

где r — радиус частиц; N — число частиц.

С другой стороны, коэффициент ослабления вычисляется по формуле

$$k = \lg \frac{I_0}{I}, \qquad (24.2)$$

где I_0 — значение фототока при чистой воде; I — значение фототока при наличии наносов.

При известных k и r значение N вычисляется по формуле (24.1).

При неоднородной крупности наносов одно и то же ослабление света может происходить от одной крупной частицы или от большого числа мелких частиц. В этом случае коэффициент ослабления становится функцией распределения частиц по крупности.

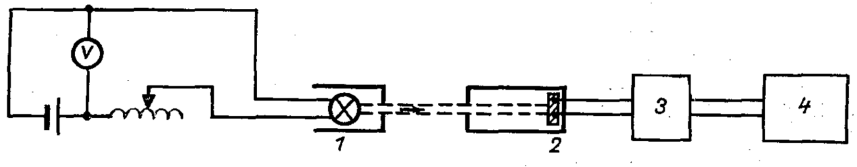


Рис. 24.7. Принципиальная схема фотомутномера.

1 — источник света; *2* — фотоэлемент; *3* — усилитель; *4* — осциллограф.

Таким образом, для расшифровки записи фотомутномера необходимо иметь кривую распределения частиц по крупности. Для этого надо взять пробу воды с наносами, произвести лабораторную обработку и получить данные о гранулометрическом составе наносов. Это значительно снижает эффективность фотометрического метода и даже делает его практически непригодным для применения в полевой гидрометрии. Обработка результатов измерений фотомутномером оказывается простой только при однородном составе наносов, чего в природе практически не бывает.

Некоторое упрощение задачи определения мутности с помощью фотомутномера возможно путем применения интерполяционного метода, который был разработан в ГГИ. Этот метод заключается в том, что с помощью фотомутномера мутность определяют систематически, например ежедневно в стандартные сроки. Наряду с этим в отдельные сроки, но значительно реже, одновременно с определением мутности фотомутномером берут пробы воды стандартным прибором и определяют мутность обычным способом. По данным одновременных измерений строят график связи, по которому можно определять значение мутности по показаниям фотомутномера за все сроки наблюдений. Параллельные измерения фотомутномером и обычным способом проводят во все основные фазы гидрологического режима реки. Проведенные испытания интерполяционного метода показали

возможность применения его при крупности наносов до 1 мм и при относительно небольшом содержании крупных фракций, а также неизменности во времени содержания отдельных фракций.

24.3. Измерение расхода взвешенных наносов

Измерение расхода взвешенных наносов обычно совмещается с измерением расхода воды и заключается в отборе проб воды для последующего определения количества содержащихся в ней наносов и вычисления значения мутности. Пробы воды берут описанными выше приборами на скоростных вертикалях одновременно с измерением скоростей течения.

При измерении расхода взвешенных наносов берут следующие пробы воды:

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

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

3) пробы для определения крупности взвешенных наносов.

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

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

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

В среднем в первые два-три года наблюдений на равнинных реках назначают не менее 20—25 измерений расходов наносов в год, а на горных реках в течение первых трех—пяти лет — до 30—40 измерений. Наибольшее количество расходов (10—12) стараются измерить в половодье. В межень расходы измеряют один-два раза в месяц, а во время прохождения дождевых паводков — не менее двух раз на подъеме и двух раз на спаде. На горных реках с паводочным режимом измерения расходов производят равномерно в течение всего паводочного периода.

В последующие годы, если будут установлены устойчивые зависимости для расчета стока наносов, количество измерений расходов может быть сокращено с учетом полученных результатов и режима наносов.

Если створ расположен на участке реки с сильно деформируемым руслом, то расходы взвешенных наносов необходимо измерять чаще: четыре—шесть раз в месяц.

Точность определения расходов взвешенных наносов при тщательном выполнении работ описанными ниже способами ориентировочно составляет в среднем для равнинных рек ±(10—15%); на горных реках определение расхода взвешенных наносов связано с рядом затруднений, вследствие чего точность определения расхода наносов снижается.

Как уже указывалось, измерение расхода взвешенных наносов производится совместно с измерением расхода воды и поэтому включает в себя операции, необходимые для измерения расхода воды (измерение уровня воды, уклона водной поверхности, промеры глубин, измерение скоростей течения); дополнительно берут пробы воды на мутность.

Пробы воды на мутность для определения расхода взвешенных наносов берут следующими способами: точечным, суммарным, интеграционным.

Точечный способ заключается в том, что пробы воды берут в отдельных точках скоростных вертикалей; применяется в трех разновидностях — детальном, двухточечном, одноточечном. При детальном способе пробы воды берут в пяти точках на вертикали: у поверхности, на $0{,}2h$, на $0{,}6h$, на $0{,}8h$ и у дна. На вертикалях с малыми глубинами число точек сокращают: пробы берут в двух точках ($0{,}2h$ и $0{,}8h$) или в одной точке — $0{,}6h$. Детальный способ применяют при необходимости более точно определить расход наносов.

Двухточечный способ применяют на больших и средних реках при небольшой мутности — 50—100 г/м³. Одноточечный способ применяют при такой же мутности, но на малых реках.

При ледяном покрове, а также в зарастающих руслах применяют двухточечный способ: пробы берут в точках $0{,}15h$ и $0{,}85h$.

Суммарный способ заключается в том, что пробы воды берут в двух точках на каждой вертикали ($0{,}2h$ и $0{,}8h$), а затем сливают в общий сосуд и определяют мутность суммарной пробы. Этот способ применим только при малой мутности — до 50 г/м³. При мутности менее 20 г/м³ допускается даже сливать вместе пробы по всему живому сечению, при этом объем суммарной пробы должен быть не менее 10 л. Пробы воды, взятые в разных точках, должны иметь одинаковый объем.

Интеграционный способ заключается в том, что проба воды забирается непрерывно по всей глубине вертикали при перемещении батометра от поверхности ко дну и обратно. Этот способ чаще всего применяют при неустановившемся движении воды, когда происходит быстрое изменение гидравлических элементов потока. В этом случае важно произвести измерения быстро, что и достигается при интеграционном способе. При взятии проб интеграционным способом необходимо равномерное перемещение прибора. Объем пробы должен быть несколько меньше емкости прибора, это служит контролем того, что собранная проба осреднила мутность по всей вертикали. Скорость

перемещения прибора вдоль вертикали подбирается в каждом случае опытным путем.

Объем проб при каждом способе устанавливают из расчета, чтобы при последующем фильтровании осадок наносов на фильтре составлял не менее 0,1 г. Для обеспечения этого условия необходимые объемы проб в зависимости от преобладающей мутности в живом сечении определяются по табл. 24.2.

Если объемы проб меньше указанных, то это может повлечь за собой погрешности вследствие потерь наносов при фильтровании. Объем каждой пробы должен быть измерен на месте.

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

Таблица 24.2

Зависимость объема пробы от мутности

Преобладающая мутность, г/м³	Объем пробы, л
>100	Не менее 1
50—100	2
20—50	5
<20	10

Контрольные единичные пробы воды на мутность берут при каждом измерении расхода в том же месте, где берутся ежедневные единичные пробы, теми же приборами и в том же объеме. Первичная обработка проб производится на посту, а взвешивание фильтров с наносами — в лаборатории.

Пробы для определения крупности взвешенных наносов берут только в характерные периоды гидрологического режима — половодье, паводки, межень — всего 4—10 проб в год. Пробы берут во время измерения расхода наносов на всех скоростных вертикалях теми же приборами, что и пробы для измерения расхода наносов, но отдельно от них. Взятые пробы сливают в одну для всего живого сечения. Объем пробы определяют по формуле

$$V = \frac{a \cdot 1000}{\rho}, \qquad (24.3)$$

где a — значение требуемой навески в граммах (при анализе методом фракциометра 0,5—2 г, при анализе методом пипетка—фракциометр 2—7 г); ρ — мутность в г/м³.

Обработка пробы производится в лаборатории.

Ежедневные единичные пробы воды на мутность берут в сроки водомерных наблюдений. В периоды небольшой мутности, в межень, пробы берут один раз, в половодья и па-

водки — два раза в день. При резких колебаниях мутности пробы берут учащенно.

Как уже указывалось, ежедневные единичные пробы берут в постоянном месте, которое должно находиться на одной из постоянных вертикалей в стрежневой части потока. Важно в процессе наблюдений убедиться, что мутность единичных проб, взятых на выбранном месте, находится в постоянном соотношении со средней мутностью воды реки. Нельзя брать единичные пробы в прибрежных участках, в застойных зонах.

Для взятия ежедневных единичных проб используются те же приборы, что и при измерении расхода наносов и при взятии контрольных единичных проб. Применяется суммарный способ (в двух точках $0{,}2h$ и $0{,}8h$), одноточечный ($0{,}6h$) или интеграционный. Объем пробы устанавливается в соответствии с табл. 24.2.

24.4. Вычисление расхода взвешенных наносов

Расход взвешенных наносов вычисляется по данным измерения расхода воды и значениям мутности, полученным в результате анализа проб воды, взятых при измерении расхода. Для вычисления мутности проб используют данные о количестве наносов в пробах, получаемые из лаборатории, где выполняется анализ проб. Мутность воды вычисляется по формуле (23.1). По этой формуле вычисляют мутность всех проб, взятых как в точках, так и суммарно и интеграционно.

Расход взвешенных наносов вычисляется двумя способами — графическим и аналитическим. Графический применяется, если измерение расхода наносов произведено детальным способом, аналитический — когда расход наносов измерялся сокращенным (двух- и одноточечным), суммарным и интеграционным способами. В тех случаях, когда в створе измерения расхода река имеет протоки, расход наносов вычисляется отдельно для основного русла и для протоков; полный расход получается путем суммирования.

Графический способ. Вычисление расхода взвешенных наносов производится на чертеже, на котором выполнено графическое вычисление расхода воды. Пример вычисления приведен на рис. 24.8, см. вклейку. Работа выполняется в такой последовательности:

1) строят эпюры мутности, для этого на эпюрах распределения скоростей течения в точках, где измерялись скорости и брались пробы воды, откладывают значения мутности. Масштаб принимают из расчета, чтобы ширина эпюр мутности примерно равнялась ширине эпюр скоростей течения. При нанесении точек мутности следует обращать внимание на резко отклоняющиеся точки и не принимать их во внимание при проведении эпюр; значение мутности на этих глубинах берется с проведенной эпюры;

2) вычисляют единичные расходы взвешенных наносов α г/(м^2·с), для этого по соответствующим точкам эпюр находят произведение скорости и мутности

$$\alpha = \rho u; \tag{24.4}$$

3) строят эпюры единичных расходов взвешенных наносов, для этого на эпюрах скоростей течения в соответствующих точках откладывают полученные значения единичных расходов и по полученным точкам проводят плавные линии;

4) определяют элементарные расходы взвешенных наносов r г/(м·с), численно равные площадям эпюр единичных расходов. Площади этих эпюр определяют планиметрированием или с помощью палетки с учетом горизонтального и вертикального масштабов;

5) определяют средние единичные расходы взвешенных наносов на вертикалях [г/(м^3·с)], для этого полученные значения элементарных расходов делят на глубины вертикалей

$$\alpha_{ср} = \frac{r}{h}; \tag{24.5}$$

6) строят эпюру средних единичных расходов $\alpha_{ср}$. Величины $\alpha_{ср}$ откладывают от линии уровня воды на каждой вертикали в том же масштабе, в котором отложены значения α на эпюрах скоростей, и выписывают под чертежом для каждой вертикали: для скоростных вертикалей — полученные значения, для промерных — снятые с проведенной эпюры;

7) строят эпюру элементарных расходов, для этого откладывают от линии уровня воды на скоростных вертикалях полученные для них ранее значения элементарных расходов. Для промерных вертикалей элементарные расходы вычисляют умножением среднего единичного расхода $\alpha_{ср}$, снятого на данной вертикали с эпюры, на глубину данной вертикали; значения r выписывают под чертежом;

8) определяют расход взвешенных наносов, численно равный площади эпюры элементарных расходов; площадь эпюры определяют планиметрированием или с помощью палетки. Полученное значение расхода выражают в размерности кг/с.

После вычисления расхода наносов определяют среднюю мутность воды в реке

$$\rho_{ср} = \frac{R \cdot 1000}{Q}, \tag{24.6}$$

где R — расход взвешенных наносов в кг/с; Q — расход воды в м^3/с, тогда $\rho_{ср}$ — в г/м^3.

Кроме того, вычисляют среднюю мутность для каждой скоростной вертикали

$$\rho_{ср.\,в}=\frac{r}{q}. \qquad (24.7)$$

Обозначения ясны из предыдущего.

На графике расхода можно также построить эпюру средней мутности на вертикалях — она позволяет анализировать распределение мутности по ширине реки.

На графике расхода в таблице принятых данных проставляют полученные значения расхода взвешенных наносов и средней мутности воды в реке.

Аналитический способ. Аналитическое вычисление расхода взвешенных наносов производится по формулам в зависимости от способа взятия проб воды на мутность.

При взятии проб точечным способом необходимо предварительно вычислить средние единичные расходы взвешенных наносов для каждой скоростной вертикали. Для этого применяют формулы, аналогичные формулам для вычисления средней скорости течения на вертикали. При двухточечном способе взятия проб средний единичный расход вычисляют по формуле

$$\alpha_{ср}=\frac{\alpha_{0,2}+\alpha_{0,8}}{2}, \qquad (24.8)$$

где $\alpha_{0,2}$ — единичный расход взвешенных наносов в точке на глубине $0{,}2h$, равный $\alpha_{0,2}=u_{0,2}\rho_{0,2}$; $\alpha_{0,8}$ — единичный расход взвешенных наносов в точке на глубине $0{,}8h$, равный $\alpha_{0,8}=u_{0,8}\rho_{0,8}$.

При одноточечном способе взятия проб средний единичный расход на вертикали вычисляют по формуле

$$\alpha_{ср}=\alpha_{0,6}, \qquad (24.9)$$

где $\alpha_{0,6}$ — единичный расход взвешенных наносов в точке на глубине $0{,}6h$, равный $\alpha_{0,6}=u_{0,6}\rho_{0,6}$.

Если измерение расхода взвешенных наносов производилось в заросшем водной растительностью русле или при ледяном покрове и пробы брались в точках 0,15 и 0,85 рабочей глубины, то средний единичный расход наносов на вертикали вычисляется по формуле

$$\alpha_{ср}=\frac{\alpha_{0,15}+\alpha_{0,85}}{2}, \qquad (24.10)$$

где $\alpha_{0,15}$ и $\alpha_{0,85}$ — единичные расходы взвешенных наносов в точках 0,15 и 0,85 рабочей глубины, определяемые как было указано выше.

Аналитическим способом можно вычислять расход взвешенных наносов, измеренный детальным способом, но при этом следует иметь в виду, что графический способ дает бо́льшую точность. При взятии проб в пяти точках на вертикали средний

единичный расход наносов на вертикали вычисляется по формуле

$$\alpha_{ср}=0{,}1\,(\alpha_{пов}+3\alpha_{0{,}2}+3\alpha_{0{,}6}+2\alpha_{0{,}8}+\alpha_{дон}). \qquad (24.11)$$

После того как для всех вертикалей определены средние единичные расходы взвешенных наносов, общий расход находят по формуле

$$R=0{,}001\left(k\alpha_1\omega_0+\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}\omega_1+\ldots\right.$$

$$\left.\ldots+\frac{\alpha_{n-1}+\alpha_n}{2}\omega_{n-1}+k\alpha_n\omega_n\right), \qquad (24.12)$$

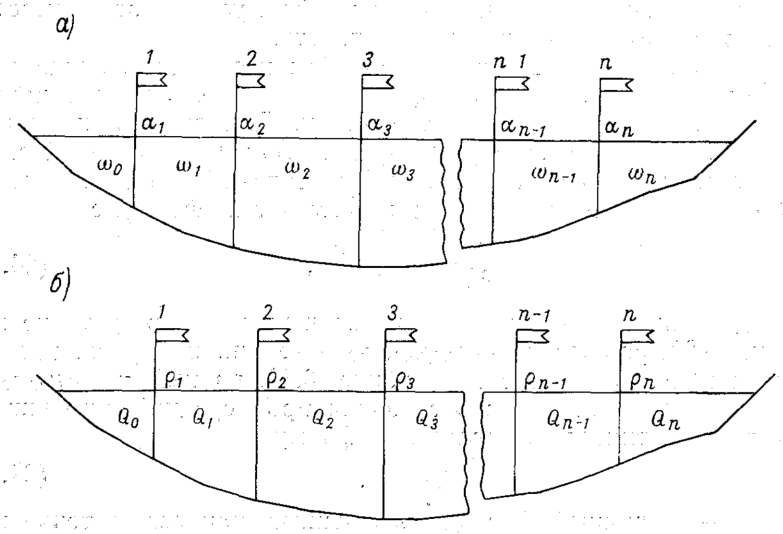


Рис. 24.9. Схемы к вычислению расхода взвешенных наносов аналитическим способом.

где α_1, α_2, ... — средние единичные расходы взвешенных наносов на скоростных вертикалях; k — коэффициент, значение которого принимается таким же, как при вычислении расхода воды; ω_0, ω_1, ... — частичные площади живого сечения, определяемые по поперечному профилю (рис. 24.9 *а*).

При взятии проб воды на мутность суммарным или интеграционным способом расход наносов вычисляют по другой формуле. В этом случае проба воды на вертикали дает среднюю мутность на данной вертикали. Для вычисления расхода наносов необходимо предварительно вычислить частичные расходы воды между скоростными вертикалями, а также между первой вертикалью и берегом и последней вертикалью и противополож-

ным берегом. Полный расход наносов определяется по формуле

$$R=0{,}001\left(\rho_1 Q_0+\frac{\rho_1+\rho_2}{2}Q_1+\ldots+\frac{\rho_{n-1}+\rho_n}{2}Q_{n-1}+\rho_n Q_n\right), \quad (24.13)$$

где ρ_1, ρ_2, ... — средняя мутность на вертикалях; Q_0 — частичный расход воды между берегом и первой скоростной вертикалью; Q_1, ..., Q_{n-1} — частичные расходы воды между скоростными вертикалями; Q_n — расход воды между последней скоростной вертикалью и берегом.

В формулу вычисления расхода значения средней мутности подставляют в г/м³, а значения частичных расходов — в м³/с; значение расхода наносов получается в кг/с. На рис. 24.9 *б* приведена схема к вычислению расхода наносов по средней мутности на вертикалях.

Как указывалось, при средней мутности в реке менее 50 г/м³ допускается сливать пробы, взятые на вертикалях суммарным или интеграционным способом, в одну пробу, которая характеризует среднюю мутность потока. В этом случае расход взвешенных наносов вычисляется по формуле

$$R=0{,}001\rho_{ср}Q, \quad (24.14)$$

где $\rho_{ср}$ — мутность суммарной пробы в г/м³; Q — расход воды в м³/с, тогда R — в кг/с.

После вычисления расхода наносов определяют среднюю мутность воды в реке.

24.5. Вычисление стока взвешенных наносов

Сток взвешенных наносов вычисляется двумя способами. Первый способ основан на использовании данных о мутности ежедневных единичных проб воды $\rho_{ед}$ и связи между мутностью единичных проб и средней мутностью реки $\rho_{ср}=f(\rho_{ед})$. Второй способ основан на использовании зависимости между расходами наносов и расходами воды $R=f(Q)$.

Первый способ наиболее распространен и считается основным, так как позволяет определять сток наносов по сравнительно небольшому числу измеренных расходов взвешенных наносов: 10—15 расходов в год. Применение второго способа ограничивается тем, что для построения надежной зависимости между расходами наносов и расходами воды $R=f(Q)$ необходимо большое число измеренных расходов наносов. Обычно достаточная частота измерения расходов наносов (20—40 в год) бывает только в первые годы работы станции или при проведении гидрометрических работ по специальной программе.

Вычисление стока взвешенных наносов по мутности ежедневных единичных проб и связи между мутностью единичных проб и средней мутностью реки. При вычислении стока наносов

этим способом используют следующие данные: 1) мутность ежедневных единичных проб воды $\rho_{ед}$; 2) среднюю мутность реки $\rho_{ср}$, определенную при измерении расходов взвешенных наносов; 3) мутность контрольных единичных проб воды $\rho_{ед.\,контр}$; 4) расходы воды.

Подсчет стока производится в такой последовательности.

1. Строят хронологический график мутности единичных проб. Для этого используют данные о мутности ежедневных единичных проб воды за год. Этот график строят совместно с хронологическим графиком расходов воды (рис. 24.10). На гидрологических станциях принято строить графики мутности единичных проб и расходов воды в составе комплексного графика

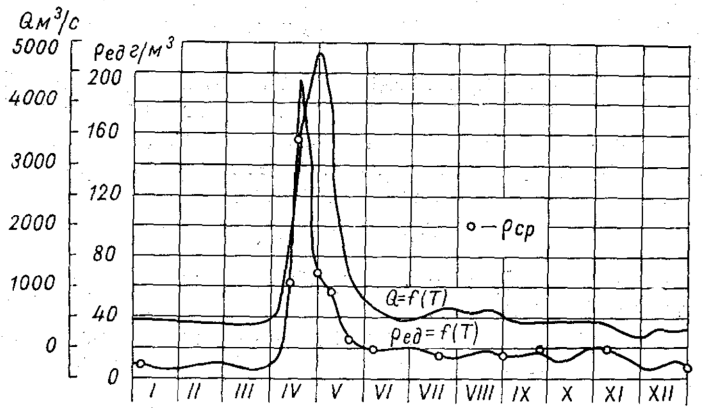


Рис. 24.10. Хронологический график мутности единичных проб и расходов воды.

результатов гидрометеорологических наблюдений (см. рис. 7.2).

График мутности единичных проб анализируют совместно с графиком расходов воды. В общем возрастанию расхода сопутствует увеличение мутности. На больших и средних реках пики мутности наступают раньше пиков расходов половодий и паводков; совпадение этих пиков во времени наблюдается обычно на малых реках.

На графики мутности единичных проб наносят точки значений средней мутности реки по данным измерений расходов наносов. Совместный анализ графиков мутности единичных проб и расходов, а также положения точек средней мутности позволяет выявить ошибочные значения мутности единичных проб, которые необходимо проверить и исправить, а недоброкачественные данные отбросить.

2. Строят график связи средней мутности реки $\rho_{ср}$ и мутности контрольных единичных проб воды $\rho_{ед.\,контр}$. Для этого по оси ординат откладывают значения мутности контрольных единич-

ных проб, бравшихся при измерении расхода наносов, а по оси абсцисс — значения средней мутности реки, определенные по результатам измерения расходов наносов. Точки соответствующих значений $\rho_{ср}$ и $\rho_{ед.\,контр}$ на графике в большинстве случаев располагаются таким образом, что по ним можно провести прямую линию (рис. 24.11), проходящую через начало координат. Уравнение ее имеет вид $\rho_{ср}=K\rho_{ед}$. Полученный график позволяет по значениям мутности ежедневных единичных проб воды

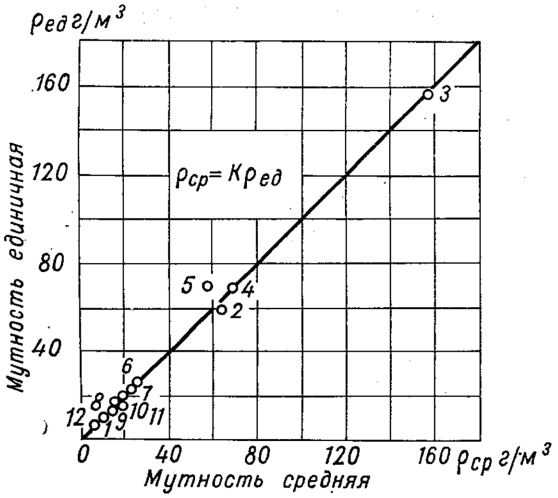


Рис. 24.11. Связь средней мутности реки и мутности контрольных единичных проб.

$\rho_{ед}$ определять значения средней мутности реки. Таким образом можно определить среднюю мутность реки за любой день в периоды между датами измерений расходов наносов. Для последующих расчетов необходимо определить значение коэффициента K в уравнении полученной прямой. Это делают так: на проведенной прямой намечают точку и определяют ее координаты — абсциссу $\rho_{ср}$ и ординату $\rho_{ед}$; значение коэффициента K получают из соотношения

$$K=\frac{\rho_{ср}}{\rho_{ед}}.$$

3. Вычисляют средние декадные расходы взвешенных наносов по формуле

$$R_{ср.\,дек}=0{,}1\sum_{1}^{10}R_{ср.\,сут}\cdot 0{,}001, \qquad (24.15)$$

где $R_{ср.\,сут}$ — средний суточный расход взвешенных наносов, равный $QK\rho_{ед}$ (здесь Q — в м³/с, $\rho_{ед}$ — в г/м³, $R_{ср.\,дек}$ — в кг/с).

4. Вычисляют сток взвешенных наносов. Для этого сначала подсчитывают значения стока наносов по декадам, а затем суммированием определяют значение годового стока. Для получения стока наносов за декаду необходимо определенный ранее расход наносов (средний за декаду) умножить на число секунд

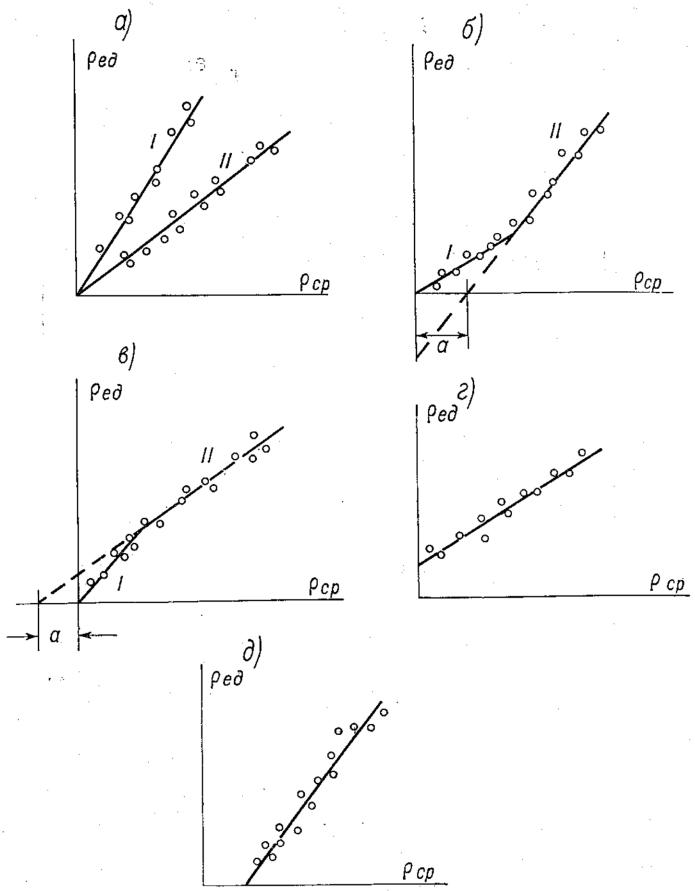


Рис. 24.12. Возможные случаи связи средней мутности реки и мутности контрольных единичных проб.

в декаде, т. е. на $8{,}64 \cdot 10^5$. Такие вычисления проводятся для каждой декады года, полученные величины суммируют. Годовой сток взвешенных наносов выражают обычно в тоннах.

Следует иметь в виду, что зависимость $\rho_{ср}=f(\rho_{ед})$ в отдельных случаях может получаться более сложной. Примеры такой более сложной связи показаны на рис. 24.12.

На рис. 24.12 *а* показан случай, когда точки $\rho_{ср}$ и $\rho_{ед}$ располагаются так, что по ним можно провести две прямые, проходящие через начало координат. Такое расположение точек возможно, если в течение года было изме-

нено место взятия единичных проб или при неизменности места взятия проб был перенесен гидрометрический створ. В этом случае зависимость между мутностью единичных проб и средней мутностью реки выражается двумя уравнениями: $\rho_{ср}=K_{I}\rho_{ед}$ и $\rho_{ср}=K_{II}\rho_{ед}$, каждое из которых соответствует определенному периоду времени.

На рис. 24.21 *б* и *в* показаны случаи, когда при малых мутностях связь $\rho_{ср}=f(\rho_{ед})$ выражается прямой, проходящей через начало координат, а в дальнейшем — прямой, не проходящей через начало координат. Такой вид зависимости возможен при недостаточной точности измерений малых значений мутности или в случаях изменения характера перемещения взвешенных наносов в различные периоды года. Зависимость $\rho_{ср}=f(\rho_{ед})$ при этом может быть выражена двумя уравнениями:

для случая *б*

прямая I $\rho_{ср}=K_{I}\rho_{ед}$; прямая II $\rho_{ср}=K_{II}\rho_{ед}+a$,

для случая *в*

прямая I $\rho_{ср}=K_{I}\rho_{ед}$; прямая II $\rho_{ср}=K_{II}\rho_{ед}-a$.

В этих уравнениях величина a представляет собой отрезок на оси абсцисс от начала координат до точки пересечения прямой II; его значение определяется после проведения прямых путем непосредственного измерения на чертеже. Значение коэффициента K_{II} определяется по формуле

$$K_{II}=\frac{\rho_{ср}\pm a}{\rho_{ед}}.$$

На рис. 24.12 *г* и *д* показаны случаи такого расположения точек, когда по ним проводятся прямые, не проходящие через начало координат. Эти случаи вызываются неправильным выбором места взятия единичных проб в периоды малой мутности и нарушениями в методике работ.

В отдельных случаях получается беспорядочный разброс точек на графике, что может быть обусловлено грубыми нарушениями методики работ или естественным непостоянством связи, что бывает у рек с блуждающим руслом.

Вычисление стока взвешенных наносов по графику зависимости между расходами воды и расходами взвешенных наносов. Этот способ применим при наличии большого числа измеренных расходов наносов во все фазы гидрологического режима, т. е. на подъеме, пике и спаде весеннего половодья и дождевых паводков, а также в летнюю и зимнюю межени. При соблюдении этого условия все участки зависимости $R=f(Q)$ достаточно освещены. Этот способ рекомендуется применять при вычислении стока больших и средних рек с весенним половодьем и устойчивой меженью. Для учета стока наносов в нижних бьефах зарегулированных рек этот способ не рекомендуется.

Для подсчета стока наносов строится график зависимости между измеренными расходами воды и измеренными одновременно с ними расходами взвешенных наносов (рис. 24.13).

В расположении нанесенных точек обычно наблюдается закономерность, позволяющая провести по ним плавную кривую. Такая кривая чаще всего имеет петлеобразный вид. В отдельных случаях получаются более сложные формы кривой, состоящей из двух и более петель, которые соответствуют паводкам: правая нижняя ветвь петли — подъему, левая верхняя — спаду. Каждая ветвь кривой относится к определенному периоду времени.

Для подсчета стока наносов с построенного графика снимают значения средних суточных расходов взвешенных наносов по значениям средних суточных расходов воды. При этом необходимо пользоваться теми участками кривой, которые соответствуют датам определения расходов. Полученные таким путем средние суточные расходы наносов суммируются по декадам, после чего вычисляются средние декадные расходы наносов.

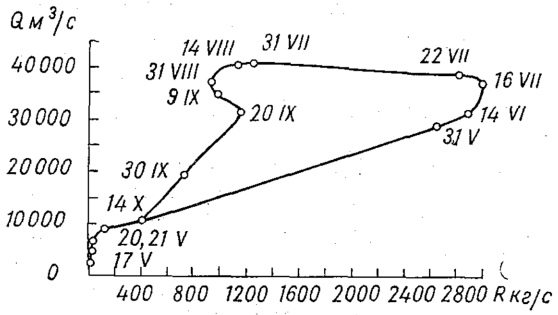


Рис. 24.13. Зависимость $R=f(Q)$ (р. Обь у Салехарда).

Годовой сток наносов получается суммированием вычисленных значений стока наносов за все декады года.

При подсчете стока взвешенных наносов за ряд лет необходимо для каждого года иметь график связи $\rho_{ср}=f(\rho_{ед})$ или $R=f(Q)$. В отдельных случаях эти связи могут оказаться устойчивыми, тогда по ним при необходимости можно производить подсчет стока наносов и за предшествующие годы.

Глава 25

Изучение стока донных наносов

25.1. Приборы для взятия проб донных наносов

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

Существует большое количество конструкций донных батометров, большинство из которых уже вышли из употребления

из-за различных недостатков. Но и применяемые в настоящее время батометры нельзя признать совершенными — они не обеспечивают еще достаточной точности измерения. Несмотря на кажущуюся простоту принципа действия донного батометра, создание такого прибора, обеспечивающего достаточную точность измерения, оказывается делом весьма сложным.

Основные трудности в создании донного батометра сводятся к следующему:

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

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

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

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

Из ранее применявшихся батометров следует отметить батометры В. Н. Гончарова, М. К. Пастрюлина, Б. В. Полякова, батометр-ванночку Б. А. Аполлова, а также батометр В. М. Сокольникова, сконструированный по типу ванночки Аполлова. В настоящее время эти приборы не применяются, однако опыт их применения и отдельные удачные решения конструктивных элементов были использованы при создании существующих приборов.

Дальнейшее развитие методики измерения донных наносов должно, по-видимому, основываться на использовании новых физических принципов.

Батометры для донных наносов подразделяются на две группы: 1) батометры для мелких донных наносов (песок, гравий) и 2) батометры для крупных донных наносов (гравий, галька).

Батометры для мелких донных наносов. Из батометров этой группы в настоящее время применяется в основном батометр «Дон», хотя он уже снят с производства.

Батометр «Дон» (рис. 25.1). В приборе обобщены наиболее удачные конструктивные детали батометров Полякова, Гончарова и Пастрюлина, а также учтен опыт их применения.

Батометр применяется в руслах с песчаными и гравелистыми наносами диаметром до 1 см. Масса батометра около 30 кг. Он опускается на дно с помощью лебедки, применим при скоростях течения до 1,5 м/с и глубинах до 20 м. Им можно пользоваться и при бóльших скоростях, но при этом необходимо делать оттяжки или увеличивать вес груза.

Батометр «Дон» состоит из двух основных частей: ловушки и кожуха. Ловушка представляет собой съемное дно прибора и состоит из плоского лотка *1* длиной 70 см, в который вкладывается рама *2* с жалюзийными перегородками. Передняя часть лотка образует трамплин, несколько выступающий перед входом в лоток. На бортах лотка с каждой стороны имеются по два ушка, за которые ловушка прикрепляется к кожуху *3* прибора.

Кожух представляет собой коробку в виде усеченного клина. В передней части кожуха имеется дверца *4*, прикрывающая

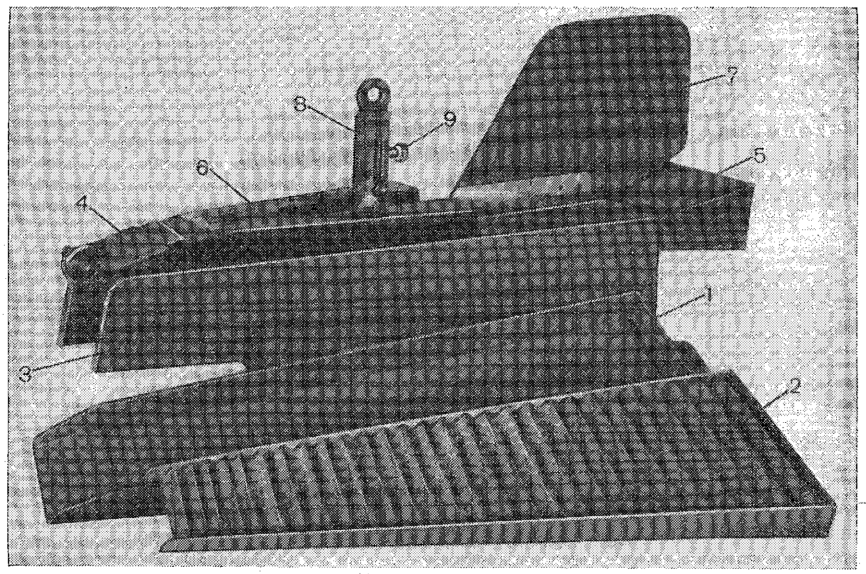


Рис. 25.1. Батометр «Дон».

входное отверстие батометра при подъеме. Когда батометр находится на дне, дверца при помощи пружины откидывается на верхнюю стенку кожуха. Задняя стенка кожуха имеет в верхней части выходное отверстие, перекрываемое дверцей при подъеме батометра. Обе дверцы приводятся в действие одновременно при помощи тросика и пружины. За выходным отверстием кожуха расположен раструб *5*, через который вода выходит из батометра.

На верхней плоскости кожуха расположены: чугунный груз *6* в виде пластины, укрепленной болтами; руль *7*, служащий для установки прибора по направлению течения; подвес в виде полой втулки *8*, внутри которой установлен подвижной стержень с кольцом для подвеса батометра на тросе посредством карабина. В нижней части стержня подвеса укреплен ролик, через

который пропущен тросик, открывающий дверцы. Штифт *9* служит для удержания дверец открытыми при опускании батометра. При установке прибора на дно дверцы остаются открытыми, а в момент начала подъема они захлопываются натяжением несущего троса, чем предохраняются от смыва осевшие в ловушке наносы. На боковых плоскостях кожуха имеются по две задвижки, посредством которых кожух скрепляется с ловушкой и образует единое целое.

Площади входного и выходного отверстий батометра одинаковы. Скорость потока при входе в батометр примерно равна скорости течения в месте установки прибора. Внутри прибора скорости уменьшаются ввиду плавного увеличения площади живого сечения, что способствует осаждению наносов. Исследования работы прибора, проведенные Г. И. Шамовым, показали, что батометр не оказывает существенного влияния на скоростное поле потока у входного отверстия.

Время выдержки прибора на дне принимается с таким расчетом, чтобы объем проб составлял 30—500 см^3 (50—750 г). Выдерживать батометр на дне более 10 мин не рекомендуется во избежание подмыва.

Батометр «Дон» при ряде положительных качеств имеет и недостатки: соединение кожуха с лотком посредством задвижек неудобно и недостаточно надежно — лоток может отделиться и потеряться; прибор в целом громоздок и тяжел; применение его при больших скоростях затруднительно.

Как было установлено некоторыми исследователями (В. Е. Любимовым и др.), батометр «Дон» дает преуменьшенные значения расходов донных наносов по сравнению с вычисленными на основании периодических промеров песчаных гряд.

Некоторые усовершенствования приборов этого типа осуществлены в донном батометре конструкции ЦНИИС (рис. 25.2), устройство и опыт применения которого были описаны А. И. Кадукиным. Испытания этого батометра проводились при скоростях течения до 3 м/с и глубинах до 20 м и показали, по свидетельству указанного автора, что прибор имеет преимущества по сравнению с батометром «Дон» как в удобстве применения, так и в надежности получаемых результатов измерений. Однако прибор обладает сравнительно большими размерами и массой (60 кг). Промышленное изготовление батометра ЦНИИС не налажено.

Батометры для крупных донных наносов. Для взятия проб донных наносов, состоящих из гравия и галечника, имеется несколько разновидностей батометров, предназначенных для применения в основном на горных реках. Учет стока наносов горных рек в значительной мере осложняется неоднородностью состава влекомых наносов по крупности фракций, значительными неровностями дна, сложенного галечно-валунными отложениями, а также большими скоростями течения.

Универсального прибора, посредством которого было бы возможно полностью учесть движение влекомых наносов на горных реках, пока нет. Основную массу донных наносов горных рек

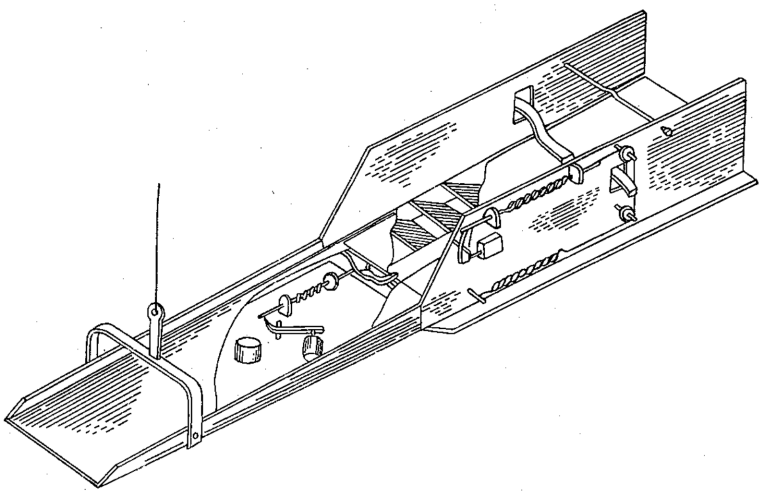


Рис. 25.2. Батометр конструкции **ЦНИИС.**

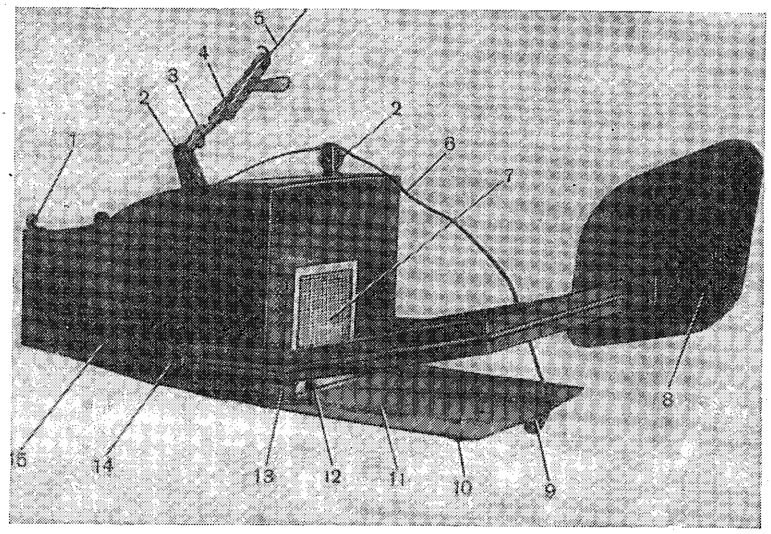


Рис. 25.3. Батометр Шамова.

1 — кольцо для оттяжки; *2* — направляющие блоки; *3* — зажим; *4* — держатель крепления троса; *5* — трос лебедки; *6* — трос для закрывания крышки; *7* — сетчатый ящик; *8* — руль; *9* — стойка; *10* — груз; *11* — крышка выходного отверстия; *12* — болты крепления сетчатого ящика; *13* — направляющие планки; *14* — цапфа крепления выноса руля; *15* — корпус.

обычно составляют галька и гравий, поэтому батометры для этих рек разрабатываются с учетом возможно более полного улавливания именно этих фракций. Основной частью таких батометров, применяемых как в нашей стране, так и за границей, являются сетчатые мешки или ящики.

Батометр Г. И. Шамова (рис. 25.3) состоит из корпуса, сетчатого ящика, крышки на выходном отверстии корпуса, руля и приспособления для опускания и подъема.

Корпус имеет обтекаемую форму и выполнен из листовой стали. Очертание верхней поверхности корпуса наклоном вперед способствует плотному прилеганию прибора ко дну ввиду возникновения составляющей гидродинамического давления потока, направленной вниз. Размеры входного отверстия батометра 20×20 см, выходного 43×35 см. Внутри корпуса между двумя направляющими планками находится сетчатый ящик, укрепленный болтами. Размер ячеек сетки ящика подбирают в зависимости от крупности наносов изучаемой реки.

Батометр опускается на дно на тросе посредством лебедки, при этом крышка открыта. В таком положении он находится на дне, располагаясь по направлению донных струй потока, чему способствует наличие руля. Влекомые по дну наносы попадают во входное отверстие; крупные частицы (гравий и галька) улавливаются сетчатым ящиком. Для улавливания песчаных частиц на дне сетчатого ящика имеется песколовка, перекрытая наклонной плоскостью с прорезями для прохода наносов крупностью до 1 см.

Продолжительность выдержки батометра в точке наблюдений подбирается опытным путем.

При подъеме батометра натяжение троса с лебедки через держатель передается на вспомогательный трос, посредством которого закрывается крышка выходного отверстия, благодаря чему предохраняется от вымывания взятая проба наносов.

Батометр Шамова имеет недостатки, свойственные и другим батометрам-ловушкам: неплотное сопряжение с дном в условиях сложного рельефа дна на горных реках, затруднительность применения его при скоростях течения выше 1,5—2,0 м/с, затруднительность определения оптимального времени выдержки прибора в точке наблюдения: при слишком короткой выдержке не будет учтена пульсация перемещения наносов, а при слишком длинной возможен подмыв прибора, движение наносов в обход, частичный выход наносов через сетку ящика.

Батометр-сетка ГГИ (рис. 25.4) предназначен для учета крупной гальки, влекомой по дну. Батометр состоит из металлической рамы и натянутой на нее проволочной сетки. Опускается батометр на штанге. Размер ячеек в сетке устанавливается в соответствии с наименьшим диаметром гальки, улавливаемой батометром. Ширина входного отверстия принимается равной 0,2—0,4 м.

Недостатком батометра-сетки является неполный учет донных наносов, так как частицы диаметром меньше размера ячеек не улавливаются. Кроме того, недостатки, отмеченные для батометра Шамова, относятся также и к рассматриваемому прибору.

Указанные недостатки донных батометров, особенно предназначенных для взятия проб гравийно-галечных наносов, являются причиной того, что сток донных наносов в настоящее время учитывается недостаточно полно. Во многих местах расходы донных наносов вообще не измеряются. Точность же измерения расхода донных наносов, особенно на горных реках, значительно ниже точности измерения расходов взвешенных наносов. По имеющимся данным, погрешность определения расхода донных наносов может составлять ± (100—200) %, а в отдельных случаях 400% и более.

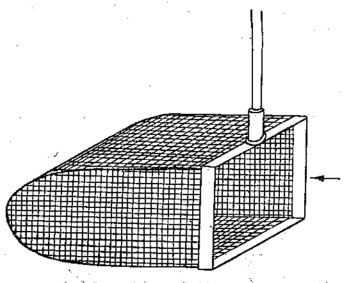


Рис. 25.4. Батометр-сетка.

Регистратор движения крупных наносов. В ГГИ Н. Я. Соловьевым разработан и испытан регистратор донных наносов, действие которого основано на фиксации соударений движущихся частиц с чувствительным элементом прибора.

Исследования движения донных наносов на горных реках выявили, что они перемещаются преимущественно путем сальтаций. Приемная пластина датчика (рис. 25.5), устанавливаемого на дне, воспринимает удары сальтирующих частиц. С приемной пластиной соединен индукционный преобразователь, в подвижных катушках которого при каждом ударе частиц наводится электродвижущая сила. Энергия каждого соударения преобразуется в электрический сигнал соответствующей величины. Запись производится на магнитоэлектрическом осциллографе. Обработка записи выполняется на основе градуировочной зависимости, получаемой по результатам лабораторной тарировки.

Элементарный расход донных наносов вычисляется по формуле

$$g = \frac{\sum_{1}^{n} p_i}{tb}, \qquad (25.1)$$

где n — число зарегистрированных частиц наносов за время t секунд; p_i — масса i-той частицы в граммах; b — ширина приемной пластины датчика (b=0,12 м); g — в г/(м·с).

Путем расшифровки осциллограммы определяется общее число зарегистрированных частиц и интенсивность соударения

каждой частицы. Масса каждой частицы в граммах определяется по формуле

$$p_i = \frac{(pu_0)_i}{u_0}, \qquad (25.2)$$

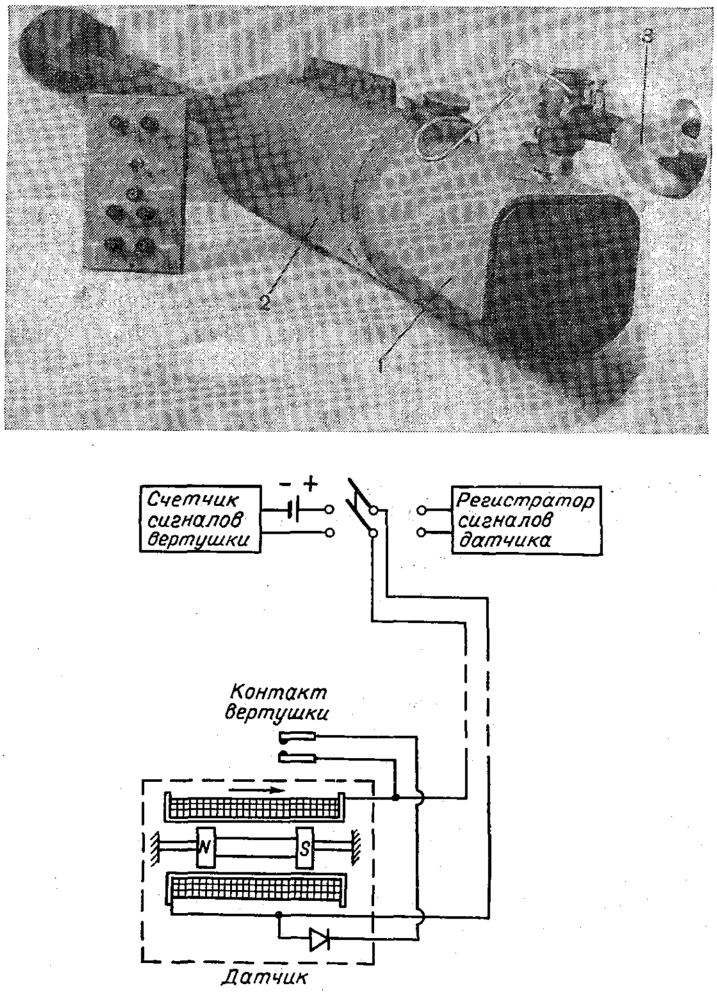


Рис. 25.5. Регистратор движения крупных наносов (общий вид и электрическая схема).

1 — датчик; *2* — груз; *3* — вертушка.

где $(pu_0)_i$ — интенсивность соударения i-той частицы (находится по градуировочной зависимости); u_0 — скорость частицы в момент соударения с приемной пластиной.

Согласно исследованиям Соловьева, $u_0 = 0{,}76u_y$, где u_y — скорость течения воды, измеряемая гидрометрической вертушкой, расположенной над приемной пластиной (рис. 25.5) на высоте 0,2 м ото дна.

Прибор рассчитан на применение в дистанционной гидрометрической установке ГР-64 (или ГР-70). Сигналы датчика и сигналы вертушки передаются раздельно, сначала измеряется скорость течения.

Регистратор наносов рассчитан на условия горных рек при скоростях до 5 м/с и глубинах до 4 м. Диапазон регистрируемых частиц от 20 до 300 г при скорости их движения в придонной области от 1 до 3 м/с.

Прибор может быть использован для исследования движения наносов в горных реках, а также и для измерения расхода наносов. В последнем случае целесообразно скоростные вертикали назначать возможно чаще, через 1—2 м, учитывая неравномерное распределение движущихся наносов по дну. Период осреднения пульсации принимают 3—6 мин, однако в каждом случае полезно определить его опытным путем. Расход наносов вычисляют аналитическим или графическим способом, как это изложено в следующем разделе.

25.2. Измерение и вычисление расхода донных наносов. Подсчет стока донных наносов

Измерение расходов донных наносов. Количество измерений расходов донных наносов устанавливается в зависимости от режима реки, обычно не менее десяти в год с более частыми измерениями в периоды половодий и паводков. Измерение расходов донных наносов производится одновременно с измерением расходов воды и взвешенных наносов. Пробы донных наносов берутся на всех скоростных вертикалях створа. Для анализа крупности специальные пробы не берутся, а анализируются пробы те же, которые взяты для определения объема.

При измерении расходов на равнинных реках необходимо на каждой вертикали перед опусканием батометра сделать промеры дна для определения расположения песчаных гряд и правильной установки батометра на взбеге гряды, т. е. на пологой поверхности вблизи гребня. При установке батометра в подвалье гряды нормальное поступление наносов в него будет нарушено и результат измерений будет неверным.

При больших скоростях течения возможен значительный относ батометра вниз по течению, что особенно часто бывает на горных реках. Для предотвращения относа применяются оттяжки (рис. 25.6). Чтобы сделать оттяжку, поперек реки натягивается вспомогательный трос, на котором свободно надето кольцо с прикрепленным к нему блоком. Оттяжка из тонкого троса (2—3 мм) прикрепляется одним концом к батометру, про-

пускается через блок, а другой конец удерживает в руке наблюдатель, находящийся в лодке или люльке. Натяжением этого конца троса батометру придается требуемое положение, после чего трос закрепляется.

При установке батометра на дне горных рек полезно также предварительно промерить дно, чтобы обнаружить возможные крупные неровности в виде валунов и т. п., которые могут помешать правильному положению прибора на дне.

На каждой вертикали рекомендуется погружать батометр для взятия проб по три—пять раз для осреднения пульсации

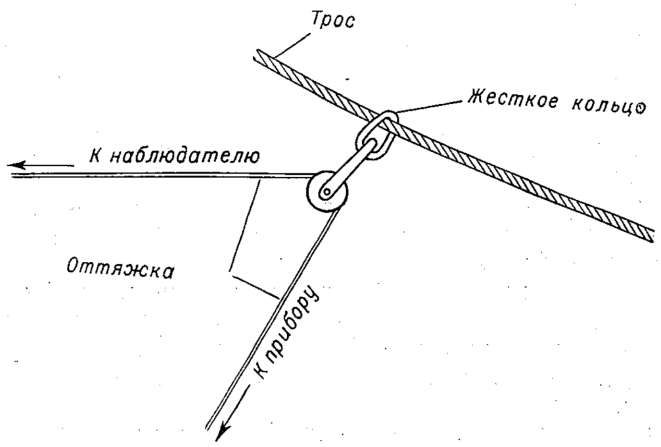


Рис. 25.6. Устройство оттяжки.

наносов. В случае, если будет обнаружена вертикаль с нулевым расходом наносов, необходимо назначить дополнительные вертикали, чтобы выявить границы движения наносов. Так же следует поступать в прибрежной части створа, если у берега движение наносов не наблюдается.

При измерении расхода песчаных донных наносов по извлечении батометра из воды наносы вытряхивают в ванночку (таз) и переводят в мерный цилиндр для измерения их объема. Затем пробы наносов просушивают на воздухе, тщательно упаковывают, снабжают этикеткой и отправляют в лабораторию для взвешивания и анализа крупности.

При измерении расхода донных наносов, состоящих из крупных фракций (гравия, гальки), объем проб не определяют. Остальные операции выполняют так же, как для песчаных наносов.

Вычисление расхода донных наносов. Расход донных наносов обычно вычисляют аналитическим способом, но для наглядности в некоторых случаях представляет интерес вычисление его графическим способом. Независимо от принятого способа

вычисления расхода необходимо предварительно подсчитать элементарные расходы наносов. Элементарные расходы донных наносов для каждой вертикали определяются по формуле

$$g=\frac{100p_д}{tl}, \qquad (25.3)$$

где $p_д$ — количество наносов в пробе в граммах (определяется в лаборатории); t — продолжительность выдержки батометра в точке наблюдения в секундах; l — ширина входного отверстия батометра в сантиметрах; g — в г/(м·с).

Полный расход донных наносов G вычисляют по формуле

$$G=0{,}001\left(\frac{g_1}{2}b_0+\frac{g_1+g_2}{2}b_1+\ldots+\frac{g_{n-1}+g_n}{2}b_{n-1}+\frac{g_n}{2}b_n\right), \qquad (25.4)$$

где $g_1, \ldots, g_n$ — элементарные расходы донных наносов на вертикалях в г/(м·с) (на 1 м ширины русла); $b_1, \ldots, b_{n-1}$ — расстояния между вертикалями в метрах; b_0, b_n — расстояния в метрах между крайними вертикалями и урезами воды или границами полосы движения наносов.

При графическом способе на поперечном профиле реки строят эпюру распределения элементарных расходов донных наносов по ширине реки (рис. 25.7). Площадь эпюры, определенная планиметром, численно равна значению полного расхода донных наносов.

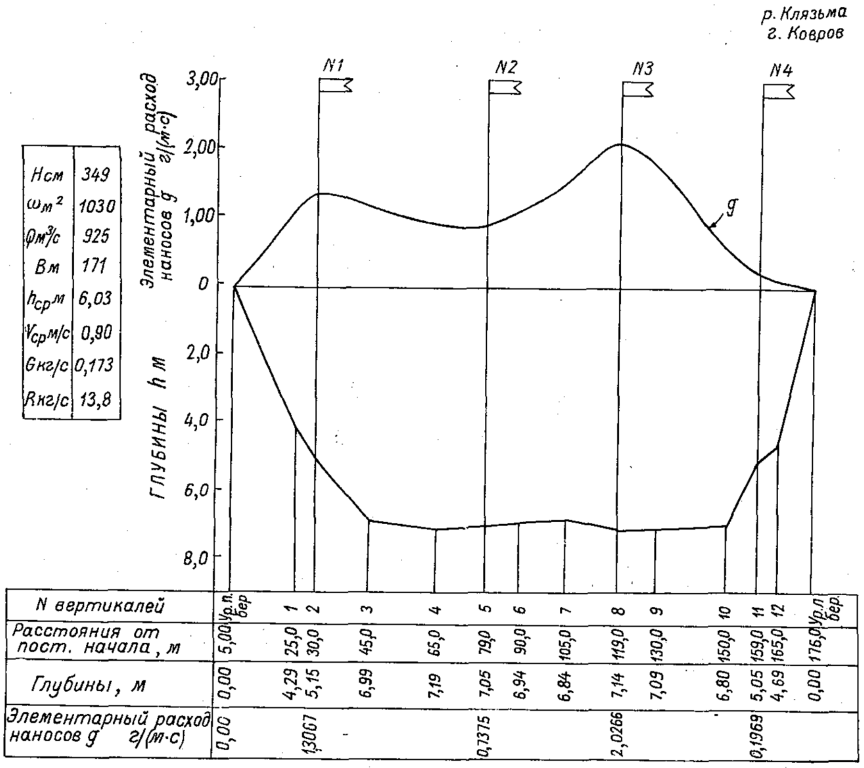
Подсчет стока донных наносов. Для этого строят график связи между значениями расхода воды и расхода донных наносов: по оси ординат откладывают значения расхода воды Q, по оси абсцисс — расходов донных наносов G.

Если связь $G=f(Q)$ получается достаточно тесной, т. е. точки на графике располагаются с небольшим разбросом, то по середине полосы точек проводят на глаз плавную кривую, которая чаще всего бывает обращена выпуклостью к оси Q. По полученной кривой определяют значения средних суточных расходов донных наносов по значениям средних суточных расходов воды.

Если точки значений (Q, G) на графике ложатся с большим разбросом и по ним невозможно провести одну кривую, то необходимо проанализировать нанесенные точки, пометив каждую точку значением уклона водной поверхности, средней скорости течения или средней глубины. При этом может оказаться, что по точкам, помеченным одинаковыми или близкими значениями указанных элементов потока, можно провести кривые, каждая из которых будет выражать связь для определенного периода времени, для которого по этой кривой и определяются средние суточные расходы донных наносов по средним суточным значениям расходов воды.

Если точки легли с большим разбросом и провести кривые описанным способом нельзя, то при наличии большого количе-

ства измеренных расходов донных наносов, равномерно распределенных в году, можно определять расходы донных наносов в периоды между измерениями путем интерполяции между измеренными значениями. Такой способ можно применять, когда режим стока наносов не изменялся в периоды между измерениями.



N вертикалей		Ур.т. вер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ур.л. вер
Расстояния от пост. начала, м	5,00		25,0	30,0	45,0	65,0	79,0	90,0	105,0	119,0	130,0	150,0	159,0	165,0	176,0
Глубины, м	0,00		4,29	5,15	6,99	7,19	7,05	6,94	6,84	7,14	7,09	6,80	5,05	4,69	0,00
Элементарный расход наносов g г/(м·с)	0,00			1,3007			0,7375			2,0266			0,1969		

Рис. 25.7. Вычисление расхода донных наносов графическим способом.

Определенные тем или иным способом средние суточные расходы донных наносов заносят в годовую таблицу, в которой производят подсчет стока наносов за год. По данным таблицы можно построить хронологический график расходов донных наносов, площадь которого выражает размер годового стока донных наносов.

25.3. Учет стока наносов суммарным способом с использованием отстойников гидротехнических сооружений и водохранилищ

Рассматриваемый способ в настоящее время применяется главным образом в условиях горных рек, где донные батометры не

обеспечивают достаточной точности учета стока донных наносов. Сущность способа заключается в том, что определяется объем и вес наносов, отложившихся в отстойных сооружениях гидроузлов или в водохранилищах за определенные периоды времени.

Для определения объема отложившихся наносов делают систематические промеры глубин по поперечникам, разбиваемым перпендикулярно оси отстойника или водохранилища. Число поперечников и промерных точек на них устанавливают в зависимости от местных особенностей рельефа дна. Во время промеров на поперечниках необходимо отмечать положение рабочего уровня воды. Для определения отметок дна по результатам промеров необходимо данные каждого промера приводить к одному условному уровню путем введения срезки, которая равна разности отметок условного и рабочего уровней.

Для определения массы наносов берут пробы в различных точках дна, чтобы охватить этими определениями все категории наносов, осаждающихся в разных частях водохранилища. В верхней части водохранилища осаждаются более крупные наносы (галька, гравий) с объемной массой около 2 т/м^3, а в приплотинной — более мелкие (илы) с объемной массой немного более 1 т/м^3. По взятым пробам определяют объемную массу наносов. Пробы берут три-четыре раза в год, обычно на подъеме и на спаде паводка и в межень.

При промывках отстойника, т. е. очистке от наносов, необходимо проводить промеры до промывки и сразу после нее.

Для учета стока наносов определяют массу отложившихся наносов за отдельные периоды. При этом объемы отложившихся наносов находят по данным промеров, а для получения массы наносов используют результаты определения объемной массы. Для этого необходимо предварительно вычислить единичные массовые деформации для каждой промерной вертикали

$$\Delta p = \Delta h \gamma_{отл}, \tag{25.5}$$

где Δh — разность глубин на данной вертикали за время между промерами; $\gamma_{отл}$ — объемная масса отложений.

Суммарную массу отложившихся наносов за период между промерами определяют по значениям единичных деформаций и частичным площадям дна с одинаковыми величинами этих деформаций.

При равномерном распределении промерных точек по всей площади водохранилища или отстойника суммарная масса отложившихся наносов определяется из соотношения

$$p_{отл} = \Delta p_{ср} \Omega, \tag{25.6}$$

где $\Delta p_{ср}$ — средняя единичная массовая деформация в т/м^2, определяемая делением суммы единичных массовых деформаций Δp_i на всех промерных вертикалях за данный период на общее

число вертикалей; Ω — площадь водохранилища или отстойника в м^2; $p_{отл}$ — в тоннах.

Для полного учета как донных, так и взвешенных наносов необходимо дополнительно измерять расходы взвешенных наносов на выходном створе. Если, кроме того, учитывать сток взвешенных наносов на входном створе, т. е. на реке выше водохранилища, то можно выделить из общего стока наносов данной реки сток донных наносов.

По имеющимся данным, погрешность определения стока донных наносов суммарным способом по отложениям в отстойниках и водохранилищах составляет в среднем 20—50%, а в отдельных случаях 100%.

Глава 26

Изучение донных отложений

26.1. Общие сведения

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

Донные отложения в реках можно рассматривать как временно неподвижные наносы, формирующие дно. В определенные фазы гидрологического режима может происходить размыв ранее отложившихся наносов, в другие фазы — их аккумуляция.

Донные отложения в водохранилищах и особенно в озерах накапливаются в течение длительного времени, отличаются по составу от речных отложений и представлены более мелкими фракциями.

Донные отложения могут быть как минерального, так и органического происхождения. Минеральные грунты бывают представлены главным образом различными комбинациями ила, глины, песка, гравия, гальки. Органогенные грунты состоят обычно из различного рода сапропелей, входящих, как правило, в состав озерных отложений.

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

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

26.2. Приборы для взятия проб донных отложений

Грунты, из которых состоят донные отложения, обладают различными механическими свойствами, что затрудняет создание универсального прибора для взятия проб. Поэтому существует большое количество различных приборов, которые следует применять в соответствии со свойствами исследуемых грунтов. Кроме того, устройство прибора во многом зависит от глубины водоема, на котором предполагается брать пробы донных отложений.

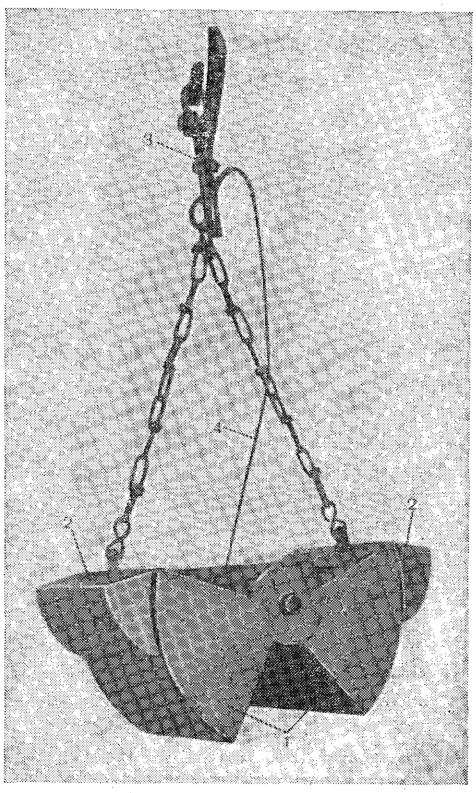


Рис. 26.1. Дночерпатель.

1 — створки; *2* — грузы; *3* — крючок; *4* — трос.

Пробы донных отложений всегда желательно брать без нарушения их структуры, но если требуется определить только род грунта, то соблюдение этого условия не обязательно.

Все приборы для взятия проб донных отложений можно подразделить на две группы: 1) приборы для взятия пробы грунта с нарушением его структуры и 2) приборы для взятия пробы без нарушения его структуры.

Из приборов первой группы в настоящее время применяют главным образом дночерпатели и иногда драги простейшего устройства. Из приборов второй группы применяют различного рода донные щупы.

Приборы для взятия проб грунта с нарушением структуры. Дночерпатель предназначен для взятия проб донных отложений из галечниковых и гравелисто-галечных грунтов. Он состоит из двух створок (рис. 26.1), закрепленных на оси, вокруг которой они могут вращаться, раскрываясь на 60—65° относительно исходного положения. Площадь дна, захватываемая створками в раскрытом виде, составляет 0,025 м^2. На наружной поверх-

ности створок прикреплены грузы, служащие для закрывания створок при подъеме дночерпателя. На плоских наружных поверхностях створок имеются окна, закрытые сетками, предназначенные для выхода воздуха при опускании прибора. К створкам снаружи прикреплены цепочки, соединенные в центре кольцом, за которое зацепляется крючок при спуске дночерпателя.

На внутренней стороне одной из створок укреплен конец тонкого троса, который далее пропущен через ролик, укрепленный на внутренней стороне другой створки, а затем через ролик на оси выведен наружу и соединен с тросом лебедки.

Для взятия пробы грунта дночерпатель опускают на тросе с помощью гидрометрической лебедки. При опускании он находится в раскрытом виде; при ударе прибора о дно крючок откидывается, освобождая кольцо. При подъеме дночерпателя трос натягивается, при этом створки закрываются, захватывая грунт во внутреннюю полость.

После поднятия дночерпателя на палубу проба из него вынимается, а внутренняя полость прибора промывается.

Штанговый дночерпатель (рис. 26.2) разработан в ГГИ и предназначен для взятия проб грунта из поверхностного слоя дна при глубинах до 2 м

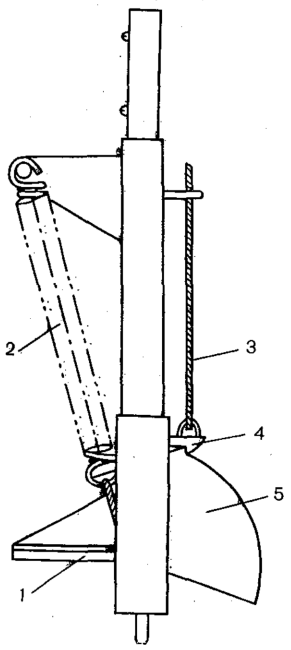


Рис. 26.2. Штанговый дночерпатель ГР-91.

1 — резиновая прокладка; *2* — пружины; *3* — тяга; *4* — фиксатор; *5* — ковш.

и скоростях течения до 2 м/с. Прибор рассчитан на применение в несвязных илистых и песчано-гравелистых грунтах.

Для взятия проб дночерпатель укрепляют на гидрометрической штанге и опускают с открытым ковшом, удерживаемым в таком положении фиксатором. При достижении дна прибор плотно прижимают к нему и одновременно натягивают вверх гибкую тягу. При этом фиксатор освобождает ковш, который под воздействием пружин врезается в дно и забирает пробу. Ковш закрывается, и его режущие кромки прижимаются к резиновой прокладке, чем и обеспечивается сохранность взятой пробы.

Отборник проб донных отложений (рис. 26.3) разработан в ГГИ и предназначается для взятия проб из поверхностного слоя дна в несвязных и слабосвязных глинистых, песчаных и песчано-гравелистых грунтах. Рассчитан на применение с дистанционными гидрометрическими установками ГР-64 и ГР-70, а также

с лебедками. Объем забираемой пробы до 300 см^3. Проба забирается ковшом, приводимым в действие натяжением несущего троса в момент начала подъема отборника. При этом ковш поворачивается вокруг своей оси, врезается в грунт, забирая пробу. После забора пробы режущие кромки ковша прижимаются к резиновой прокладке, предохраняя пробу от вымывания. Масса отборника около 40 кг.

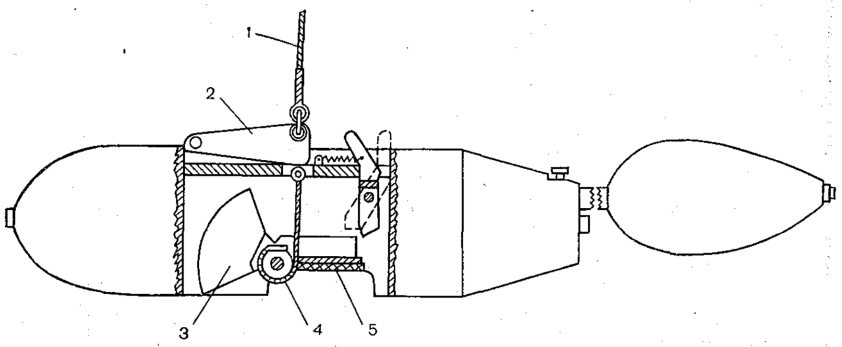


Рис. 26.3. Отборник проб донных отложений ГР-86.

1 — несущий трос; *2* — поворотный рычаг; *3* — ковш; *4* — трос; *5* — резиновая прокладка.

Драга простейшего устройства (рис. 26.4) состоит из металлической рамы и мешка для сбора грунта. Драга прикрепляется на тросе и для сбора грунта (или бентоса) выбрасывается из шлюпки на дно водоема. При движении шлюпки драга перемещается по дну, при этом заостренный край наклонной пластины рамы скребет дно, а грунт поступает через щель рамы в мешок. При работе с драгой необходимо вытравливать трос на длину, равную трех-пятикратной глубине. При больших скоростях перемещения шлюпки для предупреждения отрыва драги ото дна необходимо в 2—3 м перед другой прикреплять к тросу груз. При подъеме драги шлюпка должна стоять над драгой. Собранный грунт выбирают через нижний конец мешка.

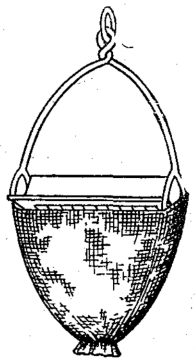


Рис. 26.4. Простейшая драга.

Приборы для взятия проб грунта без нарушения структуры. Донный щуп ГР-69 (рис. 26.5) предназначен для взятия проб донных отложений в илистых, песчаных, гравелистых и мелкогалечных грунтах. Применяется на штанге или шесте. Глубина взятия проб зависит от длины штанги и шеста, а также от скорости течения воды, но не может быть более 6 м. Основным

рабочим органом щупа является заборный стакан длиной 140 мм и диаметром 40 мм, внутри которого имеется поршень.

Перед взятием пробы щуп устанавливают в рабочее положение стаканом вниз (рис. 26.5 *а*), при этом поршень с фиксирующим кольцом должен находиться в нижнем положении для удержания стакана от перевертывания.

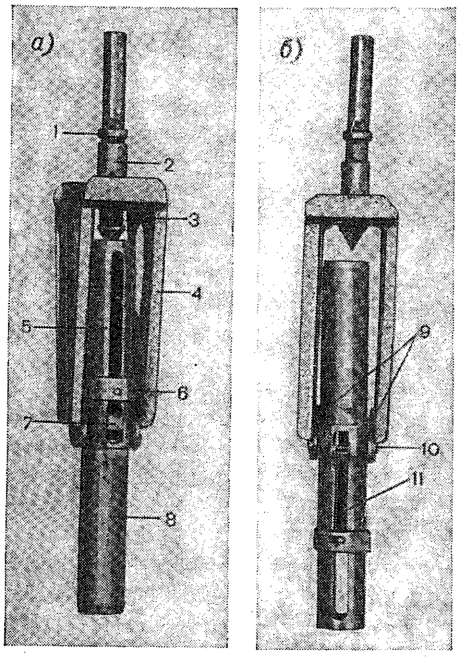


Рис. 26.5. Донный щуп ГР-69.

1 — упорное кольцо; *2* — направляющая втулка; *3* — наконечник; *4* — станина; *5* — противовес; *6* — фиксирующее кольцо; *7* — собачка; *8* — заборный стакан; *9* — упорные шпонки; *10* — цапфы; *11* — шток поршня.

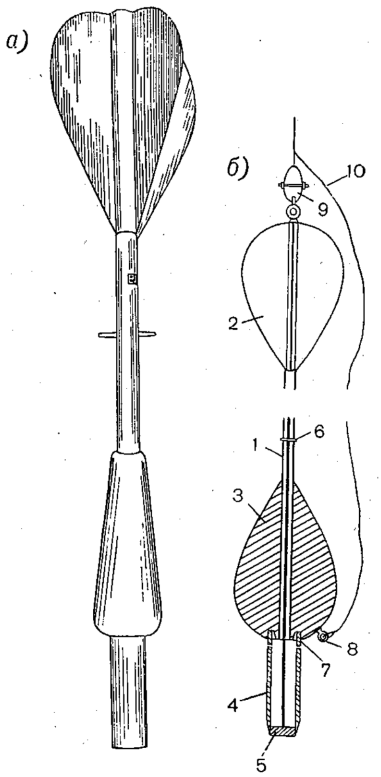


Рис. 26.6. Донный щуп Аполлова.

а — внешний вид, *б* — устройство.

При взятии пробы щуп опускают до дна и давлением на штангу вдавливают стакан в грунт. При этом давление грунта передвигает поршень вверх. Когда при поднятии щупа нижний конец стакана выходит из грунта, наконечник штанги выйдет из отверстия в верхней части противовеса и под тяжестью последнего стакан перевертывается заборным отверстием вверх (рис. 26.5 *б*). Проба грунта извлекается из стакана с помощью поршня.

Кроме описанного донного щупа ГР-69, существует ряд других штанговых донных щупов, применяемых в различных

изыскательских организациях; конструкции некоторых из этих приборов достаточно удовлетворительны, но промышленное изготовление их не налажено.

Донный щуп Аполлова (рис. 26.6) предназначается для взятия проб в песчаных или иных рыхлых и мягких грунтах на ходу судна при сравнительно больших глубинах. Прибор состоит из стальной трубки *1*, на верхнем конце которой имеется стабилизатор *2* для придания правильного направления щупу при падении в воде, а на нижнем конце — обтекаемой формы груз *3* весом до 10 кг. На конце груза укреплен режущий стакан *4* для взятия пробы грунта, имеющий длину 12 см и диаметр 4 см, внутри которого имеется поршень *5* для выдавливания взятой пробы грунта. Шток поршня проходит через внутреннее отверстие металлической трубки *1* и на конце имеет ручку *6*, выходящую через продольную щель трубки. Для выхода воды из стакана в момент взятия пробы в нем имеется отверстие *7*. На нижнем конце груза находится кольцо *8*, а на стабилизаторе — кольцо с пружинным зажимом *9*, в котором зажимается трос *10*, закрепленный в кольце *8*.

При взятии пробы на ходу судна щуп бросают за борт с носа судна (необходимо следить, чтобы трос не мешал свободному падению прибора); по достижении щупом дна стакан врезается в грунт, который поднимает поршень. При подъеме щупа трос натягивается, срывает зажим с кольца на стабилизаторе и щуп в перевернутом виде извлекается из воды.

Грунтовые трубки предназначены для взятия проб донных отложений с судна, стоящего на якоре или находящегося в движении. Приборы в основном предназначены для морских исследований, но некоторые из этих приборов, в частности описываемые ниже, могут применяться и при изучении донных отложений на озерах и водохранилищах, а также в устьевых участках рек.

Трубка для взятия проб с судна на якоре (рис. 26.7 *а*) состоит в основном из трех частей: трубки *1*, коронки *2*, груза со стабилизатором *3*. Трубка служит для помещения взятой пробы. Внутри трубки имеется вкладыш *4*, представляющий собой разъемную латунную трубку, которая вынимается вместе с пробой, чем и достигается сохранение структуры грунта. Коронка представляет собой стальной наконечник с режущими краями, навинчиваемый на нижний конец трубки. Стабилизатор навинчивается на верхний конец трубки и служит для придания прибору устойчивого вертикального положения во время падения в воде. В верхнем торце трубки имеется отверстие, закрываемое клапаном *5*, служащее для выхода воздуха при взятии пробы; при подъеме трубки клапан автоматически закрывается, что исключает возможность выпадения пробы из трубки. Сверху трубки имеется скобка *6* и крюк *7* для присоединения троса, идущего к лебедке.

Трубки изготовляются длиной 1,0 и 1,5 м, емкостью соответственно 1800 и 2700 см^3; масса трубок 13,5 и 19,0 кг.

Для взятия пробы трубка подвешивается на тросе и опускается в воду до полного погружения. Лебедка ставится на холостой ход, что дает возможность трубке быстро падать. Трубка внедряется в грунт под действием своего веса и скорости падения. Достижение трубкой дна заметно по ослаблению троса. Выбрав слабину троса, отсчитывают глубину и поднимают трубку на палубу, где, сняв коронку, вынимают вкладыш с пробой.

Трубка *1* для взятия проб на ходу судна (рис. 26.7 *б*) отличается устройством верхнего клапана и стабилизатора *3*, имеющего по наружной поверхности оправу цилиндрической формы. Трубка снабжена устройством, которое обеспечивает ее подъем вверх берущим пробу концом. Перед спуском трубки в воду клапан открывается. Необходимым условием для работы с этой трубкой является наличие у вьюшки лебедки свободного хода для быстрого сбрасывания троса. Скорость сбрасывания должна быть не меньше, чем скорость судна плюс скорость падения трубки в воде (4—5 м/с).

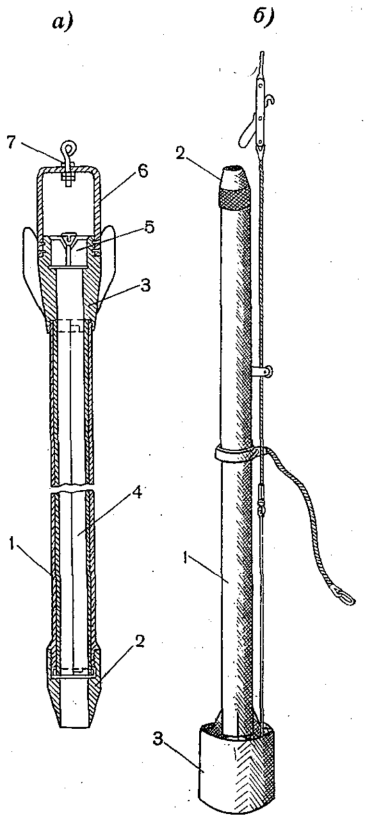


Рис. 26.7. Грунтовые трубки.

а — трубка для взятия проб с судна на якоре; *б* — трубка для взятия проб на ходу судна.

Трубка со взятой пробой укладывается на специальную подставку или палубу. Коронка *2* свинчивается с трубки, а вкладыш с пробой вынимается и раскрывается. Проба оценивается визуально и составляется ее описание. Затем проба отправляется в лабораторию для анализа.

Исследование донных отложений может проводиться новым, ультразвуковым методом, который в настоящее время уже применяется в водных исследованиях и является весьма перспективным. Применение этого метода позволяет получить автоматическую запись наслоений грунтов дна на бумажной ленте, что значительно сокращает сроки исследований.

Глава 27

Лабораторная обработка проб наносов и донных отложений

Лабораторную обработку проб наносов и донных отложений обычно производят в два приема: первичная обработка производится непосредственно на постах в полевых лабораториях, а вторичная — в стационарных лабораториях на гидрологических станциях.

27.1. Первичная обработка проб

Первичная обработка проб включает следующие виды работ: 1) выделение наносов из воды путем отстоя или фильтрования проб, 2) высушивание выделенных наносов и пересылку их в соответствующих упаковках в лабораторию для анализа. Крупные фракции донных наносов на постах разделяют на отдельные фракции на грохотах или с помощью калибров. Кроме того, на постах может производиться обработка проб взвешенных наносов путем суточного отстоя в трубках.

Выделение взвешенных наносов из проб воды, предназначенных для определения мутности, выполняется путем автоматического фильтрования, если объем пробы не превышает 1 л, или путем фильтрования после предварительного отстоя наносов, а также посредством фильтрования под давлением. Выделение наносов из проб, предназначенных для определения крупности, производится только путем отстоя.

Способ отстоя проб. Для выделения наносов путем отстоя применяют трехлитровые бутылки из светлого стекла, а также круглые или конические (расширяющиеся книзу) сосуды из белого стекла диаметром не менее 10 см. На сосуды наклеивают этикетки с номерами проб и прочими сведениями. Отстойные сосуды ставят на горизонтальную полку в затемненном от солнечных лучей месте и защищают от пыли.

Продолжительность отстоя зависит от размера частиц наносов, высоты слоя воды в сосуде и температуры воды. Чем мельче частицы, тем меньше их гидравлическая крупность и тем больше продолжительность их оседания. Чем больше высота слоя воды в сосуде, тем больше продолжительность осаждения.

Время отстоя принято определять из расчета на полное осаждение частиц диаметром до 0,0005 мм при 15°С; при этом продолжительность отстоя проб выражается зависимостью

$$t = 0{,}4hk, \qquad (27.1)$$

где t — продолжительность отстоя в сутках; h — высота слоя воды в сантиметрах; k — коэффициент, учитывающий изменение вязкости воды с температурой и определяемый по табл. 27.1.

Таблица 27.1

Температура воды, °С	40	30	25	20	15	12	10	6
Коэффициент k	0,58	0,70	0,78	0,88	1,00	1,08	1,15	1,30

Температура воды принимается равной температуре воздуха в помещении.

После отстоя осветленная вода из бутылей осторожно сливается при помощи сифона, а остающийся слой с осевшими на дне наносами взбалтывается и переливается в чистую бутылку; если данная проба взята для определения крупности, то бутылка закупоривается, заливается парафином или сургучом (для консервации полезно в пробу добавить несколько капель 10-процентного раствора формалина) и вместе с другими пробами отправляется в лабораторию. Если проба взята для определения мутности, то после слива чистой воды она ставится на фильтрование.

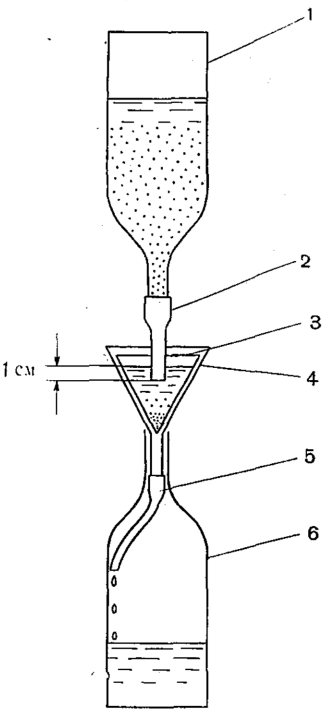


Рис. 27.1. Автоматическое фильтрование.

1 — бутылка с пробой воды; *2* — резиновый наконечник; *3* — бумажный фильтр; *4* — воронка; *5* — резиновый наконечник; *6* — бутылка для профильтровавшейся воды.

Способы фильтрования. Применяются способы автоматического фильтрования и фильтрования под давлением. Наносы из воды выделяются на заранее подготовленные фильтры из обеззоленной бумаги, которые присылаются из лаборатории. В лаборатории фильтры предварительно взвешивают и на каждом из них простым карандашом проставляют номер. Каждая проба воды фильтруется на отдельный фильтр. При большом содержании наносов одна проба может фильтроваться на несколько фильтров.

Автоматическое фильтрование применяется в случае, если объем пробы не превышает 1 л, и заключается в том, что бутылка с пробой ставится в перевернутом виде (рис. 27.1) над воронкой, горлышко бутылки погружается в воду в воронке; под воронку подставляется бутылка для сбора профильтровавшейся воды. Когда некоторое количество воды из воронки профильтруется и уровень в ней немного понизится, в бутылку войдет пузырек воздуха и вытеснит из нее соответствующий объем воды, которая выльется в воронку и восстановит первоначальный

уровень. При этом фильтрование происходит при постоянном напоре и не требует надзора.

Подсушка фильтров с выделенными наносами производится вначале на воронках. Затем фильтры окончательно высушиваются без воронок. Высушенные на воздухе фильтры складываются наносами внутрь так, чтобы они не могли высыпаться и номер фильтра был виден; в таком виде фильтры укладывают в пергаментные пакетики, в которых отправляют в лабораторию

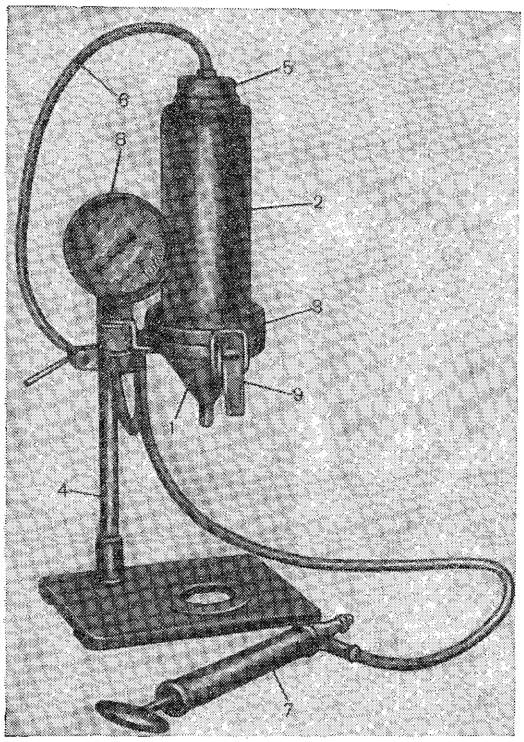


Рис. 27.2. Прибор для фильтрования проб под давлением ГР-60.

для взвешивания; каждый фильтр помещается в отдельный пакетик.

Фильтрование под давлением применяется при необходимости быстрого выполнения работ, что особенно ценно в экспедиционных условиях. Способ фильтрования под давлением был разработан В. С. Куприным. В настоящее время применяется прибор Куприна ГР-60, показанный на рис. 27.2. Увеличение давления в фильтровальной камере *1* достигается нагнетанием воздуха. Проба воды объемом 1 л вливается в стеклянный баллон *2*, вмонтированный в крышку *3* фильтровальной камеры. Баллон и фильтровальная камера прикреплены к штативу *4* посредством кронштейна и шарнира. Верхняя часть баллона

закрывается крышкой со штуцером *5*, к которому присоединяется резиновый шланг *6*. Воздух в баллон нагнетается ручным насосом *7*. Для регулирования подачи воздуха и наблюдения за давлением прибор снабжен манометром *8*.

Фильтрование производится в следующем порядке. Открывается зажим *9*, баллон отклоняется на шарнире и промывается чистой водой. В сетку воронки укладывается бумажный фильтр, предварительно смоченный водой. Баллон устанавливается на

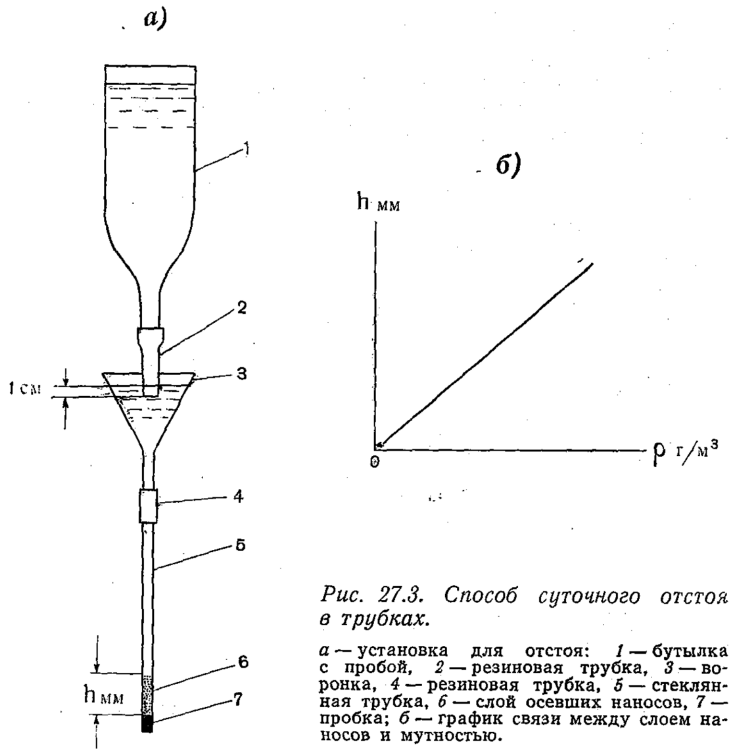


Рис. 27.3. Способ суточного отстоя в трубках.

а — установка для отстоя: *1* — бутылка с пробой, *2* — резиновая трубка, *3* — воронка, *4* — резиновая трубка, *5* — стеклянная трубка, *6* — слой осевших наносов, *7* — пробка; *б* — график связи между слоем наносов и мутностью.

место и закрепляется зажимом. Открывается крышка вверху баллона и в него вливается проба воды, затем крышка завинчивается до отказа. В баллон нагнетается воздух, под давлением которого начинается процесс ускоренного фильтрования. Скорость фильтрования зависит от давления, мутности и состава наносов. При фильтровании под давлением 2—3 ат необходимо соблюдать осторожность, не допуская ударов по баллону. Увеличивать давление свыше 3 ат нельзя.

Отфильтрованная вода стекает из воронки в стеклянную банку. Первые порции воды могут быть мутными, и поэтому, как только появится чистая вода, мутный фильтрат следует снова вылить в баллон, предварительно снизив в нем давление

до атмосферного, для повторного фильтрования. По окончании фильтрования следует смыть с внутренних стенок баллона оставшиеся на них наносы на фильтр.

Определение мутности проб путем суточного отстоя в трубках. Этот способ является упрощенным и основан на наличии связи между высотой слоя осевших за сутки в трубке наносов и средней мутностью пробы. Применение данного способа значительно сокращает объем работ по высушиванию и взвешиванию фильтров.

Каждая взятая на мутность проба в помещении поста ставится в станок для отстоя наносов в стеклянной трубке на 24 часа. За это время происходит осаждение наносов, за исключением самых мелких фракций, мельче 0,003 мм, которые не успевают осесть и не учитываются.

Внутренние диаметры трубок должны быть 5—10 мм (при большой мутности диаметр больше). На одном посту диаметры всех трубок должны быть одинаковы для сравнимости результатов отстоя. Нижний конец трубки затыкается пробкой с ровными срезами.

Бутылка с пробой укрепляется на станке горлышком вниз, так же как при автоматическом фильтровании, и наносы оседают в трубке (рис. 27.3 *а*). По окончании отстоя слой наносов в трубке измеряется с точностью до 1 мм.

Для сравнения результатов отстоя желательно иметь одинаковые объемы проб. При неодинаковых объемах делают приведение полученной высоты слоя осевших наносов к постоянному объему, например 1 л, по формуле

$$h_x = \frac{V_{\text{пост}} h_{\text{изм}}}{V_{\text{изм}}}, \qquad (27.2)$$

где h_x — высота слоя осадка в миллиметрах, приведенная к постоянному объему; $V_{\text{пост}}$ — постоянный объем проб, принятый на данном посту, в миллилитрах; $V_{\text{изм}}$ — измеренный объем пробы в миллилитрах; $h_{\text{изм}}$ — измеренная высота слоя осадка в трубке в миллиметрах.

Значения мутности пробы по высоте слоя наносов в трубках определяются по графикам связи между слоем наносов и средней мутностью (рис. 27.3 *б*).

Контрольные определения мутности для выявления связи высоты слоя наносов в трубках со средней мутностью пробы производятся 12—18 раз в год: 1—2 зимой, 4—6 на подъеме и спаде половодья и по 2—4 летом и осенью. При устойчивой связи количество контрольных определений может быть сокращено.

В некоторых случаях получается неоднозначная зависимость $\rho = f(h)$. В частности, отмечено, что на эту зависимость влияет изменение крупности наносов, наблюдаемое, например, в разные фазы половодья. В таких случаях надо определять зависимость

между этими элементами для разных фаз гидрологического режима.

27.2. Обработка проб в лабораториях

В лаборатории определяется количество наносов в пробах, состав наносов и донных отложений по крупности частиц, а также удельный и объемный вес и количество гигроскопической влаги.

Определение количества наносов в пробах. Количество наносов в пробах определяется путем взвешивания фильтров с наносами, присылаемых в лабораторию с постов. Перед взвешиванием эти фильтры помещаются в бюксах в термостат, где выдерживаются при открытых крышках в течение 5 часов при температуре 105—110°С. После охлаждения в эксикаторе фильтры с наносами взвешиваются на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Масса наносов в пробе получается вычитанием из полученной массы массы пустого фильтра.

Количество донных наносов в пробах определяется путем взвешивания в воздушно-сухом состоянии на химико-технических весах с точностью до 0,01 г. Взвешивание производится в фарфоровой чашке; масса наносов получается как разность массы чашки с наносами и массы пустой чашки.

Определение крупности наносов и донных отложений. Применяемые в настоящее время методы разделения наносов на фракции по крупности основаны на механическом и гидравлическом принципах.

На механическом принципе основаны методы: 1) непосредственного обмера (крупных) частиц, 2) просеивания частиц через грохоты и сита. Кроме этих методов, имеются более новые, в частности микрофотографический и фотоэлектрический, пока не получившие широкого распространения.

На гидравлическом принципе основаны методы: 1) фракциометра, 2) пипетки.

Применимость различных методов в зависимости от крупности частиц и вида наносов показана на рис. 27.4. Для разнородных по крупности образцов проб применяются комбинированные методы, например пипетка — фракциометр, сита — фракциометр, обмер—сита—фракциометр.

Для производства анализа требуется определенная навеска пробы, величина которой зависит от принятого метода. При ситовом методе и методе сита—фракциометр навески составляет: для песков однородной крупности 100—150 г, для песков гравелистых 300—500 г, для песков галечно-гравелистых 1—2 кг; при анализе методом фракциометра 2—0,5 кг; при анализе методом пипетки и пипетка—фракциометр 3—2 г (для анализа до диаметра 0,01 мм).

Для анализа донных отложений берется бóльшая навеска

пробы, что необходимо для определения, кроме крупности частиц, также объемного и удельного веса отложений и содержания гигроскопической влаги.

Анализ на грохотах и ситах. При преобладании в пробе частиц крупнее 10 мм проводят анализ на грохотах. При отсутствии грохотов определяют размеры частиц посредством колец-калибров диаметром 10; 20; 50 и 100 мм или путем обмера частиц лентой по трем окружностям и вычисления диаметра частицы

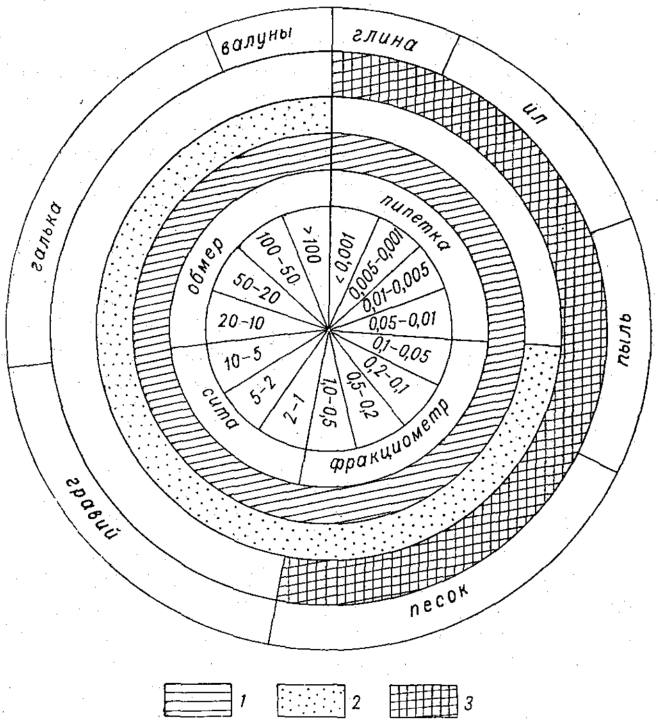


Рис. 27.4. Применимость методов анализа в зависимости от крупности частиц.

1 — донные отложения; *2* — донные наносы; *3* — взвешенные наносы.

по средней длине окружности. Частицы с диаметрами, относящимися к одной фракции, группируются вместе. Затем их взвешивают на технических весах. Полная масса расчетной навески определяется суммированием масс отдельных фракций.

Отмытые частицы песчаных наносов и отложений просушивают, отдельные комочки разминают и проба поступает на ситовый анализ. Пробу взвешивают с точностью до 0,01 г. Наносы разделяют на фракции просеиванием через набор сит с отверстиями различных диаметров, собранных в колонку и закрытых сверху крышкой, а снизу глухим дном. Для песчано-гравелистых

наносов сита имеют отверстия диаметром 10; 5; 2; 1; 0,5 мм. Просеивание ведется сразу через всю колонку сит. В результате просеивания проба будет подразделена на шесть фракций: более 10 мм; 10—5; 5—2; 2—1; 1—0,5 и менее 0,5 мм. Содержимое каждого сита переводят в фарфоровые чашки и взвешивают с точностью до 0,01 г. Сумма масс всех отдельных фракций должна быть равна общей массе пробы, но обычно она бывает меньше вследствие утери пылеватых частиц; недостачу относят за счет фракции менее 0,5 мм. Массы отдельных фракций пересчитывают в проценты от массы всей взятой пробы.

Дальнейший анализ частиц диаметром менее 0,5 мм может быть проведен на фракциометре.

Анализ на фракциометре. Анализ наносов на фракциометре применяется при крупности частиц 1,0—0,05 мм. Он основан на том, что частицы различной крупности падают в неподвижной водной среде с разной скоростью.

Фракциометр состоит из стеклянной трубки с внутренним диаметром 46—50 мм, длиной 1565 мм (рис. 27.5). В нижнем конце трубка суживается до внутреннего диаметра 13 мм. К нижней части трубки присоединена система разборных стеклянных трубок, соединенных резиновыми трубками; нижняя резиновая трубка заканчивается пробиркой. Резиновые трубки могут перекрываться зажимами *1—4*, которые находятся на определенных расстояниях от верхней метки трубки фракциометра: 153, 162, 172, 188 см. На трубке фракциометра нанесены две метки: верхняя на расстоянии 50 мм от верха воронки, нижняя — на 1400 мм от верхней метки. Трубка крепится на деревянной доске вертикально, в стороне от нагревательных приборов и в месте, куда не попадают солнечные лучи (дополнительное нагревание может вызвать конвекционные токи в воде).

Перед анализом фракциометр при открытых зажимах заполняют чистой водой до верхней метки. Наливать воду надо медленно во избежание образования воздушных пузырьков.

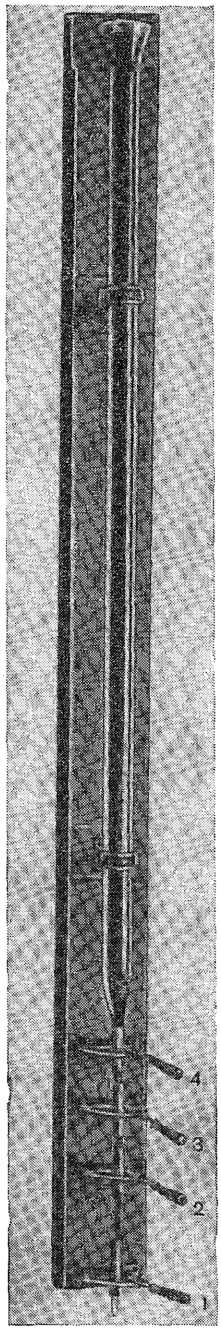


Рис. 27.5. Фракциометр Б. А. Аполлова.

К анализу можно приступать спустя 15—20 мин, когда вода примет температуру помещения.

Анализ производится так. Из пробы, поступающей на фракциометр, берется в фарфоровую чашку навеска 0,5—2,0 г, смачивается чистой водой и осторожно растирается резиновым пестиком в течение 3—5 мин до состояния жидкой кашицы. Пробу из чашки переводят в маленькую коническую колбу, встряхивают сильным вращательным движением и вливают ее содержимое во фракциометр. Одновременно с этим пускают секундомер. В момент прохода первой наиболее крупной частицы через нижнюю метку отмечается время по секундомеру. Зная время и длину пути между верхней и нижней метками, можно вычислить максимальную гидравлическую крупность в миллиметрах в секунду, а по ней и размер частицы, наиболее крупной в пробе (по табл. 23.2). Сроки закрытия зажимов, начиная с первого (нижнего), при температуре 15°С даны в табл. 27.2. Сроки закрытия зажимов для тех же фракций при других температурах приведены в Наставлении.

Таблица 27.2

№ зажима	Время закрытия зажима, секунды	Путь частиц, см	Гидравлическая крупность отсекаемых частиц, мм/с	Диаметр отсекаемых частиц, мм	Размер фракции, мм
1	31	188	60	0,5	1,0—0,5
2	82	172	21	0,2	0,5—0,2
3	203	162	8	0,1	0,2—0,1
4	765	153	2	0,05	0,1—0,05

После закрытия последнего зажима отделяется нижняя пробирка, содержимое которой смывается в фарфоровую чашку. Таким же образом, последовательно открывая зажимы (начиная с первого), смывают в чашки частицы, осевшие между зажимами.

Чашки с наносами разных фракций после выпаривания воды взвешивают с точностью до 0,01 г при воздушно-сухом состоянии наносов. Разность суммы масс всех четырех выделенных фракций и массы всей пробы определит содержание в пробе частиц диаметром менее 0,05 мм.

Массы фракций пересчитывают в проценты от массы пробы, результаты записывают в журнал.

Пипеточный метод основан на отборе проб пипеткой из взмученной суспензии с фиксированных глубин через промежутки времени, соответствующие продолжительности оседания частиц различной крупности. Таким образом, каждая проба, взятая пипеткой, будет содержать частицы определенных размеров. Массу частиц в каждой пробе определяют взвешиванием после

высушивания. По результатам взвешивания получают данные о содержании частиц различной крупности в анализируемой пробе наносов.

Пипеточным методом анализируют наносы размером частиц 0,05 мм и менее с разделением на четыре фракции. Комбинированным методом пипетка—фракциометр проба наносов разделяется на восемь фракций, начиная с 1 мм. Если в образце наносов имеются частицы крупнее 1 мм, то проба предварительно анализируется ситовым методом.

Для анализа проб наносов пипеточным методом применяется специальная установка, имеющая шесть стеклянных цилиндров объемом несколько более 1 л, одинаковой высоты, в которые помещается анализируемая суспензия. Пипеточная установка позволяет производить отбор проб при одновременном анализе шести образцов.

Для пипеточного анализа с выделением частиц диаметром до 0,0001 мм навеска пробы берется 5—7 г. Перед анализом проба должна пройти механическую, а при надобности и химическую подготовку.

Таблица 27.3

Сроки отбора проб пипеткой

Наибольший диаметр частиц в пробе, мм	Глубина взятия пробы, см	Срок отбора проб при температуре 15°С
0,05	10	51 с
0,01	10	21 мин 16 с
0,005	10	1 ч 25 мин
0,001	5	17 ч 43 мин

Сроки отбора проб определяют в зависимости от температуры суспензии; в табл. 27.3 указаны глубины взятия проб пипеткой при температуре 15°С (при других температурах указаны в Наставлении гидрометстанциям и постам).

Перед взятием первой пробы суспензия тщательно взбалтывается мешалкой. После окончания перемешивания мешалку вынимают и сразу пускают в ход секундомер. По истечении срока для данной температуры берется пипеткой первая проба с глубины 10 см. При отборе последующих проб суспензия каждый раз предварительно перемешивается мешалкой и для каждой пробы ведется свой отсчет времени. Объем каждой пробы должен составлять точно 25 мл. Взятая пипеткой проба переносится в бюкс, выпаривается досуха, охлаждается и взвешивается на аналитических весах.

Масса наносов в граммах, взятых пипеткой, отнесенной ко всему объему суспензии, вычисляется по формуле

$$x = \frac{ad}{e}, \qquad (27.3)$$

где a — масса наносов в абсолютно сухом или воздушно-сухом состоянии во взятой пипеткой суспензии в граммах; d — объем всей суспензии в цилиндре; e — объем суспензии в пипетке.

Вес наносов фракции мельче 0,001 мм во всем объеме суспензии определяется непосредственно по формуле (27.3), так как срок отбора четвертой пробы с глубины 5 см рассчитан исходя из гидравлической крупности частиц $d=0{,}001$ мм, которая равна 0,0008 мм/с при 15°С, а все более крупные частицы к этому времени погрузятся глубже.

Срок отбора третьей пробы с глубины 10 см определен исходя из гидравлической крупности частиц $d=0{,}005$ мм. Но в пробе будут содержаться частицы $d\leqslant 0{,}001$ мм, которые осаждаются медленнее. Поэтому вес наносов фракции 0,001—0,005 мм можно получить, вычитая из массы наносов третьей пробы, который вычисляется по формуле (27.3), массу наносов четвертой пробы.

Масса наносов фракции 0,005—0,01 мм получается вычитанием из массы наносов во второй пробе, вычисленной по формуле (27.3), массы наносов двух предыдущих фракций, т. е. мельче 0,001 и 0,001—0,005 мм.

Масса наносов фракции 0,01—0,05 мм получается вычитанием из массы наносов в первой пробе суммарной массы наносов трех предыдущих фракций.

После анализа проводится определение содержания каждой фракции наносов в процентах от массы всей пробы.

Анализ наносов, основанный на гидравлическом принципе, не свободен от некоторых недостатков, вызывающих погрешности в определении веса отдельных фракций. При анализе на фракциометре некоторая неточность обусловлена тем, что при падении частиц в стоячей воде более крупные из них увлекают за собой более мелкие, гидравлическая крупность которых значительно меньше. Погрешности в пипеточном методе обусловлены тем, что при отборе мелких фракций время, необходимое для приведения суспензии в цилиндре в состояние покоя после взбалтывания мешалкой, превышает время падения частиц, выпадение которых задерживается под воздействием движения суспензии.

Глава 28

Краткие сведения об изучении стока растворенных веществ

Изучение химического состава природных вод и стока растворенных веществ в реках имеет большое значение как для практических целей, так и для научных исследований.

Химический состав вод рек и общая их минерализация зависят в первую очередь от: 1) источника питания рек и годового режима стока; 2) состава почв, с которыми соприкасаются воды поверхностного стока; 3) литологического состава пород и грунтов, в которых протекают подземные воды, питающие реки; 4) действия живых организмов.

Дополнительно к основным факторам на химический состав воды в реках косвенно влияют условия климата и растительный покров бассейна. Значительное влияние на состав речных вод в настоящее время оказывают сбросные воды промышленных предприятий и городов и другие загрязняющие стоки.

Минерализация речных вод в общем имеет достаточно ясно выраженную зональность, соответствующую ландшафтной зоне, в которой расположен данный речной бассейн. В отдельных бассейнах эта закономерность может нарушаться вследствие особенностей геологического строения. Зональность не наблюдается также и у больших рек, сток которых объединяет бассейны многих малых рек, находящихся в различных физико-географических условиях.

28.1. Приборы для взятия проб воды

Пробы воды на химический анализ можно брать из поверхностного слоя и из глубин.

На реках, где вследствие турбулентного перемешивания состав воды приблизительно однороден для всего сечения потока, пробы воды берутся только из поверхностного слоя, а на озерах и водохранилищах — как с поверхностного слоя, так и с различных глубин; особенно важно взять пробы в зоне (выше и ниже) температурного скачка.

Пробы из поверхностного слоя воды берутся специально предназначенным для этой цели ведром. Перед взятием пробы ведро следует ополоснуть два-три раза водой, которая берется для исследования.

Пробы воды из глубинных слоев берутся специальными батометрами, которые опускают на нужную глубину на тросе посредством лебедки. При необходимости взятия проб с нескольких горизонтов на трос прикрепляют серию батометров, которыми берут пробы воды с различных глубин за один прием.

Для взятия проб воды на озерах и водохранилищах применяется преимущественно батометр И. В. Молчанова. На крупных водохранилищах с большими глубинами применяют, кроме того, глубоководные морские батометры. Они снабжаются термометрами, что позволяет одновременно со взятием пробы измерить температуру воды.

Подробное описание глубоководных батометров имеется в курсах морской гидрометрии. Здесь же дадим лишь краткое описание батометра БМ-48.

Батометр морской БМ-48 состоит из полого цилиндра, имеющего на обоих концах крановые затворы, которые открываются посредством двух параллельных рычагов. Цилиндр имеет сливной кран и вентиль, которые плотно закрываются перед спуском. К цилиндру на съемной раме прикрепляются глубоководные опрокидывающиеся термометры.

Батометр укрепляется на тросе с помощью зажима и спускового устройства и опускается на заданную глубину. После требуемой выдержки по тросу спускается посыльный груз, от удара которого автоматически закрывается полый цилиндр батометра и происходит его опрокидывание на 180°. При этом на глубоководных термометрах осуществляется фиксация температуры воды. Морские батометры применяются обычно сериями: на одном тросе укрепляется на различных горизонтах несколько батометров. Опрокидывание их происходит последовательно от одного посыльного груза. Емкость батометра 1 л, масса 4,3 кг.

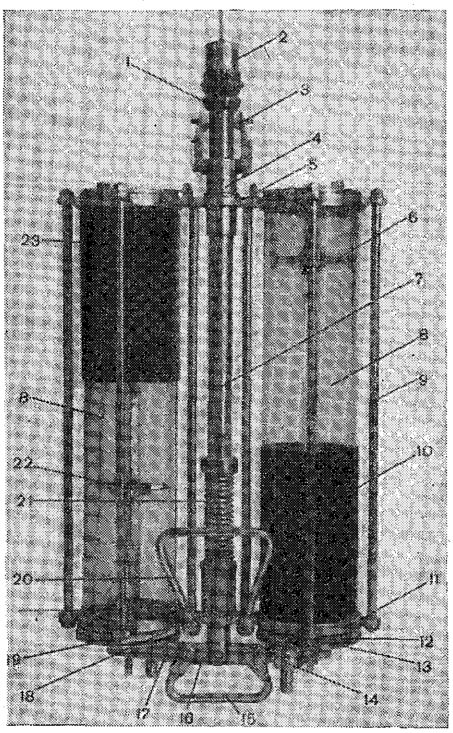


Рис. 28.1. Батометр Молчанова.

Батометр И. В. Молчанова ГР-18 (рис. 28.1) состоит из двух одинаковых цилиндров из органического стекла емкостью по 2 л, укрепленных на металлической раме. Рама имеет два основания: верхнее *5* и нижнее *11*, в центре которых впаяны втулки *4* и *18*. Через втулки проходит центральная ось рамы, заканчивающаяся в нижней части коромыслом *17*, а в верхней части — головкой *2*. Основания рамы состоят из двух металлических колец, соединенных металлической планкой. Отверстие каждого кольца имеет буртик, в который упирается торец цилиндра *8*. Между буртиком и цилиндром прокладывается резиновое кольцо *19*. Цилиндры *8*, вставленные в буртики оснований, стягиваются стяжками *9*. Коромысло *17*, установленное в нижней части оси *7*, состоит из двух металлических дисков *13*, соединенных планкой *16*. К внутренней стороне дисков прикреплены

резиновые прокладки *12*. На средней части оси установлена пружина *21*, прижимающая диски коромысла к кольцам нижнего основания и тем самым герметически закрывающая нижние части цилиндров. Нижняя втулка *18* имеет спиральный паз, по которому перемещается штифт, укрепленный на оси. Благодаря этому коромысло с дисками поворачивается вокруг оси *7* на 90°, что необходимо для свободного доступа воды в цилиндры.

На верхней втулке укреплены две собачки *3*, которые при взведении пружины с помощью ручек *15* и *20* заходят за выступ оси *1* и удерживают пружину во взведенном состоянии. Центральная ось *7* имеет на верхнем конце прорезь с винтом для подвески батометра на тросе. Трос пропускается через отверстие в центре головки *2*, которая после закрепления троса в прорези винтом надевается на верхний конец оси.

Для взятия проб воды батометр с открытыми верхними и нижними крышками цилиндров опускают на тросе на заданную глубину и выдерживают несколько минут. Затем по тросу пускают посыльный груз, от удара которого по головке *2* разводятся собачки *3*, освобождая пружину *21*, вследствие чего цилиндры закрываются снизу. Одновременно освобождаются из держателей верхние крышки и закрывают цилиндры сверху.

В закрытом виде батометр вынимают из воды и сливают пробу в заранее подготовленную посуду через краны *14*. Для измерения температуры воды в каждом цилиндре на кронштейне *6* установлен термометр, защищенный непрозрачным кольцом (*10* и *23*).

Масса батометра 7,5 кг, он применим при глубинах до 50 м.

Уход за батометрами. Для обеспечения исправной работы батометров за ними требуется тщательный уход. После работы цилиндры батометров, а также все соединительные их части должны быть промыты. Непосредственно перед работой движущиеся части батометра смазывают машинным маслом.

28.2. Взятие проб воды на химический анализ. Выбор пункта и сроки взятия проб воды

Пробы воды на химический анализ берутся на гидрометрическом створе при условии, что в районе участка станции (поста) нет местных искажений естественного содержания химического состава воды. Пробы воды на реках берутся на стрежне потока с его поверхности. На озерах и водохранилищах пробы воды берутся на постоянной (одной или нескольких) вертикали из верхнего и придонного горизонтов; с промежуточных горизонтов пробы берутся в зависимости от термической стратификации, но обычно не более чем на семи-восьми горизонтах в дневные часы.

Количество и сроки взятия проб для химического анализа устанавливаются в соответствии с характером водного режима

реки, озера (водохранилища) и практическими потребностями в этом виде исследований. В общем случае для производства химического анализа на большинстве рек в течение года берется семь-восемь проб, из них одна проба зимой, три-четыре в период весеннего половодья (на подъеме, пике и спаде), две пробы летом (в период устойчивой межени и при дождевом паводке) и одна проба осенью перед ледоставом. На реках с устойчивой летней меженью число проб уменьшается до пяти-шести в год, а на реках с паводочным режимом увеличивается до восьми. На временных водотоках берутся три-четыре пробы в период весеннего стока талых вод.

На станциях, расположенных в промышленных районах или на реках с характерными особенностями химического состава воды, берут 18—22 пробы в год, из них одну-две в период наименьшего расхода воды, три-четыре на подъеме, пике и спаде половодья, одну-две в наиболее крупный дождевой паводок; одну-две в межпаводковые периоды при наименьшем летнем и осеннем расходах воды; одну в последний день каждого месяца. На озерных станциях в зависимости от особенностей химического режима вод озера и его народнохозяйственного значения берут от 4—6 до 12 проб в год.

Порядок работы: 1) в сосуд набирают исследуемую воду, 2) производят полевое определение физико-химических свойств воды; 3) берут пробы для лабораторного анализа воды.

Для получения точных данных о химическом составе растворенных в воде веществ необходимо тщательно следить: 1) за чистотой и исправным состоянием приборов для взятия проб воды и посуды (колбы, бутылки, бюретки, пипетки и т. п.), употребляемой при химических определениях); 2) за точностью навесок реактивов и сохранностью стандартных и употребляющихся для титрования растворов; 3) чтобы все операции по взятию проб воды и определению ее физико-химических свойств производились с точным соблюдением методических правил и указаний.

Полевое определение физико-химических свойств воды. Состав работ. При взятии пробы воды необходимо на месте определить ее физико-химические свойства, которые подвержены быстрому изменению. Этими свойствами являются: 1) температура воды; 2) цвет, прозрачность, вкус и запах воды; 3) содержание ионов водорода (pH), 4) содержание двуокиси углерода (CO_2), 5) содержание растворенного в воде кислорода O_2. Кроме того, в отдельных случаях, при надобности, определяют содержание монокарбонатного иона $CO_3^{\cdot\cdot}$.

Определение физических свойств воды. Температура воды в поверхностном слое измеряется обычным водным термометром в оправе, который погружается на глубину 0,2 м.

Температура воздуха определяется посредством термометра-праща.

Для определения цвета и прозрачности воды из взятой пробы наполняют бутылку или склянку из прозрачного стекла. Прозрачность определяют, просматривая бутылку на просвет. Оценивают прозрачность по следующей шкале:

а) очень прозрачная вода — при отсутствии взвесей в воде;

б) прозрачная — при незначительном количестве взвесей;

в) слабо мутная — при наличии хорошо видимых взвесей;

г) мутная — количество взвесей настолько велико, что вода не прозрачна.

В примечании необходимо указать характер взвесей и их происхождение (водоросли при цветении, минеральная муть и т. п.).

Для определения цвета воды рассматривают бутылку с водой на фоне листа белой бумаги и подбирают наиболее близкий цвет по шкале цветности воды.

Вкус определяется лишь для воды, употребляемой для питья. В записях отмечают обнаруженные привкусы: горький, горько-соленый, солоноватый, железистый, кисловатый и т. п.; при отсутствии определенного вкуса отмечают «без вкуса».

Запах воды отмечается кратко словами: нет, затхлый, гнилостный.

Если температура воды ниже 15°С, то вкус и запах определяются в помещении после повышения температуры воды до 18—20°С.

Определение химических свойств воды. Для количественного определения непосредственно у водного объекта неустойчивых компонентов применяются полевые гидрохимические лаборатории.

Из взятой пробы воды сразу же на лодке или на берегу определяют pH, CO_2, фиксируют растворенный кислород и наполняют бутылки для отправки в лабораторию.

Определение содержания ионов водорода pH производится электролитическим или колориметрическим методом; чаще для этой цели на постах применяется прибор pH—47М с пределами измерения pH от 2 до 12.

Содержание CO_2 определяется титрованием.

Растворенный в воде кислород O_2 определяется иодометрическим методом. Метод состоит из двух частей: фиксации и самого определения.

Все перечисленные определения необходимо проводить в строгом соответствии с указаниями «Наставления гидрометеорологическим станциям и постам».

Проба воды для полного химического анализа берется в объеме 2,5 л (две бутылки по 1 л и одна 0,5 л). Бутылки ополаскивают три раза водой, взятой на исследование, после чего их наполняют пробой, не доливая до пробки 3—4 см. Для предохранения проб от действия бактериальных процессов прибавляют в литровые бутылки по 2 мл хлороформа, а в пол-литровую бутылку — 1 мл 25-процентного раствора серной кислоты.

После этого бутылки закрывают хорошо подогнанными пробками, предварительно вымытыми в горячей воде и ополоснутыми водой из взятой пробы. Пробки заливают менделеевской замазкой, сургучом или парафином. К горлу каждой бутылки привязывают талон, на котором указывают место взятия пробы и результаты полевого определения физико-химических свойств воды. Бутылки с пробами упаковывают в ящик со стружками или сеном и отправляют в лабораторию.

28.3. Вычисление расходов растворенных веществ и подсчет стока

Расход растворенных веществ вычисляется на основе результатов химических анализов воды, проведенных в лаборатории.

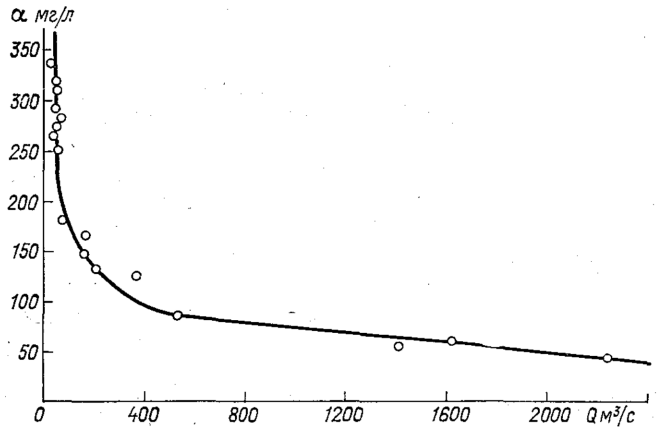


Рис. 28.2. Зависимость $\alpha = f(Q)$ для р. Западной Двины у г. Витебска.

Масса растворенных веществ (сухого остатка) в единице объема называется минерализацией воды и выражается формулой (23.3)

$$\alpha = \frac{p_c \cdot 10^6}{V},$$

где α — минерализация в г/м³ или в мг/л; p_c — сухой остаток в граммах; V — объем взятой пробы воды в миллилитрах.

Определив минерализацию воды α и полагая ее одинаковой для всей площади живого сечения, секундный расход растворенных веществ можно определить по формуле

$$S = \frac{\alpha Q}{10^3}, \qquad (28.1)$$

где S — расход растворенных веществ в кг/с; α — минерализация в г/м³; Q — расход воды в день взятия пробы в м³/с.

Ежедневные расходы растворенных веществ определяются с помощью совмещенного хронологического графика ежедневных расходов воды и значений минерализации (см. рис. 23.4). На этот же график полезно нанести вычисленные расходы растворенных веществ.

Пользуясь указанным графиком, ежедневные расходы растворенных веществ определяют по интерполяции. При наличии достаточного количества проб полезно сделать попытку установить связь $\alpha=f(Q)$ или $S=f(Q)$, т. е. минерализации (рис. 28.2) или расходов растворенных веществ с расходами воды. Если связь $\alpha=f(Q)$ или $S=f(Q)$ будет достаточно тесной, то нетрудно определить значения ежедневных расходов растворенных веществ.

Результаты вычислений записывают в годовую таблицу ежедневных расходов растворенных веществ, где дополнительно вычисляют средние месячные значения расходов и средний годовой расход S_0, выбирают экстремные их значения за каждый месяц и год в целом и подсчитывают суммарный годовой сток растворенных веществ (химический сток) в тоннах

$$W_{р.в}=31{,}54\cdot 10^3 S_0. \qquad (28.2)$$

Пользуясь данными годовой таблицы, нетрудно построить гидрограф растворенных веществ $S=f(T)$.

В некоторых случаях представляет интерес сток отдельных ингредиентов ионного состава воды, например ионов SO_4'' и Cl'. Для вычисления ежедневных расходов и суммарного годового стока отдельных ионов можно применять указанные выше способы для подсчета суммарного их стока.

Для характеристики изменения содержания отдельных ингредиентов ионного состава воды реки или озера в течение года строят хронологические графики.

Раздел VIII

Специальные исследования и наблюдения

Глава 29

Измерение направлений течений

Изучение направлений течений в реках имеет важное значение при исследовании русловых процессов, проектирования выправительных работ для улучшения судоходных условий, строительстве мостов и гидротехнических сооружений. Большое научное и практическое значение имеет изучение течений в озерах и водохранилищах.

Направления и скорости течения измеряются в поверхностных и глубинных слоях воды.

В зависимости от поставленных задач и местных условий направление течения может измеряться в отдельных точках, на отдельных вертикалях, на одном или ряде створов.

Изучение направления поверхностных течений можно проводить с помощью поверхностных поплавков; направление глубинных течений — при помощи двойных привязных и глубинных поплавков; направление течения в отдельных точках живого сечения — при помощи специальных приборов: измерителя течений ГР-42, морской вертушки ВМ-М, самописца течений БПВ-2р и др.

29.1. Измерение направлений и скоростей течений поплавками

Направление поверхностных течений достаточно точно (в условиях безветренной погоды) может быть определено посредством поверхностных поплавков.

Вдоль участка, предназначенного для изучения течений, на наиболее открытом и удобном для работ берегу разбивают магистраль и перпендикулярно к ней (с помощью теодолита) — поперечные створы.

Расстояние l между створами назначают из соотношения $l = (20 \div 50) v_{макс}$, где $v_{макс}$ — максимальная скорость течения на участке.

Створы закрепляют на магистральном берегу двумя вехами, а на противоположном — одной вехой.

На реках шириной до 50 м рекомендуется для упрощения работы иметь на створах тросы, размеченные через 1 м.

Для определения направления течений производят следующие работы:

1) в 5—10 м выше пускового створа равномерно по ширине реки забрасывают последовательно 15—30 поплавков;

2) по сигналам наблюдателей определяют засечками на мензуле (или отсчетами по размеченным тросам) место пересечения поплавками каждого створа;

3) отсчитывают по секундомеру время в секундах, затраченное каждым поплавком на прохождение пути между первым (верхним) и последним (нижним) створами, а также записывают время пересечения поплавком каждого створа.

Если наблюдения за поплавками велись посредством мензулы с кипрегелем, то обработка состоит в следующем:

1) на плане участка реки наносят траектории движения поплавков согласно произведенным засечкам их на створах;

2) вычисляют скорости движения отдельных поплавков на исследуемом участке и наносят на план.

Если съемку участка реки и засечки поплавков производили теодолитом, то составляют план участка реки и вычисляют по измеренным углам и расстояниям положения точек пересечения поплавками линий створов. Дальнейшая обработка ведется, как указано выше.

Для отдельных створов при надобности строят векторы скоростей течения. Длина вектора определяется скоростью движения поплавка и относится к точке пересечения им створа. Направление вектора устанавливается по касательной к траектории поплавка на данном участке.

Применяют так называемый одноточечный способ засечки поплавков с помощью теодолита, устанавливаемого в одной точке на высоком берегу или на вышке, откуда виден весь участок. Теодолитом засекают последовательно запускаемые поплавки на всем пути движения их на исследуемом участке реки. При каждой засечке поплавка измеряют горизонтальный и вертикальный углы и берут отсчет по секундомеру (рис. 29.1). Затем вычисляют горизонтальное расстояние от вышки до поплавка по формуле

$$l = \frac{h}{\operatorname{tg}\alpha \pm I \sin\varphi}, \qquad (29.1)$$

где h — высота теодолита над уровнем воды; α — вертикальный угол; I — продольный уклон водной поверхности; φ — горизонтальный угол между створом и направлением на поплавок.

При малых уклонах ($I<0{,}0005$) величину $I \sin\varphi$ не учитывают. Накладку на план точек засечек поплавков делают в полярных координатах по горизонтальному углу φ и расстоянию l.

По наложенным точкам проводят траектории поплавков, у каждой засечки проставляют время — отсчет по секундомеру.

На озерах и водохранилищах измерения скоростей и направлений течений можно производить с помощью двойных привязных поплавков. Они представляют собой два сосуда в виде цилиндрических ведер диаметром 26 см и высотой 23 см, изготовленных из листового металла (рис. 29.2). Верхний сосуд имеет

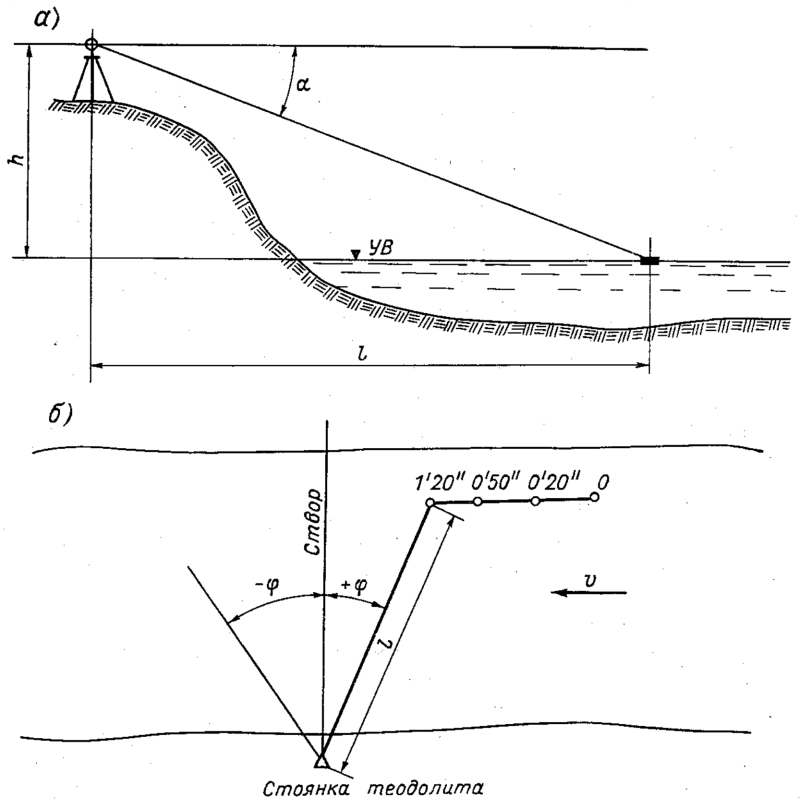


Рис. 29.1. Схема засечек поплавков теодолитом.
а — разрез, *б* — план.

вид бидона с горловиной, закрывающейся пробкой. Для лучшей видимости коническая, выступающая из воды верхняя часть сосуда окрашивается в яркий цвет и на ней укрепляется флажок.

Нижний сосуд представляет собой открытое ведро с дужкой, подвешиваемое на тросе к нижней дужке верхнего.

К верхней дужке верхнего сосуда прикрепляют размеченный через 1 м нетонущий линь длиной до 200 м.

При измерении течения в поверхностном слое воды расстояние от верха верхнего сосуда до середины нижнего делается минимальным. При измерении глубинного течения расстояние должно быть равным глубине, на которой определяется течение.

Загружать нижний сосуд обязательно, так как иначе он отклоняется течением вверх. Окончательного уравновешивания всей системы достигают, наливая необходимое количество воды в верхний сосуд. При определении глубинного течения необходимо иметь два поплавка: один для определения поверхностного течения, а другой — для глубинного.

Для наблюдений судно устанавливают на якоря, поплавки спускают за борт, свободно выпуская линь, пока марка, обозначающая начало разметки линя, не выйдет за борт, и в этот момент пускают в ход секундомер, продолжая травить линь. При значительных скоростях течения травится почти весь размеченный линь (150—200 м), а при слабых наблюдения прекращают через 5—7 мин. В конце наблюдения линь задерживают, останавливают секундомер, быстро выбирают слабину линя, подводят компас, по которому отсчитывают угол (азимут) на поплавок с точностью до 1°. Одновременно определяют длину вытравленного линя с точностью до 0,1 м. Скорость течения получается делением длины вытравленного линя (с учетом поправки) на продолжительность наблюдения. Направление течения определяется прибавле-

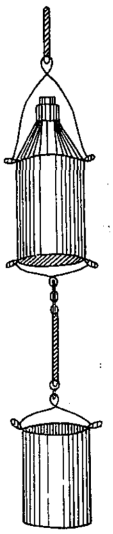


Рис. 29.2. Двойной привязной поплавок.

нием к отсчету по компасу поправки на склонение; западное склонение вычитают, восточное прибавляют.

При определении направления и скорости течения на глубине необходимо учитывать влияние на глубинный поплавок поверхностного течения.

Для измерения действительной скорости $v_г$ на глубине погружения нижнего поплавка необходимо произвести одновременно измерение направления и скорости движения $v_д$ двойного поплавка и параллельно с ним направления и значения поверхностной скорости $v_п$ одним поверхностным поплавком.

Если направления течений в поверхностном слое и на глубине нижнего поплавка совпадают, то скорость движения двойного поплавка равна полусумме скоростей поверхностного и нижнего (глубинного) поплавков, которые определяются непосредственными измерениями

$$v_д = \frac{v_п + v_г}{2}, \qquad (29.2)$$

откуда скорость на глубине нижнего поплавка определится из соотношения

$$v_г = 2v_д - v_п. \qquad (29.3)$$

Если направления поверхностного и глубинного течений не совпадают, то скорость двойного поплавка принимается равной геометрической полусумме поверхностной и глубинной скоростей течения:

$$\bar{v}_д = \frac{\bar{v}_п + \bar{v}_г}{2} \qquad (29.4)$$

и

$$\bar{v}_г = 2\bar{v}_д - \bar{v}_п. \qquad (29.5)$$

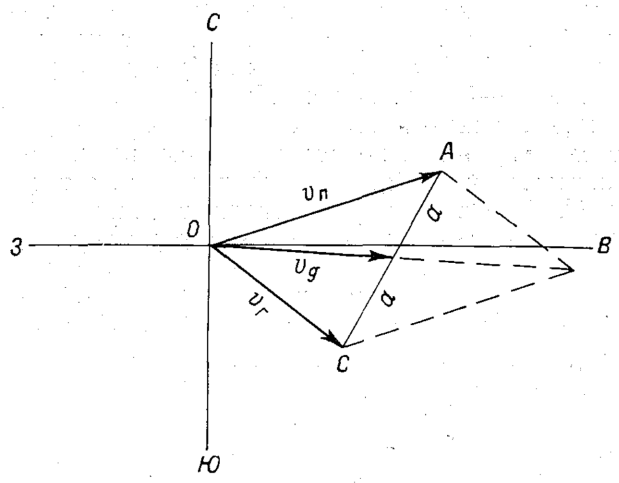


Рис. 29.3. Графическое определение скорости и направления глубинного течения.

Значение и направление глубинной скорости находят графически, для чего в определенном масштабе на бумаге проводят вектор поверхностной скорости, направление его точно накладывают по транспортиру; из этой же точки проводят вектор, соответствующий значению и направлению скорости двойного поплавка. Концы векторов соединяют прямой линией, на продолжении которой откладывают отрезок, равный расстоянию между концами векторов. Соединяя полученную точку с точкой 0, прочерчивают линию 0С, которая в принятом масштабе выражает значение и направление скорости на глубине нижнего поплавка (рис. 29.3).

29.2. Измерение направлений и скоростей течений приборами

Измеритель течений ГР-42 (рис. 29.4) разработан в ГГИ под руководством П. Н. Бурцева. Предназначается для измерений скоростей и направлений течений в озерах, водохранилищах и реках. Прибор опускается в собранном виде с заякоренного судна на тросе при помощи лебедки; рассчитан на применение при глубинах погружения до 30 м. Скорость и направление течения определяются в отдельных точках скоростных вертикалей.

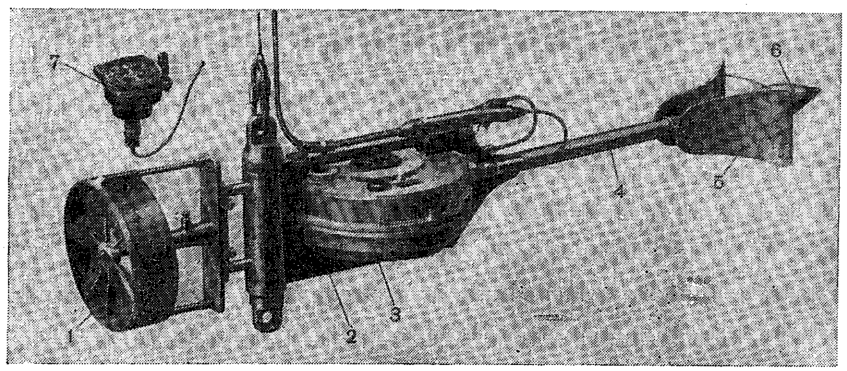


Рис. 29.4. Измеритель течений ГР-42.

1 — вертушка ГР-42; *2* — рама; *3* — датчик ПДК-3; *4* — штанга; *5* — стабилизатор направления; *6* — поплавок; *7* — указатель направления (лагометр).

Для измерения скорости течения служит специальная гидрометрическая вертушка с диапазоном измерения от 0,02 до 0,70 м/с и замыканием контактов через один оборот лопастного винта; при скоростях больше указанного предела она заменяется вертушкой ГР-21 или ГР-55.

Для измерения направления течения применяется потенциометрический дистанционный компас ПДК-3. Магнитная стрелка компаса устанавливается по направлению магнитного меридиана. В компасе имеется потенциометрическая система, позволяющая непрерывно следить за положением прибора относительно магнитного меридиана. Отсчеты направления течения берутся по магнитоэлектрическому лагометру, находящемуся на борту судна. Показания лагометра дают азимут направления течения.

Датчики прибора соединяются с источниками питания и указателями, расположенными на борту, с помощью шестижильного кабеля. Для питания цепи указателя направления служит батарея гальванических элементов напряжением 27 В, помещенная в отдельном ящике. Для питания сигнальной цепи

вертушки используется другая батарея гальванических элементов напряжением 3 В. Сигналы вертушки принимаются на звонок, но может быть применен импульсный счетчик.

Достоинством измерителя течений ГР-42 является дистанционность и возможность наблюдения за пульсацией скорости и направления течения.

Точность измерений скорости и направления течений прибором ГР-42 зависит от условий его применения. Полевые и лабораторные (в тарировочном канале) испытания прибора показали, что при измерении с заякоренных судов при волнении точность определения скорости характеризуется вероятной погрешностью ±(3—5) см/с, а направления течения ±(10—30)°. При отсутствии волнения скорость может быть измерена с погрешностью ±(2—3) см/с, а направление течения ±(5—10)°.

При сильных течениях для предотвращения относа прибора к нему подвешивают груз, входящий в комплект.

Результаты измерений скоростей и направлений течений обычно представляют в виде плана участка реки, озера или водохранилища с показанием створов и вертикалей; значения и направления скоростей показывают в виде векторов. На каждой вертикали показывают векторы поверхностного и глубинного течений, обозначая их различными условными знаками или различным цветом.

Печатающий самописец течений БПВ-2р (рис. 29.5). Применяется для измерений скоростей и направлений течений в морях, озерах и водохранилищах, но также может применяться и на больших реках. Рассчитан на глубину погружения до 250 м.

Самописец БПВ-2р является автономным прибором, т. е. может действовать без присмотра, будучи установленным на заякоренном буе. Продолжительность непрерывной автономной работы прибора при регистрации скоростей и направлений течений через каждые 60 мин — 54,5 суток; автоматическая регистрация указанных параметров может производиться прибором также через 5, 10, 15, 20, 30 мин — требуемый интервал времени задается с помощью управляющего диска в механизме самописца. При указанных интервалах продолжительность автономной работы прибора соответственно сокращается. Измеряемые величины печатаются на бумажной ленте шириной 1 см в виде готовых (не требующих обработки) значений скорости и направления течения; скорость считывается с ленты с точностью до 1 см/с, направление течения — до 5°. Диапазон измерения скорости от 0,03 до 1,48 м/с. Для измерения скорости в приборе применен четырехлопастный пластмассовый ротор с вертикальной осью, вращение которого передается регистрирующему механизму посредством магнитной муфты сцепления. Для измерения направления течения используется магнитный компас. Регистрирующий механизм приводится в действие двумя

заводными пружинами. От одного завода пружин на ленте регистрируется до 1440 замеров скорости и направления течения.

Регистрирующий механизм самописца смонтирован в цилиндрическом кожухе, устанавливаемом в корпусе прибора. На верхнем торце кожуха имеется шкала поправок на склонение

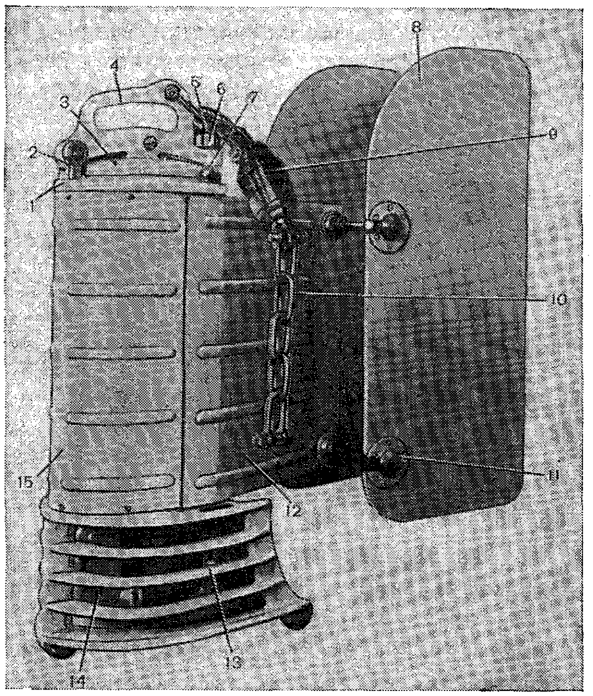


Рис. 29.5. Печатающий самописец течений БПВ-2р.

1 — корпус; *2* — тяга с талрепом; *3* — крышка; *4* — ручка прибора; *5* — откидной болт; *6* — гайка; *7* — шпилька; *8* — рулевая пластина; *9* — вертлюг; *10* — цепь подвеса; *11* — держатель; *12* — тыльный обтекатель; *13* — ограждение крылатки; *14* — ротор-крылатка; *15* — лобовой обтекатель.

магнитной стрелки, по которой заранее устанавливается поправка на склонение, в результате чего на ленте получается запись направлений течений в азимутах с поправкой на склонение. Скорость течения регистрируется с осреднением за время около 4 мин независимо от выбранного интервала времени между измерениями, что достигается с помощью счетно-решающего устройства в механизме прибора.

Самописец БПВ-2р может применяться не только как автономный прибор, но и с заякоренных судов на тросе, при этом для опускания его на заданные глубины используется лебедка.

Если самописец применяется в качестве автономного прибора, то перед установкой его в точку измерения необходимо особенно тщательно проверить и отрегулировать действие механизма (в соответствии с инструкцией по эксплуатации), так как отказ в работе может вызвать непроизводительную потерю времени.

Комплект самописца БПВ-2р укладывается в один ящик; полный вес комплекта 49 кг, вес самописца 29 кг.

Морская вертушка ВМ. Эта вертушка (рис. 29.6) предназначена для определения скорости и направления течения на

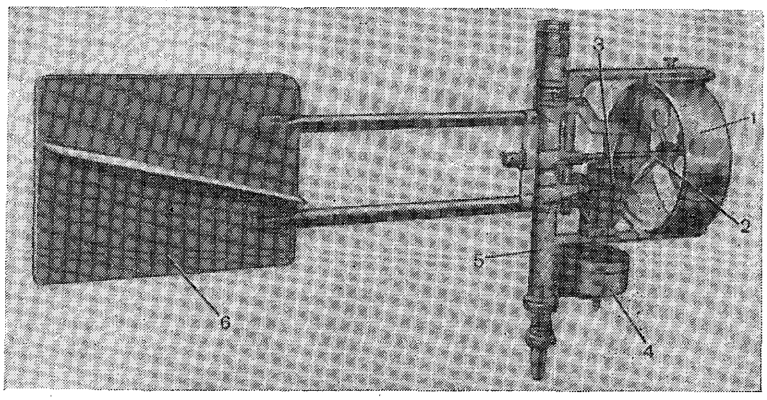


Рис. 29.6. Морская вертушка ВМ.

1 — защитное кольцо; *2* — лопастное устройство; *3* — счетный механизм; *4* — компасная коробка; *5* — корпус; *6* — стабилизатор направления.

морях, но ею можно пользоваться для этих же целей на озерах и водохранилищах, а также на реках при глубинах более 1,5—2 м.

Основные части вертушки: корпус, лопастный винт (крылатка), счетный механизм, компасная коробка, стабилизатор направления и защитное латунное кольцо.

Число оборотов лопастного винта регистрируется счетчиком оборотов, представляющим собой прямоугольную коробку (рис. 29.7) с помещенными в ней тремя шестеренками *1*, на осях которых с лицевой стороны счетчика насажены стрелки-указатели числа оборотов. Верхний указатель служит для отсчета единиц и десятков оборотов лопастного винта, средний — для отсчета сотен (до 1000) и нижний — для отсчета оборотов до 10 000.

Зубцы верхней шестеренки выступают из коробки и могут быть присоединены к червячной нарезке *2* оси лопастного винта или отключены от нее с помощью подключающего механизма. Этот механизм предварительно заводится на два зубца с помощью ручки, имеющейся на его барабане, а включение и выклю-

чение счетчика производится ударами посыльных грузов по головке на верхнем конце вертикальной оси корпуса вертушки.

Компасная коробка *3* разделена перегородками *4* на 36 секторов, пронумерованных от 0 до 36. Угол каждого сектора равен 10°. Нулевой сектор расположен против стабилизатора направления; к лопастному винту обращен 18-й сектор.

В центре коробки укреплена игла *5*, на которой вращается магнитная стрелка *6*, имеющая в центре чашечку, соединенную с продольным желобком, идущим по северной половине стрелки.

Направление течения определяется по бронзовым шарикам, падающим в коробку из трубочки *7*, укрепленной над счетным механизмом.

При помощи особой трубки («брала») берут 20—23 шарика и засыпают их в трубку над счетным механизмом. При вращении лопастного винта вертушки шарики проходят через счетный механизм (три шарика на 100 оборотов), падают в компасную коробку через отверстие в ее крышке, попадают в чашечку магнитной стрелки и скатываются по наклонному желобку ее северного конца в секторы коробки. Шарики всегда скатываются в направлении на север, но так как компасная коробка поворачивается вместе с вертушкой по направлению течения, то шарики падают каждый раз в различные секторы.

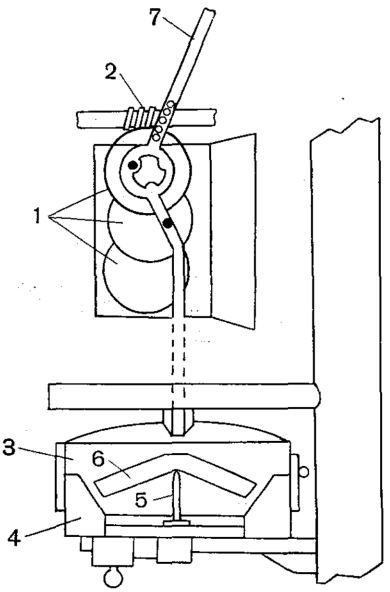


Рис. 29.7. Схема счетного механизма и компасной коробки морской вертушки.

Азимут направления течения отсчитывается от северного конца стрелки, т. е. от сектора, в который попали шарики, до нулевого сектора (рис. 29.8). Обработка результатов измерения направления течения поясняется примерами, приводимыми ниже.

Вертушка подвешивается на тросе. На нижнем конце оси вертушки имеется ушко для прикрепления груза при сильных течениях.

Модернизированная морская вертушка ВММ от описанной выше отличается следующим:

1) измененной системой подвески, имеющей вид втулки, в отверстие которой вводится огон троса, закрепляемый специальным винтом;

2) наличием откидной планки, которая позволяет снимать лопастный винт с осью, что важно для предохранения цапф винта при перевозках;

3) наличием двух лопастных винтов, позволяющих работать при больших и малых скоростях течения (начальные скорости винтов 0,045 и 0,02 м/с);

4) наличием арретира, укрепленного на верхней части рамы корпуса, который удерживает лопастный винт от вращения вхолостую;

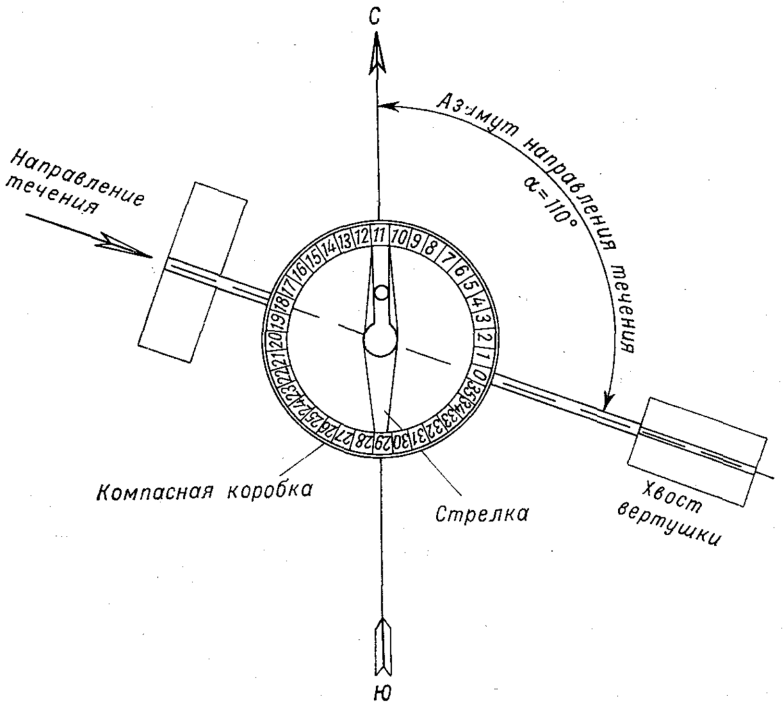


Рис. 29.8. Схема отсчета направления течения по компасной коробке.

5) наклонной (съемной) плоскостью стабилизатора; при волнении она заменяется запасной с меньшей площадью и дополнительным грузом для балансировки вертушки.

К недостаткам морской вертушки следует отнести отсутствие дистанционности измерений — для отсчетов по счетчику и компасной коробке ее надо вынимать из воды, а также ненадежную работу в загрязненной и содержащей наносы воде.

Направления и скорости течения измеряются в отдельных точках на вертикалях. Судно на вертикалях закрепляют на якорях. Вертушку медленно опускают на заданную глубину во избежание сброса магнитной стрелки с острия токами воды,

проникающей в коробку. Выжидают 1—2 мин, пока вертушка развернется по направлению течения, а магнитная стрелка установится по направлению меридиана. Затем по тросу пускают посыльный груз, и в момент его удара о головку вертушки включают секундомер. Продолжительность наблюдения в точке назначается в зависимости от скорости течения по табл. 29.1.

Таблица 29.1

Скорость течения, м/с	<0,20	0,20—0,35	0,35—0,75	>0,75
Продолжительность наблюдения, мин	20	10	5	2,5

Число выпавших в коробку шариков за время наблюдения должно быть не менее 10 и не более 18—20. По истечении срока наблюдения пускают второй посыльный груз; секундомер останавливают в момент удара груза о головку вертушки. Вертушку поднимают на поверхность, берут отсчет по счетчику оборотов и записывают в книжку. Снимают с вертушки компасную коробку, открывают и, сняв магнитную стрелку с иглы, записывают номера секторов, в которых есть шарики, и их количество в секторах.

Обработка результатов наблюдений начинается с критического просмотра записей; затем сопоставляют число заряженных и выпавших шариков, а также число оборотов лопастного винта с числом выпавших в компасную коробку шариков, исходя из соотношения, что на 33—34 оборота выпадает один шарик.

Для вычисления средней скорости течения необходимо определить разность между конечным и начальным показаниями счетчика, что дает общее число N оборотов лопастного винта за время наблюдений t. Число оборотов винта в секунду определяют из соотношения $n=N/t$. Затем по тарировочной таблице определяют скорость течения.

Для определения среднего магнитного азимута направления течения находят угол разброса шариков — он равен разности крайних номеров секторов, умноженной на 10°. Если угол разброса шариков меньше угла $30°+4m$ (где m — общее число выпавших шариков), то применяют арифметический способ вычисления азимута, в противном случае — геометрический способ. Вычисление среднего азимута рассмотрим на примере.

Пример. В компасную коробку выпало 20 шариков с распределением их по секторам 2_2, 3_6, 4_7, 5_5. Угол разброса шариков равен $(5-2)\cdot 10=30°$; этот угол меньше $30°+4\cdot 20=110°$. Применяем арифметический способ вычисления по формуле

$$\alpha = \frac{N'n_1 + N''n_2 + \ldots + N^n n_n}{m} \cdot 10°, \qquad (29.6)$$

где α — искомый азимут направления течения; $N' \ldots N^n$ — номера секторов, в которые выпали шарики; $n_1, \ldots, n_n$ — количество шариков в секторах; m — общее количество выпавших шариков.

Подставляя значения, получим

$$\alpha = \frac{2\cdot 2 + 3\cdot 6 + 4\cdot 7 + 5\cdot 5}{20} \cdot 10° = 37°30'.$$

Истинный азимут течения определяют введением поправки на склонение: восточное склонение прибавляют к магнитному азимуту, западное — вычитают.

Геометрический способ определения направления и скорости течения заключается в графическом построении и суммировании векторов скоростей. Длина каждого вектора определяется числом шариков, выпавших в данный сектор, а направление — углом, соответствующим номеру сектора. Суммарный вектор выражает среднее направление течения. Истинная скорость v определяется из соотношения

$$v = v_0 \frac{l}{m}, \qquad (29.7)$$

где v_0 — скорость по показанию счетчика; l — длина суммарного вектора в масштабе графика; m — общее количество выпавших шариков.

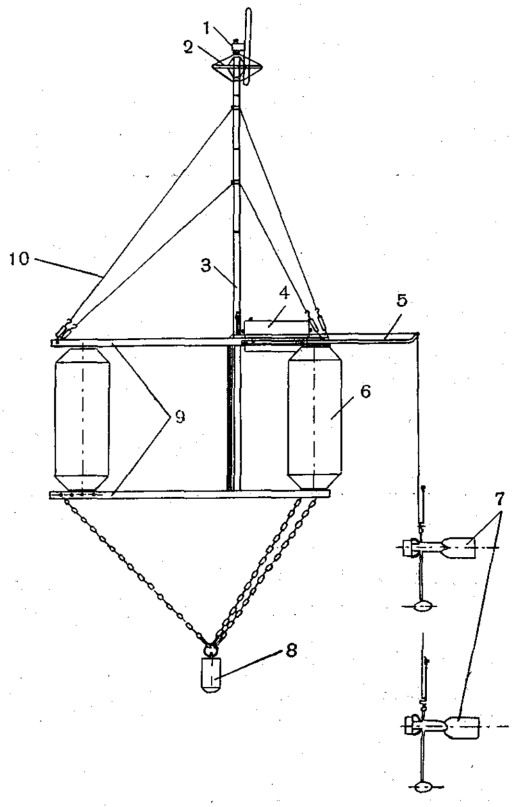


Рис. 29.9. Радиоизмеритель течений ГМ-33.

1 — передатчик; *2* — защитное устройство; *3* — мачта; *4* — контейнер; *5* — подвеска датчиков; *6* — поплавки; *7* — датчики (вертушки); *8* — груз; *9* — рама; *10* — растяжки.

Радиоизмеритель течений ГМ-33 предназначен для измерения направлений и скоростей течений в морях на глубинах до 200 м, но может применяться и на крупных водохранилищах и озерах. Устанавливается на специальном автономном заякоренном радиобуе. Для измерений направлений и скоростей течений применена вертушка с магнитной системой, устанавливающейся по магнитному меридиану. Вращение ротора вертушки и изменения направления продольной оси вертушки

относительно магнитной рамки под действием течения преобразуются в электрические импульсы с последующим преобразованием их в сигналы радиопередатчика. К бую подвешиваются две вертушки на различных глубинах (рис. 29.9). Скорость течения измеряется в диапазоне от 0,03 до 3,00 м/с с точностью ±(2 см/с+3% измеряемой величины); направление течения регистрируется с точностью ±10°. Дальность действия радиосигнала до 30 км.

Передатчик радиобуя работает в ультракоротковолновом диапазоне. Сигналы принимаются приемным устройством с поворотной антенной и регистрируются на телеграфной ленте. Скорости и направление течений определяются по частоте и взаиморасположению записанных на ленте сигналов.

Длительность автономной работы радиобуя до 30 суток.

Глава 30

Наблюдения за температурой, цветом и прозрачностью воды

30.1. Наблюдения за температурой воды

Наблюдения за температурой воды производятся на всех гидрологических станциях и постах, на которых ведутся наблюдения за уровнем, и включают:

1) систематические ежедневные измерения температуры воды в постоянном месте — в прибрежной зоне или на стрежне реки;

2) эпизодические синхронные измерения температуры воды в нескольких точках по длине и ширине реки.

Место для измерения температуры воды в реках выбирается в створе или вблизи водомерного поста в прибрежной части на проточном месте с глубиной по возможности не менее 0,3—0,5 м. К месту измерений не должны подходить струи родниковых или сбросы промышленных вод. Температура воды в месте измерения должна мало отличаться от средней температуры воды во всем водном сечении и по длине реки на участке поста. Соблюдение этого условия проверяют путем эпизодических синхронных измерений.

При ширине реки менее 10 м измерения температуры воды производят на стрежне, а при малых глубинах — в самом глубоком проточном месте реки.

Температуру воды измеряют водным термометром (рис. 30.1 *а*) с точностью до 0,1°С.

Микротермометр (рис. 30.1 *б*) позволяет отсчитывать значения температуры воды с точностью до 0,01°С в диапазоне от —0,8 до +1,2°С. Используется на шугоносных реках

в переходные периоды, осенью и весной, при температуре воды, близкой к нулю.

Для измерения температуры воды с повышенной точностью применяют также микроэлектротермометр (рис. 30.2), имеющий диапазон измерения от —0,2 до +1,60°С и точность отсчета по шкале 0,01°С.

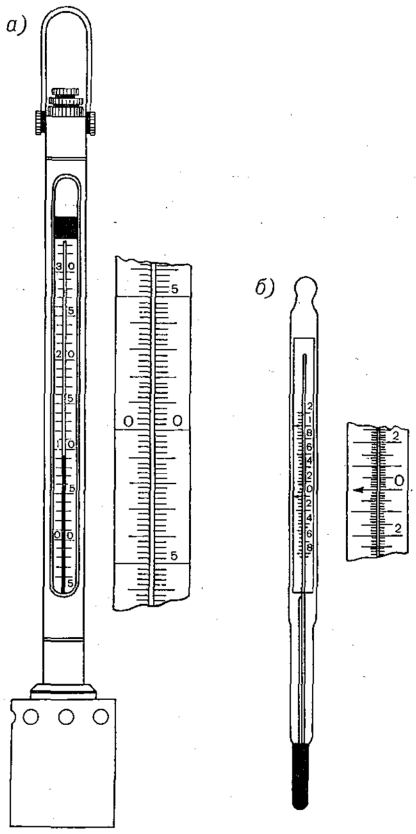


Рис. 30.1. Ртутные термометры для измерения температуры воды.

а — водный термометр в оправе; *б* — микротермометр (без оправы).

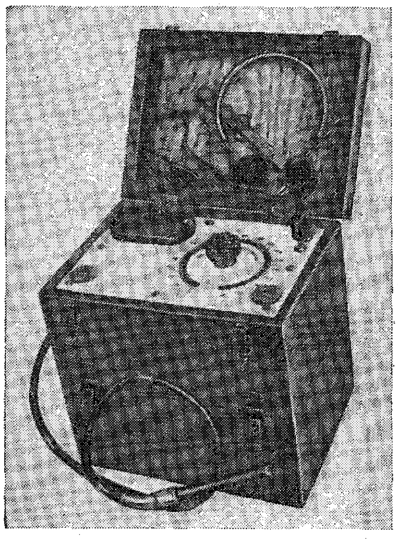


Рис. 30.2. Микроэлектротермометр.

Прибор состоит из датчика, укрепленного на конце трехжильного кабеля длиной 12 м, и основного прибора с измерительной частью. Датчик состоит из двух сопротивлений — медной и манганиновой проволок, намотанных бифилярно и заключенных в тонкостенный металлический кожух. Медная проволока используется в качестве термочувствительного элемента, манганиновая проволока имеет приблизительно постоянное сопротивление. Основной прибор состоит из деревянного ящика, на панели которого находится кнопка включения питания, ручка реохорда с указателем, шкала реохорда, клеммы для подключения кабеля и наушников. На внутренней стороне панели выполнен монтаж измерительной части прибора.

Изменение электрического сопротивления медной проволоки, происходящее при изменении температуры, измеряется по методу равновесного электроизмерительного моста. Датчик образует два плеча моста, другие два плеча находятся в измерительной части прибора. Переменной частью этих сопротивлений является круговой реохорд. Балансировка моста производится вращением рукоятки прибора, при этом движок перемещается по реохорду. В качестве индикатора баланса плеч моста применены телефонные наушники. При затухании звука в них берут отсчет по шкале реохорда. Для питания моста в приборе имеется полупроводниковый генератор звуковой частоты.

Для измерения температуры датчик погружают в воду на заданную глубину и выдерживают в течение 4—5 мин. Затем, вращая ручку реохорда, добиваются исчезновения звука в наушниках и берут отсчет по шкале. Значение температуры получают по тарировочной таблице.

В состав первичной обработки входит:

1) введение в отсчеты инструментальных поправок;

2) вычисление средних суточных значений температуры воды по данным измерений в 8 и 20 часов (для систематических ежедневных измерений);

3) вычисление средних декадных и выборка наибольших за месяц значений температуры воды.

На гидрологической станции ежемесячно проверяют первичную обработку результатов наблюдений и дополнительно выполняют:

1) построение графика хронологического хода изменения средних суточных температур воды на комплексном графике;

2) анализ результатов наблюдений;

3) составление таблицы «Температура воды» для гидрологического ежегодника.

По данным измерений температуры воды может быть вычислен тепловой сток, т. е. количество тепла, проносимого рекой через створ. Количество тепла T (тепловой расход) в килокалориях, проносимое в одну секунду через створ при расходе воды Q м^3/с и при температуре воды t_i, равно

$$T = Ct_iQ. \qquad (30.1)$$

где C — удельная объемная теплоемкость воды, равная 1000 ккал/(м^3·°С). В системе СИ удельная теплоемость воды принимается равной 4190 кДж/(м^3·°С).

Для большинства рек значение температуры воды t_i в приведенной формуле можно принять равным значению температуры воды, измеряемой на посту в постоянной точке (обычно прибрежной). Для отдельных больших рек, где температура воды в постоянной точке у берега существенно отличается от температуры воды на стрежне (Енисей в нижнем течении, Ангара, Лена и др.), в приведенную формулу следует дополнительно ввести коэффициент K, равный отношению температуры воды, измеренной в постоянной точке наблюдений, к средней температуре воды по всему живому сечению реки. Значение

коэффициента K определяется в этих случаях путем организации специальных исследований в различные сезоны года с выполнением температурных разрезов.

При изучении термического режима озер и водохранилищ температура воды измеряется как на поверхности, так и в глубинных слоях. Температуру воды на поверхности измеряют в пункте наблюдений, выбираемом у приглубого берега в месте, имеющем свободный водообмен с глубоководной частью водоема. Измерение производят термометром в оправе на глубине 0,1 м от поверхности.

Температуру воды в глубинных слоях измеряют на рейдовых вертикалях или вертикалях гидрологических разрезов, на которых, кроме того, ведут наблюдения за цветом и прозрачностью воды, химическим составом, течениями, а в зимний период — также за толщиной и строением льда. Температуру воды измеряют на определенных горизонтах, положение которых по глубине определяют в зависимости от глубины вертикали и от разности температур воды у поверхности и у дна.

При назначении горизонтов измерения температуры необходимо стремиться к достаточному освещению области с наибольшим градиентом температуры — слоя температурного скачка. Для этого производят дополнительное измерение температуры в двух-трех точках в области наибольшего изменения температуры по глубине.

Систематические стационарные наблюдения за температурой воды на глубинах производят на одной или нескольких вертикалях, а при специальных исследованиях — по ряду створов (разрезов) с несколькими вертикалями на каждом створе.

Полевой гидрологический электротермометр ГР-41М применяется для измерения температуры воды в глубинных слоях; диапазон измерений от —1 до +35°С, точность отсчета по шкале 0,1°С. Датчик термометра укреплен на конце трехжильного кабеля длиной 45 м. Электрическая схема и принцип действия прибора такие же, как и микроэлектротермометра. Для измерения температуры электротермометр устанавливают и закрепляют на судне. Датчик вставляют в специальный зажим, укрепляют на тросе лебедки, при надобности снизу присоединяют гидрометрический груз и погружают на заданную глубину. Через 4—5 мин, надев наушники, нажимают кнопку включения питания, и, вращая ручку реохорда, добиваются исчезновения звука в них; после этого берут отсчет температуры по шкале.

Электротермометр ГР-41М является сетевым прибором и выпускается заводами Гидрометслужбы. Следует отметить некоторые недостатки прибора. К ним относится большая инерционность датчика (что свойственно электротермометрам сопротивления), большой вес и размеры, неудобство работы с наушниками при морозе.

Термисторные[1] термометры не обладают отмеченными недостатками, но выпуск их для гидрологических работ промышленностью пока не налажен. Отдельные организации изготовляют их своими силами и с успехом применяют. Основными достоинствами термисторных термометров являются весьма малая тепловая инерция и малый вес.

Для измерения температуры воды на больших глубинах, например на крупных озерах и водохранилищах, где невозможно использовать электротермометр ГР-41М ввиду недостаточной длины кабеля, применяют глубоководные опрокидывающиеся термометры.

Глубоководный опрокидывающийся термометр (рис. 30.3 *а*) представляет собой стеклянный баллон, внутри которого укреплены два термометра — основной и добавочный. Для измерения температуры воды служит основной термометр. Добавочный термометр необходим для внесения поправки (редукционной) за счет изменения температуры воздуха внутри стеклянного баллона термометра, которое может произойти от момента измерения температуры воды (момент опрокидывания термометра) до момента отсчета температуры. Добавочный термометр расположен в перевернутом виде относительно основного и представляет собой обычный ртутный термометр с делениями через 0,5°С.

Ртутный резервуар основного термометра окружен ртутью, находящейся в нижней части стеклянного баллона, что необходимо для передачи температуры окружающей воды. При выходе из ртутного резервуара капилляр основного термометра имеет сужение и небольшой глухой отросток. В этом месте и происходит разрыв столбика ртути при опрокидывании термометра. Далее капилляр расширяется и образует завиток, затем капиллярная трубка прямолинейна, а в верхней части заканчивается расширением — приемником. Вдоль прямолинейной капиллярной трубки нанесена шкала. Объем приемника капилляра обозначается vol[2]; его величина проставляется на каждом термометре с обратной стороны и выражается в градусах. Знать его необходимо для определения редукционной поправки.

Термометры применяются в специальных рамах (рис. 30.3 *б*), устройство которых предусматривает возможность опрокидывания термометров вместе с рамой для отрыва столбика ртути в капилляре термометра.

В раме имеются две гильзы для термометров. Для большей точности измерения в обе гильзы вставляются термометры, а температура определяется путем осреднения их показаний.

Обычно на тросе укрепляют серию рам, располагая их на заданных глубинах. По истечении срока наблюдений (5—7 мин)

---

[1] Термистор — полупроводниковое термосопротивление.

[2] От латинского volumen — объем.

для отрыва столбика ртути в термометрах рамы опрокидываются посредством посыльного груза, пускаемого по тросу. Затем рамы поднимают на палубу, берут отсчеты по основному и дополнительному термометрам. Значение редукционной поправки к показаниям основного термометра определяется по

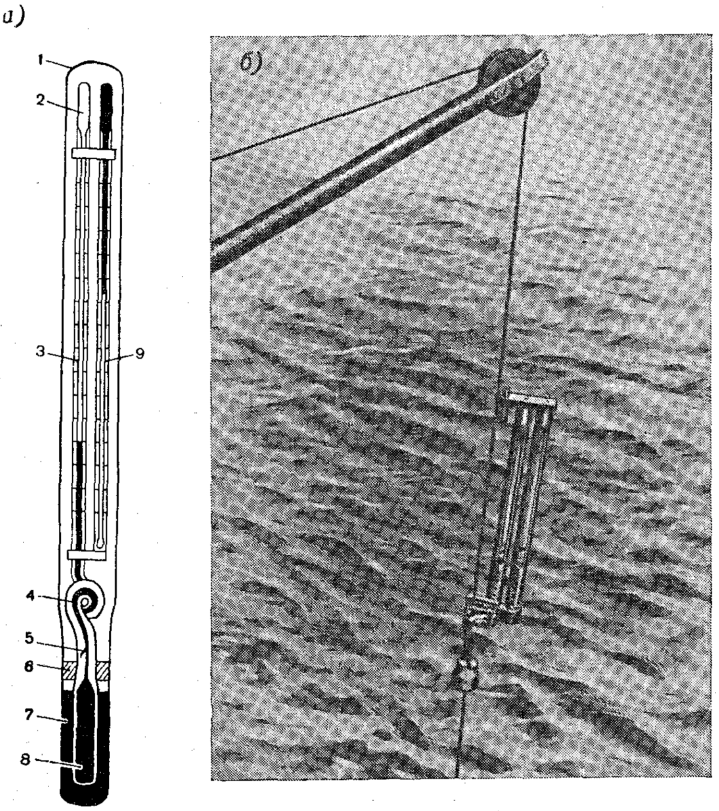


Рис. 30.3. Глубоководный опрокидывающийся термометр (а) и рама для него (б).

1 — стеклянный баллон; *2* — приемник капилляра; *3* — основной термометр; *4* — петлеобразный изгиб; *5* — глухой отросток; *6* — перегородка; *7* — ртуть; *8* — ртутный резервуар основного термометра; *9* — добавочный термометр.

специальным таблицам (см. «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 7, ч. 1).

Обработка результатов наблюдений за температурой воды на рейдовых вертикалях заключается в построении эпюр распределения температуры по глубине. За годовой цикл наблюдений составляют хронологический график изменения температуры воды на вертикали — график термоизоплет.

По данным измерений температуры воды на гидрологическом разрезе вычерчивают эпюры распределения температуры на каждой вертикали разреза, а на их основе вычерчивают на поперечном профиле изотермы — линии равных температур.

30.2. Определение прозрачности и цвета воды

Прозрачность воды определяют по погружаемому в воду стандартному диску (диск Секки), который представляет собой (рис. 30.4) металлический круг *1* диаметром 300 мм, в центре которого вставлена втулка *2* с пропущенным через нее линем *4* и грузом *3*, расположенным на нижней поверхности диска. Диск окрашен в ярко-белый цвет. Линь длиной 20—50 м размечается марками.

Прозрачность воды определяется с теневого борта судна. Диск медленно опускают в воду и, когда он

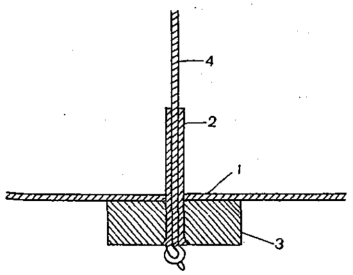


Рис. 30.4. Белый диск для определения прозрачности воды.

перестанет быть видимым, замечают по линю глубину его погружения. Затем травят линь еще на 1—2 м и, выждав 10—15 секунд, чтобы исчезло зрительное впечатление от диска, медленно выбирают линь до момента появления диска.

Отсчеты глубины погружения диска при исчезновении и появлении его производят с точностью до 0,1 м. Если разница между глубинами исчезновения и появления превосходит 0,5 м, то наблюдения необходимо повторить.

В книжке записи наблюдений необходимо указать высоту глаза наблюдателя над водой. Эта высота при рейдовых наблюдениях должна оставаться по возможности постоянной.

Цвет воды. Изучение цвета, как и прозрачности воды, в стационарных условиях ведется на постоянной вертикали, положение которой закрепляется буйком.

Цвет воды определяют сравнением его с набором стандартных растворов шкалы цветности воды. Шкала представляет собой набор из 21 пронумерованной и запаянной пробирки, наполненной цветными растворами. Эти растворы подобраны так, что создается постепенный переход между основными окрасками воды в озерах и водохранилищах — синей, зеленой и коричневой.

Пробирки с растворами заключены в две рамки, по 11 в каждой (рис. 30.5). Рамки вложены в ящик. В левой половине находятся пробирки с оттенками от синего (I) до зеленого (XI),

а в правой — с оттенками от зеленого (XI) до коричневого (XXI). Пробирка XI для удобства сопоставления повторяется дважды.

Растворы для шкалы приготовляют, смешивая в разных пропорциях растворы медного купороса и хромовокислого калия и прибавляя в определенных количествах сернокислый кобальт и аммиак. Шкала снабжается сертификатом, в котором указывается время проверки.

Цветные растворы шкалы через два-три года обесцвечиваются. Поэтому рекомендуется иметь две шкалы: одну — рабочую, по которой производят наблюдения, и вторую — эталон,

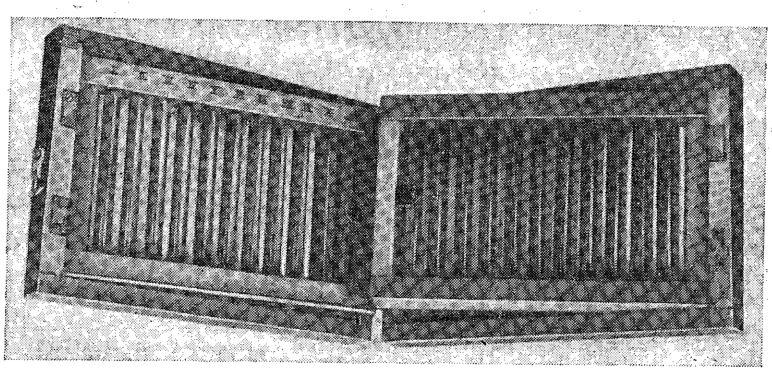


Рис. 30.5. Шкала для определения цвета воды.

которую употребляют для сравнения с рабочей шкалой и особенно тщательно защищают от света. Проверка рабочей шкалы заключается в сопоставлении ее со шкалой — эталоном. Наблюдения за цветом воды проводят одновременно с измерением ее прозрачности.

Для определения цвета воды белый диск поднимают на половину измеренной перед этим глубины прозрачности воды и сравнивают цвет воды над диском с цветом жидкости в пробирках, при этом шкала должна находиться в тени, а под пробирки следует положить лист белой бумаги. Номер пробирки с оттенком цвета, наиболее близко подходящим к цвету воды, записывают в книжку. Точное совпадение оттенков наблюдается не всегда. Если цвет воды подходит к двум соседним оттенкам шкалы, то записывают номера обеих пробирок.

Обработка материалов наблюдений за цветом и прозрачностью воды заключается в составлении месячных и годовых таблиц, а также в построении графиков годового хода этих элементов.

Глава 31

Наблюдения за ледовым режимом

Для изучения ледового режима гидрологические станции и посты проводят следующие наблюдения:

1) за ледовой обстановкой и условиями образования и разрушения льда в периоды замерзания и вскрытия водоема;

2) за ростом толщины ледяного покрова, характером его поверхности и ледовыми явлениями в период ледостава;

3) за образованием внутриводного льда, шуги и за шугоходом.

Кроме перечисленных, в программу могут включаться специальные исследования и наблюдения: исследование строения льда и его физических свойств, изучение влияния ледяных образований (зажоров, заторов и др.) на режим протекания воды в реках и вытекания воды из озер и водохранилищ, изучение режима полыней в нижних бьефах ГЭС и т. д. Программы и методики подобных исследований разрабатывают в каждом случае с учетом местных условий и технических возможностей.

31.1. Наблюдения за ледовой обстановкой и ледоходом

Наблюдения за ледовой обстановкой ведут на гидрологических станциях и постах в течение всего зимнего периода. Участок наблюдений назначают не менее трехкратной ширины реки. Желательно, чтобы на выбранном участке имелся плёс и перекат (для промерзающих рек это условие обязательно).

В зависимости от интенсивности развития ледяных образований и степени их изменчивости наблюдения ведут ежедневно или же раз в 3—5 дней. В периоды осеннего и весеннего ледоходов наблюдения за ледовой обстановкой проводят как в основные, так и в дополнительные сроки водомерных наблюдений, а в случае быстрой смены гидрометеорологических условий и ледовой обстановки — учащенно.

В состав наблюдений за ледовой обстановкой входит визуальная оценка ледовой обстановки и ее развития, а также картирование.

Визуальные наблюдения проводят для хронологического освещения развития ледяных образований и явлений на участке поста. При записи ледовой обстановки следует руководствоваться терминологией характерных ледяных образований и явлений ледового режима, принятой в системе Гидрометслужбы [32]. Если ледовая обстановка сложна и разнообразна, то, кроме описания, производят ее картирование на бланках плана участка реки. В этом случае ледовую обстановку показывают условными знаками (рис. 31.1).

При описании ледяных образований отмечают степень их развития. При наблюдении заберегов и закраин определяют на глаз их ширину у каждого берега.

При ледоходе оценивают его густоту в долях от единицы: за нуль принимается совершенно чистая поверхность воды, за единицу — поверхность реки, сплошь покрытая движущимся льдом.

Если лед проходит не по всей ширине реки, то отмечается густота ледохода в наблюдаемой его полосе и ширина полосы

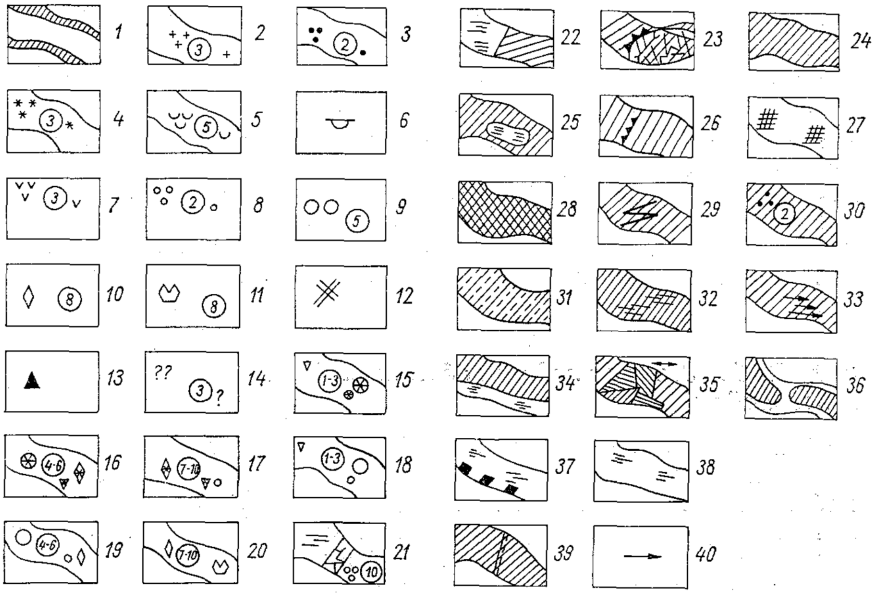


Рис. 31.1. Условные знаки для картирования ледовой обстановки: (цифры в кружке — количество баллов ледяных образований).

1 — забереги; *2* — снежура; *3* — сало; *4* — шуга; *5* — блинчатый лед; *6* — пятры; *7* — льдины 0,5—2 м; *8* — льдины 3—20 м; *9* — льдины 25—100 м; *10* — ледяные поля 100—500 м; *11* — ледяные поля свыше 500 м; *12* — ледяная каша; *13* — торос; *14* — лед неопределенной формы; *15* — редкий шугоход; *16* — средний шугоход; *17* — сплошной шугоход; *18* — редкий ледоход; *19* — средний ледоход; *20* — сплошной ледоход; *21* — ледяная перемычка; *22* — кромка льда; *23* — зажор или затор; *24* — ледяной покров; *25* — полынья; *26* — гряда торосов; *27* — наледь; *28* — река промерзла до дна; *29* — трещина во льду; *30* — снежница; *31* — наслуд; *32* — вода на льду; *33* — вода течет поверх льда; *34* — закраина; *35* — подвижка; *36* — разводье; *37* — навалы льда на берегу; *38* — чисто; *39* — проезжая дорога на ледяном покрове; *40* — направление течения.

относительно полной ширины реки. Например, запись «ледоход 0,7×0,3» означает, что лед густотой 0,7 шел полосой, занимая 0,3 ширины всей реки, а остальная ее часть была свободна ото льда. Произведение 0,7×0,3=0,21 дает суммарную характеристику явления и называется коэффициентом ледохода.

При картировании отмечают характеристику ледохода в баллах по 11-балльной системе. За нуль принимается свободная ото льда поверхность воды, за 10 баллов — сплошь покрытая

льдом. Один балл соответствует 0,1 коэффициента ледохода. Например, коэффициент ледохода 0,5 соответствует 5 баллам.

Если необходимо получить более точные характеристики густоты ледохода и степени покрытия реки льдом, последние определяются с помощью геодезических инструментов или аэрофотосъемки.

Большой практический интерес представляет расход льда, т. е. количество льда в кубических метрах, проходящего через данный створ в одну секунду. Для определения расхода льда измеряют скорость движения плывущих льдин и толщину льда. Скорость движения льдин находят по времени прохождения отдельными приметными льдинами расстояния между заранее разбитыми створами. Расстояние между створами устанавливают с таким расчетом, чтобы продолжительность хода льдин между створами была не меньше 8—10 секунд. Измерение скорости движения льдин производят с пяти—десятикратной повторностью в разных местах по ширине реки.

Толщину льдин определяют по пяти—десяти наиболее крупным льдинам, выжатым на берег.

Расход льда вычисляют по формуле

$$Q_л = khvB, \qquad (31.1)$$

где k — коэффициент ледохода, равный произведению густоты ледохода и степени покрытия реки льдом; h — средняя толщина льда в метрах; v — средняя скорость движения льда в м/с; B — ширина реки в метрах.

На основании отдельных определений расхода льда вычисляют средние суточные расходы, а затем и объем (сток) льда за период весеннего ледохода.

Для изучения состояния ледяного покрова крупных судоходных рек в периоды их вскрытия и замерзания, а также для изучения состояния льдов на озерах и водохранилищах проводят аэровизуальные наблюдения и аэрофотосъемку. Это позволяет в короткий срок выявить состояние и режим льдов на большом протяжении и получить практически синхронные материалы.

31.2. Измерение толщины льда и снега на льду

В состав наблюдений входят измерения: 1) высоты снега на льду, 2) общей толщины льда, 3) глубины погружения льда, 4) глубины погружения шуги, 5) высоты слоя воды на льду.

Толщину снежного покрова на льду измеряют переносной водомерной или снегомерной рекой.

Для измерения толщины льда в намеченных точках сверлят отверстия ледовым буром или пробивают лунки пешней.

Ледовый бур БЛ-47. В комплект его входит бур для сверления лунок (рис. 31.2 *б*) и рейка для измерения толщины льда (рис. 31.2 *а*). Сверло бура имеет форму двухзаходного винта

диаметром 4 см и длиной 150—200 см. Вращение бура осуществляется посредством коловорота, установленного на его верхней части. Ледомерная рейка изготовляется из стальной полосы, разделенной на сантиметры; на нижнем конце ее имеется упор,

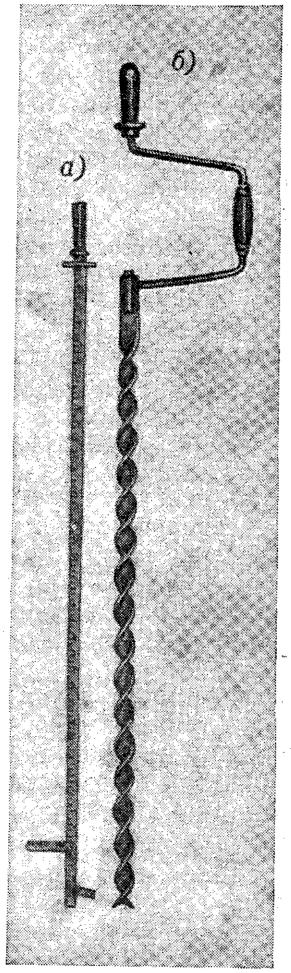


Рис. 31.2. Ледовый бур БЛ-47.

откидываемый пружиной. Верхняя плоскость упора, установленного перпендикулярно рейке, совпадает с нулевым делением.

Ледовый бур ГР-7 по устройству такой же, как БЛ-47, но имеет диаметр 7 см, что позволяет дополнительно к измерению толщины льда определять глубины промерным лотом и температуру воды термометром в оправе. Ледомерная рейка к этому буру такая же, как на рис. 31.2.

Ледовый бур ПИ-8 (рис. 31.3) предназначается для ручного бурения скважин во льду с получением керна (образца) для определения строения льда. Режущая часть бура выполнена в виде кольца, в котором сделан вырез, на одном из торцов которого укреплен зубчатый резец. Кольцо укреплено на штанге, вверху которой имеется коловорот. Кольца изготовляются диаметром от 120 до 310 мм.

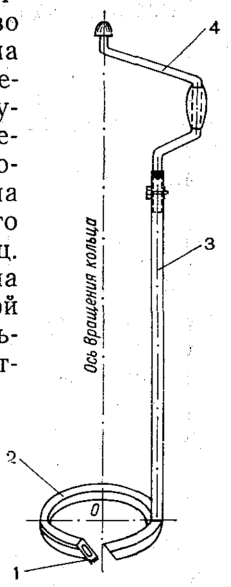


Рис. 31.3. Ледовый бур ПИ-8.

1 — резец; *2* — кольцо; *3* — штанга; *4* — коловорот.

Ледовый бур механизированный ГР-58 применяют при массовом сверлении лунок. Прибор смонтирован на санках и состоит из бурового комплекта и генераторного агрегата (рис. 31.4). Буровой комплект состоит из электродрели, спирального бура диаметром 70 мм, бура диаметром 100 мм и удлинителя. Электродрель служит для вращения бура. Генераторный агрегат состоит из генератора и бензинового двига-

теля. Ледовый бур позволяет бурить лунку глубиной 1,2 м, а с удлинителем — до 2 м. Вес комплекта 75 кг. К недостаткам бура следует отнести неудобство перемещения его по льду при наличии глубокого снега и торосов, а также при необходимости подъема на крутые берега или спуска с них.

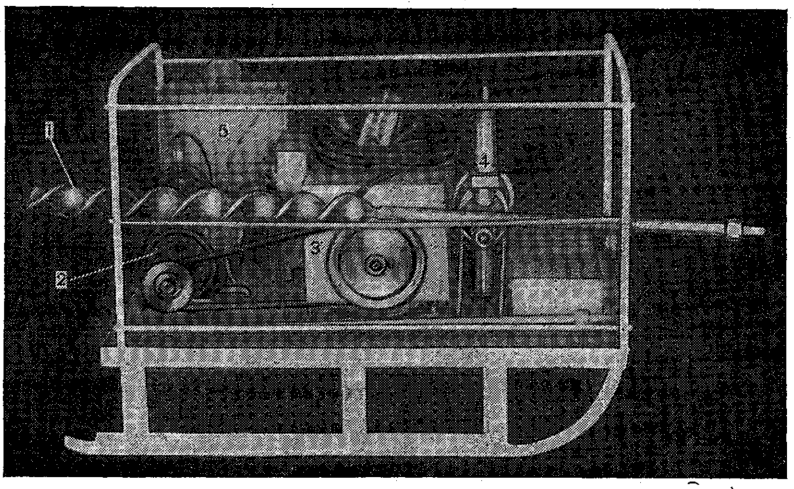


Рис. 31.4. Ледовый бур механизированный ГР-58.

1 — спиральный бур; *2* — двигатель; *3* — генератор; *4* — электродрель; *5* — бак для бензина.

Ледомерная рейка с подкосом. Толщину льда в лунках, пробитых пешней, измеряют ледомерной рейкой с подкосом. Выпускается стандартная ледомерная рейка ГР-31. Для удобства отсчетов на рейку можно надевать планку, устанавливаемую на верхнюю поверхность ледяного покрова. Устройство ледомерной рейки и способ измерения ею толщины льда показаны на рис. 31.5. На этом рисунке общая толщина льда 32 см, а глубина погружения льда в воду 26 см. Деления рейки,

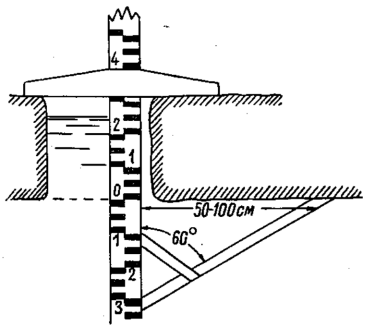


Рис. 31.5. Ледомерная рейка с подкосом.

идущие вниз от нуля, предназначаются для измерения возвышения льда над уровнем воды, если ледяной покров нависает над водой.

Чтобы получить более точные результаты, рекомендуется измерять толщину льда с четырех сторон лунки и за окончатель-

ный результат принимать среднее значение из всех измерений.

Для измерения толщины слоя подледной шуги применяют шугомерные рейки и специальные приборы — датчики. Измерения производят в лунках, пробитых для измерения толщины льда.

Шугомерные рейки. Толщина шуги средней плотности при слое более 1—1,5 м и отсутствии включений битого льда может быть измерена металлической рейкой, прилагаемой к ледовому буру. Откидную поперечную планку этой рейки рекомендуется удлинить до 15—20 см. При толщине льда и шуги, превышающей длину рейки, применяют деревянный шест с делениями через 5 см, снабженный металлическим наконечником и откидной планкой с упором.

Шугомерная рейка ГР-85. Основным рабочим органом ее является чувствительный элемент — шугоосязательный датчик, укрепляемый на нижнем конце облегченной разборной штанги общей длиной 6 м. Размер датчика обеспечивает прохождение штанги с ним в лунку диаметром 70 мм. Датчик соединяется двухпроводной линией связи с полупроводниковым усилителем звуковой частоты, находящимся на поверхности. Граница шуги устанавливается по изменению звука в наушниках при опускании штанги с датчиком. В датчике магнитоэлектрической системы имеется магнитопровод и постоянный магнит с обмоткой. В зазоре магнитопровода расположен и закреплен в резиновой прокладке отрезок стальной проволоки, концы которой выступают на несколько сантиметров с двух сторон датчика. При вертикальных перемещениях датчика эти концы скользят по льду или шуге и вибрируют, при этом в обмотке датчика возникают электрические колебания звуковой частоты, поступающие на усилитель и затем в наушники.

Место для наблюдений за толщиной льда выбирают в створе водомерного поста или поблизости от него с таким расчетом, чтобы на увеличение толщины льда и состояние снежного покрова на льду не влияли местные условия, поэтому следует избегать близости дорог, полыней, отмелых мест и т. п.

На средних и больших реках в первые месяцы наблюдений измерения рекомендуется производить в трех лунках, расположенных на середине реки. Одна из этих лунок должна находиться в створе водомерного поста, а две другие — в 5—10 м выше и ниже него. Если результаты измерений в трех лунках будут различаться не более чем на 10—15%, а также при достижении толщины льда 70 см наблюдения продолжают в одной лунке. На малых реках (шириной менее 25 м) измерения производят в одной лунке на середине реки в створе поста. Лунку для каждого наблюдения пробивают на новом месте рядом с прежним. Наблюдения начинают с измерения толщины снега. После измерения толщины снега его счищают (в месте намечаемой лунки) с поверхности ледяного покрова и определяют ха-

рактер поверхности ледяного покрова: гладкий, неровный, торосы. После того как лунки пробиты (просверлены), измеряют толщину кристаллического льда и глубину погружения его в воду. При наличии подледной шуги измеряют толщину ее слоя.

Обработка результатов измерений толщины снега, льда и шуги заключается для средних и больших рек в вычислениях средних арифметических значений из измерений по трем лункам. Результаты обработки наносят ежемесячно на комплексный график. Надежность полученных значений выявляется в процессе анализа комплексного графика с использованием данных о высоте слоя снега на льду, хода температуры воздуха, колебаний уровня воды и ледовых фаз состояния реки.

31.3. Ледомерные съемки

Ледомерные съемки производят на тех гидрологических станциях и постах, где ведутся систематические наблюдения за ледяным покровом. Назначение съемок — выявить типичность места, выбранного для систематических измерений толщины льда, а на участках рек, где условия формирования ледяного покрова существенно изменяются от года к году, ледомерные съемки дают материалы для оценки результатов систематических измерений толщины льда в единичной точке. Ледомерные съемки производят при изысканиях для составления проектов гидротехнических сооружений или для других целей, например при изучении руслового процесса, в особенности на перекатах, формирование которых в ряде случаев в значительной степени зависит от ледовых условий.

Ледомерные съемки производят два раза в течение зимы: в начале ледостава (сразу же после того, как передвижение по ледяному покрову станет безопасным) и в конце зимы при наибольшей толщине ледяного покрова. На реках с устойчивым формированием ледяного покрова ледомерные съемки ведут в течение двух-трех зим, а затем прекращают; для контроля съемки производят в дальнейшем в особо характерные (суровые, мягкие, многоснежные или малоснежные) зимы. На реке, где условия формирования ледяного покрова сложны и ежегодно различны, а также на участках зарегулированных рек ниже плотин подробные ледомерные съемки ведут в течение двух-трех лет, а в дальнейшем ежегодно проводят сокращенные (по количеству профилей и точек) съемки.

На малых реках (шириной менее 25 м) взамен ледомерной съемки проводят ежедекадные наблюдения в пяти-шести точках по длине реки с учетом местных особенностей русла (плёс, перекат).

Ледомерные съемки на больших и средних реках производят по поперечным профилям, привязанным к планово-высотной основе участка поста. Количество профилей назначается не

менее пяти, из них два располагаются на границах участка съемки, а остальные — на равных расстояниях друг от друга. На каждом профиле назначают не менее семи точек измерений. Береговые точки располагаются на профиле в 5—10 м от берега, а остальные — равномерно по профилю. При сложном распределении глубин на профиле назначают дополнительные точки измерений, приурочиваемые к переломам линии дна.

В каждой точке измеряют: 1) толщину снега на льду, 2) толщину льда, 3) толщину погруженного льда, 4) толщину подледной шуги, 5) глубину от уровня воды в лунке. При ледомерных съемках описывают структуру льда, измеряют толщину отдельных его слоев.

При ледомерных съемках необходимо учитывать в каждом отдельном случае особенности ледовой обстановки на участке. Так, при неравномерном распределении подледной шуги необходимо выяснить границы ее распространения. Для этого назначают дополнительные точки измерений как на основных профилях съемки, так и между ними. При торосистой поверхности ледяного покрова точки измерений назначают в промежутке между торосами. Высоту преобладающих торосов измеряют или оценивают глазомерно. Полыньи, промоины и закраины должны быть обследованы, описаны и нанесены на план съемки. Таким же образом обследуют и картируют трещины в ледяном покрове и наледи.

Обработка материалов ледомерной съемки заключается в составлении поперечных профилей, плана ледомерной съемки и пояснительной записки к материалам съемки. На профиль наносят: высоту снега, общую толщину льда и подледной шуги с выделением погруженного льда и шуги, глубину реки.

31.4. Наблюдения за образованием внутриводного льда, шугообразованием и шугоходом

Наблюдения за образованием внутриводного льда. Определяется начало и продолжительность образования, а также интенсивность в зависимости от условий погоды и состояния реки.

Наблюдения организуют на участке поста или поблизости от него, где имеются условия для образования внутриводного льда. Наблюдения проводят посредством специальных сеток, которые могут устанавливаться как на дне, так и на разных глубинах по вертикали. Сетка для наблюдений за образованием внутриводного льда на дне реки (донного льда) имеет вид полусферы диаметром 30 см, высотой 8—10 см и весом 1,4—1,6 кг. Сетка состоит из каркаса в виде обруча диаметром 30 см с крестовиной сечением 2×20 мм. Каркас обтянут латунной сеткой с ячейками 2×2 мм. В середине крестовины укреплен стержень длиной

10 см с кольцом для подвешивания сетки. Готовая сетка должна быть занумерована, взвешена с точностью до 5 г, а площадь ее внешней поверхности вычислена с точностью до 1 см^2. Для опускания сетки на дно и подъема ее служит тонкий канат, который одним концом при помощи карабина прикрепляется к кольцу сетки, а другим крепится к концу шеста (рис. 31.6). Наблюдения за образованием внутриводного льда проводят ежедневно в течение осенне-зимнего периода начиная со дня, когда температура воды на основном водомерном посту опустится до +0,5°С, до окончательного установления ледостава. На участках рек, не покрывшихся поверхностным льдом или имеющих полыньи, наблюдения ведут в течение всего морозного периода. Устанавливают сетки ежедневно в 20 часов, а поднимают на следующий день в 8 часов.

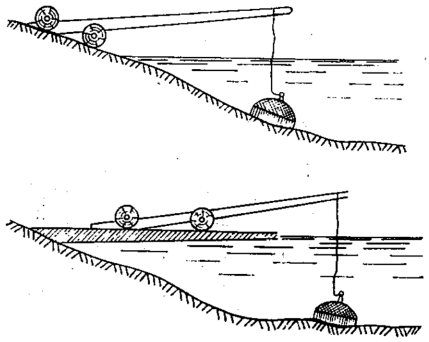


Рис. 31.6. Сетка для регистрации образования внутриводного (донного) льда.

Для определения момента начала образования внутриводного льда применяют шугосигнализаторы. Действие их основано на различии электрической проводимости льда и воды. В поток опускают два электрода. При образовании внутриводного льда на электродах будут выделяться кристаллы льда, при этом электрическая проводимость между ними будет уменьшаться. Электроды включают в одно из плеч электроизмерительного моста. При изменении сопротивления между ними происходит разбаланс моста. В измерительной диагонали моста возникает ток, который усиливается и подается на регистрирующий прибор. Шугосигнализаторы выпускаются промышленностью для установки на гидроэлектростанциях, где служат для сигнализации о начале обмерзания решеток во входных отверстиях турбинных трактов.

Наблюдения за шугоходом и условиями шугообразования. Наблюдения за шугоходом проводятся в гидрометрическом створе станции или на специально выбранном створе, где движение шуги хорошо просматривается на всем участке. При изучении шугохода и условий шугообразования проводят следующие наблюдения:

1) за температурой воды по микротермометру;

2) за температурой и влажностью воздуха, общей и нижней облачностью и туманами, скоростью ветра;

3) за густотой шугохода, скоростью движения и количеством шуги.

Метеорологические наблюдения, указанные в п. 2, организуют непосредственно на посту или для этой цели используют данные ближайшей метеостанции, удаленной от поста не более чем на 10 км. В последнем случае необходимо предварительно убедиться путем организации параллельных наблюдений на посту в том, что показания этой метеостанции соответствуют местным условиям поста.

Густота шугохода и степень покрытия реки плывущей шугой определяются, как указано в п. 31.1. Наблюдения проводят в светлое время суток через каждые 2—4 часа в соответствии

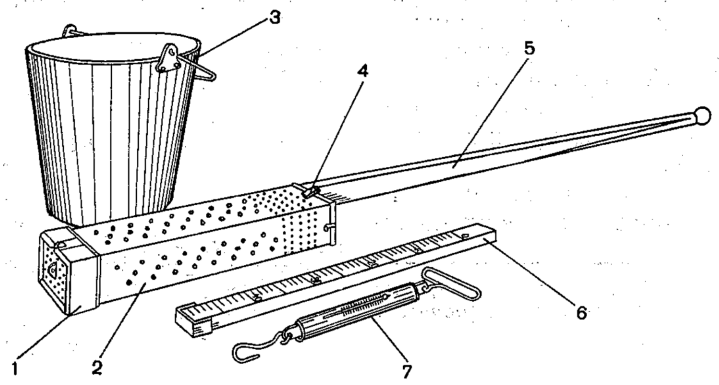


Рис. 31.7. Шугобатометр.

1 — стальной башмак; *2* — труба квадратного сечения; *3* — ведро; *4* — ушки для троса; *5* — рукоятка; *6* — рейка; *7* — безмен.

с суточным ходом явления. Если при шугоходе одновременно наблюдается движение сала, блинчатого льда и битого льда заберегов, то наличие этих включений отмечают в книжке для записи наблюдений.

Количество шуги определяют посредством шугобатометра. Стандартный шугобатометр ГР-3М (рис. 31.7) представляет собой металлическую трубу квадратного сечения площадью 100 см^2, длиной 50 см. Нижний конец снабжен стальным башмаком с острыми кромками. Для удержания шуги в батометре низ его имеет дверцу, свободно открывающуюся внутрь прибора при его погружении в слой шуги. Для выхода из прибора воды стенки его и дверца имеют отверстия. Для взятия пробы шуги батометр вертикально погружают в слой плывущей шуги и он вырезает из нее столбик площадью 100 см^2 и высотой, равной толщине слоя шуги. Толщину слоя шуги измеряют по рейке, входящей в комплект прибора, после этого пробу шуги высыпают в ведро, прилагаемое к шугобатометру, и взвешивают с точностью до 50 г безменом, также входящим в комплект прибора. Следует заметить, что толщина слоя шуги, измеренная

в шугобатометре, будет несколько отлична от толщины слоя шуги в реке.

В зависимости от ширины реки и степени ее покрытия шугой пробы шуги берут на четырех—шести вертикалях, на которых последовательно берется по пять проб. За окончательный результат принимают средние арифметические значения толщины и веса шуги из всех проб.

Скорость движения шуги определяется по времени прохождения отдельными, хорошо заметными скоплениями шуги пути длиной от 25 до 100 м (в зависимости от скорости движения шуги) в соответствии с правилами, принятыми для измерения скоростей течения поплавками. Измерение скорости движения шуги производят от 5 до 10 раз, причем приметные скопления шуги выбирают на различных расстояниях от берега, чтобы получить среднюю скорость движения шуги для всей ширины реки.

Расход шуги (в т/с), плывущей по всей ширине поверхности реки, вычисляют по формуле

$$Q_ш = kav_ш B, \qquad (31.2)$$

где k — средняя в створе густота шугохода; a — среднее коли-

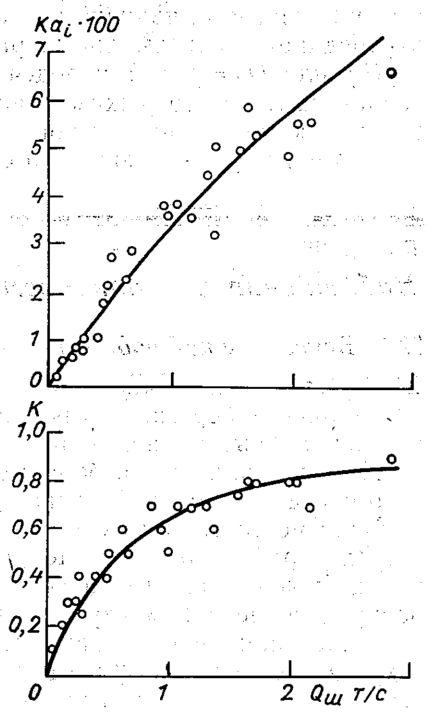


Рис. 31.8. Зависимости $Q_ш = f(ka_i)$ и $Q_ш = f(k)$ для р. Чу у поста Бурулдайский мост (по А. Н. Чижову).

чество шуги на единицу площади в т/м^2; $v_ш$ — средняя скорость движения шуги в м/с; B — ширина реки в метрах.

Для сокращения объема работ по измерению расходов шуги полезно строить графики зависимости расхода шуги $Q_ш$ от густоты шугохода k (рис. 31.8), которая в ряде случаев позволяет определить расход шуги по данным визуальных наблюдений.

Как показали исследования А. Н. Чижова, зависимость $Q_ш = f(k)$ может быть использована для определения расходов шуги только в створах, на которых густота шугохода не достигает больших значений, не более $k = 0{,}4 \div 0{,}7$. При $k = 1$ кривая на графике $Q_ш = f(k)$ направляется параллельно оси абсцисс, так как расход шуги может возрастать за счет увеличения толщины слоя шуги (при сплошь покрытой шугой поверхности реки).

Лучшая связь получается, если расход шуги выразить зависимостью $Q_ш=f(ka_i)$, где a_i — вес шуги на 1 м² шуговых скоплений, полученный путем взятия проб на одной из вертикалей створа с достаточно большой толщиной слоя шуги.

Графики $Q_ш=f(k)$ или $Q_ш=f(ka_i)$ используют для подсчета стока шуги.

В итоге наблюдений за шугоходом и условиями, его определяющими, составляют отчет, в котором, помимо материалов наблюдений, приводятся: а) методика наблюдений; б) характер и режим шуговых явлений на реке в связи с состоянием погоды; в) средние и максимальные расходы шуги, зависимость $Q_ш=f(k)$ или $Q_ш=f(ka_i)$ и подсчет стока шуги; г) общая характеристика ледового режима данного осенне-зимнего периода по сравнению со средними многолетними характеристиками, а при отсутствии их — по сравнению с предшествующими годами.

Глава 32
Наблюдения за волнением

32.1. Береговые наблюдения

Цель береговых наблюдений — осветить волновой режим водоема в районе берега. Наблюдения за волновым режимом ведут на специальных волномерных постах.

Для правильного выбора места при организации волномерного поста необходимо предварительно изучить (по данным ближайших метеостанций) скорости и направления господствующих ветров в районе озера, водохранилища и сопоставить полученные данные с планом водоема и сведениями, характеризующими распределение в нем глубин. Особенно важно выявить господствующее направление наиболее сильного и продолжительного ветра в тех частях озера, где возможна наибольшая длина разгона волн и где глубины наиболее значительны.

В районе установки поста необходимо сделать промеры на площади размером 0,5×0,5 км и построить на основе их план в горизонталях через 0,25—1,0 м в зависимости от рельефа дна водоема.

Отметки дна необходимо увязать с уровнем воды на ближайшем водомерному посту. На плане указывают места установки волномерных вех и других приборов.

При наблюдениях за волнением на озерах и водохранилищах оценивают в баллах состояние поверхности водоема, степень волнения, пользуясь стандартными шкалами. Состояние поверхности водоема под влиянием ветра оценивают по визуальным наблюдениям, степень волнения — на основании измерений по волномерным вехам или другим имеющимся на наблюдательном пункте приборам.

32.2. Волномерные вехи и наблюдения по ним

Элементы (высоту, период и т. п.) волны у берега определяют при помощи волномерных вех; для этой цели применяют также специальные приборы — волномеры и самописцы волнения.

Волномерные вехи. Веха представляет собой шест длиной 8—12 м, диаметром 10 см. Верхнюю часть вехи на длину 5—6 м раскрашивают различными цветами в виде колец высотой 10 см. Веху устанавливают на сваях, прочно забиваемых в грунт дна. При глубинах более 3—5 м веху устанавливают на якорях, на плаву. Для придания вехе плавучести вблизи ее нижнего конца укрепляют деревянную бабку из отрезка сухого бревна длиной 1,2—2 м (рис. 32.1 *а*). Чтобы веха не сдвигалась с места волнением и течением, она прикрепляется мягким 6—10-миллиметровым тросом к мертвому якорю весом 80—100 кг.

При глубинах более 10—12 м конструкция вехи усиливается, в качестве поплавка для вехи (рис. 32.1 *б*) применяют сварной металлический бачок объемом

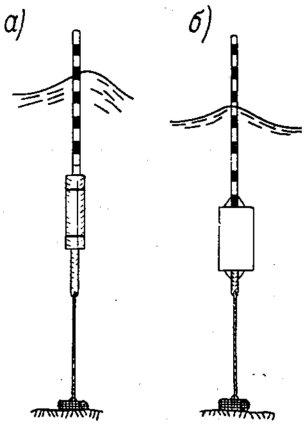


Рис. 32.1. Волномерные вехи.

а — с деревянной бабкой; *б* — с металлическим поплавком.

80—100 л. Применяют также поплавки из поропласта. Вес якоря увеличивается до 150—200 кг.

При значительных изменениях уровня воды веха для сохранения ее вертикального положения подтягивается или опускается. После установки вехи определяют ее местоположение и отметку нуля. Проверку указанных характеристик производят еженедельно и сверх того после каждого сильного шторма. Отметку нуля вехи определяют также после каждого ее опускания или подтягивания.

Наблюдения по волномерным вехам. Посредством волномерных вех можно определять высоту и период волны.

Наблюдения за волнением проводят в стандартные сроки, а при сильных штормах и в дополнительные сроки. При максимальной разности волновых горизонтов менее 10 см на малых озерах и 20 см на больших озерах измеряют только скорость и направление ветра, средний период волны (если возможно производить отсчеты) и отмечают состояние водной поверхности.

Состав и последовательность наблюдений на волномерном посту следующие:

1) определяют в начале и конце наблюдений скорость и направление ветра;

2) по волномерной вехе измеряют средний период волн и определяют наибольшую разность волновых горизонтов;

3) отмечают направление распространения волнения, стадию развития волнения и другие его характеристики.

Для нахождения среднего периода волн по секундомеру отмечают время прохождения через веху 101-го последовательного гребня волн и делением времени на 100 получают средний период волн. Наблюдения проводят два раза, причем расхождение между двумя отсчетами не должно превышать 5%. За окончательный результат берут среднее из двух определений.

При наблюдении необходимо учитывать все гребни волн, проходящих через веху, а не выбирать только наиболее ярко выраженные.

Наибольшая разность волновых горизонтов получается как разность между наибольшим отсчетом по вехе при прохождении вершин волн и наименьшим отсчетом по вехе при прохождении подошв волн, выбранных из большого числа наблюденных волн за определенный отрезок времени. Эта разность будет больше, чем высота волны, так как самой высокой вершине не соответствует самая глубокая подошва волны. В зависимости от среднего периода волны, который определяют в начале наблюдений, назначают время производства наблюдений за вершинами с таким расчетом, чтобы через веху прошло около 50 волн. За это время наблюдатель должен зафиксировать наивысшее деление вехи, до которого поднимались вершины. В течение такого же времени проводят наблюдения за подошвами волн, при которых фиксируют наинизшее деление вехи, до которого они опускались. Отсчет производится с точностью до 5 см.

Наблюдения повторяют по два раза, и для вершин берется максимальное значение из двух отсчетов по вехе, а для подошв — минимальное значение. Вычитая из максимального значения отсчета наивысшей вершины волны минимальное значение отсчета, отвечающее отметке самой низкой подошвы, получают максимальную разность волновых горизонтов, которая будет соответствовать 100 волнам.

Одновременно с наблюдениями за волнением измеряют скорость ветра и определяют его направление. Скорость ветра измеряют при помощи ручного анемометра, устанавливаемого на 2 м над поверхностью воды вблизи берега. Если берега крутые, измерять скорость ветра в виде исключения можно на высоком берегу, но постоянно на одной высоте над поверхностью воды. Время выдержки анемометра должно быть не менее 10 мин. Если вблизи пункта волновых наблюдений имеется флюгер, то скорость и направление ветра определяют также по флюгеру.

Уровень воды измеряют с точностью до 1 см на ближайшем водомерном посту в сроки наблюдений за волнением.

32.3. Волномеры и самописцы волнения для наблюдений в прибрежной зоне

Волномер-перспектометр ГМ-12 (рис. 32.2) предназначен для измерения элементов волн: высоты, длины, периода, скорости и направления распространения, а также для измерения расстояний до предметов в водоеме. Прибор рассчитан для применения на морях, но с успехом применяется на крупных озерах и водохранилищах. Работа волномера основана на принципе оптического измерения элементов волн при помощи перспективной сетки.

Основной частью прибора являются два монокуляра от призматического бинокля Б8×30. Один из монокуляров имеет в фокальной плоскости стеклянную перспективную сетку для измерений элементов волн и расстояний. Для измерения углов прибор имеет лимб и алидаду.

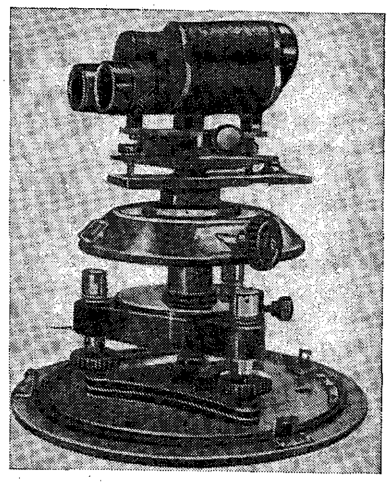


Рис. 32.2. Волномер-перспектометр ГМ-12.

Перспективная сетка (рис. 32.3) имеет две шкалы: шкалу дальности *1*, расположенную в середине поля зрения трубы по вертикали, предназначенную для измерений расстояний, и шкалу высоты волн *2*, предназначенную для измерения высот волн и расположенную справа от шкалы дальности.

Шкала дальности *1* служит для определения расстояний до видимых ориентиров (точек) на поверхности водоема. Масштаб этой шкалы переменный: одно деление шкалы между 0,1—0,3 соответствует 10 м на водной поверхности, между 0,3—0,5 одно деление шкалы соответствует 50 м, между 0,5—1,0 — 100 м и между 1—2 — 500 м. Следовательно, если наблюдаемая на водной поверхности точка совпадает с делением шкалы 0,15 дальности, то расстояние до нее равно 0,15 км.

Шкала высоты волн *2* разбита на 32 деления. Каждое деление имеет цену 0,5 м, что обозначено на самой сетке вверху (h=0,5 м). Следовательно, если, например, высота волны укладывается между 9 и 14 делениями, т. е. захватывает пять делений высоты шкалы, то действительная высота будет 5×0,5= =2,5 м.

Шкала сетки *3* предназначена для измерения горизонтальных расстояний (перпендикулярных лучу зрения) на поверхности

водоема. Линии этой шкалы, проектируясь на водную поверхность, соответствуют параллельным линиям, которые находятся на расстоянии 5 м одна от другой и постепенно сближаются к линии видимого горизонта. Например, линия, в конце которой написано 5 м, параллельна линии шкалы дальности и удалена от нее на 5 м. Эти линии могут быть также использованы для определения скорости движения предметов (например, льдин), перемещающихся перпендикулярно лучу зрения.

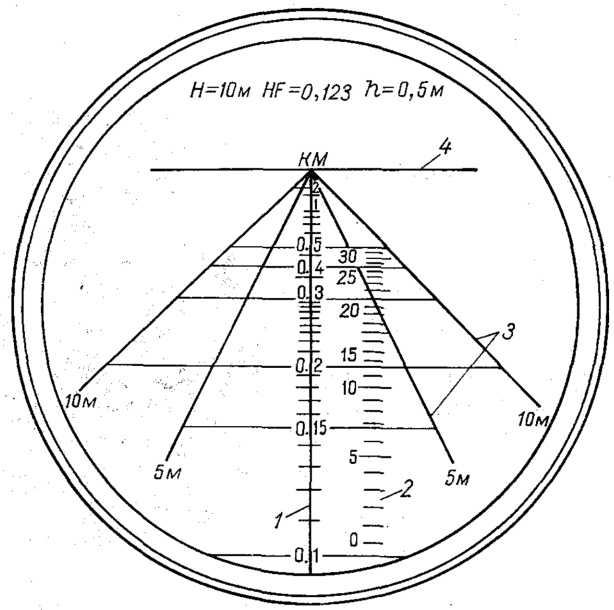


Рис. 32.3. Перспективная сетка.

Линия сетки *4* при установке прибора совмещается с изображением линии видимого горизонта на водоеме.

В верхней части сетки прибора приведены данные, для которых она рассчитана. На рис. 32.3 $H=10$ м означает, что данная сетка рассчитана для установки прибора на высоте 10 м над уровнем воды; $HF=1{,}23$ является постоянным коэффициентом сетки, который равен произведению высоты установки прибора $H=10$ м и фокусного расстояния зрительной трубы $F=0{,}123$ м.

Место установки волномера должно быть выбрано с таким расчетом, чтобы поверхность водоема была открытой в различных направлениях. Прибор устанавливают на прочной вышке и закрепляют болтами.

При установке прибора и при производстве наблюдений необходимо придерживаться указаний инструкции по его применению.

Береговые самописцы волнения. Самописцы волнения — волнографы — предназначены для непрерывной регистрации отдельных или всех элементов волн. Ниже дано описание некоторых конструкций самописцев волнения.

Электроконтактная веха (рис. 32.4) представляет собой латунный, изолированный от воды резиновой трубкой стержень *1* длиной 2—2,5 м, в который ввернуты через 10 см латунные, посеребренные с внешнего торца контакты *2*. Для предотвращения попадания воды под изоляцию контакты затягиваются сверху текстолитовыми контргайками *3*. Стержень крепится на роликовых изоляторах *4* к деревянной рамке *5*, устанавливаемой при помощи двух хомутов *6* на одиночной волномерной вехе *7*.

При прохождении волны через электроконтактную веху замыкается часть контактов, в результате этого скачкообразно изменяется сила тока в электрической цепи, состоящей из источников питания, токопроводящей линии и осциллографа.

Высота и период волн регистрируются на осциллографе,

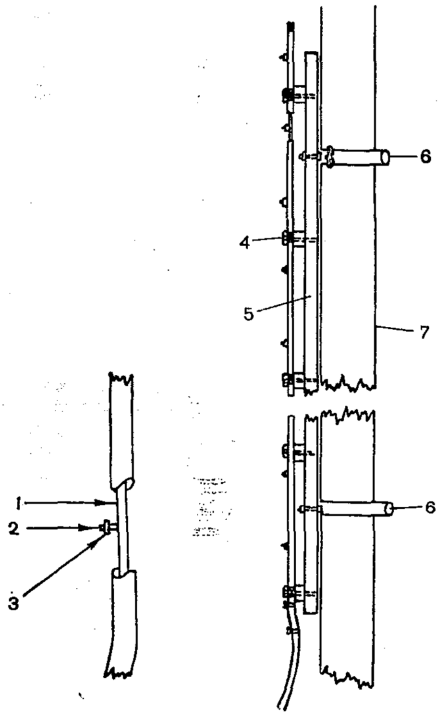


Рис. 32.4. Электроконтактная веха.

установленном на берегу; запись волн получается в виде ступенчатой кривой.

Волнограф всех элементов волн ВЭВ-К (рис. 32.5). Работа этого прибора конструкции П. П. Кокоулина основана на принципе регистрации моментов времени прохождения гребня волны через три точки, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, с одновременной регистрацией высоты и периода волны. Длина стороны треугольника принимается 4—5 м. Волнограф состоит из трех описанных выше электроконтактных вех длиной 4—5 м, установленных на поплавках и связанных жесткой треугольной рамой. Рама с поплавками затопляется на глубину ниже ожидаемых понижений уровня на подошвах волн. Лучше устанавливать волнограф на трех якорях-присосах весом по 250—300 кг каждый. Моменты

прохождения гребня волны через вехи (вершины треугольника) регистрируются на ленте установленного на берегу осциллографа, соединенного с прибором кабелем.

На больших озерах и водохранилищах могут применяться морские волнографы, в частности волнограф прибреж-

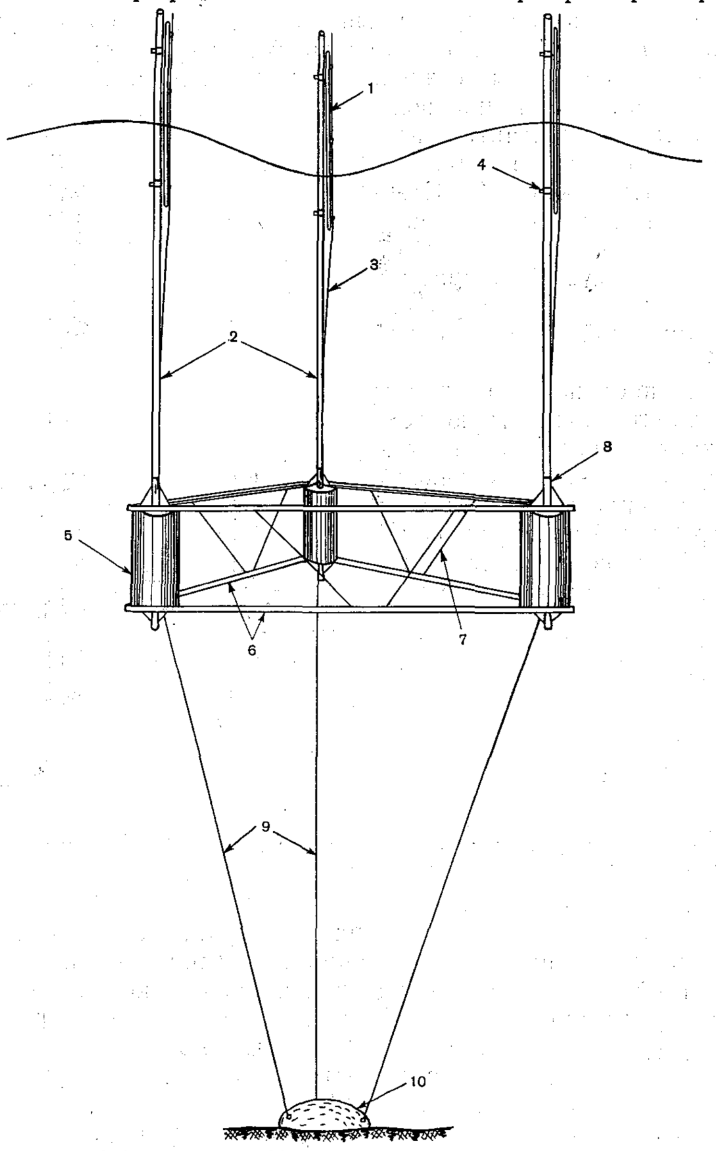


Рис. 32.5. Волнограф ВЭВ-К.

1 — электроконтактная веха; *2* — деревянные вехи; *3* — натяжной трос; *4* — хомут; *5* — поплавок; *6* — рама; *7* — растяжки; *8* — патрубок; *9* — трос; *10* — якорь-присос.

ный ГМ-61. Он предназначен для дистанционной регистрации элементов волн — высот, периодов. Прибрежный волнограф состоит из проволочного датчика, измерительного блока с генератором звуковой частоты и регистратора. Датчик представляет собой высокоомную нихромовую проволоку диаметром 0,3—0,4 мм, вертикально укрепляемую на неподвижной опоре — сваях, эстакаде и т. п. Проволока на половину своей длины погружается в воду. Сопротивление проволоки является функцией волновых колебаний воды. При частоте тока 4—5 кГц вода обладает очень малым сопротивлением и схему проволочного датчика можно рассматривать как схему реостата. Такой датчик может работать как в соленой воде морей, так и в пресной воде озер и водохранилищ.

Датчик соединяется линией связи с измерительным блоком на берегу. Запись элементов волн производится на регистраторе КСП-4, но также может вестись на шлейфном осциллографе.

32.4. Наблюдения за волнением вдали от берега

Наблюдения за волнением в открытой части озер и водохранилищ проводятся при выполнении гидрологических разрезов и наблюдениях на рейдовых вертикалях, а также при специальных исследованиях элементов волн в открытой части водоема.

В состав наблюдений входит: 1) определение направления и скорости ветра и общего состояния погоды; 2) общая визуальная оценка степени волнения и состояния водной поверхности; 3) определение направления распространения волнения; 4) определение отдельных элементов волн (высоты, периода, длины и скорости движения).

Наблюдения за волнением вдали от берега можно проводить с судна, закрепленного на якоре, или на ходу; методы таких наблюдений подробно рассматриваются в курсе морской гидрометрии. Здесь мы остановимся на некоторых методах, часто применяемых при наблюдениях на озерах и водохранилищах.

Отдельные элементы волн могут определяться при помощи специальных вех, самописцев волнения, а также посредством стереофотосъемки и аэрофотосъемки.

Стандартная максимально-минимальная волномерная веха ГР-24 применяется для измерения высоты волн вдали от берегов. Состоит из направляющей штанги с поплавком, затопляемого буя и груза-якоря с тросом (рис. 32.6). На штанге имеется кольцевой поплавок, могущий свободно перемещаться по штанге вверх и вниз при волнении. Чтобы он при этом не вращался, имеются три направляющих тросика, натянутые вертикально вдоль штанги и проходящие через втулки в поплавке. На верхней части поплавка укреплен горизонтальный лимб, над шкалой которого имеется металлический движок. В движке есть паз, входящий в направляющий

пруток, закрепленный на наружной поверхности штанги. Пруток образует винтовую линию: на длине штанги 4,5 м он делает поворот на 300°. При перемещениях поплавка вверх и вниз движок благодаря описанному устройству перемещается по лимбу то в одну, то в другую сторону. На лимбе есть две указки, которые перемещаются движком в разные стороны при волнении и остаются в тех местах, где они оказались при прохождении самого высокого гребня и самой низкой подошвы. По положению указок на шкале лимба определяют наибольшую разность волновых горизонтов. После снятия отсчетов указки приводят к нулевому положению; тем самым веха подготавливается к следующему наблюдению.

Можно также определить высоту самого высокого гребня и самой низкой подошвы относительно статического уровня; для этого необходимо знать исходное (до шторма) положение поплавка. Веха действует автономно, а показания снимают после шторма.

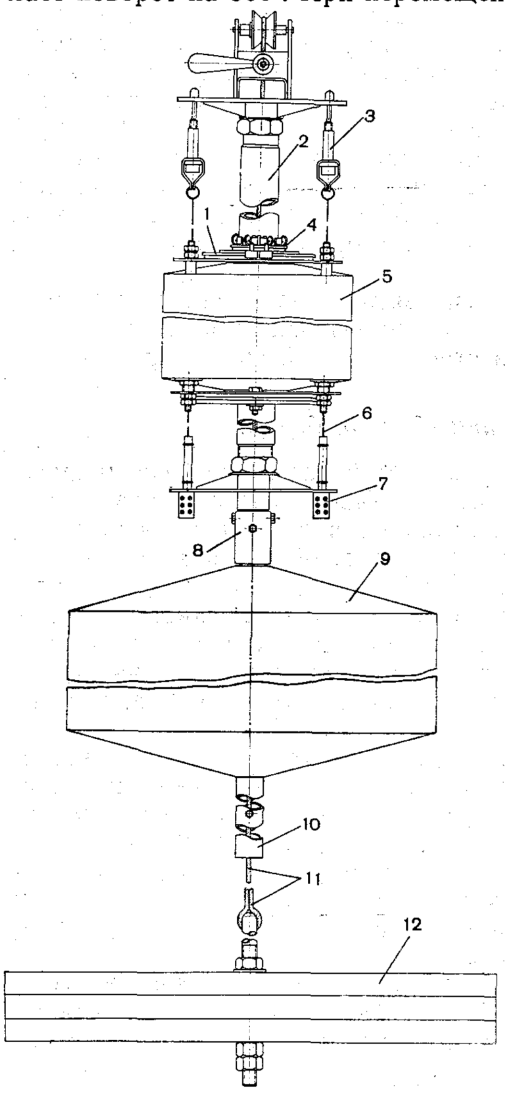


Рис. 32.6. Максимально-минимальная волномерная веха ГР-24.

1 — лимб; *2* — направляющая штанга; *3* — талрепы; *4* — движок; *5* — поплавок; *6* — направляющие тросики; *7* — карабины; *8* — муфта; *9* — затопляемый буй; *10* — штанга; *11* — трос; *12* — якорь.

Стереофотограмметрический метод. Для детального изучения элементов и формы волн применяется стереофотограмметрический метод, заключающийся в том, что избранный участок водной поверхности фотографируют одновре-

менно двумя фототеодолитами с концов базиса длиной обычно не менее 10 м. Фототеодолитная съемка волнения может производиться как с берега, так и с судна. Полученная пара снимков (стереопара) служит исходным материалом для определения сфотографированного рельефа водной поверхности. Следует иметь в виду, что одна стереопара отражает более или менее

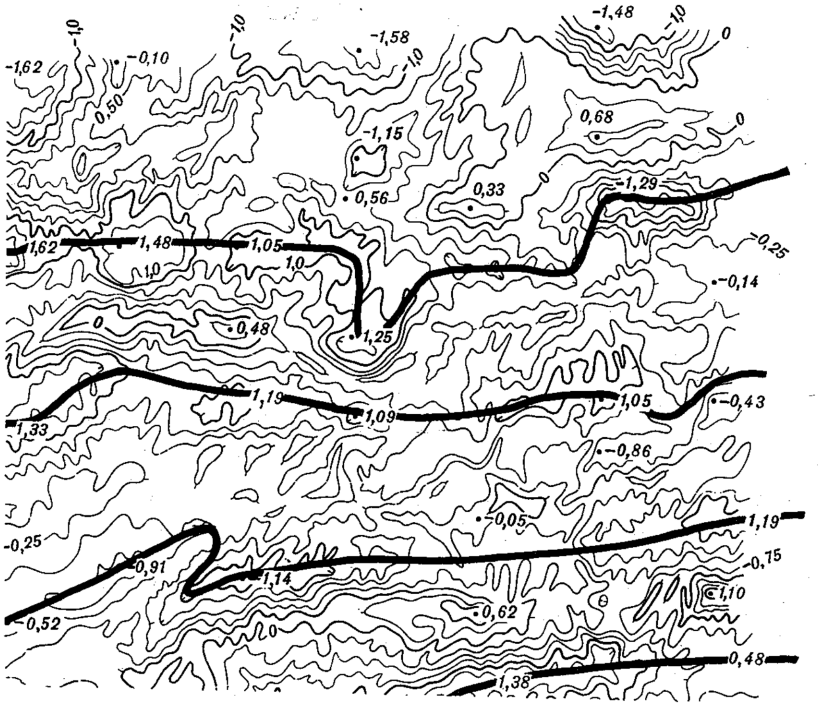


Рис. 32.7. Стереофотоплан поверхности моря (толстые линии проведены по наиболее низким точкам волновой поверхности).

случайное состояние водной поверхности, следовательно, необходимо провести серию съемок. При съемке волнения важно также обратить внимание на выбор места для установки фототеодолитов и на правильность экспозиции снимков.

Обработку стереопар производят с помощью стереофотограмметрических приборов, например стереопланиграфа с координатографом, позволяющего автоматически, даже при непараллельности оптических осей фотоаппаратов, строить точный план в горизонталях снятой поверхности водоема.

Применяется также стереоскопическая аэрофотосъемка, имеющая ряд преимуществ по сравнению с наземной. Съемка производится синхронно с двух самолетов. Высота полетов

обычно не более 200 м. На рис. 32.7 приведен план поверхности водоема в горизонталях, полученный методом воздушной стереофотосъемки.

Глава 33
Применение аэрометодов в гидрометрии

Аэрометоды включают аэровизуальные наблюдения, аэрофотосъемку с последующим дешифрированием и изучением снимков, а также различные виды измерений на водных объектах: скоростей течения, расходов воды и пр.

Гидрологическое дешифрирование аэрофотоснимков, методика которого хорошо разработана, позволяет определять важные характеристики долин, пойм, русел рек, а также характеристики других водных объектов: озер, водохранилищ, каналов, болот и т. д. Изучение аэрофотоснимков позволяет анализировать развитие руслового процесса, определять границы водосборов. Многие гидрологические явления и процессы весьма успешно изучаются с помощью аэрометодов, например ледовые явления, процесс заполнения и опорожнения пойм в половодье, волнение на озерах и водохранилищах, переформирование берегов водохранилищ. Специальные аэросъемки производят для определения снегозапасов. В частности, самолетная гамма-съемка позволяет получить непосредственно запасы воды в снежном покрове по линии полета самолета. Разработана и успешно применяется съемка температуры поверхности воды с самолета при помощи радиационного термометра.

В последние годы получили развитие и практическое применение некоторые аэрометоды гидрометрических измерений, на которых мы ниже остановимся. Большим достоинством аэрометодов является быстрота выполнения работ, возможность производить измерения в паводки, при ледоходе, а также в отдаленных и труднодоступных районах.

Для проведения гидрометрических работ используются самолеты АН-2, реже ЛИ-2, оборудованные для летно-съемочных работ. На самолете устанавливается аэрофотоаппарат АФА-ТЭ или другой топографический аппарат с размером кадра 18×18 см. В кадре каждого снимка фиксируются часы, что дает возможность определять промежутки времени между последовательными снимками. Кроме того, при аэрофотосъемке регистрируется высота полета (при помощи альтиметра или радиовысотомера), а также превышения между точками фотографирования (при помощи самопишущего прибора — статоскопа).

Некоторые гидрометрические измерения, например скоростей течения на небольших реках, можно производить, делая съемки с самолета при помощи обычного фотоаппарата тип «Зенит».

Такой способ рекомендуется, в частности, «Методическими указаниями управлениям Гидрометслужбы», № 72, 1966.

Подробное изложение методики аэрогидрометрических работ выходит за рамки данного учебника. При производстве их необходимо руководствоваться упомянутыми выше «Методическими указаниями», а также «Методическими рекомендациями по измерению расходов воды рек аэрометодами» [28].

Ниже кратко остановимся только на некоторых основных видах аэрогидрометрических измерений.

33.1. Измерение скоростей и направлений течений

Для измерения скоростей и направлений течений применяют способы: 1) одиночных снимков, 2) стереоскопический.

Способ одиночных снимков заключается в последовательном фотографировании одиночными снимками с самолета плывущих по реке поплавков.

В качестве поплавков применяют заметные с самолета предметы с малой парусностью — дощатые щиты, при ледоходе — льдины, при лесосплаве — плывущие по воде отдельные бревна. В ГГИ были разработаны и применялись специальные ураниновые поплавки, сбрасываемые с самолета при помощи механического сбрасывателя при полете поперек реки выше створа измерений. Эти поплавки представляют собой деревянные цилиндрики высотой 11 см и диаметром 4 см, утяжеленные на нижнем конце металлическим кольцом. Поверхность их покрывается пастой из столярного клея и порошка уранина (флюоресцеина натрия). В воде паста образует флюоресцирующее зеленое пятно, хорошо видимое на снимках. Кроме того, применяют поплавки из маркирующих жидкостей, сбрасываемых с самолета в стеклянных ампулах, разбивающихся при ударе о воду. Для этой цели используют машинное масло, образующее на воде хорошо заметные пятна. Используют также смесь бензола технического, полистирола эмульсионного, нафталина и резинового клея; на поверхности воды бензол быстро испаряется, а нафта-

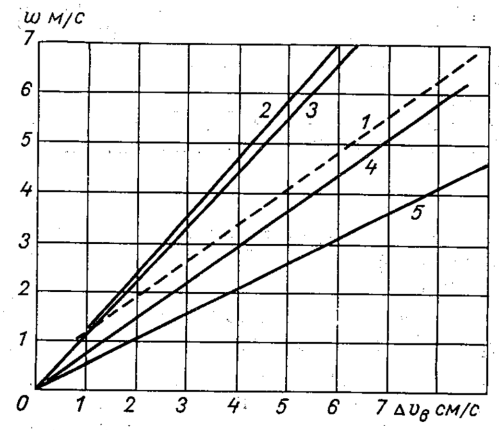


Рис. 33.1. График для определения ветровой составляющей скорости поплавка.

1 — поплавок ураниновый; *2—5* — поплавки-льдины; *2* — 2×2×0,6 м; *3* — 1×1×0,6 и 0,5×0,5×0,6 м; *4* — 1×1×0,2 м; *5* — 2×2×0,2 м.

лин, связанный полимерами, остается на поверхности, образуя хорошо заметное пятно диаметром до 10 м.

Работы по измерению скоростей выполняют в безветренную погоду или при слабом ветре. При ветре надо вводить поправки, для чего измеряют скорость и направление ветра.

Аэрофотосъемку делают при двух последовательных залетах самолета. Для получения траекторий поверхностных течений фотографирование выполняют многократно последовательными залетами с интервалом 2—5 мин. Полученные аэрофотоснимки могут иметь искажения за счет наклона самолета и пр. Поэтому для дальнейшего использования их трансформируют и приводят к одному масштабу при помощи специального прибора — трансформатора. Для трансформации снимков необходимо иметь на местности предварительно привязанные к геодезической сети опорные точки, опознаваемые на снимках. После трансформации снимков вычерчивают в определенном масштабе план участка реки, на который переносят с каждого снимка последовательные положения поплавков. Зная расстояния между последовательными положениями каждого поплавка и продолжительности хода, можно определить скорости вдоль траекторий.

Поправка на ветер к полученным скоростям течения вводится согласно Методическим указаниям № 72 [29], по формуле

$$\Delta v = \Delta v_в \cos \varphi, \qquad (33.1)$$

где $\Delta v_в$ — ветровая составляющая скорости движения поплавка в воде; φ — острый угол между направлением течения и направлением ветра.

Значение ветровой составляющей определяется по графику (рис. 33.1) в зависимости от скорости ветра w. Поправка Δv при попутном ветре отрицательная, при встречном — положительная. Скорость ветра должна быть измерена над водной поверхностью с помощью ручного анемометра.

В Методических рекомендациях [28] рассматривается способ учета влияния ветра на скорость перемещения поплавков без наземных измерений. Для этого с самолета сбрасывают в несколько точек по ширине реки поплавки двух типов: 1) измерительные — описанные выше поплавки ГГИ и 2) специальные ветровые поплавки из пенопласта, цилиндрической формы, высотой 70 и диаметром 150 мм, покрытые также ураниновой пастой. Сброс ветровых поплавков предшествует сбросу измерительных поплавков, при этом линия сброса располагается выше сбросного створа на расстоянии $l = vt$, где v — средняя скорость течения, t — время между моментами сброса измерительных и ветровых поплавков. Сущность способа заключается в определении по аэрофотоснимкам разности скоростей перемещения в потоке двух поплавков, имеющих отличную друг от друга парусность. В результате обработки последовательных аэрофото-

снимков можно вычислить по приведенным в [28] формулам значения векторов скорости течения воды и скорости ветра в ряде точек водной поверхности.

Ошибка измерения скоростей течения способом одиночных снимков по имеющимся данным составляет 0,10—0,15 м/с, т. е. примерно такая же, как при обычных поплавочных измерениях. Преимущество способа заключается в быстроте выполнения работ, возможности проведения измерений сразу по всей ширине реки и на участке большой протяженности, а также при ледоходе и разливе на больших реках.

Стереоскопический способ основан на использовании стереоэффекта, возникающего при рассмотрении в стереоскоп двух последовательных аэрофотоснимков водной поверхности с плывущими по течению поплавками.

Если в качестве поплавков используются дощатые щиты, то их предварительно запускают на участке реки. Если используются ампулы с маркирующей жидкостью или ураниновые поплавки, то запуск их выполняют с самолета при полете поперек реки выше створа.

Аэрофотосъемку делают при продольном полете над рекой со скоростью порядка 40 м/с. Съемку ведут в автоматическом режиме с продольным перекрытием 60% и интервалами между снимками 8—9 секунд. На снимках должны быть видны оба берега реки. Масштаб снимков определяют из расчета, чтобы ширина реки на снимке была бы не менее 8—10 см.

Исходя из принятого масштаба определяют высоту полета

$$H = fm, \qquad (33.2)$$

где f — фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата; m — знаменатель численного масштаба снимка.

Например, при $f = 100$ мм и масштабе 1 : 5000 высота полета будет равна $H = 0{,}1 \cdot 5000 = 500$ м.

На двух последовательных снимках, называемых стереопарой, зафиксируются поплавки на водной поверхности. Положение поплавков относительно постоянных береговых ориентиров будет на снимках различным: на втором снимке, сделанном позднее, поплавки расположатся ниже по течению, чем на первом. Расстояния между последовательными положениями поплавков пропорциональны скоростям течения.

При рассмотрении стереопары в стереоскоп смещения поплавков вызовут стереоэффект, аналогичный стереоэффекту, который создается рельефом, деревьями и другими возвышающимися на поверхности земли предметами. При этом смещения поплавков аналогичны разностям продольных параллаксов Δp, соответствующим смещениям точек на снимках под влиянием рельефа местности. Продольным параллаксом p называется разность координат одноименных точек на двух последовательных снимках стереопары (рис. 33.2). Разность продольных

параллаксов двух различных точек местности определяет превышение одной точки над другой.

Если рассматривать в стереоскоп два последовательных снимка реки с поплавками, то в результате описанного эффекта водная поверхность будет казаться не плоской, а выпуклой или вогнутой в зависимости от направления полета: при полете против течения — выпуклой, при полете по течению — вогнутой.

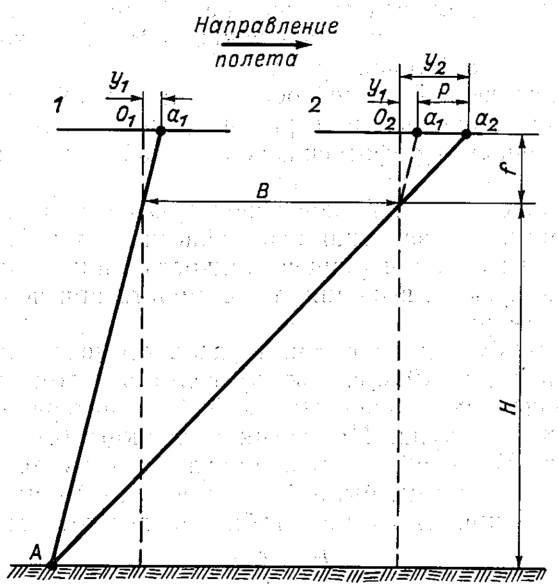


Рис. 33.2. Продольный параллакс.

y_1 и y_2 — координаты точки A на первом и втором снимках; $p=y_2-y_1$ — продольный параллакс.

Обрабатывают снимки на стереофотограмметрических приборах — стереометре или стереокомпараторе. По двум последовательным снимкам воссоздается пространственная модель местности — участка реки с поплавками на поверхности воды, причем водная поверхность будет иметь отмеченный выше вид.

Путем стереофотограмметрических измерений можно определить для каждого поплавка разность продольных параллаксов Δp. Для этого снимки ориентируются по изображениям урезов воды правого и левого берегов, что позволяет обойтись без наземных геодезических работ. Сначала определяют продольный параллакс точки на урезе воды, затем — продольный параллакс поплавка и их разность. Это проделывают для каждого поплавка. Значения поверхностных скоростей находят по формуле

$$v=\frac{\Delta p}{\Delta t}m, \qquad (33.3)$$

где Δp — разность продольных параллаксов; Δt — интервал времени между снимками; m — знаменатель численного масштаба.

Направления скоростей определяют по направлениям скоростных векторов, получаемых по нанесенным на план последовательным положениям поплавков.

Стереоскопический способ отличается более высокой точностью по сравнению со способом одиночных снимков. По имеющимся данным, погрешность измерения скоростей составляет 0,05—0,06 м/с.

33.2. Измерение расходов воды

Наиболее целесообразно производить измерения расходов воды аэрометодами на больших реках. Наибольшие преимущества аэрометодов выявляются при необходимости производить измерения в отдаленных и труднодоступных районах. Благодаря большой скорости выполнения работ измерения расходов воды с самолета с успехом применяют в экспедиционных условиях при исследованиях длинных участков рек. На постоянных гидростворах на больших реках применение описываемых методов особенно эффективно в периоды половодий и крупных паводков, а также при ледоходах, когда обычные измерения расходов затруднительны или невозможны.

Применяют два способа измерения расходов воды аэрометодами: 1) с предварительным промером глубин на гидростворе, 2) без промеров глубин.

Первый способ можно применять, если река на участке измерений имеет достаточно устойчивое, неразмываемое русло. В таком случае поперечный профиль створа может быть составлен заблаговременно при низком уровне воды; в дальнейшем он используется для вычисления расхода воды по поверхностным скоростям течения, определяемым аэрометодом. Если же русло реки неустойчивое, то рассматриваемый способ может применяться при условии, что съемка поперечного профиля реки по створу производится одновременно с измерением скоростей течения; это не всегда возможно из-за ледохода, больших скоростей и пр. В подобных случаях для промеров используют эхолот с самописцем, установленный на специально оборудованном судне.

Для определения поверхностных скоростей течения делают аэрофотосъемку поплавков одиночными снимками при двух залетах, как это было описано в предыдущем параграфе. На местности линия створа должна быть обозначена хорошо опознаваемыми на снимках знаками. Кроме того, на местности должны иметься хорошо опознаваемые, привязанные к геодезической сети ориентиры, необходимые для трансформирования снимков.

При производстве аэрофотосъемки необходимо, чтобы на первом снимке плывущие по воде поплавки были бы выше

створа, а на втором — ниже створа, что имеет значение для последующей обработки — определения скоростей и расходов воды.

Полученные аэрофотоснимки трансформируют — приводят к одному масштабу, затем на чертежной бумаге вычерчивают план участка, проводят линию створа и переносят со снимков положения поплавков, как это показано на рис. 33.3.

Соединяя точки двух последовательных положений каждого поплавка, получают векторы путей поплавков. Для вычисления расхода воды необходимо определить проекции поверхностных скоростей на нормаль к гидроствору. Для этого делают графические построения с соблюдением необходимой точности. Из конечных точек векторов путей поплавков проводят линии перпендикулярно створу (см. рис. 33.3). В каждом полученном таким путем треугольнике определяют длину катета, перпендикулярного створу. Разделив полученную величину на продолжительность интервала времени между снимками, получают поверхностную

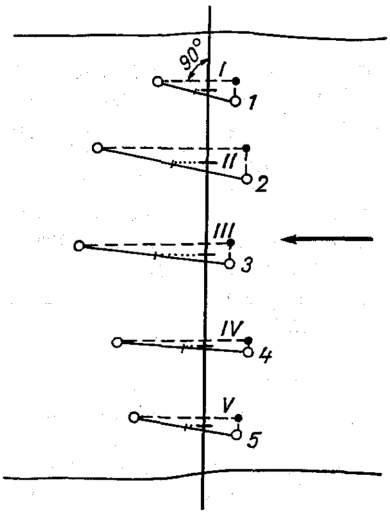


Рис. 33.3. Графическое построение для определения поверхностных скоростей течения.

1—5 — поплавки; I—V — скоростные вертикали.

скорость течения по нормали к гидроствору. Положение скоростных вертикалей находят, проектируя на линию створа точки, лежащие на серединах векторов путей поплавков. При ветре вводят поправки в значения скоростей.

Расход воды вычисляют аналитическим способом, так же как и при измерении расхода поверхностными поплавками (см. гл. 14). Для перехода от фиктивного расхода к действительному применяют переходный коэффициент K_1, определяемый, как указано в гл. 14.

Второй способ, не требующий промеров глубин, основан на применении поплавков-интеграторов. Теория поплавка-интегратора была изложена в п. 11.3, где выведена формула

$$l = \frac{1}{v_1} v_в h,$$

где l — расстояние от скоростной вертикали до точки всплытия поплавка; v_1 — скорость вертикального подъема поплавка, принимаемая при выводе формулы за постоянную; $v_в$ — средняя скорость течения на вертикали; h — глубина по вертикали.

временно делают съемку с минимальными интервалами между отдельными снимками для определения по всплескам мест падения сосудов. В дальнейшем эти точки опознаются на снимках и от них производят измерения длин расходных отрезков.

Масло выливается из сосудов в течение 7—8 мин. За это время самолет успевает сделать не менее двух заходов и выполнить основную аэрофотосъемку. На снимках фиксируются река, оба берега с опознавательными знаками направления гидроствора и места выхода масляных пятен на поверхность воды.

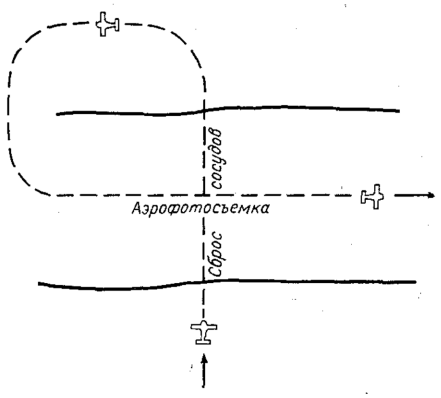


Рис. 33.5. Схема полетов для измерения расхода воды.

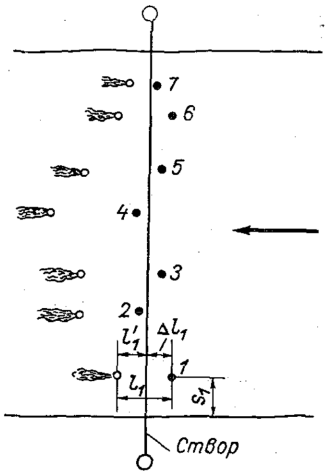


Рис. 33.6. Схема к определению расходных отрезков.

Цифрами показаны места падения сосудов (всплески).

Аэрофотоснимки, сделанные при сбрасывании сосудов (вспомогательные) и при всплытии масла на поверхность воды (основные), подвергаются обработке с целью определения длин расходных отрезков. На основных снимках проводят линию створа, пользуясь для этого береговыми ориентирами. С вспомогательных снимков на основные переносят точки падения сосудов. Длины расходных отрезков определяют по формуле

$$l_i = l'_i \pm \Delta l_i, \qquad (33.7)$$

где Δl_i — расстояние от линии створа до точки падения сосуда (рис. 33.6); знак плюс — когда точки падения выше створа, минус — ниже створа; l'_i — расстояние от линии створа до точки выхода масла.

На основных снимках измеряют также расстояния S от постоянного начала или от уреза воды до вертикалей, за которые принимают проекции точек падения сосудов на линию створа.

Для вычисления расхода воды формула (33.6) не употреб-

ляется, так как в нее входит значение скорости всплывания поплавка, которое в турбулентных потоках ввиду наличия восходящих и нисходящих токов воды не строго постоянно, как в спокойной воде. Для учета этого обстоятельства Б. К. Малявским [27] предложена эмпирическая формула, полученная по данным натурных исследований на различных реках

$$q = 0{,}135l, \tag{33.8}$$

где q — элементарный расход на вертикали; l — расходный отрезок [см. формулу (33.7)].

Пользуясь этой формулой, можно, зная значения расходных отрезков и расстояния между вертикалями, построить эпюру распределения элементарных расходов по гидроствору, и определив ее площадь, получить значение расхода воды.

Как указано в монографии [27], сравнительные измерения расходов воды описанным способом и вертушкой показали, что точность данного способа составляет ± (4—5) %, принимая вертушечные измерения за истинные.

Дальнейшее усовершенствование интеграционного измерения расхода воды с самолета выполнено в ГГИ. Методика измерения подробно описана в Методических рекомендациях [28].

Для измерения расхода с самолета сбрасываются специально разработанные устройства — гидробомбы, состоящие из баллона, деревянного стабилизатора и поплавка, отделяющегося при ударе о поверхность воды.

В баллон заливается жидкий индикатор — смесь отработанного масла с керосином. Выход масла из баллона при достижении им дна реки осуществляется через пять специальных отверстий.

В качестве поверхностного поплавка, отделяющегося от гидробомбы на поверхности воды, используется пластмассовый или деревянный поплавок. На аэрофотоснимках места падения гидробомб определяются положением поверхностных поплавков (в момент падения). Места выхода масла на поверхность воды легко опознаются на аэрофотоснимках. Значения элементарных расходов на вертикалях определяются по формуле

$$q = L\frac{u_1 u_2}{u_1 + u_2}, \tag{33.9}$$

где L — расстояние между точкой падения гидробомбы и местом выхода масла на поверхность воды; u_1 — скорость погружения гидробомбы на дно; u_2 — скорость всплывания масла; u_1 и u_2 определяются эмпирически в лабораторных условиях, L определяется путем измерений на аэрофотоснимках.

Значение расхода воды определяется путем интегрирования эпюры элементарных расходов по ширине реки.

Описанный метод по данным [28] характеризуется погрешностью 5—10%.

Кроме описанных способов измерений расхода воды, в ГГИ разработан еще способ, не требующий предварительных промеров глубин на гидростворе. Профиль поперечного сечения реки определяется с помощью буйковых систем, сбрасываемых с самолета по линии створа. Буйковая система имеет груз—якорь, к которому на прочных нитях различной длины прикреплены два буйка. Аэрофотосъемка всплывших буйков дает возможность определить глубину реки в месте их падения. На аэрофотоснимках измеряется расстояние a между буйками. Длины

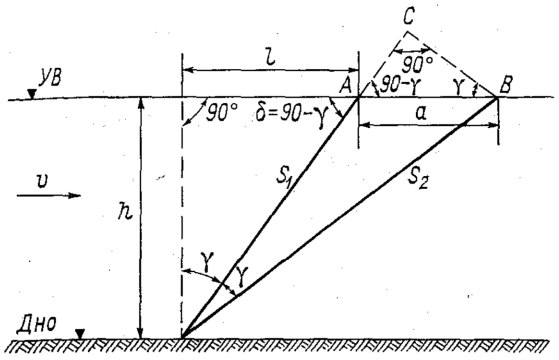


Рис. 33.7. Схема установки буйковой системы в потоке.

нитей S_1 и S_2, связывающих буйки с якорем, известны. По измеренному расстоянию a и известным S_1 и S_2 значение глубины определяется из геометрических соотношений (рис. 33.7).

В этом способе поверхностные скорости течения определяются поплавками, сбрасываемыми с самолета с последующей их аэрофотосъемкой. Фиктивный расход воды определяется по поверхностным скоростям и площади живого сечения, а действительный расход — с применением переходного коэффициента K_1.

Подробное изложение этого способа имеется в Методических рекомендациях [28].

Раздел IX

Автоматизация гидрологической сети. Механизированная обработка результатов наблюдений

Глава 34

Автоматизация гидрологической сети

34.1. Об основной схеме комплексной автоматизации Гидрометеорологической службы СССР

Основная схема комплексной автоматизации Гидрометслужбы СССР предусматривает автоматизацию метеорологической и гидрологической сети. Схема автоматизации предусматривает также получение гидрометеорологической информации через искусственные спутники Земли. Переход от существующей системы гидрометеорологических наблюдений к новой, автоматизированной, займет более или менее продолжительный период времени. Одним из основных вопросов при этом является разработка и внедрение чувствительных элементов (датчиков), выбор методов передачи и обработки информации. Уже разработано несколько вариантов схем автоматизации процессов измерения и средств передачи информации в центральные пункты сбора и обработки информации. Осуществление комплексной автоматизации потребует существенной организационной перестройки Гидрометслужбы. Она будет состоять из следующих основных звеньев:

—Гидрометцентра СССР,

— региональных гидрометцентров (в Новосибирске, Ташкенте и Хабаровске),

— территориальных гидрометцентров,

— зональных гидрометеорологических обсерваторий.

К настоящему времени указанная организационная перестройка осуществляется в широких масштабах. Большой производственный эксперимент по внедрению комплексной автоматизации проводится в Белорусской ССР.

Поток информации в перечисленные выше звенья будет поступать различными средствами, в том числе от унифицирован-

о гидрологическом режиме водных объектов. Рассмотрим несколько подробнее устройство гидрологического поста ГР-103. Он предназначен для ведения наблюдений и регистрации на перфоленте в двоично-десятичном коде гидрологических элементов в тех пунктах гидрологической сети, где требуется систематическое накопление информации.

Пост ГР-103 состоит из блока автоматики и гидрологических датчиков. Датчики размещаются на расстоянии до 2 км от блока автоматики; информация от них передается по проводам.

На первом этапе автоматизации гидрологической сети режимные регистрирующие посты будут состоять из двух датчиков: датчика уровня и датчика температуры воды. Однако число датчиков, включаемых в АРРГП, может достигать десяти. Ведутся работы по созданию других гидрологических датчиков. До их разработки и освоения наблюдения за другими элементами режима будут производиться применяемыми в настоящее время методами.

Блок автоматики обеспечивает работу поста по заданной программе. Он состоит из программного устройства, устройства кодирования и накопления информации и блока питания. По команде из блока автоматики производится съем информации одновременно со всех датчиков. Предусмотрена различная цикличность сбора информации, которая может устанавливаться с учетом характера гидрологических процессов. Так, наблюдения могут производиться каждый час, каждые два часа, раз в сутки, два раза в сутки. Информация, т. е. результаты измерений уровня и температуры воды, а также час, день, месяц регистрируются на перфоленте.

Процесс сбора и регистрации информации в каждом цикле осуществляется по такой программе [19]:

1. В течение 5 мин подается питание на все датчики, что обеспечивает поступление от них информации в число-импульсном коде одновременно на все пересчетные схемы, число которых равно числу датчиков; в пересчетных схемах происходит преобразование число-импульсного кода в двоично-десятичный.

2. Через 5 мин после начала цикла включается двигатель перфоратора и запускается управляющее устройство.

3. В течение 3 секунд по командам управляющего устройства формируются служебные комбинации (час, день, месяц, номер датчика); происходит последовательный съем информации с пересчетных схем в схему накопителя, откуда информация поступает в схему преобразователя последовательного кода в параллельный, необходимый для работы перфоратора, и в схему формирования контрольного разряда; формируется контрольный разряд, обеспечивающий достоверность информации при передаче ее по каналам связи на ЭВМ; осуществляется запись информации на перфоленте в пятиэлементном двоично-десятичном

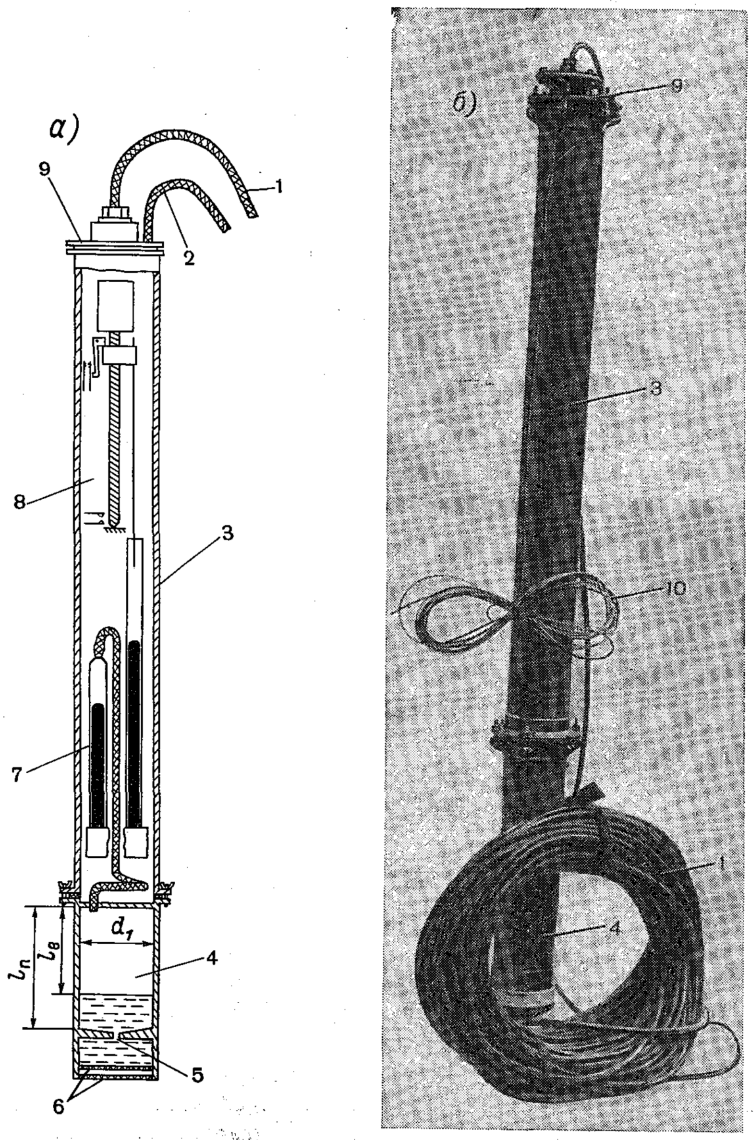


Рис. 34.1. Дистанционный гидростатический уровнемер [18].

а — схема конструкции прибора; *б* — общий вид; *1* — кабель; *2* — компенсационный шланг; *3* — защитный кожух; *4* — приемник давления; *5* — отверстие; *6* — сетки (фильтр); *7* — манометр; *8* — измерительный блок; *9* — крышка; *10* — трос.

коде; выключается двигатель перфоратора, управляющее устройство приходит в исходное состояние.

Рассмотрим устройство гидрологических датчиков.

Датчик уровня воды УГД основан на гидростатическом принципе. Чувствительным элементом, воспринимающим гидростатическое давление, является ртутный манометр

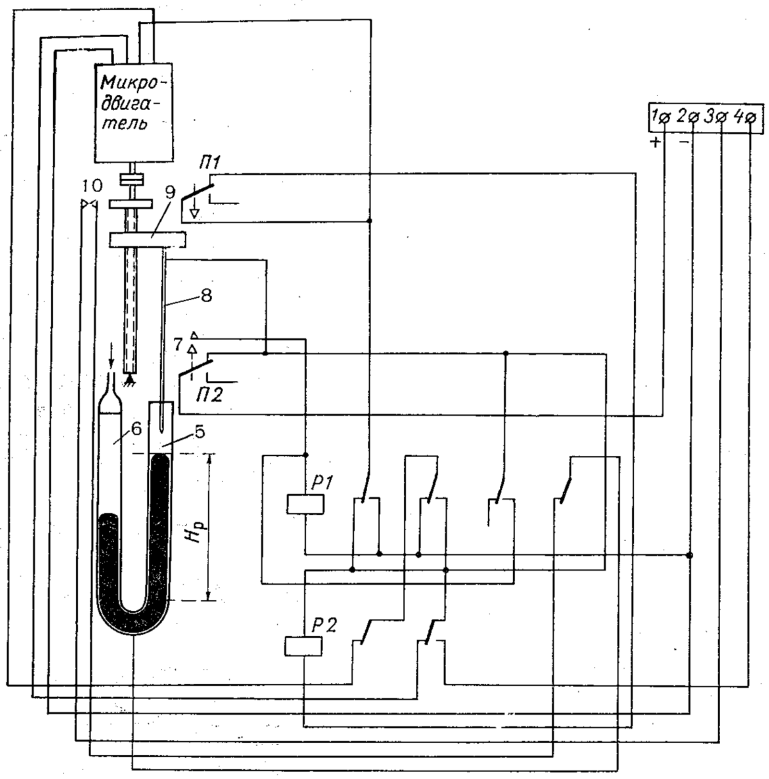


Рис. 34.2. Электрическая схема гидростатического уровнемера [*18*].

1—4 — соединительные клеммы; *5* и *6* — рабочая и резервуарная трубки манометра; *7* — неподвижный контакт; *8* — щуп-искатель; *9* — профильная гайка; *10* — прерыватель тока; *П1* и *П2* — микропереключатели; *Р1* и *Р2* — реле.

(рис. 34.1). Один конец трубки манометра соединен посредством шланга с приемником давления, который изолирован от измерительного блока. Другая трубка манометра сообщается с атмосферным давлением, которое подводится в измерительный блок с помощью компенсационного шланга. При колебаниях уровня воды изменяется значение гидростатического давления в приемнике давления, вследствие чего уровень ртути в измерительной трубке манометра соответственно перемещается. Положение мениска ртути измеряется с помощью металлического

щупа-искателя при его вертикальном перемещении, которое осуществляется посредством микроэлектродвигателя. Перемещения щупа преобразуются в электрические импульсы (число-импульсный код), передающиеся по кабелю на регистрирующее устройство. В данном приборе между уровнем воды в водоеме и уровнем ртути в рабочей трубке манометра имеет место обратная зависимость. Для получения прямой зависимости между уровнем воды и числом импульсов на выходе измерительного блока измерение высоты столба ртути в трубке производится от поверхности ртути до неподвижного контакта (рис. 34.2). Такая конструкция датчика позволяет измерять уровень даже в случае, когда вода доходит до нижней части приемника давления [19]. Весь механизм уровнемера помещается в цилиндрическом кожухе, закрываемом сверху герметической крышкой. Размеры уровнемера (габариты): высота 130 см, внешний диаметр 18 см.

Датчик температуры воды рассчитан на измерение температуры в диапазоне от 0 до 40°С с погрешностью до ±0,2°. В качестве чувствительного элемента *1* принят платиновый термометр сопротивления ПТС-500. Прибор состоит из чувствительного элемента и преобразователя, носящего название «автоматический измеритель температуры» (АИТ), размещаемого в блоке автоматики. Устройство чувствительного элемента датчика температуры показано на рис. 34.3. Чувствительный элемент находится внутри защитного стакана *3*. Пространство между стаканом и чувствительным

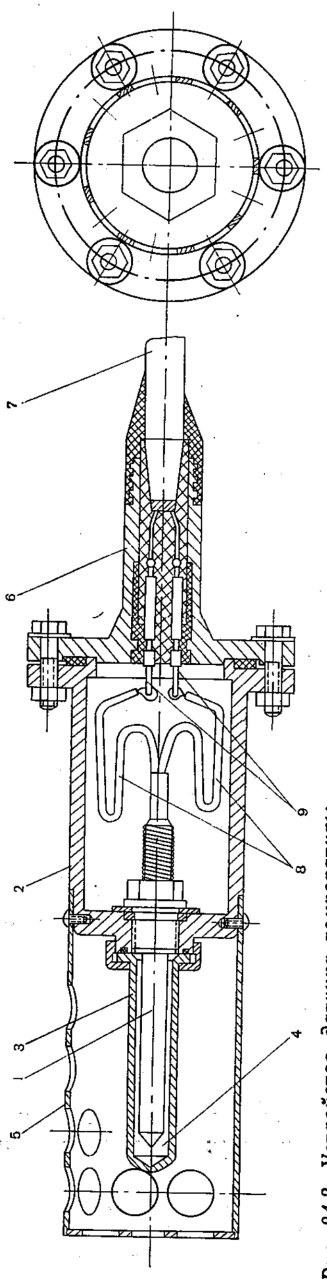


Рис. 34.3. Устройство датчика температуры.
1 — чувствительный элемент; *2* — корпус; *3* — защитный стакан; *4* — пространство, заполняемое теплопроводящим материалом; *5* — перфорированный защитный кожух; *6* — фланец; *7* — кабель; *8* — провода; *9* — жилы кабеля.

элементом *4* заполняется теплопроводящим материалом. Металлический защитный кожух *5* перфорирован. К верхней части корпуса *2* крепится фланец *6* с кабелем *7*. На рисунке показаны также провода *8* и жилы кабеля *9*.

Постовые сооружения для размещения гидрологических датчиков и средств автоматики должны быть приспособлены для различных местных условий: наличия или отсутствия поймы, амплитуды уровней, характера ледохода и пр.

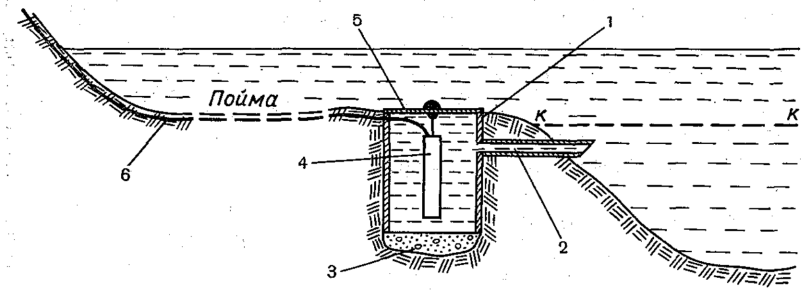


Рис. 34.4. Схема установки гидростатического уровнемера в затопляемом колодце [18].

1 — колодец; *2* — соединительная труба; *3* — дно; *4* — уровнемер; *5* — кабель и шланг.

В ГГИ разработаны различные типы постовых устройств применительно к следующим условиям рек: беспойменные створы, створы с поймой, незатопляемой при ледоходе, створы с поймой, затопляемой при ледоходе, створы в зоне гидротехнических сооружений.

Для этих условий разработаны проекты постовых устройств: на всплывающем контейнере с якорем-присосом, с береговыми колодцами, со свайной опорой и на гидротехническом сооружении. Как показали испытания, наиболее простым и дешевым для установки уровнемера УГД является затопляемый колодец (рис. 34.4). Такой колодец делается вблизи уреза воды, облицовывается бетоном или металлической трубой диаметром 0,4—0,5 м. Глубина колодца 1,5—2,0 м, дно бетонируется. Соединительная труба должна быть ниже наинизшего уровня воды в реке. Недостатком такой установки является затруднительность доступа к прибору при высоких уровнях воды.

34.3. Некоторые методические вопросы автоматизации гидрологических наблюдений

В условиях автоматизации большое значение приобретает определение оптимальной частоты наблюдений — критерий достаточности информации. Для оценки количества дискретных изме-

рений заданной функции (или ее аналога), необходимого для изучения какого-либо гидрологического процесса с заданной точностью, в ГГИ был разработан метод, основанный на теореме акад. А. В. Котельникова. Теорема Котельникова, применяемая в теории связи, утверждает, что если функция $f(t)$ ограничена полосой частот от 0 до ω_c, то она может быть определена заданием ее ординат в ряде дискретных точек, отстоящих друг от друга на интервал времени

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{1}{2f_c}, \qquad (34.1)$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$; f_c — наивысшая частота спектра функции.

Из теоремы Котельникова следует, что если период функции $f(t)$ равен T, то функция $f(t)$ может быть представлена с помощью следующего количества информации (дискретных измерений):

$$m = \frac{T}{\Delta t} = 2f_c T. \qquad (34.2)$$

Величина m получила название критерия достаточности информации.

Нахождение величины f_c основывается на разложении функции в ряд Фурье: определяется частотный спектр и величина f_c — наивысшая гармоника функции. На практике в большинстве случаев для разложения функции в ряд Фурье пользуются приближенными методами гармонического анализа — машинами-анализаторами или специальными шаблонами (Лопшица или Смирнова).

Теорема Котельникова применима при изучении процессов, непрерывных по своей природе и исследуемых путем дискретных измерений. Поэтому допускается, что критерий достаточности информации, основанный на этой теореме, может быть применен при изучении гидрологических процессов.

Этот вопрос подробно рассмотрен в монографии А. М. Димаксяна [18].

Следует отметить, что применение критерия достаточности информации, вытекающего из теоремы Котельникова, в общем должно ограничиваться случаями, когда заранее известен аналог или истинный ход функции (какого-либо процесса), что необходимо для выполнения гармонического анализа.

В ГГИ были проведены работы для определения интервалов времени дискретизации Δt между измерениями расходов воды, обеспечивающих заранее заданные относительные погрешности в учете стока для наиболее сложных участков десяти типов гидрографов по классификации Б. Д. Зайкова. В монографии [18] сопоставление исходной и синтезированной кривой изучаемой функции осуществляется определением коэффициентов

соответствия. Последнее дает возможность определить погрешность в учете стока. Там же показано, что при дискретизации функции неизбежны ошибки, которые тоже зависят от критерия достаточности информации как при автоматизации, так и при обычных наблюдениях.

Наряду с рассмотренным методом, позволяющим определить количество дискретных измерений, необходимых для характеристики гидрологического процесса, применяют метод статистической обработки данных учащенных измерений, проведенных в натурных условиях. Результаты такой обработки дают возможность делать выводы о необходимой частоте наблюдений.

Размещение режимных гидрологических постов в условиях автоматизации должно проводиться, как и вообще, на основе принципа географической интерполяции гидрологических элементов между пунктами наблюдений. Наряду с этим должны учитываться особенности гидрологического режима водных объектов данной территории и запросы отраслей народного хозяйства в получении тех или иных специфических данных о гидрологическом режиме, например в связи с орошением земель, осушением болот и т. п.

Для проверки и отработки в натурных условиях системы автоматизации гидрометеорологических наблюдений был разработан и в настоящее время, как уже указывалось, осуществляется проект автоматизации Гидрометслужбы Белорусской ССР. Выполнение предусмотренных проектом работ позволит получить необходимые данные по следующим вопросам:

— рациональное размещение гидрологической сети, обоснование состава, частоты и точности наблюдений для наиболее полного освещения режима вод суши и перспектив комплексного использования водных ресурсов;

— использование современных технических средств измерения, передачи и накопления информации;

— типизации гидрометрических постов по инженерно-гидрологическим условиям размещения средств автоматики;

— варианты постовых сооружений по типам гидрометрических створов;

— организация неавтоматизированных наблюдений с помощью разъездных гидрометрических отрядов, аэрометодов и других средств.

Кроме того, имеется в виду получение данных по технико-экономической эффективности автоматизации гидрометеорологических наблюдений.

Результаты этой работы послужат накоплению опыта и будут являться основой для перехода к комплексной автоматизации всей Гидрометеорологической службы СССР.

Глава 35

Механизированная обработка результатов наблюдений

При автоматизации гидрологических наблюдений информация, получаемая от режимных регистрирующих постов, будет автоматически фиксироваться на техническом носителе — перфоленте — и вводиться в ЭВМ для обработки. Предусматривается и непосредственное поступление оперативной информации в ЭВМ от гидрологических автоматических станций.

В настоящее время обработка результатов гидрологических наблюдений сети станций и постов еще в значительной степени выполняется инженерно-техническим персоналом вручную. Это приводит к тому, что опубликование результатов наблюдений значительно отстает по времени. Такая задержка сама по себе нежелательна и не дает возможности многим организациям, заинтересованным в использовании материалов наблюдений, получать их своевременно. Для устранения этого недостатка разработана и уже вводится на государственной гидрологической сети система механизированной обработки результатов наблюдений.

Проводилась экспериментальная проверка разработанной системы, в ходе которой был внесен ряд уточнений. В результате получены достаточно обоснованные выводы об эффективности разработанной системы механизированной обработки и о целесообразности дальнейшего внедрения ее на гидрологической сети.

Надо отметить, что на начальной стадии применения механизированной обработки гидрологической информации, вероятно, выявится необходимость в дальнейших улучшениях отдельных звеньев принятой системы.

Рассмотрим основные положения системы механизированной обработки гидрологической информации в условиях неавтоматизированной сети станций и постов.

Обработка результатов гидрологических наблюдений неавтоматизированных постов состоит из следующих этапов:

— запись результатов наблюдений и измерений непосредственно на постах в полевые книжки нового образца;

— перенесение информации из книжек на технический носитель — перфоленту — для последующего ввода в ЭВМ;

— обработка результатов гидрологических наблюдений и автоматический контроль на ЭВМ;

— запись результатов обработки на магнитную ленту и последующая перезапись на микрофильм для создания механизированного фонда памяти;

— печатание на ЭВМ месячных таблиц гидрологических данных и в дальнейшем таблиц гидрологических ежегодников.

Рассмотрим каждый из перечисленных этапов.

35.1. Запись результатов наблюдений и измерений

Результаты гидрометрических измерений уровней, расходов воды и взвешенных наносов и сопутствующих им наблюдений должны заноситься в полевые книжки нового образца.

Книжка КГ-1М предназначена для записи результатов водомерных наблюдений за месячный период на посту.

Книжка КГ-3М предназначена для записи измерений расхода воды вертушкой и глубинным поплавком различными способами — основным, детальным, сокращенным.

Книжка КГ-7М предназначена для записи измерений расхода воды поверхностными поплавками.

Книжка КГ-6М предназначена для записи измерений расхода взвешенных наносов (точечным, суммарным или интеграционным способом) и расхода донных наносов.

В книжках нового образца сохранен неизменным объем сведений, которые записывались в книжки старого образца, не предназначавшиеся для автоматизированной обработки данных. Поэтому сохраняется возможность и ручной обработки данных измерений. Все данные, предназначенные для перенесения на перфоленту и, следовательно, для автоматизированной обработки, выделены в книжках утолщенно очерченными рамками. Книжки нового образца отличаются также тем, что для удобства перфорации и дальнейшей обработки каждая графа в них имеет адрес-номер. Графой здесь называется отдельная клетка, в которую записывается цифрой результат наблюдений; горизонтальный ряд граф называется строкой, вертикальный — колонкой. Кроме того, введено кодирование некоторых признаных данных. Так, например, титульная страница книжки КГ-1М имеет перфорируемую признаную часть, предназначенную для автоматизированного поиска информации, в которой указывается: код информации (условный номер раздела Государственного водного кадастра, шифр серии материалов, номер вида информации), код пункта наблюдений, код времени наблюдений.

Правила записи в книжках нового образца подробно регламентируются «Временными методическими указаниями по машинной обработке и контролю данных гидрометеорологических наблюдений», вып. 6, раздел I (Обнинск, 1975). Остановимся на некоторых основных правилах записи.

В колонках, в которых помещаются данные, предназначенные для перенесения на перфоленту, записываются только цифры, не допускается применение каких-либо буквенных

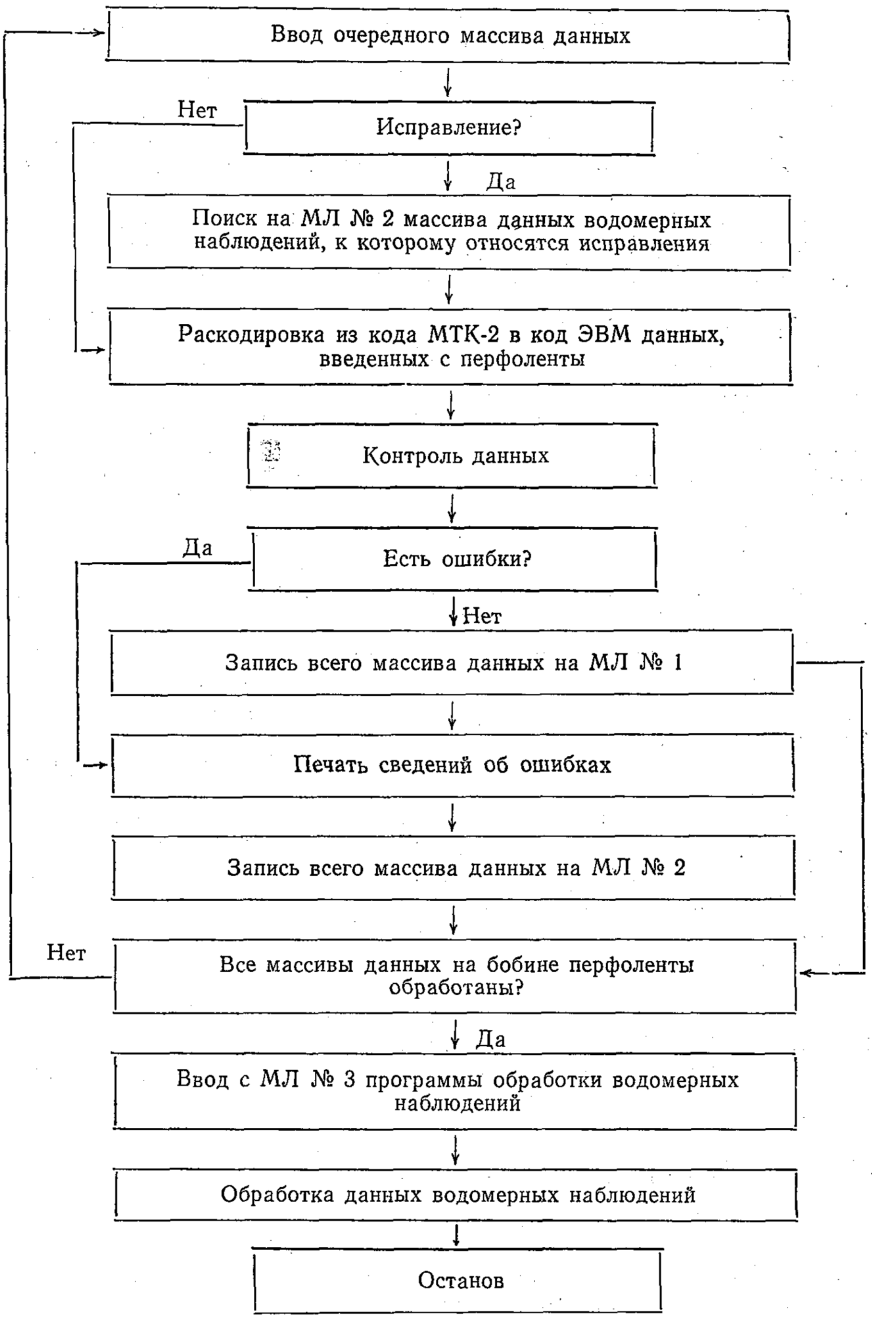


Рис. 35.1. Общая блок-схема программы контроля результатов водомерных наблюдений.

обозначений. Если наблюдение за каким-либо элементом не производилось, то соответствующие графы оставляются незаполненными. Не допускаются прочерки или другие подобные им обозначения. Запись результатов гидрологических наблюдений, предназначенных для автоматизированной обработки, должна производиться только в пределах утолщенно очерченной рамки страниц книжек.

Адресная система записи в полевых книжках, как уже указывалось, предусматривает удобство перенесения записи результатов наблюдений и измерений на перфоленту. Каждая графа имеет свой адрес, который состоит из одной — четырех цифр и знака равенства, например 125=.

Перенесение данных из книжек на перфоленту осуществляется на телетайпных аппаратах Т-51 и Т-63, или других рулонных телеграфных аппаратах, где каждый символ перфорируется в коде МТК-2 (второй международный телеграфный код). Одновременно с перфорацией информация печатается на широкой бумажной телеграфной ленте.

Перед перфорацией производится контроль правильности заполнения книжек, особенно тех граф, которые подлежат перфорации, делается также проверка вычислений. На перфоленту должны переноситься только проверенные данные.

При перфорации данных из книжек на перфоленту тоже возможны ошибки: 1) ошибочная перфорация одного или нескольких знаков; 2) пропуск одного или нескольких знаков; 3) повторение знаков и др. Исправления ошибок даются в соответствии с правилами, изложенными во Временных методических указаниях [13].

Перенесение информации на перфоленту производится на гидрологических станциях. Подготовленные перфоленты вместе с широкой бумажной лентой высылаются в региональный вычислительный центр (РВЦ). Перфоленты с данными водомерных наблюдений высылаются ежемесячно; перфоленты с данными по измерениям расходов воды и взвешенных наносов — поквартально.

В РВЦ по мере поступления материалов осуществляется машинный контроль и обработка данных, печать итогов обработки в виде таблиц и накопление информации в фонде памяти ЭВМ.

35.2. Обработка результатов наблюдений

Для обработки результатов гидрологических наблюдений составлены программы применительно к вычислительной машине «Минск-32» (в дальнейшем предусматривается переход к обработке информации на ЭВМ типа ЕС). Имеются программы для обработки результатов водомерных наблюдений, измерений расходов воды и взвешенных наносов, данных по стоку воды

и др. Предусматривается создание библиотеки программ для обработки различных видов гидрологической информации. Имеющиеся программы периодически уточняются.

В процессе обработки результатов измерений на ЭВМ производится автоматический контроль. В задачу автоматического контроля исходной гидрологической информации входит обнаружение ошибок, случайных и систематических, которые искажают естественный ход элемента и этим дают возможность обнаружить их. Разработка алгоритма автоматического контроля в общем достаточно сложна. Такие алгоритмы, как правило, основываются на сравнении наблюденной величины элемента с его значением, вычисленным по формулам. В качестве примера приводим общую блок-схему программы контроля и обработки результатов водомерных наблюдений[1] (рис. 35.1).

Большинство ошибок обнаруживается в процессе контроля на ЭВМ. Если имеются ошибки, которые не могут быть исправлены автоматически, то производится перезапись на магнитную ленту — МЛ № 2 (см. рис. 35.1); сведения об ошибках анализируются специалистами и составляется ведомость ошибок. Информация об ошибках вводится в ЭВМ и производится повторный контроль. После контроля и исправления ошибок в ЭВМ вводится с МЛ № 3 программа обработки водомерных наблюдений.

В результате обработки водомерных наблюдений на магнитную ленту записывается информация, которая потом перезаписывается на микрофильм для долгосрочного хранения. При этом информация сортируется по четырем макетам: 1) исходные данные, 2) суточные характеристики уровня, 3) данные о температуре воды, 4) сведения о толщине льда.

По окончании работы программы обработки, на ЭВМ печатается таблица с итоговыми данными и графическим изображением хода уровня.

Для автоматического контроля и обработки результатов измерений расходов воды и расходов взвешенных наносов тоже имеются программы; технология обработки данных в общих чертах аналогична приведенной выше для водомерных наблюдений. Следует отметить, что в настоящее время производится непрерывное усовершенствование и уточнение программ, а в ближайшем будущем предстоит их переработка в связи с переходом на новые вычислительные машины — четвертого поколения — типа ЕС. Поэтому вряд ли имеет смысл приводить здесь подробные сведения об имеющихся программах.

Остановимся кратко на обработке данных по стоку воды. Традиционные методы подсчета стока воды описаны в разделе VI.

---

[1] Григорьев В. И., Яковенко Л. И. Совершенствование технологии механизированного контроля и обработки водомерных наблюдений.— «Труды НИИАК», 1973, вып. 87, с. 3—7.

Суть их сводится к построению кривых связи $Q=f(H)$, по которым определяются ежедневные расходы воды и затем вычисляется сток воды. Для построения кривых связи $Q=f(H)$ в практической гидрометрии применяется графический способ: кривая проводится глазомерно по нанесенным на клетчатку точкам Q, H. Значения ежедневных расходов снимаются с кривой по значениям ежедневных уровней.

Для машинной обработки такой способ не применим. Для этого необходимо получить аналитическое выражение связи $Q=f(H)$. Аналитическое представление этой связи рассматривалось в ряде работ, в частности в учебнике Н. А. Гирилловича [15]. Наиболее общим выражением связи $Q=f(H)$ может являться многочлен вида

$$Q=a+bH+cH^2+\ldots+mH^n, \qquad (35.1)$$

являющийся уравнением параболы n-го порядка. Параметры параболы a, b, c, ... определяются по способу наименьших квадратов.

В процессе отработки технологии машинной обработки гидрологических данных было предложено несколько методов автоматизированного вычисления стока воды рек. Вопросы построения программ обработки стоковых данных рассмотрены в работах В. И. Григорьева, Г. В. Лесниковой и др.

Остановимся здесь на методе, предложенном В. И. Григорьевым и проходящим в настоящее время практическую проверку. Согласно этому методу, значение ежедневного расхода воды $Q_{еж}$ определяется как сумма двух составляющих

$$Q_{еж}=Q_{кр}+\Delta Q, \qquad (35.2)$$

где $Q_{кр}$ — расход, снятый с кривой $Q=f(H)$ установившегося режима; $\Delta Q=KQ_{кр}$, при этом $K=f(t)$ — поправочный коэффициент, значение которого снимается с графика поправок.

Значение K учитывает отклонение точек от кривой $Q=f(H)$ установившегося режима в периоды зарастания русла, неустановившегося движения воды — подъема и спада, ледяных образований, деформаций русла.

Подлежащие обработке данные вводятся в ЭВМ, где из всех измеренных расходов отбираются значения при состоянии реки «чисто» и при отсутствии каких-либо явлений, нарушающих связь $Q=f(H)$. Далее ряд этих расходов аппроксимируется многочленом

$$Q_{кр}=a+bH+cH^2+\ldots+mH^n. \qquad (35.3)$$

При этом производится анализ поля точек и исключение отдельных, сильно отклоняющихся. С помощью полученного уравнения вычисляются поправочные коэффициенты K для каждого

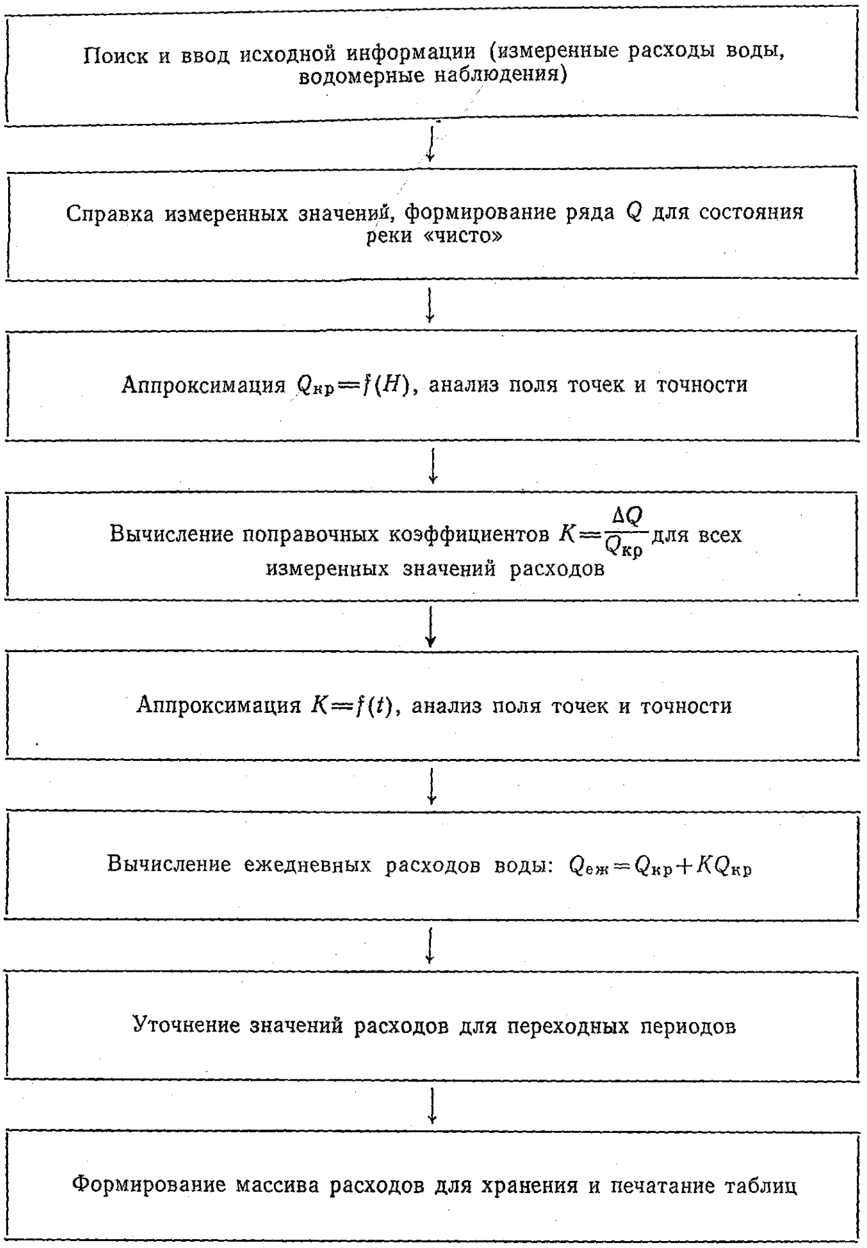


Рис. 35.2. Блок-схема программы вычисления ежедневных расходов воды.

Приложение 2

Значения коэффициентов шероховатости для естественных водотоков, по М. Ф. Срибному [41]

Категория	Характеристика русла	n
	а. Для равнинных рек	
1	Прямолинейные участки канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	0,020
2	Извилистые участки канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	0,022
3	Естественные земляные русла в весьма благоприятных условиях, чистые и прямые, со спокойным течением	0,025
4	Галечные и гравийные русла в таких же условиях	0,030
5	Русла постоянных потоков, преимущественно больших и средних рек в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды	0,035
6	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков в обычных условиях, извилистые с некоторыми неправильностями в направлении струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, местами камни). Незаросшие ровные поймы	0,040
7	Русла больших и средних рек, значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые с неспокойным течением. Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые нормальным количеством растительности (травы, кустарники)	0,050
8	Русла периодических потоков, сильно засоренные и извилистые. Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кусты, деревья, наличие заводей). Порожистые участки равнинных рек	0,065
9	Русла и поймы, весьма значительно заросшие (со слабым течением), с большими глубокими промоинами	0,080
10	Поймы такие же, как в предыдущей категории, но с сильно неправильными кососструйными течениями, с заводями	0,100
11	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.), поймы лесистые с очень большими мертвыми пространствами, с местными углублениями, озерами и пр.	0,140
12	Глухие поймы, сплошь лесные, таежного типа	0,200

Категория	Характеристика русла	n
	б. Для горных рек	
1	Искусственные отводы русел рек, весьма чисто высеченные в скале	0,020
2	То же при посредственной обработке поверхности	0,022
3	Естественные русла рек горного происхождения, но с небольшими уклонами и в весьма благоприятных условиях; чистые, прямые, земляные (глина, песок, мелкий гравий) русла с уклоном $I = 0{,}0005 \div 0{,}0008$	0,025
4	Галечно-гравийные русла в таких же условиях с $I = 0{,}0008 \div 0{,}0010$	0,030
5	Периодические потоки (большие и малые) при очень хорошем состоянии поверхности и формы ложа. Галечно-гравийные русла такие же, как в предыдущей категории, но с более крупной галькой. $I = 0{,}001 \div 0{,}003$	0,035
6	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. Правильные, хорошо разработанные галечные русла горных рек в нижнем течении. $I = 0{,}003 \div 0{,}007$	0,040
7	Русла (больших и средних рек) значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые с неспокойным течением. Периодические (ливневые и весенние) водотоки с крупногалечным покрытием ложа или с растительностью. $I = 0{,}007 \div 0{,}015$	0,050
8	Русла периодических водотоков сильно засоренные и извилистые. Галечно-валунные русла горного типа (в среднем течении) с ненормальной поверхностью водного зеркала. $I = 0{,}015 \div 0{,}05$	0,065
9	Валунные, горного типа русла горных рек (в средней и верхней частях) и периодических водотоков с бурным пенистым течением, с изрытой поверхностью водного зеркала (с летящими вверх брызгами воды). $I = 0{,}05 \div 0{,}09$	0,08
10	Горно-водопадного типа русла, преимущественно в верхнем течении с крупновалунным и извилистым строением ложа; перепады ярко выражены, пенистость настолько сильна, что вода, потеряв прозрачность, имеет белый цвет; шум потока доминирует над всеми остальными звуками. $I = 0{,}09 \div 0{,}20$	0,100
11	Характеристика горных рек та же, что и предыдущей категории, но с более сильным сопротивлением	0,140
12	Предельно высокое сопротивление горных рек	0,200

Приложение 3

Значения коэффициентов шероховатости для пойм больших рек [1]

Характер поймы	Средняя глубина, м	Коэффициент Шези C	Коэффициент шероховатости n
Негустые заросли кустарника	1,30	9,7	0,118
Сплошной кустарник	1,18	8,2	0,135
Густые заросли ивы высотой 4—5 м	2,05	3,55	0,400
Лес	3,11	13,8	0,105
Луг	3,05	32,8	0,040
Огороды	2,24	34,5	0,035

[1] Васильева Л. А. Коэффициенты шероховатости в руслах и поймах больших рек. Сб. материалов по обмену опытом, № 4. Л., Изд. Гидропроекта, 1962.

Приложение 4

Значения коэффициента Шези по формуле Н. Н. Павловского

R м	n							
	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,050	0,080	0,100
0,10	30,6	22,4	17,3	13,8	11,2	8,1	3,7	2,3
0,12	32,6	23,5	18,3	14,7	12,1	8,2	4,1	2,7
0,14	33,0	24,5	19,1	15,4	12,8	9,3	4,5	3,0
0,16	34,0	25,4	19,9	16,1	13,4	10,0	4,8	3,3
0,18	34,8	26,2	20,6	16,8	14,0	10,4	5,2	3,6
0,20	35,7	26,9	21,3	17,4	14,5	10,9	5,4	3,8
0,22	36,4	27,6	21,9	17,9	15,0	11,2	5,8	4,1
0,24	37,1	28,3	22,5	18,5	15,5	11,8	6,0	4,3
0,26	37,8	28,8	23,0	18,9	16,0	12,2	6,4	4,5
0,28	38,4	29,4	23,5	19,4	16,4	12,5	6,6	4,8
0,30	39,0	29,9	24,0	19,9	16,8	12,8	6,8	5,0
0,35	40,3	31,1	25,1	20,9	17,8	13,6	7,5	5,5
0,40	41,5	32,2	26,0	21,8	18,6	14,4	8,0	5,9
0,45	42,5	33,1	26,9	22,6	19,4	15,0	8,5	6,4
0,50	43,5	34,0	27,8	23,4	20,1	15,6	8,9	6,8
0,55	44,4	34,8	28,5	24,0	20,7	16,2	9,4	7,2
0,60	45,2	35,5	29,2	24,7	21,3	16,7	9,8	7,6
0,65	45,9	36,2	29,8	25,3	21,9	17,2	10,2	7,9
0,70	46,6	36,9	30,4	25,8	22,4	17,7	10,6	8,3
0,75	47,3	37,5	30,9	26,4	22,9	18,2	11,0	8,6
0,80	47,9	38,0	31,5	26,8	23,4	18,5	11,3	8,9
0,85	48,4	38,4	31,8	27,2	23,8	18,8	11,5	9,1
0,90	48,8	38,9	32,3	27,6	24,1	19,3	11,9	9,5
0,95	49,5	39,5	32,8	28,1	24,6	19,7	12,2	9,8
1,00	50,0	40,0	33,3	28,6	25,0	20,0	12,5	10,0
1,10	50,9	40,9	34,1	29,3	25,7	20,6	13,0	10,5
1,20	51,8	41,6	34,8	30,0	26,3	21,2	13,5	10,9
1,30	52,5	42,3	35,5	30,6	26,9	21,8	14,0	11,4

R м	n							
	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,050	0,080	0,100
1,40	53,2	42,9	36,1	31,2	27,4	22,2	14,3	11,8
1,50	53,9	43,6	36,7	31,7	28,0	22,7	14,8	12,1
1,60	54,5	44,1	37,2	32,2	28,4	23,1	15,1	12,4
1,70	55,1	44,7	37,7	32,7	28,9	23,5	15,4	12,8
1,80	55,6	45,1	38,0	33,0	29,2	23,8	15,7	13,0
1,90	56,1	45,6	38,4	33,4	29,7	24,2	16,0	13,3
2,00	56,6	46,0	38,9	33,8	30,0	24,8	16,2	13,6
2,50	58,7	47,9	40,6	35,4	31,5	25,8	17,4	14,6
3,00	60,3	49,3	41,9	36,1	32,5	26,6	18,2	15,2
3,50	61,5	50,3	42,8	37,4	33,3	27,4	18,7	15,7
4,00	62,5	51,2	43,6	38,1	33,9	27,9	18,9	16,0
4,50	63,4	51,7	44,1	38,5	34,4	28,4	19,2	16,1
5,00	64,1	52,4	44,6	38,9	34,6	28,5	19,3	16,2

Список литературы

1. Автоматизированная гидрометеорологическая система. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 216 с.

2. Архангельский М. М., Букина Л. А. Физические основы оптического метода измерения концентрации речных наносов.— «Изв. АН СССР, Сер. геофиз.». 1955, № 5, с. 435—444.

3. Атлас типовых проектов гидрометрических сооружений, ч. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1952. 44 с.

4. Барышников Н. Б. К определению максимальных расходов воды на реках с поймой.— «Труды ЛГМИ», 1969, вып. 36, с. 100—107.

5. Биргер Г. И. Элементы общей теории ультразвуковых расходомеров.— «Измерительная техника», 1961, № 4, с. 42—48.

6. Богомолов А. М., Димаксян А. М., Петров В. П. Основы построения автоматической гидрологической телеизмерительной системы.— «Труды ГГИ», 1963, вып. 101, с. 19—43.

7. Бочкарев Я. В. и др. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации. М., «Колос», 1969. 392 с.

8. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы. М.—Л., «Энергия», 1965. 248 с.

9. Быков В. Д. Гидрометрия. Л., Гидрометеоиздат, 1949. 464 с.

10. Быков В. Д., Васильев А. В. Гидрометрия. Изд. 3-е. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 448 с.

11. Васильев А. В., Шмидт С. В. Водно-технические изыскания. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 344 с.

12. Воскресенский С. В., Гозе Н. П. Приборы для измерения скоростей течения воды. Л., Речиздат ЦУЕГМС, 1935. 116 с.

13. Временные методические указания по машинной обработке и контролю данных гидрометеорологических наблюдений. Вып. 6, разд. I. Обнинск, 1975. 84 с.

14. Гаврилов А. М. Основы учета стока на гидроэлектростанциях. Л., Гидрометеоиздат, 1965. 419 с.

15. Гириллович Н. А. Гидрометрия. Л.—М. Изд. ОНТИ НКТП, 1937. 328 с.

16. Гириллович Н. А. Интеграционные методы определения расхода воды вертушкой в открытых руслах.— «Метеорология и гидрология», 1941, № 5, с. 41—54.

17. Глушков В. Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М., изд. АН СССР, 1961. 416 с.

18. Димаксян А. М. Гидрологические приборы. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 284 с.

19. Димаксян А. М., Федотова Л. В. Автоматическая режимная гидрологическая станция.— «Труды ГГИ», 1974, вып. 215, с. 3—36.

20. Железняков Г. В., Данилевич Б. Б. Точность гидрологических измерений и расчетов. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 240 с.

21. Железняков Г. В. Теоретическая гидрометрия. Л., Гидрометеоиздат, 1976. 343 с.

22. Исследование течений на озерах и водохранилищах. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 320 с.

23. Карасев И. Ф. О принципах размещения и перспективах развития гидрологической сети.— «Труды ГГИ», 1968, вып. 164, с. 3—36.

24. Карасев И. Ф., Чижов А. Н. О критериях точности измерения уровней воды на реках и водохранилищах.— «Метеорология и гидрология», 1967, № 7, с. 59—67.

25. Карауше в А. В. Речная гидравлика. Л., Гидрометеоиздат, 1969, 416 с.

26. Лучшева А. А. Практическая гидрометрия. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 296 с.

27. Малявский Б. К. Методы определения гидрологических характеристик рек с самолета. М., «Транспорт», 1965. 120 с.

28. Методические рекомендации по измерению расходов воды рек аэрометодами. Л., Гидрометеоиздат, 1974. 134 с.

29. Методические указания управлениям Гидрометслужбы, № 65. М., Гидрометеоиздат, 1962. 38 с.

30. Методические указания управлениям Гидрометслужбы, № 72. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 109 с.

31. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Определение понятий гидрометеорологических элементов и оценка точности наблюдений. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 92 с.

32. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2, ч. II. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 264 с.

33. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, ч. II, 1972. 266 с.

34. Овчаров Е. Е., Плотников В. М. Автоматизация учета воды на оросительных системах. М., «Колос», 1972. 96 с.

35. Пикуш Н. В. Методы и приборы гидрометрии. Л., Гидрометеоиздат, 1967. 208 с.

36. Пособие по экстраполяции кривых расходов до наивысших уровней. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 115 с.

37. Руководство по поверке гидрологических приборов. Л., Гидрометеоиздат, 1966. 220 с.

38. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды.— «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—97.

39. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П. Г. Киселева. М., «Энергия», 1972. 312 с.

40. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л., Гидрометеоиздат, 1971. 372 с.

41. Срибный М. Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движению.— В кн. Исследование и комплексное использование водных ресурсов. М., изд. АН СССР, 1960, с. 204—220.

42. Современные методы и приборы, предназначенные для измерения гидравлических и гидрологических элементов. Симпозиум, Болгария — Варна, 1974. 540 с. (ротапринт).

43. Труды III Всесоюз. гидролог. съезда. Т. 8. 1960, Л., Гидрометеоиздат.

44. Труды IV Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 11. 1976, Л., Гидрометеоиздат.

45. Тяпкин Н. Д. Приборы для определения скоростей и расходов воды в открытых руслах (реках и каналах). М., 1901. 304 с.

46. Хамадов И. Б., Бутырин М. В. Эксплуатационная гидрометрия в ирригации. М., «Колос», 1975. 208 с.

47. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 306 с.

48. Щапов Н. М. Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин. М., Госэнергоиздат, 1957. 237 с.

49. André H. Hydrométrie pratique des cours d'eau. Tome I. Grenoble, 1964.

50. Troskolanski A. Hydrometry. Pergamon press. New York, 1960, 684 c.

Предметный указатель

Автоматизация гидрологической сети 415
Аэрометоды в гидрометрии 404

Батометр:
  вакуумный 308
  донный 324
  мгновенного наполнения 303—304
Батометр-бутылка 304
Бур ледовый 385

Вертикаль:
  промерная 98
  скоростная 182
Вертушка:
  гидрометрическая 115
  — компонентная 122
  лабораторная 133
  морская 370
Водослив гидрометрический 224

Гидравлическая крупность наносов 297
Глубина воды:
  средняя 98
  рабочая 186
График комплексный 68—69
Груз гидрометрический 79, 177

Диск белый 381
Дночерпатель 338

Зависимость уровня от расхода воды:
  однозначная 264
  неоднозначная 265

Изотахи 113
Интеграция скоростей течения воды 188

Канал тарировочный 139—142
Координирование промеров глубин 75, 93
Кривая:
  расходов воды 264
  — — зимняя 285
  тахиграфическая 203

Лебедка гидрометрическая 77
Лот промерный 76
Лоток гидрометрический 221
Люлька гидрометрическая 175

Метод смешения 235
Микротермометр ртутный 375—376
Минерализация воды 296, 302
Модель расхода воды 167
Мостик гидрометрический 175
Мутность воды 296, 301

Нуль графика:
  водомерного поста 25
  наблюдений 27

Переправа гидрометрическая 175
Петля паводочная 279
Пипетка 352, 353
Площадь сечения:
  водного 97, 98
  живого 98, 113, 197
Понтон гидрометрический 180—181
Поплавок:
  гидрометрический 148
  двойной 364
Поплавок-интегратор 151
Пост:
  водомерный 25
  — дистанционный 47
  режимный регистрирующий автоматический 417
Профиль:
  реки поперечный 97
  — продольный 100
  скорости 110
Пульсация скоростей течения 107

Радиолаг 94
Расход воды:
  вычисление 194
  измерение 185
  фиктивный 212, 214
  элементарный 167, 200
Расход наносов:
  взвешенных — измерение 312,
  вычисление 315
  элементарный 316
Рейка водомерная 29, 32
Реперы водомерного поста 51

Самописец:
течений ГР-42 367
— печатающий БПВ-2Р 368
уровня 39
Скорость:
гидрометрической вертушки критическая 120
— — начальная 119
местная мгновенная 108
— осредненная 108
средняя на вертикали 111
Станция гидрологическая 20
Створ гидрометрический 170
Сток:
воды 263, 267
наносов взвешенных 296, 319
Съемки ледомерные 389

Тарирование гидрометрических вертушек 139
Термогидрометр 159
Термометр:
водный в оправе 64, 376
глубоководный 379
Трубка:
гидрометрическая 154
грунтовая 342

Уклон поверхности воды 50—51
Уравнение:
кривой расходов воды 430
тарировочное гидрометрической вертушки 145
Урез воды 98, 100
Уровень воды 22—24
Уровнемер дистанционный 256
Уровни воды соответственные 74
Установка:
гидрометрическая дистанционная 175—179
самописцев уровня воды 45

Фильтровальный прибор Куприна ГР-60 346
Фильтрование автоматическое 345
Фотомутномер 310
Фракциометр 351

Шаг лопастного винта:
геометрический 118
гидравлический 120
Шкала цветности воды 381—382
Штанга гидрометрическая 135
Шугобатометр 392
Шугосигнализатор 391

Щуп донный 340

Экстраполяция кривой расходов воды 269
Электротермометр 378
Эпюра скоростей течения воды 110
Эхолот промерный 81

Оглавление

Предисловие 3

Раздел I

Задачи гидрометрии. Краткая история. Организация гидрометрических наблюдений

Глава 1. **Введение** 5

1.1. Предмет и задачи гидрометрии . . . . . —
1.2. Значение гидрометрии для народного хозяйства 6
1.3. Краткие исторические сведения о развитии гидрографических и гидрометрических работ в СССР 8

Глава 2. **Организация сети гидрометеорологических станций и постов в СССР** 17

2.1. Гидрометеорологическая служба СССР . . . . . —
2.2. Основные принципы организации и размещения сети гидрометеорологических станций и постов . . . . . —
2.3. Классификация гидрометеорологической сети 19

Раздел II

Наблюдения за уровнями воды

Глава 3. **Основные сведения о режиме уровней воды и сущность водомерных наблюдений** 22

3.1. Основные сведения о режиме уровней воды . . . . . —
3.2. Цели и основные задачи водомерных наблюдений 24
3.3. Принципы устройства водомерных постов 25

Глава 4. **Типы и устройство водомерных постов** 28

4.1. Простые водомерные посты . . . . . —
4.2. Передаточные водомерные посты 33
4.3. Устройства и приборы для регистрации максимальных и минимальных уровней на простых и передаточных постах 35
4.4. Приспособления и приборы для увеличения точности отсчета уровня воды 37
4.5. Самопишущие водомерные посты 39
4.6. Дистанционные водомерные посты 47
4.7. Уклонные водомерные посты 50
4.8. Реперы водомерных постов 51

Глава 5. **Организация водомерных наблюдений** 53

5.1. Выбор участка реки и места для установки поста . . . . . —
5.2. Устройство, оборудование и нивелировка поста. Открытие поста. Обязанности наблюдателя 59
5.3. Перенос водомерного поста 61

Глава 6. **Наблюдения за уровнем воды на посту** 62

6.1. Состав и сроки наблюдений . . . . . —
6.2. Наблюдения на водомерном посту 64

Глава 7. **Обработка результатов водомерных наблюдений** 65

7.1. Обработка книжек для записи водомерных наблюдений . . . . . —
7.2. Обработка лент самописца 67
7.3. Вычисление средних суточных уровней 70
7.4. Составление годовой таблицы и графика колебаний уровня . . . . —
7.5. Специальная обработка уровней 72
7.6. График связи соответственных уровней двух водомерных постов 74

Раздел III

Измерение глубин

Глава 8. **Производство промерных работ** 75

8.1. Задачи промерных работ . . . . . —
8.2. Методы и приборы для измерения глубин и профилей дна 76
8.3. Способы выполнения промерных работ 86
8.4. Выполнение промерных работ эхолотами 93

Глава 9. **Обработка материалов промерных работ** 96

9.1. Обработка записей в промерной книжке . . . . . —
9.2. Построение поперечных профилей и вычисление морфометрических характеристик 97
9.3. Приведение промеров к условному (срезочному) уровню 99
9.4. Составление плана реки в горизонталях и изобатах 100
9.5. Составление продольного профиля . . . . . —
9.6. Обработка результатов промеров озер 101
9.7. Обработка материалов эхолотного промера 104

Раздел IV

Измерение скоростей течения воды

Глава 10. **Скорости течения в русловых потоках** 107

10.1. Пульсация скоростей . . . . . —
10.2. Распределение скоростей в речном потоке 110

Глава 11. **Методы и приборы для измерения скоростей течения воды** 114

11.1. Классификация методов измерения . . . . . —
11.2. Гидрометрические вертушки 115

11.3. Поплавки 148
11.4. Гидрометрические трубки 154
11.5. Определение скорости течения путем регистрации силового воздействия потока на тело 156
11.6. Измерение скоростей течения приборами, основанными на принципе теплообмена 159
11.7. Определение скоростей течения по объему воды, вошедшей в прибор, и продолжительности наблюдения 160
11.8. Измерение скоростей течения ультразвуковым методом 161

Раздел V

Измерение расходов воды

Глава 12. **Общие понятия о применяемых методах. Модель расхода** 164

12.1. Методы определения расходов воды . . . . . —
12.2. Метод «скорость—площадь». Модель расхода 165

Глава 13. **Измерение расходов воды с помощью гидрометрических вертушек** 169

13.1. Выбор участка реки . . . . . —
13.2. Определение направления гидрометрического створа 170
13.3. Оборудование гидрометрического створа 175
13.4. Измерение расходов воды 185
13.5. Интеграционный способ измерения скоростей течения и расходов воды 188
13.6. Особенности измерения расходов воды в различных условиях . . 193
13.7. Вычисление расходов воды 194
13.8. Измерение расходов воды на малых реках и водотоках 203
13.9. О точности измерения расходов воды гидрометрической вертушкой 207

Глава 14. **Измерение расходов воды поплавками** 210

14.1. Измерение расходов воды поверхностными поплавками . . . . . —
14.2. Измерение расходов воды глубинными поплавками 215

Глава 15. **Расчетный способ определения расходов воды** 216

15.1. Сущность способа . . . . . —
15.2. Вычисление расходов воды в беспойменных створах 217
15.3. Вычисление расходов воды на пойменных створах 219

Глава 16. **Определение расходов воды с помощью мерных устройств** 221

16.1. Определение расходов воды с помощью гидрометрических лотков —
16.2. Определение расходов воды с помощью гидрометрических водосливов 224
16.3. Регистрация расходов воды самописцами и расходоуказателями 231

Глава 17. **Определение расходов воды объемным методом** 232

Глава 18. **Определение расходов воды методом смешения** 235

18.1. Сущность метода смешения . . . . . —
18.2. Способ длительного пуска раствора индикатора 236
18.3. Способ ускоренного пуска раствора индикатора 238

Глава 19. **Определение расходов воды на гидроузлах** 246

19.1. Изменения условий протекания воды, вносимые гидроузлами . . —
19.2. Определение расходов воды на малых ГЭС 249
19.3. Определение расходов воды на крупных ГЭС 255

Раздел VI

Определение зависимости между расходами и уровнями и подсчет стока воды

Глава 20. **Построение кривой расходов при однозначной зависимости между расходами и уровнями** 263

20.1. Основные понятия . . . . . —
20.2. Построение кривой расходов 265
20.3. Подсчет стока воды 267

Глава 21. **Экстраполяция кривых расходов** 268

21.1. Экстраполяция кривых расходов в условиях беспойменных створов 269
21.2. Экстраполяция кривых расходов для пойменных створов 274
21.3. Экстраполяция кривых расходов вниз 277

Глава 22. **Построение кривой расходов и подсчет стока воды при отсутствии однозначной зависимости между расходами и уровнями** . . . 278

22.1. Неустановившееся движение воды . . . . . —
22.2. Ледовые явления 281
22.3. Зарастание русла 286
22.4. Неустойчивые русла 288
22.5. Переменный подпор 291

Раздел VII

Изучение твердого стока и донных отложений

Глава 23. **Общие сведения о твердом стоке** 295

23.1. Основные понятия . . . . . —
23.2. Крупность и гидравлическая крупность наносов 297
23.3. Движение наносов в реках 298
23.4. О режиме мутности и стока наносов в реках 301
23.5. Минерализация речных вод и сток растворенных веществ 302

Глава 24. **Изучение стока взвешенных наносов** 303

24.1. Приборы для взятия проб воды со взвешенными наносами . . . —
24.2. Фотометрический способ определения мутности 310
24.3. Измерение расхода взвешенных наносов 312
24.4. Вычисление расхода взвешенных наносов 315
24.5. Вычисление стока взвешенных наносов 319

Глава 25. **Изучение стока донных наносов** 324

25.1. Приборы для взятия проб донных наносов . . . . . —
25.2. Измерение и вычисление расхода донных наносов. Подсчет стока донных наносов 332
25.3. Учет стока наносов суммарным способом с использованием отстойников гидротехнических сооружений и водохранилищ 335

Глава 26. **Изучение донных отложений** 337

26.1. Общие сведения . . . . . —
26.2. Приборы для взятия проб донных отложений 338

Глава 27. **Лабораторная обработка проб наносов и донных отложений** 344

27.1. Первичная обработка проб . . . . . —
27.2. Обработка проб в лабораториях 349

Глава 28. **Краткие сведения об изучении стока растворенных веществ** 354

28.1. Приборы для взятия проб воды 355
28.2. Взятие проб воды на химический анализ. Выбор пункта и сроки взятия проб воды 357
28.3. Вычисление расходов растворенных веществ и подсчет стока . . 360

Раздел VIII

Специальные исследования и наблюдения

Глава 29. **Измерение направлений течений** 362

29.1. Измерение направлений и скоростей течений поплавками . . . . —
29.2. Измерение направлений и скоростей течений приборами 367

Глава 30. **Наблюдения за температурой, цветом и прозрачностью воды** 375

30.1. Наблюдения за температурой воды . . . . . —
30.2. Определение прозрачности и цвета воды 381

Глава 31. **Наблюдения за ледовым режимом** 383

31.1. Наблюдения за ледовой обстановкой и ледоходом . . . . . —
31.2. Измерение толщины льда и снега на льду 385
31.3. Ледомерные съемки 389
31.4. Наблюдения за образованием внутриводного льда, шугообразованием и шугоходом 390

Глава 32. **Наблюдения за волнением** 394

32.1. Береговые наблюдения . . . . . —
32.2. Волномерные вехи и наблюдения по ним 395
32.3. Волномеры и самописцы волнения для наблюдений в прибрежной зоне 397
32.4. Наблюдения за волнением вдали от берега 401

Глава 33. **Применение аэрометодов в гидрометрии** 404

33.1. Измерение скоростей и направлений течений 405
33.2. Измерение расходов воды 409

Раздел IX

Автоматизация гидрологической сети. Механизированная обработка результатов наблюдений

Глава 34. **Автоматизация гидрологической сети** 415

34.1. Об основной схеме комплексной автоматизации Гидрометеорологической службы СССР . . . . . —
34.2. Автоматический режимный регистрирующий гидрологический пост АРРГП (ГР-103) 417
34.3. Некоторые методические вопросы автоматизации гидрологических наблюдений 422

Глава 35. **Механизированная обработка результатов наблюдений** . . . 425

35.1. Запись результатов наблюдений и измерений 426
35.2. Обработка результатов наблюдений 428

Приложения

1. Поправки на длину подводной части троса Δ_2 (в метрах со знаком минус) 433
2. Значения коэффициентов шероховатости для естественных водотоков, по М. Ф. Срибному [41] 434
3. Значения коэффициентов шероховатости для пойм больших рек . . 436
4. Значения коэффициента Шези C по формуле Н. Н. Павловского . . —

Список литературы 438

Предметный указатель 441

ВАСИЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ БЫКОВ
АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ВАСИЛЬЕВ

Гидрометрия

Редактор Л. А. Чепелкина.
Художник Э. Д. Кузнецов.
Художественный редактор Б. А. Денисовский.
Технический редактор В. И. Семенова.
Корректоры: В. И. Гинцбург, Т. Н. Черненко
ИБ № 116

Сдано в набор 24/VI 1977 г. Подписано к печати 11/X 1977 г. М-20330. Формат 60×90/16. Бум. тип. № 1. Печ. л. 28,5. с вкл. Уч.-изд. л. 29,2. Тираж 6500 экз. Индекс ГЛ-187. Заказ 309. Цена 1 р. 50 к. Гидрометеоиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.
Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
190000, Ленинград, Прачечный пер., 6