

А. А. Лучшева

ПРАКТИЧЕСКАЯ ГИДРОМЕТРИЯ

*Издание 2-е
переработанное
и дополненное*

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



Ленинград Гидрометеиздат 1983

Рецензент: Ленинградский гидрометеорологический институт
(канд. геогр. наук Г. Н. Угренинов)

В книге даны примеры обработки гидрометрических наблюдений с применением новых методов гидрометрии и гидравлики, производимых на речных станциях.

По сравнению с первым изданием обновлены и дополнены упражнения с учетом новых методических руководств, учебников и ГОСТов. Переработан раздел «Автоматизированная обработка гидрометрических наблюдений», введены разделы: статистическая обработка уровней, лабораторная обработка проб наносов, расчеты, связанные с охраной речных вод от загрязнения, и т. д.

Учебное пособие предназначено для студентов гидрометеорологических институтов и университетов. Может быть полезно для студентов гидрогеологических, гидротехнических и гидромелиоративных специальностей, а также для специалистов-практиков.

The book «Practical hydrometry» by A. A. Lutsheva considers examples of the processing of hydrometric observational data made available at river stations using new hydrometry and hydraulic methods. As compared to the first edition examples are renewed and some additional ones included with consideration of new methodological guides, text-books and standards. The chapter «Automatized processing of hydrometric observations» is remade. New chapters are added: statistical processing of levels, laboratory treatment of sediment samples, computations related to preventing river water against pollution, etc.

The book is intended for students of hydrometeorological educational establishments and universities. It is also useful for students of hydrogeological, hydrotechnical and hydromelioration specialities as well as for practical specialists.

Предисловіе

Второе издание учебного пособия «Практическая гидрометрия»¹ составлено в соответствии с учебными программами по гидрометрии для студентов гидрометеорологических институтов, географических факультетов государственных университетов, гидрогеологических факультетов геологоразведочных институтов. Пособие рекомендуется студентам для изучения курса гидрометрии, а также выполнения курсовых и дипломных проектов, заданий по учебным летним и зимним гидрометрическим практикам.

Структура учебного пособия следующая: в каждой главе приводится ряд упражнений, которые составлены единообразно по схеме: «дано», «требуется», «решение». В пунктах «дано» приводятся цифровые исходные данные, в «требуется» дается перечень вопросов, необходимых для последовательного выполнения поставленной в упражнении задачи, в «решении» рассматриваются общие пояснения к поставленной задаче, а затем по каждому пункту «требуется» приводится последовательный ход его выполнения с расчетами, рисунками и графиками. В предлагаемое учебное пособие невозможно включить упражнения по всем разделам курса, поэтому рассматривается только методика обработки материала по основным вопросам гидрометрии.

В целях ограничения объема пособия большая часть таблиц исходных данных и обработки приведена в сокращенном виде.

Во втором издании переработаны и дополнены примеры обработки гидрометрических наблюдений с применением новых указаний согласно решений IV гидрологического съезда, изложенных в Наставлениях, Методических рекомендациях ГГИ и указаниях Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, монографиях, вышедших с момента выхода первого издания пособия.

В настоящем издании учебного пособия для обработки и анализа гидрометрических данных использованы традиционные методы гидрологических расчетов.

Во втором издании пособия введены новые разделы: рассматриваются гигроскопическая влага и плотность наносов, гранулометрический анализ состава наносов, охрана водных ресурсов, расчеты качества воды и уровня загрязнения, статистические методы обра-

¹ А. А. Лучшева. Практическая гидрометрия. — Л.: Гидрометеониздат, 1972.— 380 с.

ботки и аэрокосмические методы. В связи с введением государственного учета вод и государственного водного кадастра приведена новая глава «Автоматизированная обработка гидрологических данных» наблюдений и их кодирование, современные технические носители информации, автоматизированный контроль и обработка данных и автоматизированное вычисление ежедневных расходов воды.

Глава 10 составлена сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных: В. А. Семеновым (разделы 10.1, 10.2, 10.7, 10.8) инж. М. А. Шипулиной (разделы 10.3—10.6, приложения и рисунки к главе 10):

Уровень воды

1

1.1. Составление профиля гидрологического поста

Упражнение 1.1. Построение профиля гидрологического уровня своего свайного поста.

Д а н о: журнал нивелирования поста (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Журнал нивелирования гидрологического поста
р. Воря — с. Голыгино, 18/VI 1980 г.

№ станции	№ репера, свай	Отсчет по рейке			Превышение		Среднее превышение		Отметка, м абс.	Расстояние от репера, м	Приводка над нулем графика, см
		задний	передний	промежуточный	+	-	+	-			
1	Рп. № 1	ч 0737 к 0703							175,000	0,00	300
	св. № 1			ч 1948 к 1807	1211 1104 1214		1212	173,788	3,33	179	
	св. № 2		ч 2484 к 2293	1747 1590 1749		1748	173,252	6,36	125		
	св. № 3		ч 3141 к 2799	2304 2096 2306		2305	172,695	7,76	70		

Примечания: 1. Рейка двухсторонняя. Коэффициент красной стороны рейки 1.1.

2. Отметки уровней: а) высоких вод 173,62 м абс. 15/V 1979 г., б) низких вод 172,94 м абс. 27/VIII 1980 г.; в) рабочий уровень в день нивелирования 173,10 м абс.

3. Отметка нуля графика 172,00 м абс.

Т р е б у е т с я: 1. Обработать данные нивелирования.

2. Выбрать плоскость нуля графика и вычислить приводку.

3. Построить профиль гидрологического уровня своего свайного поста.

Решение: 1. Гидрологический пост — пункт на водном объекте, оборудованный устройствами и приборами для проведения систематических гидрологических наблюдений. Речной гидрологический пост, на котором ведется учет стока воды, назы-

вается расходным, а пост с наблюдениями высоты уровня воды и сопутствующих ему явлений — у ровным.

В данном упражнении рассматривается пост, состоящий из одного репера и трех свай. После устройства поста необходимо произвести нивелирование постовых устройств и составить документацию.

Нивелирование IV класса поста производилось с одной стоянки инструмента. В табл. 1.1 приведены записи при нивелировании. Задний отсчет производился на репер, отсчеты на сваи являлись промежуточными. При нивелировании отсчеты делались по черной и красной сторонам рейки. Отсчеты по черной стороне рейки: на

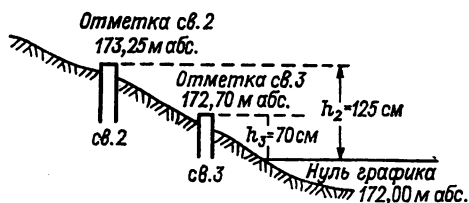


Рис. 1.1. Схема отметок свай, приводок и нуля графика

репер 0737, на св. № 1—1948. Превышение записывается в графу со знаком минус $1948 - 0737 = -1211$. Отсчеты по красной стороне рейки: на репер 0703, на св. № 1 — 1807. Превышение $1807 - 0703 = -1104$. Чтобы отсчеты по красной стороне рейки были сопоставимы с отсчетами по черной стороне, следует превышение по красной стороне рейки умножить на коэффициент 1,1. Для сваи № 1 получим: $1104 \cdot 1,1 = -1214$. Среднее превышение сваи № 1 равно: $(1211 + 1214) : 2 = -1212 = -1,212$ м. Репер № 1 связан с ближайшим к посту репером государственной сети, который имеет переуровненную отметку в Балтийской системе БС над нулем Кронштадского футштока. Абсолютная отметка репера № 1 175,00 м абс. Отметка сваи № 1 = $175,000 - 1,212 = 173,788$ м.

Нивелирование гидрологического уровенного свайного поста и контрольных реперов производится 2—3 раза в год.

2. Уровень воды — высота поверхности воды в водном объекте над условной горизонтальной плоскостью сравнения. Горизонтальной плоскостью сравнения для гидрологического поста является нуль графика гидрологического поста, высотная отметка которого остается постоянной для всего периода действия поста. Отметка нуля графика выбирается при устройстве поста с таким расчетом, чтобы его плоскость находилась не менее чем на 0,5 м ниже самого низкого уровня.

Плоскость нуля графика должна иметь высотную отметку в той же системе, что и репер поста. Положение нуля графика поста может быть изменено лишь в исключительных случаях (при неудачно выбранном нуле графика, открытии поста, переносе поста и создании водохранилища).

Для репера и всех свай гидрологического поста определяются приводки h в сантиметрах — превышение репера и свай над нулем графика. В данном примере нуль графика имеет отметку 172,00 м абс. Соответственно приводки для репера № 1 и свай вычислены в табл. 1.1 и приведены на рис. 1.1.

Помимо нуля графика, на постах имеется «нуль наблюдения» — высотная плоскость, от которой производится отсчет

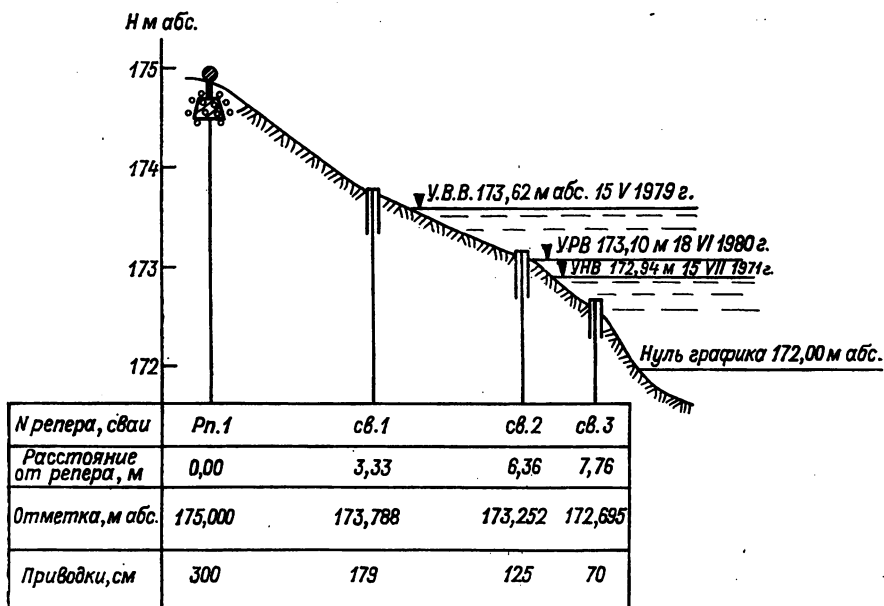


Рис. 1.2. Профиль гидрологического свайного поста
р. Воря — с. Голыгино

уровня в момент наблюдений (для свайного поста нулем наблюдений будут головки свай).

Высота уровня воды на свайном посту измеряется переносной водомерной рейкой в сроки наблюдений. Рейка устанавливается на металлическую головку сваи и выдерживается 0,5—1 мин. Затем производится отсчёт.

3. Профиль гидрологического уровенного свайного поста составляется после его устройства или контрольного ремонта. Масштаб выбирается в зависимости от высотных отметок и горизонтальных расстояний.

При построении профиля водомерного поста вертикальный масштаб может быть выписан в абсолютных отметках или в приводках (в сантиметрах). На сети Госкомгидромета СССР построение профилей ведется в системе приводок с целью упрощения контроля и обработки, так как в ежегодниках уровни приведены над нулем

графика. На ведомственных постах уровни приводятся обычно в абсолютных отметках.

На профиле (рис. 1.2) вправо от шкалы на расстоянии не более 1 см отмечается в соответствии с вертикальным масштабом положение репера. Для определения положения водомерных свай по горизонтальной шкале откладывается в масштабе расстояние от репера до каждой сваи и по отметке находится ее высотное положение. Линия поверхности земли на профиле проводится плавно с таким расчетом, чтобы головки свай возвышались над линией не более 2 мм.

На профиле гидрологического поста условными знаками наносится тип реперов и свай (металлические винтовые, бетонные, деревянные), а также характер грунта (скальный, камни, валуны, галька, мягкая галька, песок и пр.). В горизонтальных плоскостях, соответствующих отметкам, наносятся уровни с их датой: 1) исторические (высший УВВ и низший УНВ), 2) рабочий уровень в день нивелирования (УРВ), 3) отметка нуля графика. Уровни выписываются с точностью до 1 см, или до 0,01 м (в зависимости от принятой системы в абсолютных отметках или над нулем графика).

Под профилем составляется таблица, в которой выписываются номера реперов и свай, расстояние от постоянного начала или от репера до свай, абсолютные отметки свай и приводки в сантиметрах.

1.2. Уклон водной поверхности

Упражнение 1.2. Определение точности измерения гидравлического уклона на участке реки.

Д а н о: результаты обследования реки в двух створах:

Уклон на участке	0,00001	Коэффициент шероховатости:	
Расстояние между створами L км	5,0	n_1	0,030
Гидравлический радиус, м:		n_2	0,040
R_1	2,50		
R_2	3,00		

П р и м е ч а н и е: нивелирование линии длиной 5 км произведено с точностью 1 класса.

Т р е б у ё т с я: 1. Рассмотреть формулу погрешности гидравлического уклона.

2. Определить скорости течения по формуле Шези и коррективы скорости.

3. Установить погрешности измерения уровня и уклона I .

Р е ш е н и е: 1. Уравнение Д. Бернулли для двух сечений неравномерного потока имеет вид

$$z_1 + p_1/\gamma + \alpha_1 v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + \alpha_2 v_2^2/(2g) + h_w, \quad (1.1)$$

где z_1 и z_2 — координаты сечений над плоскостью сравнения 0—0;

γ — удельный вес; p_1 и p_2 — атмосферное давление в этих сечениях; α_1 и α_2 — коррективы скорости (коэффициенты кинетической энергии), учитывающие неравномерность распределения скоростей по сечению: v_1 и v_2 — средние скорости потока; g — ускорение свободного падения; h_w — потери удельной энергии (гидродинамического напора) по длине потока.

Уравнение Д. Бернулли для двух сечений вод потока имеет вид

$$z_1 + \alpha_1 v_1^2 / (2g) = z_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g) + h_w, \quad (1.2)$$

где z_1 и z_2 — отметки поверхности воды (уровни) над плоскостью сравнения; значения p_1/γ и p_2/γ опускаются, так как на свободной поверхности воды давление p_1 и p_2 (атмосферное давление) в обоих сечениях одинаково.

Гидравлический уклон I_r есть изменение удельной энергии потока (гидродинамического напора), отнесенное к его длине:

$$I_r = h_w / L, \quad (1.3)$$

$$I_r = [z_1 + \alpha_1 v_1^2 / (2g) - z_2 + \alpha_2 v_2^2 / (2g)] / L. \quad (1.4)$$

Относительная погрешность гидравлического уклона, как указано в работе Г. В. Железнякова и Б. Б. Данилевича [23], может быть вычислена по формуле

$$\Delta I_r / I_r = [\Delta z_{1-2} + (v_1^2 - v_2^2) \Delta \alpha / (2g) + (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta v / g] / I_r L + \Delta L / L, \quad (1.5)$$

где Δz_{1-2} , $\Delta \alpha$, Δv , ΔL — погрешности определения уровня между первым и вторым сечением, коэффициента α , скорости v и расстояния L .

2. Для определения скоростей v_1 и v_2 движения потока применяется формула Шези $v = C\sqrt{RI}$ (см. упражнение 3.9).

Коэффициенты C_1 и C_2 определяются по приложению 2: $C_1 = 40,6 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, $C_2 = 32,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Подставляя значения C , R и I в формулу Шези, получим: $v_1 = 40,6 \sqrt{2,5 \cdot 0,00001} = 0,20 \text{ м/с}$; $v_2 = 32,5 \sqrt{3,0 \cdot 0,00001} = 0,18 \text{ м/с}$.

Коррективы скорости α (коэффициенты кинетической энергии Кориолиса) для речных потоков зависят от C и g . Для равнинных рек среднее значение их составляет примерно 1,2, для горных — примерно 1,4.

Г. В. Железняковым [13] предложена формула для определения корректива скорости

$$\alpha = 1 + 0,88 \left(0,34 + \frac{1 + \sqrt{g/C}}{2,3 + 0,3C/\sqrt{g}} \right)^2. \quad (1.6)$$

По полученным значениям C_1 и C_2 по табл. 1.2 определяется $\alpha_1 = 1,23$, $\alpha_2 = 1,26$.

3. Погрешность определения падения уровня Δz_{1-2} состоит из:
а) погрешности измерения уровня H в створе, которая прини-

мается равной 3 мм; следовательно, в двух створах общая погрешность $\Delta H = 3 + 3 = 6$ мм;

б) погрешности нивелирования, которая зависит от класса нивелирования:

Класс нивелирования	I	II	III	IV
Погрешность на 1 км, мм	0,5	5	10	20

Для данного примера при I классе нивелирования погрешность $0,5 \cdot 5 = 2,5$ мм.

Таким образом $\Delta z_{1-2} = 6,0 + 2,5 = 8,5$ мм = 0,0085 м. Принимая погрешности скорости $\Delta v = 0,01$ v, корректива скорости $\Delta \alpha = 0,01$ α и расстояния $\Delta L/L = 1/2000$ и подставляя в формулу (1.5) численные значения коэффициентов, получим погрешность определения гидравлического уклона

Таблица 1.2

Значение корректива скорости по формуле (1.6)

C м ^{0,5} /с	α	C м ^{0,5} /с	α	C м ^{0,5} /с	α
1,0	4,75	15,0	1,39	60	1,20
2,5	2,32	20	1,33	70	1,18
5,0	1,75	30	1,27	80	1,17
7,5	1,55	40	1,23	90	1,17
10,0	1,49	50	1,21	100	1,16

$$\frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{1}{0,0001 \cdot 5000} \left(0,0085 + \frac{0,20^2 - 0,18^2}{19,6} \cdot 0,01 + \frac{1,23 - 1,26}{9,8} \cdot 0,01 \right) + \frac{1}{2000} = 16,1 \%$$

При малых уклонах на точность определения гидравлического уклона оказывает влияние Δz_{1-2} . При анализе величин, входящих в расчет Δz_{1-2} , видим, что наибольшее значение имеет погрешность, связанная с определением уровня. Следовательно, на точность отсчета уровня воды следует обращать особое внимание при определении гидравлического уклона водной поверхности. Если ΔH уменьшить до 2 мм, то общая погрешность $\Delta I_2/I_2$ может быть уменьшена в 2 раза.

Упражнение 1.3. Определение поправки к измеренному уклону на участке реки.

Дано: $I = 0,00015$, $Q = 68$ м³/с, $C = 25$ м^{0,5}/с.

Площади живых сечений в верхнем и нижнем створах уклонных постов $\omega_v = 48$ м² и $\omega_n = 43$ м², расстояние между ними $L = 500$ м.

Требуется: рассчитать инерционную поправку, ввести ее в значение падения и определить уклон.

Решение: на беспойменных участках рек, согласно [37], вводится инерционная поправка в значение падения за счет неравномерности движения потока на участке измерения по формуле

$$H_{ин} = \alpha Q^2 \left(\frac{1}{\omega_n^2} - \frac{1}{\omega_b^2} \right) / (2g), \quad (1.7)$$

где α — коэффициент Кориолиса; Q — расход воды в момент измерения уклона. Для данного примера при $C = 25 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ по табл. 1.2 $\alpha = 1,3$; подставив известные значения в формулу (1.7), получаем

$$H_{ин} = \frac{1,3 \cdot 68^2}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{1}{43^2} - \frac{1}{48^2} \right) = 0,03 \text{ м.}$$

Вычисленная поправка вводится в том случае, если она не менее 5 % падения. Если $\omega_n < \omega_b$, поправка вводится со знаком минус, а при $\omega_n > \omega_b$ — со знаком плюс. Падение в данном примере $\Delta H = 0,00015 \cdot 500 = 0,075$, следовательно, $\Delta H = 0,075 - 0,03 = 0,045$ и соответственно $I = 0,00009$.

Упражнение 1.4. Определение расстояния между уклонными постами.

Дано: 1. $I = 0,30 \text{ ‰}$, относительная погрешность измерения уклона $\sigma_I = 10 \text{ ‰}$.

2. Погрешность нивелирования $\pm 10 \text{ мм}$ на 1 км двойного хода.

3. Средняя квадратическая погрешность определения уровня воды $\sigma_n = 10 \text{ мм}$.

Требуется: определить расстояние между уклонными постами при заданных условиях.

Решение: 1. Расстояние между уклонными постами L определяет падение уровня в его пределах. Измеренный уклон должен обладать определенной заданной точностью. Точность измерения зависит от длины участка, точности нивелирования, значения измеренного уклона и погрешности, с которой измеряется уровень на уклонных постах.

Формула для определения длины участка при его протяженности от 0,1 до 10 км имеет вид

$$L = \eta^2 \sqrt{\eta^2 + 800\sigma_{0I}^2 I^2 \sigma_n^2} / (200I^2 \sigma_{0I}^2), \quad (1.8)$$

где η — средняя квадратическая погрешность нивелирования на длине базиса (для нивелирования III класса $\eta = \pm 10 \text{ мм}$ на 1 км двойного хода); I — значение измеренного уклона, ‰ (падение 1,0 м на участке длиной 1,0 км равняется 1 ‰).

Согласно исходным данным, расстояние между уклонными постами $L = 0,5 \text{ км}$.

Упражнение 1.5. Расчет расстояния между уклонными постами при определении геометрического уклона с заданной точностью.

Дано: 1. На участке длиной 1000 м определен уклон 0,00001 с точностью 6 %.

2. Погрешность определения уровня $\Delta H = \pm 2 \text{ мм}$.

Т р е б у е т с я : 1. Рассчитать погрешность отсчетов уровня воды.

2. Определить расстояние L при заданной точности.

Р е ш е н и е : 1. Геометрический уклон свободной поверхности воды является частным случаем гидравлического уклона при условии равенства скоростей в двух сечениях. При этом условии из формулы (1.3) получим

$$I_{\Gamma} = h_w/L = (z_1 - z_2)/L. \quad (1.9)$$

Формула относительной погрешности геометрического уклона имеет вид

$$\Delta I_{\Gamma}/I_{\Gamma} = \Delta z_{1-2}/z_{1-2} + \Delta L/L, \quad (1.10)$$

так как $\Delta L/L$ очень мало, то получим

$$\Delta I_{\Gamma}/I_{\Gamma} = \Delta z_{1-2}/z_{1-2}. \quad (1.11)$$

Относительная погрешность по условию упражнения равна

$$\Delta I_{\Gamma}/I_{\Gamma} = \Delta z_{1-2}/z_{1-2} = 6\%.$$

Следовательно, $\Delta z_{1-2} = 0,06 z_{1-2}$.

Так как $I = z_{1-2}/z$, то при заданных значениях $z_{1-2} = 0,00001 \times 1000 = 0,01$ м и $\Delta z_{1-2} = 0,06 \cdot 0,00001 \cdot 1000 = 0,0006$ м $\approx 0,001$ м.

Таким образом, при расстоянии между постами $L = 1000$ м и уклоне $I = 0,00001$ отсчеты уровня должны быть произведены с точностью $0,001$ м = 1 мм.

2. Точность отсчета уровня в 1 мм при современной аппаратуре получить трудно. Таким образом, чтобы обеспечить заданную точность, следует увеличить расстояние L , которое примем 5 км.

Не приводя расчета, примем $\Delta z_{1-2} = 0,0031$ м.

При заданных $L = 5000$ м и $I = 0,00001$, $z_{1-2} = 0,00001 \cdot 5000 = = 0,050$ м.

Подставляя полученные значения, вычислим относительную ошибку геометрического уклона по формуле (1.11) $\Delta I_{\Gamma}/I_{\Gamma} = = 0,0031 \cdot 100 : 0,050 = 6,2\%$.

Следовательно, чтобы обеспечить заданную точность определения уклона 6 %, следует выбрать участок $L = 5$ км.

Упражнение 1.6. Определение дальности распространения подпора на участке реки.

Д а н о : 1. Средняя глубина реки на безподпорном участке $h_0 = 4,0$ м.

2. Отметки уровня воды в верхнем бьефе $H_{в.б} = 127,00$ м абс., в нижнем бьефе $H_{н.б} = 121,00$ м абс.

3. Средний уклон водной поверхности $I = 0,00024$.

Т р е б у е т с я : определить дальность распространения подпора.

Р е ш е н и е : формула вычисления дальности распространения подпора имеет вид

$$L = a_n (h_0 + z)/I, \quad (1.12)$$

где a_n — коэффициент, являющийся функцией:

$$a_n = f(z/h_0), \quad (1.13)$$

где z — разность уровней верхнего и нижнего бьефов (подпор). При отсутствии данных об уклоне водной поверхности он может быть заменен средним значением уклона дна реки.

В зависимости от подпора и средней глубины реки на участке принимаются следующие значения коэффициента a_n :

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

Для данного примера $z = 127,00 - 121,00 = 6,00$ м, $z/h_0 = 6,00 : 4,00 = 1,5$.

Интерполируя значения z/h_0 , получаем $a_n = 0,88$.

Подставим полученные значения в формулу (1.12) $L = 0,88(4,0 + 6,0) : 0,00024 \approx 37$ км.

Упражнение 1.7. Расчет поперечного уклона на изгибе реки.

Д а н о: 1. Средняя скорость течения $v_{cp} = 0,59$ м/с.

2. Средняя глубина $h_{cp} = 2,30$ м.

3. Коэффициент формулы Шези $C = 30,5$ м^{0,5}/с.

4. Радиус кривизны на участке изгиба реки $R_k = 500$ м.

Т р е б у е т с я: определить коэффициент Кориолиса и вычислить поперечный уклон.

Р е ш е н и е: в работе [16] приведена формула определения поперечного уклона при закруглении

$$I_n = \alpha v^2 / (gR_k), \quad (1.14)$$

где α — коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей в живом сечении; v — средняя скорость течения; g — ускорение свободного падения; R_k — радиус кривизны.

Коэффициент Кориолиса α определяется по формуле (1.6) или табл. 1.2. При $C = 30,5$ м^{0,5}/с по табл. 1.2 $\alpha = 1,26$. Подставляя известные значения в формулу (1.14), получаем $I_n = 1,26 \times 0,59^2 : (9,81 \cdot 500) = 0,438 : 4905 = 0,0001$.

Из формулы Шези можно определить продольный уклон по соотношению $I = v^2 / C^2 h_{cp}$. Подставим известные значения $I = 0,59^2 : (30,5^2 \cdot 2,30) = 0,348 : 2139 = 0,0002$.

Известно, что продольные уклоны больше поперечных.

Упражнение 1.8. Передача высотной отметки с левого берега на правый на прямолинейном участке реки.

Д а н о: 1. Географическая широта пункта наблюдения $\varphi = 55^\circ$.

2. Ширина реки $B = 300$ м, средняя скорость течения $v_{cp} = 1,50$ м/с.

3. Сведения об уровне воды: отметка временного кола № 1 на левом берегу $H_1 = 124,863$ м абс.; превышение уровня воды над колом на левом берегу $h_1 = 124$ мм. На правом берегу отметка вре-

менного кола № 2 неизвестна, но отсчет по рейке над колом $h_2 = 129$ мм.

- Требуется: 1. Определить отметку верха кола № 2.
2. Ввести поправку к определенной отметке.

Таблица 1.3

Превышение уровня воды Δh мм у правого берега
в зависимости от ширины реки и скорости течения

Скорость течения, м/с	Ширина реки, м									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0,5	0,5	1,0	1,4	1,9	2,4	2,9	3,4	3,8	4,3	4,8
1,0	1,0	1,9	2,9	3,8	4,8	5,7	6,7	7,6	8,6	9,6
1,5	1,4	2,9	4,3	5,7	7,2	8,6	10,0	11,5	12,9	14,3
2,0	1,9	3,8	4,7	7,6	9,5	11,5	13,4	15,3	17,2	19,1
2,5	2,4	4,8	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,1	21,5	23,9
3,0	2,9	5,7	8,6	11,5	14,4	17,2	20,1	23,0	25,8	28,7

Таблица 1.4

Выписка из книжек для записи гидрологических

№ строки	Число	Время, часы	Уровень воды над нулем поста, см	Код состояния водного объекта		Температура (яспр.), °С		Осадки, мм	Ветер и волнение по коду	Примечание
				4	5	воды	воздуха			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

МАРТ

= 41	1	8	146	565			-14,0	1	00	
= 42	1	20	148	565			-8,0	1	00	
= 95	27	8	306	539	565		+1,0		32	
= 96	27	20	313	539	565		+2,0		32	
=

ДЕКАБРЬ

= 41	1	8	126	565			-7,0			
= 42	1	20	130	565			-6,0			
= 61	11	8	189	0131			-5,0			
= 62	11	20	206	0131			-7,0			
	31	8	131	565			-6,0			
	31	20	130	565			-7,0			

Решение: 1. Отметка верха кола на противоположном берегу определяется по формуле

$$H_2 = H_1 + h_1 - h_2, \quad (1.15)$$

где H_1 — известная отметка верха кола на одном берегу; h_1 — превышение уровня над верхом кола на этом же берегу; h_2 — то же на другом берегу.

Для данной задачи $H_2 = 124,863 + 0,124 - 0,129 = 124,858$ м абс.

2. Вследствие действия силы Кориолиса уровень воды у правого берега выше, чем у левого (табл. 1.3). Для данного примера $\Delta h = 4,3$ мм.

Для определения поправки $\Delta h'$ полученное превышение умножим на коэффициент K :

Широта местности, °	40	45	50	55	60	65	70
K	1,00	1,10	1,19	1,27	1,35	1,41	1,46

Поскольку $\varphi = 55^\circ$, то $K = 1,27$. Следовательно, поправка $\Delta h' = \Delta h K = 4,3 \cdot 1,27 = 5,4$ мм = 0,005 м.

наблюдений КГ-1м р. Лама — пос. Егорье, 1979 г.

№ строки	Уровень воды, см		Температура, °С		Среднее за сутки		Состояние водного объекта (словесная характеристика)
	номер свай	отсчет	воды	воздуха	уровень	температура, °С	
11	12	13	14	15	16	17	18

	12	24		-14,0	147	-11,0	Ледостав
	12	26		-8,0			„
	9/10	14/62		+2,0	310	+1,5	Закрайны л/б и п/б 2 м
	9	20		+1,0			То же

	13	38		-7,0	128	-6,5	Забереги л/б и п/б 1—2 м
	13	42		-6,0			То же
	11/12	4/67		-5,0	198	-6,0	Забереги л/б и п/б 3 м
	11/12	21/84		-7,0			То же
	12	9		-6,0	130	-6,5	Ледостав
	12	8		-7,0			„

Поправка вводится при передаче с правого берега на левый со знаком минус, а при передаче с левого на правый берег со знаком плюс. Поправка менее 5 мм не вводится, так как точность измерения уровня воды лежит в этих пределах.

Для данного примера поправка вводится со знаком плюс, поскольку передача отметки ведется с левого берега на правый. Следовательно, высотная отметка кола № 2 на правом берегу равна: $H_2 = 124,858 + 0,005 = 124,863$ м абс.

1.3. Обработка данных наблюдений за уровнем воды

Упражнение 1.9. Обработка книжек наблюдений за уровнем воды.

Д а н о: выписка из книжек КГ-1М (с сокращением) (табл. 1.4).

2. Сведения о нивелировании постовых устройств (табл. 1.5).

Т р е б у е т с я: 1. Произвести просмотр записей в книжке гидрологических наблюдений.

Таблица 1.5

Сведения о нивелировании постовых устройств
р. Лама — пос. Егорье
Отметка нуля графика 126,50 м Б. С.

№ реперов и свай	22.VI 1978		15.II 1979		5.VI 1979	
	отметка, м Б. С.	приводка, см	отметка, м Б. С.	приводка, см	отметка, м Б. С.	приводка, см
Рп. 1	134,155	765,5	134,155	765,5	174,155	765,5
св. 1	133,27	677	133,27	677	133,27	677
.....
.....
9	129,43	293	129,43	293	129,43	293
10	128,89	239	128,94	244	128,94	244
11	128,33	183	128,35	185	128,35	185
12	127,72	122	127,72	122	127,72	122
13	127,39	89	127,38	88	127,38	88

2. Проверить вычисление окончательных приводок свай и установить период их действия.

3. Привести отсчеты высоты уровня к нулю графика.

4. Вычислить средние суточные уровни (для двухсрочных и многосрочных наблюдений), средний за месяц и выбрать наивысшие и наименее высокие уровни.

5. Показать условными знаками ледовые образования по записям наблюдателя.

6. Обработать данные наблюдений за температурой воды и воздуха.

7. Графически проверить ход уровня.

Р е ш е н и е: 1. Наблюдения за уровнем воды на реках, как правило, связаны с учетом стока, но могут иметь и самостоятельное

значение на судоходных участках, вблизи крупных населенных пунктов, промышленных объектов, гидротехнических сооружений и пр. Сеть гидрологических постов подразделяется на основную и специальную. Основная сеть состоит из пунктов наблюдений, действующих постоянно или длительное время по утвержденным программам и ведущим наблюдения по единой методике. Основная сеть предназначена для изучения пространственно-временных закономерностей гидрологического режима, учета и эксплуатации водных ресурсов и влияния на них хозяйственной деятельности, обеспечения службы прогнозов и народного хозяйства оперативной информацией о водных объектах. Кроме постоянно действующей сети, существуют периодические (круглогодичные или сезонные) посты с ограниченным сроком действия, организованные на пересыхающих и замерзающих реках, а также для изучения максимального и минимального стока.

Специальные посты организуются Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды и различными ведомствами для решения научных и практических задач. Большое значение имеет гидрологическая сеть, организованная Министерством геологии СССР в непосредственной близости к гидрологической сети Госкомгидромета, для изучения вопросов связи поверхностных и подземных вод. Гидрологические посты оснащаются измерительными устройствами и приборами (максимальные и минимальные рейки, указатели уровня У-52, рейка с успокоителем ГР-23, самописцы «Валдай», 501, ГР-38 и др.).

Частота сроков измерений уровня на сети станций зависит от характеристики режима половодья, межени и периода ледяных образований и специальных задач. В основном наблюдения производятся ежесуточно в 8 и 20 ч и в период паводков через 1, 2, 4 ч между этими сроками.

Точность измерения уровня для различных приборов следующая: крючковая рейка до $\pm 0,1$ см, переносная с успокоителем ГР-23 до $\pm 0,5$ см, переносная металлическая до $\pm 0,5—1,0$ см, наклонная ± 1 см, самописцы разных систем в зависимости от масштабов $\pm 0,3—6,0$ см.

Ниже приведены некоторые замечания о точности измерения уровня и погрешностях гидрологических наблюдений (табл. 1.6)

Таблица 1.6

Допустимые погрешности измерения уровня воды при вычислении стока по зависимости $Q = f(H)$

Амплитуда колебания уровня, м	Допустимая погрешность, см
2,5	0,5
2,5—5,0	1,0
5,0—10	2,0

Для определения реальной точности измерения уровня Наставление [38] рекомендует производить сравнительные измерения уровня, по которым вычисляется абсолютная квадратическая погрешность σ_H в сантиметрах по формуле

$$\sigma_H = \sqrt{\sum (H_i - \bar{H})^2 / (n-1)}, \quad (1.16)$$

где H_i — единичное измерение уровня (полусумма отсчетов каждого гребня и ложбины); $\bar{H} = \sum_1^n H_i / n$; n — число измерений уровня (не менее 10).

Гидрологическая сеть, находящаяся в ведении Государственного Комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, производит государственный учет вод, который предъявляет повышенные требования к точности данных гидрологических наблюдений.

Наблюдения за всеми элементами режима вод характеризуются систематическими и случайными погрешностями.

Систематические погрешности это такие, которые при многократном измерении одной и той же величины в неизменных условиях сохраняются постоянными либо изменяются по определенному закону; учитываются эти погрешности при обработке данных.

Случайные погрешности это такие, которые при многократном измерении не остаются постоянными: они зависят от ряда неизвестных факторов, применяемого метода измерений, условий среды и пр. Оцениваются эти погрешности статистическими методами.

По своему происхождению различают следующие виды погрешностей.

Систематические: инструментальная погрешность, представляющая собой отклонение (разность) показаний прибора после введения всех поправок от действительного значения, измеряемого эталонным прибором.

Случайные: погрешность методики и условий наблюдений, обусловленная несовершенством способа наблюдений, погрешностью установки прибора, ошибкой отсчета и производства наблюдений в разных условиях, погрешность, возникающая при осреднении наблюдений по месту и времени.

Все эти погрешности, рассматриваемые в совокупности, составляют погрешность наблюдения, которая представляет собой разность между измеренным значением и действительным значением параметра в данном месте и в определенный момент наблюдений. В гидрометрической практике случайные и систематические погрешности проявляются совместно и не всегда можно выделить систематические погрешности, поэтому условно считают, что они ведут себя подобно случайным.

Представим себе, что имеется ряд каких-либо измерений X_1, X_2, \dots, X_n . Среднее значение этого ряда называется средним арифметическим

$$X_0 = \sum_1^n X_i/n. \quad (1.17)$$

Средняя квадратическая погрешность исследуемого ряда вычисляется по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_1^n (X_i - X_0)^2/n}, \quad (1.18)$$

где X_i — порядковый член исследуемого ряда; X_0 — среднее значение ряда.

Если число членов ряда $n \leq 35$, то формула (1.18) имеет вид

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_1^n (X_i - X_0)^2/(n-1)}. \quad (1.19)$$

Гидрометеорологические элементы следуют закону нормального распределения Гаусса. В соответствии с этим законом вероятность того, что значения погрешности находятся в пределах средней квадратической погрешности σ составляет 68 %, в пределах 2σ находится 95 %, а в пределах 3σ — 99,7 % всех значений погрешности.

В качестве предельной погрешности в гидрометрии принимают погрешность обеспеченностью 95 %, что означает, что из 20 измерений лишь одно измерение имеет погрешность, большую 2σ .

Перейдем к обработке книжки КГ-1М. Она производится ежедневно наблюдателем поста. По истечении месяца книжка высылается на станцию, где производится сплошная проверка с учетом контрольных нивелировок постовых устройств.

В последние годы на сети станций проводится большая работа по подготовке данных наблюдений к автоматизированной их обработке. Методы автоматизации подробно изложены в гл. 10 данного пособия. В связи с тем что на сети вводятся новые формы книжек, исходные данные упражнения приведены в бланке нового образца. В книжке жирной чертой обведены сведения, которые зашифровываются по специальному коду (см. гл. 10). Полевые книжки наблюдений независимо от дальнейшей автоматизированной обработки требуют первичной обработки, чему и посвящено данное упражнение.

Для примера рассмотрим обработку уровня за несколько дней марта и декабря, являющихся наиболее характерными по колебаниям уровня воды и ледовым явлениям.

Рассмотрим записи, приведенные в табл. 1.4. В марте подъем уровня начался с конца месяца. При переходе со сваи на сваю на-

блюдения производились по двум сваям. Отрицательных отсчетов по сваям не было. Ледовые явления записаны с достаточной точностью. 11 декабря наблюдался подъем уровня, наблюдения производились по двум сваям. Температура воздуха была устойчива, и окончательный ледостав наступил в конце месяца.

2. Наблюдатель поста при обработке данных наблюдений пользуется приводами, записанными в справочной таблице полевой книжки КГ-1М (в данном упражнении она не приведена). Эти приводки выписываются сотрудниками станции по данным последней контрольной нивелировки и даты их применения являются предварительными.

Для установления срока применения контрольных приводок необходимо произвести: а) сопоставление приводок, вычисленных по последней и предшествующим контрольным нивелировкам, одновременно проверяя записи наблюдателя о датах повреждения свай; б) интерполяцию приводок.

Рассмотрим весь порядок вычислений на примере данных нивелирования свайного поста на р. Лама — пос. Егорье. В данном упражнении не приводятся сведения о привязке контрольного и основного реперов к реперу государственной геодезической сети. В табл. 1.5 приведены данные (с сокращением) контрольного нивелирования от основного репера к головкам свай. На водомерном посту 13 свай.

За период 22/VI 1978 г. по 5/VI 1979 г. были произведены три нивелировки, по которым обработаны уровни 1979 г.

Отметка репера приведена с точностью до 1 мм, а свай — с точностью до 1 см. Как видно из табл. 1.5, отметки головок свай очень устойчивы.

Приводки, полученные после ремонта, начинают применять с даты ремонта. Если отметка свай изменялась вследствие выпучивания грунта, вызванного его оттаиванием, то измененную приводку следует отнести на дату наступления положительных значений температуры воздуха.

При просмотре книжек с целью выяснения даты изменения приводок необходимо проверить записи наблюдателя о повреждениях свай в период ледоходов, замерзания и оттаивания почвы. Следует просмотреть отсчеты по соседним сваям. Если приводки значительно изменились, необходимо построить график связи между значениями уровня воды по вышележащим или нижележащим постам. Нарушение этой связи будет указывать на моменты изменения приводок.

Если приводки всех свай изменяются на одну и ту же величину, то, видимо, изменилась отметка репера. Следовательно, требуется повторная контрольная нивелировка.

В данном примере все изменения в приводах применяются с дат нивелировок.

3. Отсчеты высоты уровня приводятся к нулю графика после установления сроков применения окончательных нивелировок свай,

приводка по которым выписываются в справочную табличку книжки КГ-1М.

На рис. 1.3 приведен пример отсчетов и обработка уровня.

В графах 12 и 13 табл. 1.4 записаны номер свай и отсчет по рейке a см. Уровень воды над нулем графика H см вычисляется по формуле

$$H = h \pm a. \quad (1.20)$$

Уровень над нулем графика может быть положительным и отрицательным.

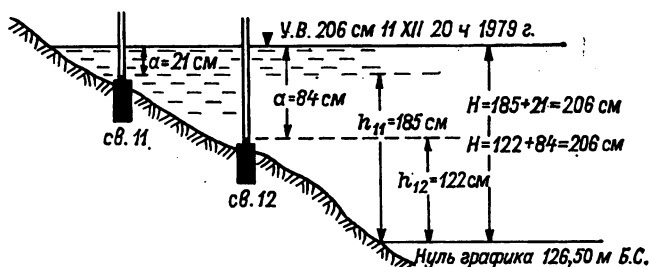


Рис. 1.3. Схема к вычислению уровня воды над нулем графика

р. Лама — пос. Егорье, за 20 ч 11/XII 1979 г.

Наблюдения 11 декабря производились по сваям 11/12 и отсчеты соответственно 21/84 см (см. рис. 1.3). Приводка сваи № 11 равна 185 м, сваи № 12 — 122 см. Уровень над нулем графика по свае 11 $H = 185 + 21 = 206$ см и по свае № 12 $H = 122 + 84 = 206$ см. Аналогично приводятся отсчеты высоты уровня за каждый день месяца.

4. Средние суточные уровни по данным двухсрочных наблюдений определяются как среднее арифметическое из двух значений. При четырехсрочных наблюдениях (02, 08, 14 и 20 ч) средний суточный уровень вычисляется как среднее арифметическое из четырех значений. При многосрочных наблюдениях через равные промежутки времени средний уровень вычисляется по формуле

$$H_{\text{ср}} = \left(\frac{H_0 + H_{24}}{2} + H_1 + H_2 + \dots + H_{24-n} \right) : \frac{24}{n}, \quad (1.21)$$

где H_0 и H_{24} — уровни в 0 и 24 ч; H_1, H_2, \dots — значения уровней через принятые равные промежутки времени, исключая (0 и 24 ч); n — принятый интервал, ч.

Средний уровень за месяц вычисляется по формуле

$$H_{\text{ср}} = \sum_1^n H_i / n, \quad (1.22)$$

где H_i — средний суточный уровень под нулем графика, см; n — число дней в месяце.

Средний уровень за месяц выписывается в конце книжки. Из срочных наблюдений выбирается наивысший и наинизший уровень за месяц. В данном примере для марта $H_{\text{ср}} = 200$ см, $H_{\text{наив}} = 445$ см, $H_{\text{наиниз}} = 146$ см.

5. В графах 4 и 5 табл. 1.4, согласно коду (приложение 4), записывается состояние водного объекта по записям наблюдателя в графе 18.

6. Температура воды и воздуха за сутки вычисляется как среднее арифметическое; в случае пропуска за один срок средняя температура за данные сутки не вычисляется. В конце месяца выводятся средние декадные и средние месячные значения температуры (как средние из средних декадных). Из всех наблюдений за месяц выбираются наибольшие значения.

Сведения о толщине льда, снега и глубине погружения льда и шуги приводятся по измерениям один раз в пятидневку в нескольких лунках. В рассматриваемых книжках КГ-1М за март и ноябрь не было устойчивого ледостава, поэтому эти сведения отсутствуют.

7. После обработки инструментальных и анализа визуальных водомерных наблюдений в книжках КГ-1М уровни за каждый месяц наносятся на график. Пример построения этого графика, его анализ приведены в упражнении 1.10, здесь же укажем, что обработка книжек для записи гидрологических наблюдений должна заканчиваться графическим анализом.

1.4. Годовая таблица и график колебания уровней воды

Упражнение 1.10. Составление годовой таблицы и графика колебания уровней воды.

Д а н о: 1. Данные упражнения 1.9.

2. Годовая таблица уровней (см. табл. 1.7).

Т р е б у е т с я: 1. Пояснить составление годовой таблицы уровней.

2. Дать рекомендации к построению графика колебания уровней.

Р е ш е н и е: 1. По данным обработанных книжек КГ-1М составляется таблица «Ежедневные уровни воды» (ЕУВ), в которую выписываются средние суточные значения уровней под нулем графика. При наличии пропусков в наблюдениях их можно восстановить по графикам связи уровней по ближайшему посту. Для зимних месяцев уровни выписываются ближе к левой стороне столбца, оставляя место для обозначений ледовых явлений. За каждый месяц вычисляется среднее значение и выбираются наивысшие и наинизшие уровни. Средний годовой уровень вычисляется как среднее арифметическое из средних месячных. Высший и низший уровни за год выбираются из срочных наблюдений в книжках КГ-1М.

Годовая таблица ЕУВ приведена с сокращением (табл. 1.7).

2. Ежедневные значения вычисленного среднего уровня наносятся на график хода уровней. График вычерчивается на миллиметровой бумаге размером 41 × 29 см. На короткой стороне листа

Таблица 1.7

Ежедневные уровни воды (ЕУВ) р. Лама — пос. Егорье, 1979 г.
Отметка нуля графика 126,50 м Б. С.

Дата	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	129	152	147	544	424	110	113	130	130	139	126	128
6	128	154	158	646	314	110	118	134	141	141	109	172
29	143		326	440	119	115	136	126	150	109	115	132
30	144		364	429	115	113	131	129	143	114	114	132
31	148		427		110		130	130		120		131
Средн.	128	148	200	424	204	110	132	128	161	121	131	162
Выш.	148	153	427	696	424	115	165	154	204	145	156	218
Низш.	125	143	147	176	110	109	113	121	130	109	109	120

Средний годовой 183; высший 698 3/IV; низший 109 5/VI.

проводится вертикальная ось, по которой откладывается уровень в следующих масштабах:

Амплитуда уровня, м до 1,5 1,5—2,5 2,5—5,0 5,0—10 >10
Масштаб 1 : 5 1 : 10 1 : 20 1 : 50 1 : 100—1 : 200

По горизонтальной оси откладывается время 1 мм — 1 сут. Высота уровня откладывается от оси времени на вертикальных линиях и закрепляется точками, которые затем соединяются между собой прямыми линиями. На график наносятся ледовые явления. Если на данном посту измеряются расходы воды и взвешенных наносов, то условными обозначениями они отмечаются на графике (см. комплексный график на рис. 1.4). Если на графике хода уровня наблюдаются резкие переломы, необходимо выяснить их причины. На графике указывается название реки, год и отметка нуля графика; график подписывается составителем и проверившим его. Большое значение для анализа хода уровней реки имеют совмещенные графики колебаний уровня по постам, расположенным выше и ниже по течению.

1.5. Комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений

Упражнение 1.11. Анализ хода уровня по комплексному графику.

Дано: комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений (рис. 1.4).

Требуется: 1. Пояснить составление графика.

КОМПЛЕКСНЫЙ
результатов гидрометеорологических

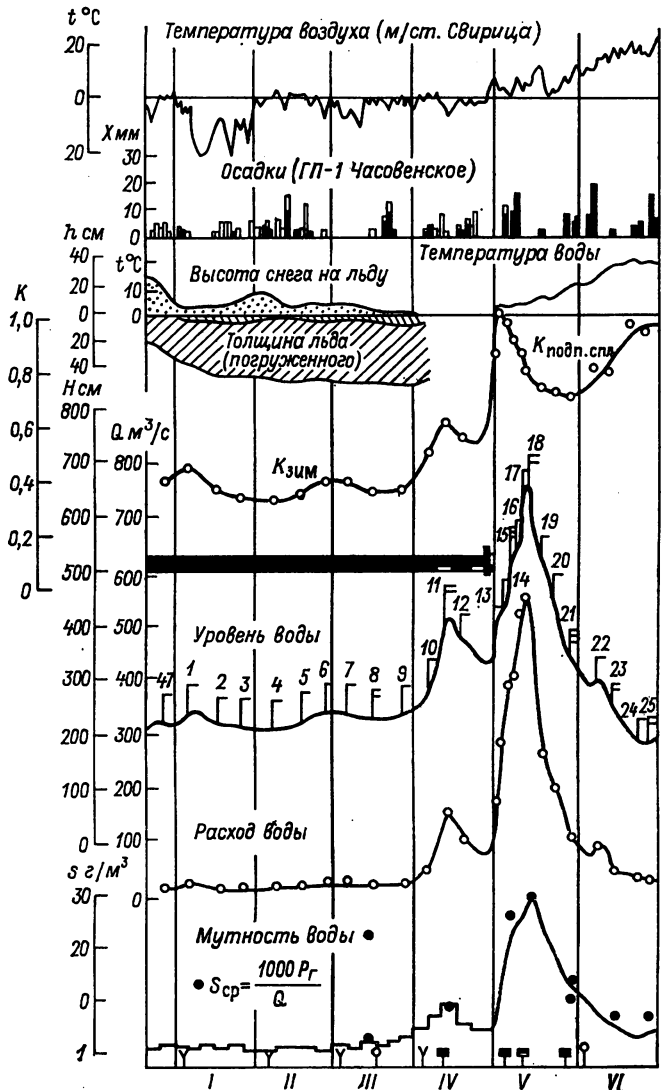
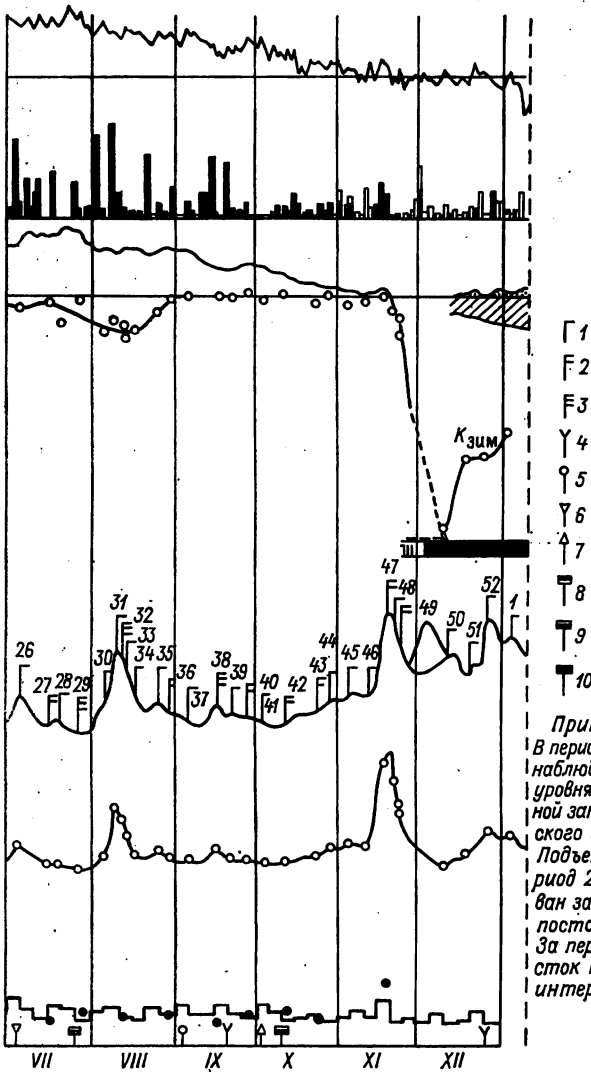


Рис. 1.4. Комплексный график результата

1 — расход воды; 2 — расход воды и взвешенных наносов; 3 — расход воды взвешенных течений; 7 — взяты пробы на химический анализ; 8 — отбор проб на гранулометрический анализ; 10 — отбор проб на гранулометриче

ГРАФИК
наблюдений за 1974 г.



- Г 1
- Г 2
- Г 3
- Г 4
- Г 5
- Г 6
- Г 7
- Г 8
- Г 9
- Г 10

Примечания:
 В период 5 V - 29 VIII
 наблюдался подпор
 уровня от лесосплав-
 ной запани и Ладож-
 ского озера.
 Подъем уровня в пе-
 риод 29 XI - 11 XII выз-
 ван зажором ниже
 поста 200 м.
 За период 29 XI - 11 XII
 сток подсчитан по
 интерполяции.

тов гидрометеорологических наблюдений р. Паша — с. Часовенское
 и донных наносов; 4 — промер русла; 5 — контрольная нивелировка поста; 6 — съемка
 состав взвешенных наносов; 9 — отбор проб на гранулометрический состав донных на-
 ский состав взвешенных и донных наносов

2. Произвести анализ хода гидрометеорологических элементов по комплексному графику.

Р е ш е н и е: 1. Поясним составленный график. При построении комплексного графика выбирается горизонтальный масштаб (обычно 1 мм — 1 сут), в котором откладывается весь год и дополнительно последняя декада или весь декабрь предыдущего года и первая декада января последующего года. График содержит большое количество сведений о гидрометеорологическом режиме, поэтому вертикальные масштабы имеют сдвинутые шкалы для различных элементов (табл. 1.8). Эти масштабы в целях сопоставления графиков за ряд лет остаются постоянными.

Средний суточный уровень воды H наносится за каждый день. Ледовые фазы обозначаются согласно гр. 18 табл. 1.4. На линии уровня флажками отмечаются даты измерения расходов.

Средние суточные расходы воды Q наносятся за каждый день с указанием точек измеренных расходов. Если высота расчетного уровня расхода не совпадает со средним суточным значением, то основание флажка поднимается в соответствии с масштабом до значения расчетного уровня.

График единичных проб мутности $s_{ед}$ строится по средним суточным (пентадным, декадным) значениям. Значение средней мутности указывается по измеренным расходам наносов. В период паводка значение мутности наносится за каждый день.

Температура воды $t_{вод}$ наносится за каждый день периода, свободного ото льда, начиная с даты при $t_{вод} = 0^{\circ}\text{C}$.

Температура воздуха $t_{возд}$ наносится по данным ближайшей метеорологической станции (на рис. 1.4 — по метеостанции Свирица) по средним суточным значениям; положительные температуры отмечаются красным карандашом, отрицательные — синим.

Суточные суммы осадков X наносятся по данным метеорологической станции, показания которой характеризуют условия водосбора, сток с которого измеряется в створе поста. Выбор метеостанции зависит от того, где расположен пост — в равнинном или горном районе. Жидкие осадки изображаются зачерненными столбиками, твердые — незачерненными.

Толщина льда h наносится по пятидневным или декадным значениям. Если есть сведения, то выделяется погруженный в воду лед.

Вспомогательные графики переходных коэффициентов: для зимнего периода $K_{зим} = Q_z/Q_{кр}$ и для периода зарастаемости русла $K_{зар} = Q_{зар}/Q_{кр}$. Значения $K_{зим}$ и $K_{зар}$ наносятся согласно датам измерения расходов. Эти графики являются расчетными при вычислении стока.

Уклон водной поверхности наносится по датам измерения расходов воды, при определении которых они измеряются.

Запас воды в снеге наносится по данным снегосъемок по пятидневкам.

Таблица 1.8

Вертикальные масштабы для построения комплексного графика

Элемент режима	Вертикальный масштаб					
Уровень воды H см	Амплитуда H м	1,0	1—2	2—5	5—10	10
	Масштаб	1 : 10	1 : 20	1 : 50	1 : 100	1 : 200
Расход воды, Q м ³ /с	Устанавливается в зависимости от амплитуды H , Q и S так, чтобы эти линии не пересекались					
Единичная мутность $s_{ед}$ г/м ³						
Температура воды и воздуха, °С	1 мм — 1 °С					
Толщина льда и снега на льду, см	1 мм — 2 см					
Осадки, мм	1 мм — 1 мм					
Запасы воды в снеге, мм	Амплитуда	100 мм			100 мм	
	Масштаб	1 см — 50 мм			1 см — 100 мм	
Переходные коэффициенты $K_{зим}$ и $K_{зар}$	1 см—0,10					

При построении всех графиков значения элементов следует откладывать на линии, ограничивающей справа миллиметровое деление, отвечающее данным суткам.

Комплексный график для р. Паша — с. Часовенское (рис. 1.4) достаточно полно отражает весь ход гидрометеорологических элементов.

2. Анализ комплексного графика показывает, что в течение января—марта снежный покров был неустойчивым. Минимальная температура воздуха в январе достигала — 22 °С. В феврале и марте наблюдалось значительное повышение температуры воздуха, что вызвало выпадение осадков в виде дождя, уровень воды с на-

чала февраля до конца марта немного повысился. Толщина льда к моменту вскрытия достигала 45 см. Интенсивное снеготаяние пришлось на начало апреля, вслед за тем начался подъем уровня и образовалась закраина, но во второй декаде апреля температура воздуха понизилась, что вызвало прекращение таяния снега, уровень воды к 27/IV понизился. С 29/IV произошел переход температуры воздуха через 0°C , начался ледоход и подъем уровня; очищение ото льда произошло 1/V. Снежный покров полностью сошел 4/V. Наивысший уровень наблюдался в начале второй декады мая, и паводок прошел с одним пиком.

С 5/V по 29/VIII наблюдался подпор уровня от лесосплавной запани.

Повышение уровня в начале июля и августа вызвано интенсивными дождями. Небольшое и повышение уровня, также вызванное выпадением осадков, наблюдалось в середине сентября. Осеннее повышение уровня в ноябре связано с выпадением снега и дождей. Окончательный переход температуры воздуха через 0°C осенью произошел 27/XI. На реке начались ледовые явления: ледоход и затор льда. Подъем уровня в период 29/XI — 11/XII вызван зазором в 200 м ниже поста. Ледостав на реке установился 12/XII. Расходы измерялись равномерно; в течение года измерено 52 расхода. Температура воды тесно связана с температурой воздуха. Изменение расходов и колебания мутности связано с ходом уровня. На основе анализа хода гидрометеорологических элементов можно установить ошибки наблюдений.

Глава 2.

2

Глубины рек

2.1. Приведение промеров глубин к расчетному уровню

Упражнение 2.1. Приведение площади водного сечения к расчетному уровню.

Д а н о: 1. 10/VI 1960 г. при уровне воды $H = 205$ см над нулем графика был определен расход воды в створе № 1. В табл. 2.1 приведены площади водного сечения между скоростными вертикалями (с учетом промерных вертикалей).

2. 15/VI 1960 г. при уровне воды $H = 224$ см определен расход воды в том же створе № 1, но промерные работы не были произведены. При вычислении расхода воды за 15/VI используются площади водного сечения по промерам от 10/VI 1960 г.

Т р е б у е т с я: 1. Определить срезку уровня и разность площадей водного сечения.

2. Подсчитать площадь при расчетном уровне.

Таблица 2.1

Площадь водного сечения (створ № 1) по промерам от 10/VI 1960 г. и вычисление площади при расчетном уровне $H = 224$ см

№ скоростной вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Расстояние между вертикалями, м	Площадь между вертикалями при уровне H F м ²	Разность площадей $\pm \Delta F$ м ²	Площадь при расчетном уровне $H_{расч}$ $F \pm \Delta F$ м ²
Ур. пр. б. ($H_{расч}$)	8,0	2	—	0,19	0,19
Ур. пр. б. (H)	10,0	10	13,5	1,90	15,4
1	20,0	10	24,7	1,90	26,6
..... 6	70,0	4,0	9,2	0,76	9,96
Ур. л. б. (H)	74,0	1,0	—	0,10	0,10
Ур. л. б. ($H_{расч}$)	75,0	$F = 152$			$F_{расч} = 164$

Р е ш е н и е: 1. При определении расхода воды бывают такие условия, когда произвести промерные работы не представляется возможным. В таких случаях при вычислении расхода воды можно использовать данные предыдущих измерений. Разность уровня воды в день измерения расхода и уровня воды при промерах называется срезкой уровня.¹

В данном примере за расчетный уровень принимается $H_{расч} = 224$ см при определении расхода 15/VI 1960 г. Срезка уровня $\Delta H = 224 - 205 = 19$ см = 0,19 м. Срезка имеет знак плюс, так как расчетный уровень, для которого вычисляется площадь, выше, чем уровень при промерах 10/VI 1960 г. Разность площадей между вертикалями ΔF вычисляется по формуле

$$\pm \Delta F = b \Delta H, \quad (2.1)$$

где b — расстояние между скоростными вертикалями, м; ΔH — срезка уровня, м.

¹ Срезкой может быть и разность уровней в период определения расхода или производства промеров при резком подъеме или спаде уровня.

Например, на участке урез пр. б.— верт. № 1 (на рис. 2.1 участок *a*) $\Delta F = 10 \cdot 0,19 = 1,90$ м и площадь при расчетном уровне $F \pm \Delta F = 13,5 + 1,90 = 15,4$ м² (см. табл. 2.1).

Для участков у урезам разности площадей сечения, как видно из рис. 2.1, обозначены $\Delta F_{\text{п}}$ и $\Delta F_{\text{л}}$. На участке от уреза пр. б. при $H_{\text{расч}}$ до уреза пр. б. при $H_{\text{п}}$ разность площадей водного сечения равна $\Delta F_{\text{п}} = (10 - 8) \cdot 0,19 : 2 = 0,19$ м²; на участке от уреза л. б.

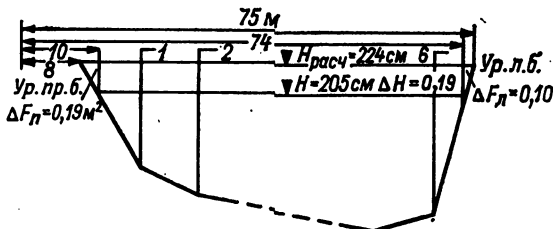


Рис. 2.1. Схема к приведению площади водного сечения к расчетному уровню

при H до уреза л. б. при $H_{\text{расч}}$ $\Delta F_{\text{л}} = (75 - 74) 0,19 : 2 = 0,10$ м².

2. Площадь, приведенная к расчетному уровню $H_{\text{расч}} = 224$ см равна $F = 164$ м².

2.2. Вычисление глубины реки и обработка книжек промеров

Упражнение 2.2. Вычисление глубины промерной вертикали по длине вытравленного троса.

Дано: длина вытравленного троса $l = 12$ м, $\varphi_{\text{п}} = 36^\circ$, $\varphi_{\text{пов}} = 10^\circ$.

Требуется: вычислить глубину вертикали.

Решение: при больших скоростях течения следует учитывать отклонение троса от вертикального положения. Длина вытравленной подводной части троса l больше глубины h . Длина вытравленной части троса определяется по отсчетам по счетчику в момент касания грузом дна и поверхности воды. Если отклонение троса от вертикали незначительно, то разность между отсчетами равна глубине h . Чтобы определить глубины, к длине вытравленного троса вводится поправка на длину подводной части троса в зависимости от углов его отклонения при опускании груза под поверхность воды $\varphi_{\text{пов}}$ и до дна $\varphi_{\text{п}}$ (табл. 2.2).

Положение, при котором $\varphi_{\text{пов}} > \varphi_{\text{п}}$, практически не наблюдается поэтому поправки приводятся для $\varphi_{\text{п}} \geq 20^\circ$.

Для данного примера по табл. 2.2 $\Delta l/l = -0,04$. Следовательно, $\Delta l = -0,04 \cdot 12 = -0,48$ и глубина $h = 12 - 0,48 = 11,52 = 11,5$ м.

Упражнение 2.3. Определение минимальной массы груза при измерении глубин без введения поправок.

Таблица 2.2

Относительные поправки на длину подводной части троса $\Delta l/l$
(со знаком минус) [42]

$\Phi_{п}^0$	$\Phi_{пов}^0$			$\Phi_{п}^0$	$\Phi_{пов}^0$		
	0	10	20		0	10	20
10	0,01	0,01	—	28	0,04	0,05	0,06
14	0,01	0,01	—	30	0,04	0,05	0,06
16	0,01	0,02	—	32	0,05	0,06	0,07
18	0,01	0,02	—	34	0,05	0,06	0,07
20	0,02	0,02	0,03	36	0,06	0,07	0,08
22	0,02	0,02	0,04	38	0,07	0,08	0,09
24	0,08	0,03	0,04	40	0,08	0,03	0,10
26	0,03	0,04	0,05				

Д а н о: 1. Глубина вертикали $h = 8,0$ м.

2. Средняя скорость течения воды на вертикали $v_b = 1,29$ м/с, движения катера $v_k = 1,18$ м/с.

3. Диаметр троса $d = 2$ мм.

Т р е б у е т с я: 1. Определить общую скорость движения воды и катера ω м/с.

2. Определить массу груза M кг.

Р е ш е н и е. 1. Определение глубин русла при работах по продольникам, косым галсам или по профилю можно производить без остановки катера и измерения углов отнoса троса. В таких случаях чтобы повысить точность измерений, необходимо рассчитать по диаметру троса массу груза.

На точности определения глубин сказывается скорость течения воды, а также и скорость движения судна. Д. Я. Раткович [42] предлагает метод расчета, по которому сначала определяется общая скорость по формуле

$$\omega = \sqrt{v_b^2 + v_k^2}, \quad (2.2)$$

где v_b — средняя скорость на вертикали, м/с; v_k — скорость движения катера, м/с.

Для данного случая получим $\omega = \sqrt{1,29^2 + 1,18^2} = \sqrt{3,06} = 1,75$ м/с.

2. Груз в зависимости от условий работы подбирается в табл. 2.3.

При $h = 8,0$ м, $d = 2$ мм и $\omega = 1,85$ м/с масса груза, при которой будет обеспечена достаточная точность измерения глубин без введения поправок на относ троса, $M = 22,5$ кг.

Упражнение 2.4. Обработка книжки промеров глубин.

Д а н о: 1. Начальный уровень над нулем графика р. Сырдарья — ст. Чиназ 567 см (254,67 м абс.), конечный 584 см (254,84 м абс.), срезка $\pm 0,17$ м.

Таблица 2.3

Масса гидрометрического груза (кг) для измерения глубин без введения поправок на относ троса

Глубина, м	Скорость, м/с	Диаметр d , мм		
		2	3	4
8	1,0	10	10	10
	1,5	15	20	25
	2,0	30	40	50

Примечание: подробная таблица приведена в работах [16, 42].

2. Запись промеров глубин (табл. 2.4).

Т р е б у е т с я: 1. Проверить запись местоположения промерных вертикалей.

2. Вычислить: а) расчетный уровень при промерах, б) средние глубины по двум ходам, в) поправки на относ каната и рабочие глубины, г) глубину со срезкой, д) отметки дна.

Р е ш е н и е: 1. В данном примере местоположение промерных вертикалей определялось засечками на мензульном планшете. По сигналу мензулиста рабочий производил промеры по створу. Сигналы давались поочередно отмашкой белым (б) или красным (к) флагами. В промерной книжке (табл. 2.4) рядом с номерами промерных вертикалей стоят буквы «б» и «к», по которым и были выписаны в книжку расстояния от постоянного начала, снятые в масштабе с планшета.

2а. Уровень за время работ повысился на 17 см. Если бы превышение уровня было в пределах 5 см, то за расчетный уровень можно принять среднее из начального и конечного отсчета. За условный (срезочный) уровень в данном примере принимаем низший уровень 567 см над нулем графика, или 254,67 м абс.

б. Средняя глубина определялась как среднее арифметическое по двум измерениям по общепринятым правилам округления с точностью до 0,01 м. Если во время промеров наблюдалось большое колебание уровня и промеры производились в два хода («туда» и «обратно»), то в этом случае измеренные глубины каждого хода должны быть приведены к условному (срезочному) уровню.

в. Относ каната при промерах наблюдался только на вертикалях № 2, 3, 4; были измерены углы относ каната и введены поправки. Вычисление рабочих глубин производится с учетом поправок (со знаком минус) на относ каната. Если они не вводятся, то рабочая глубина равна средней по двум измерениям.

г. Срезка равна — 0,17 м. Введение срезки к каждой промерной вертикали следует производить пропорционально изменению уровня за время работ. За период, когда уровень повысился на 0,17 м, было произведено 17 промеров глубин. Следовательно, на каждой промерной вертикали (при условии равномерного измене-

Таблица 2.4

Книжка для записи промеров глубин
р. Сырдарья — с. Чиназ, 25/VI 1969 г.

№ промерной вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Глубина, м			Угол отнoса каната	Поправка на угол отнoса каната	Глубина, м			Расстояние между промерными вертикалями, м	Площадь между промерными точками, м ²	Отметка дна, м абс.
		I	II	средняя			рабочая	со срезкой	между вертикалями			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ур. пр. б.	13,0	0,00	0,00	0,00	—	—	0,00	0,00				254,67
1 к	20,0	5,60	5,62	5,61	—	—	5,61	5,60	2,80	7,0	19,6	249,07
2 б	30	9,48	9,50	9,49	10°	—0,25	9,24	9,22	7,41	10,0	74,1	245,45
.....
17к	180	1,11	1,13	1,12	—	—	1,12	0,95				253,72
									0,48	4,0	1,92	
Ур. л. б.	184	0,00	0,00	0,00	—	—	0,00	0,00			F = 1041	254,67

ния уровня за время промерных работ, которые продолжались в течение 2 ч) уровень изменился на 0,01 м.

Значения срезов для каждой промерной вертикали следующие:

Номер промерной вертикали	1	2	3	...	17
Срезка уровня, м	-0,01	-0,02	-0,03	...	-0,17

Значения срезки с точностью до 0,01 м со знаком минус вводятся в рабочие глубины, а исправленные таким образом глубины записываются в табл. 2.4.

д. После введения всех исправлений в измеренные при промерах глубины вычисляются отметки дна как разность между абсолютной отметкой уровня воды и исправленной глубиной. Например, для промерной вертикали № 1 отметка дна равна 254,67 — 5,60 = 249,07 м абс.

Если в исследуемом профиле водного сечения у берегов наблюдаются зоны, где отсутствует движение воды, т. е. имеется мертвое пространство, то для определения его границ устанавливается точка, где обнаруживается скорость течения меньше той, которую можно измерить; находится глубина в этой точке и расстояние до нее от постоянного начала.

2.3. Построение поперечных профилей и вычисление морфометрических характеристик русла с оценкой точности их определения

Упражнение 2.5. Построение профиля водного сечения по результатам промеров глубин.

Д а н о: результаты промеров (см. табл. 2.4).

Т р е б у е т с я: 1. Построить профиль водного сечения.

2. Вычислить основные морфометрические и гидравлические характеристики, установить точность определения: а) площади водного сечения F ; б) ширины реки B , в) средней глубины $h_{ср}$, г) наибольшей глубины $h_{наиб}$, д) смоченного периметра χ , е) гидравлического радиуса R , ж) параметра V . Г. Глушкова Г.

Р е ш е н и е: 1. Для построения профиля водного сечения выбираются масштабы: горизонтальный 1 см — 20 м, вертикальный 1 см — 2,0 м (рис. 2.2.). За постоянное начало принимается точка, закрепленная на местности, от которой ведется счет горизонтальных расстояний. Профиль строится по данным табл. 2.4 (графы 1, 2, 9), причём линия дна вычерчивается прямыми линиями от одной промерной вертикали к другой. На линии поверхности воды следует выписать уровень воды в абсолютных отметках (в метрах) или над нулем графика (в сантиметрах), к которому отнесены промеры. На профиле с левой стороны в таблице выписываются основные характеристики водного сечения, рассмотренные ниже.

Профиль может быть построен в отметках дна.

При построении профиля водного сечения до отметки наивыс.

шего уровня необходимо, помимо промеров, иметь данные нивелирования левого и правого берега до этой отметки.

2. Основные морфометрические и гидравлические характеристики профиля водного сечения реки используются при гидрологических и гидравлических расчетах, вычислениях расходов воды, экстраполяции кривых $Q = f(H)$ и пр., поэтому каждые промерные работы на участке реки заканчиваются подсчетом этих характеристик.

а. Площадь водного сечения является площадью, нормальной к среднему направлению движения потока при

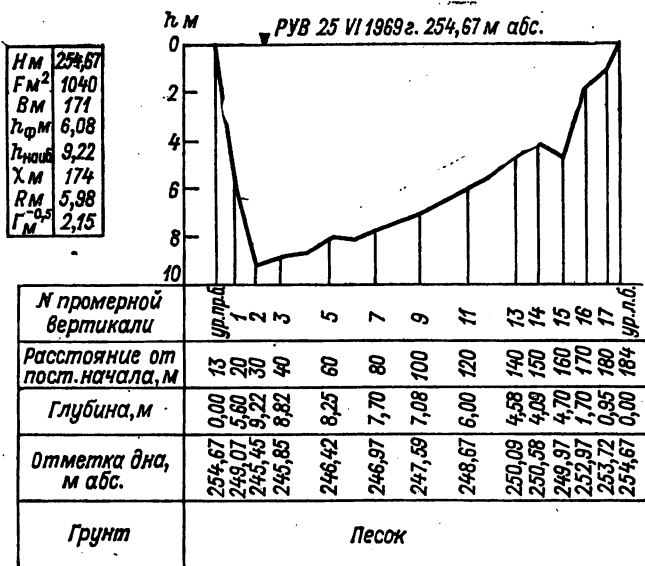


Рис. 2.2. Поперечный профиль водного сечения.
р. Сырдарья — с. Чиназ, промеры от 25/VI 1969 г.

открытом русле, ограниченная профилем русла и уровнем воды. При ледяном покрове за верхнюю границу принимается нижняя поверхность льда.

При измерении расхода воды различают: площадь водного сечения, площадь живого сечения, площадь мертвого пространства.

Под площадью водного сечения при наличии ледяного покрова подразумевается полная площадь поперечного сечения за вычетом площади погруженного неподвижного льда (поверхностного, шуги и внутриводного).

Под площадью живого сечения подразумевается часть водного сечения, в которой скорость течения можно измерить.

Под площадью мертвого пространства подразумевается часть площади водного сечения, в которой скорость течения меньше той,

которую можно измерить. Если мертвое пространство отсутствует, то площади живого и водного сечения совпадают.

Площадь водного сечения определяется планиметрированием профиля (см. упражнение 3.8) или вычисляется аналитическим способом. Рассмотрим аналитический способ вычисления площади.

При достаточно большом числе промерных вертикалей можно считать, что линия дна изменяется по прямой, а следовательно, площадь между промерными вертикалями может быть подсчитана как сумма площадей треугольников и трапеций (рис. 2.3).

Площадь береговых участков может быть вычислена по следующим формулам:

$$f_0 = (h_0 + h_1) b_0 / 2 \quad \text{и} \quad f_n = h_n b_n / 2. \quad (2.3)$$

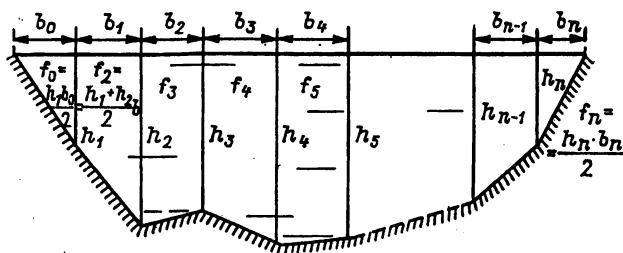


Рис. 2.3. Схема к вычислению площади водного сечения и длины смоченного периметра.

Если $h_0 = 0$, то

$$f_0 = h_1 b_0 / 2. \quad (2.4)$$

Если последняя промерная вертикаль у левого берега является границей мертвого пространства, то площадь мертвого пространства равна

$$f_{\text{м. пр}} = h_n b_n / 2. \quad (2.5)$$

Площадь отдельной трапеции между какими-либо промерными вертикалями вычисляется по формуле

$$f_n = (h_{n-1} + h_n) b_{n-1} / 2. \quad (2.6)$$

В этих формулах $h_0, h_1, h_2, \dots, h_n$ — глубины промерных вертикалей, исправленные на относ. каната и срезку уровня; b_1, b_2, \dots, b_{n-1} — расстояния между промерными вертикалями; b_0 и b_n — расстояния между крайними промерными вертикалями и урезами.

Общая площадь водного сечения реки вычисляется по формуле

$$F = \frac{h_1 b_0}{2} + \frac{(h_1 + h_2) b_1}{2} + \dots + \frac{h_n b_n}{2}. \quad (2.7)$$

Результаты расчетов площади водного сечения записываются в промерной книжке (табл. 2.4, графа 12).

Например, определим площадь водного сечения от уреза правого берега (урез пр. б.) до промерной вертикали № 1. Расстояние от уреза до этой точки $b_0 = 20,0 - 13,0 = 7,0$ м. Глубина воды в точке № 1 $h_1 = 5,60$ м. Следовательно, площадь сечения для этого участка равна $f_0 = 5,60 \cdot 7,0 : 2 = 19,6$ м².

Общая площадь водного сечения подсчитывается как сумма всех площадей между вертикалями и берегом; в рассматриваемом случае $F = 1041$ м².

Формула (2.7) справедлива при достаточном числе промерных вертикалей. Если число вертикалей недостаточно, то возникает систематическая погрешность. При числе вертикалей $n \leq 20 \div 25$ площадь водного сечения вычисляется с занижением, при $n \geq 20 \div 25$ погрешность определения площади почти не зависит от n .

б. Ширина реки B определяется как разность расстояний от постоянного начала между урезами берегов

$$B = l_n - l_1, \quad (2.8)$$

где l_n — расстояние от постоянного начала профиля до уреза дальнего берега; l_1 — то же до уреза ближнего берега. В данном примере $B = 184 - 13,0 = 171$ м.

При вычислении площади необходимо установить погрешность ее определения [17]. Погрешность определения площади водного сечения F выражается через погрешность измерения h и b .

Формула погрешности определения площади имеет вид

$$\Delta F = B \Delta h + \Delta b \sum_1^n h. \quad (2.9)$$

Подсчитаем погрешность ΔF по данным табл. 2.4. Ширина реки 171 м, число промерных вертикалей 17, промеры глубин производились с погрешностью $\Delta h = 0,02$ м, а расстояния определялись засечками с точностью $\Delta B = 0,10$ м. По графе 9 подсчитано

$\sum_1^n h = 105,2$ м. Подставляем в формулу (2.9) известные значения $\Delta F = 171 \cdot 0,02 + 0,1 \cdot 105,2 = 3,42 + 10,5 = 13,9$ м². Относительная погрешность определения площади водного сечения при $F = 1040$ м² будет $\Delta F/F = 13,9 \cdot 100 : 1040 = 1,3$ %.

в. Средняя глубина $h_{\text{ср}}$ водного сечения вычисляется как частное от деления площади водного сечения на его ширину

$$h_{\text{ср}} = F/B. \quad (2.10)$$

Подставим в формулу (2.10) значения F и B $h_{\text{ср}} = 1040 : 171 = 6,08$ м.

г. Наибольшая глубина выбирается из исправленных глубин по графе 9 табл. 2.4; $h_{\text{наиб}} = 9,22$ м. Формула погрешности средней глубины имеет вид

$$\Delta h_{\text{ср}} = \left(\Delta h B + \Delta b \sum_1^n h \right) / B + h_{\text{ср}} \Delta B / B. \quad (2.11)$$

Примем погрешность определения ширины реки $\Delta B/B = 1 : 2000$; получим $\Delta h_{cp} = \frac{0,02 \cdot 171 + 0,1 \cdot 105,2}{171} + \frac{1}{2000} \cdot 6,08 = 0,0845$.

Относительная погрешность равна $\Delta h_{cp}/h_{cp} = 0,0845 \cdot 100 : 6,08 = 1,4 \%$.

д. Смоченный периметр χ — длина линии дна реки на профиле между урезами воды. При наличии ледяного покрова в длину смоченного периметра включается длина нижней поверхности льда по профилю.

Величина χ вычисляется как сумма гипотенуз прямоугольных треугольников (см. рис. 2.3) по формуле

$$\chi = \sqrt{b_0^2 + h_1^2} + \sqrt{b_1^2 + (h_2 - h_1)^2} + \dots + \sqrt{b_n^2 + h_n^2}, \quad (2.12)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ — расстояние между промерными точками, м; h_1, h_2, \dots, h_n — глубина промерных вертикалей, м.

Подставляя в формулу (2.12) значение b и h для участков водного сечения у правого и левого берегов, получим $\chi = \sqrt{7,0^2 + 5,6^2} + \sqrt{10^2 + (9,22 - 5,60)^2} + \dots + \sqrt{4,0^2 + 0,95^2} = 173,74 = 174$ м.

Из сопоставления значения ширины русла $B = 171$ м и смоченного периметра $\chi = 174$ м видно, что для данной формы русла эти величины близки между собой.

е. Гидравлический радиус R — частное от деления площади водного сечения на длину смоченного периметра

$$R = F/\chi. \quad (2.13)$$

В данном примере $R = 1040 : 174 = 5,98$ м.

Для русел, ширина которых близка к смоченному периметру, гидравлический радиус близок к средней глубине. В данном примере $h_{cp} = F/B = 6,08$ м и $R = F/\chi = 5,98$ м.

Гидравлический радиус можно заменить средней глубиной при условии, что отношение $h_{cp}/B < 1/10$; в данном примере $6,08 : 174 = 1 : 25$.

Рассмотрим точность определения гидравлического радиуса и средней глубины русла. Г. В. Железняков и Б. Б. Данилевич приводят следующий вывод формулы абсолютной погрешности вычисления гидравлического радиуса:

$$\Delta R = \frac{1}{\chi^2} \left\{ [\chi B - F (h_1/b_1 + h_n/b_n)] + \Delta h \left(\chi \sum_1^n h - nF \right) \Delta b \right\}. \quad (2.14)$$

Подсчитаем ΔR по известным данным, принимая $\Delta h = 0,02$ м и $\Delta B = 0,1$ м. Получим

$$\Delta R = \frac{1}{174^2} \left\{ \left[174 \cdot 171 - 1040 \left(\frac{5,6}{7,0} + \frac{0,95}{4,0} \right) \right] 0,02 + (174 \cdot 105,2 - 17 \cdot 1040) 0,1 \right\} = 0,017 \text{ м.}$$

Следовательно, относительная погрешность определения гидравлического радиуса $\Delta R/R = 0,017 \cdot 100 : 5,98 = 0,28 \%$.

ж. Параметр Глушкова Γ представляет собой характеристику взаимодействия размываемого русла и потока и вычисляется по формуле

$$\Gamma = \sqrt{B}/h_{\text{ср}}, \quad (2.15)$$

Для данного примера получим $\Gamma = \sqrt{171} : 6,08 = 2,15 \text{ м}^{-0,5}$.

Рассмотрим точность определения параметра Γ по измеренным элементам водного сечения.

Формула абсолютной погрешности параметра Глушкова имеет вид

$$\Delta \Gamma = 3\sqrt{B} \Delta B / (2F) + \sqrt{B^3} \left(B \Delta h + \Delta B \sum_1^n h \right) / F^2. \quad (2.16)$$

Подсчитаем $\Delta \Gamma$ по известным данным

$$\Delta \Gamma = \frac{3\sqrt{171}}{2 \cdot 1040} \cdot \frac{1}{2000} + \frac{\sqrt{171^3} (171 \cdot 0,02 + 0,1 \cdot 105,2)}{1040^2} = 0,03 \text{ м}^{-0,5}$$

Относительная погрешность равна $\Delta \Gamma / \Gamma = 0,03 \cdot 100 : 2,15 = 1,4 \%$.

Составим таблицу относительных погрешностей вычисления морфометрических характеристик (табл. 2.5), откуда видно, что погрешности невелики.

Таблица 2.5

Относительные погрешности вычисления морфометрических характеристик

р. Сырдарья — с. Чиназ

Элемент	Погрешность, %
Площадь $F \text{ м}^2$	1,3
Средняя глубина $h_{\text{ср}} \text{ м}$	1,4
Гидравлический радиус $R \text{ м}$	0,28
Параметр Глушкова $\Gamma \text{ м}^{-0,5}$	1,4

Упражнение 2.6. Определение параметра формы водного сечения потока.

Дано: данные промеров русла р. Сырдарья — с. Чиназ (см. табл. 2.4).

Требуется: вычислить параметр формы водного сечения, учитывающий неравномерность распределения глубин по широте.

Решение: форма поперечного водного сечения русла в сочетании с его размерами, шероховатостью, уклоном участка и распределением скорости потока в сечении составляет сложный ком-

плекс, который изучается в гидрометрии. При расчете переходных коэффициентов от поверхностных скоростей к средним, при экстраполяции кривых $Q = f(H)$ также применяется параметр формы водного сечения потока, определяемый по формуле, предложенной Г. В. Железняковым:

$$\beta_* = \frac{1}{F \sqrt{h_{cp}}} \int_0^B h^{3/2} db, \quad (2.17)$$

где F — площадь поперечного сечения, m^2 ; h — глубина, m ; b — расстояние между промерными вертикалями, m .

Для определения β_* можно использовать два способа: графический и аналитический.

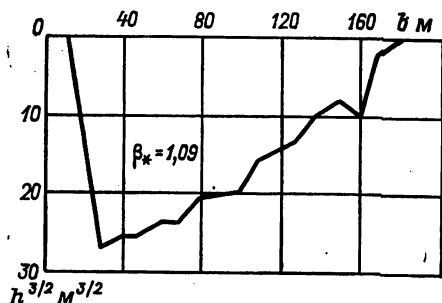


Рис. 2.4. К определению параметра β_* для водного сечения. р. Сырдарья — с. Чиназ, 12/VI 1969 г.

При графическом способе значение интеграла в формуле (2.17) определяется планиметрированием эюры $h^{3/2}b$. Для построения эюры составляется табл. 2.6, в которой для каждой глубины определяется значение $h^{3/2}b$. На рис. 2.4 построена эюра $h^{3/2}b$, площадь которой определена планиметром (в данном случае $F_{\beta_*} = 2781 \text{ м}^{2,5}$).

Таблица 2.6

Вспомогательная таблица к определению параметра β_* и погрешности его вычисления

№ промерной вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Глубина h м	\sqrt{h}	$h\sqrt{h} = h^{3/2}$
Ур. пр. б.	13,0	0,00	0,00	0,00
	20,0	5,60	2,366	13,25
•••••	•••••	•••••	•••••	•••••
17	180	0,95	0,975	0,93
Ур. л. б.	184	0,00	0,00	0,00
Сумма		105,2	41,203	277,04

Подставляя известные значения в формулу (2.17), получаем

$$\beta_* = \frac{1}{1040 \sqrt{6,08}} \cdot 2781 = 1,09.$$

Как показали исследования большого количества водных сечений, максимальное значение $\beta_* = 1,62$, среднее — примерно 1,10. Для параболической формы русла теоретическое значение параметра β_* близко к 1,10. Следовательно, форма данного водного сечения поверхностного потока близка к параболической.

Для сокращения объема вычислений можно использовать зависимость между морфометрическими параметрами $a_h = h_{cp}/h_{наиб}$ и β_* (табл. 2.7).

Таблица 2.7
Значения β_* для беспойменных русел

a_h	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	1,00
β_*	1,47	1,39	1,32	1,26	1,27	1,17	1,13	1,10	1,07	1,04	1,02	1,00

Для данного примера $a_h = h_{cp}/h_{наиб} = 6,08 : 9,22 = 0,65$, следовательно, $\beta_* = 1,10$. Напомним, что по фактическим данным по формуле (2.17) $\beta_* = 1,09$.

При аналитическом способе следует в формуле (2.17) интеграл $\int_0^B h^{3/2} db$ заменить суммой произведений h и b , а β_* получается по формуле

$$\beta_* = \frac{1}{F \sqrt{h_{cp}}} \sum_0^B \left(\frac{h_{n-1}^{3/2} + h_n^{3/2}}{2} \right) b_n. \quad (2.18)$$

Расчет по этой формуле в данном упражнении не приводится.

Относительная погрешность вычисленного параметра формы водного сечения определяется по формуле, предложенной Железниковым:

$$\Delta\beta_*/\beta_* = \frac{3}{2} \left(b \sum_1^n h^{1/2}/F_{\beta_*} - B/F \right) \Delta h + \left(\sum_1^n h^{3/2}/F_{\beta_*} - 3 \sum_1^n h/F \right) \Delta b + \Delta B/(2B). \quad (2.19)$$

Подставляя значения из табл. 2.6 и 2.7 и принимая $\Delta h = 0,02$ м, $\Delta b = 0,1$ м, $\Delta B/B = 1 : 2000$, $b = 10,0$, получаем, $\Delta\beta_*/\beta_* = 0,0204 = 2,04$ %.

Абсолютная погрешность при $\beta_* = 1,09$ составляет $\Delta\beta_* = 0,022$.

Упражнение 2.7. Анализ профиля водного сечения для зимнего периода.

Дано: профиль водного сечения (рис. 2.5).

Требуется: 1. Привести пояснения к измерениям в зимний период.

2. Вычислить основные морфометрические и гидравлические характеристики профиля: а) площадь водного сечения F_b , б) общую площадь льда $F_{о.л}$, в) площадь погруженного льда $F_{п.л}$, площадь шуги $F_{ш}$, г) общую площадь сечения h_{cp} , д) ширину реки B , е) сред-

нюю глубину $h_{ср}$, ж) наибольшую глубину $h_{наиб}$, з) среднюю толщину льда $h_{л.с}$, и) смоченный периметр и гидравлический радиус, к) коэффициент степени стеснения потока.

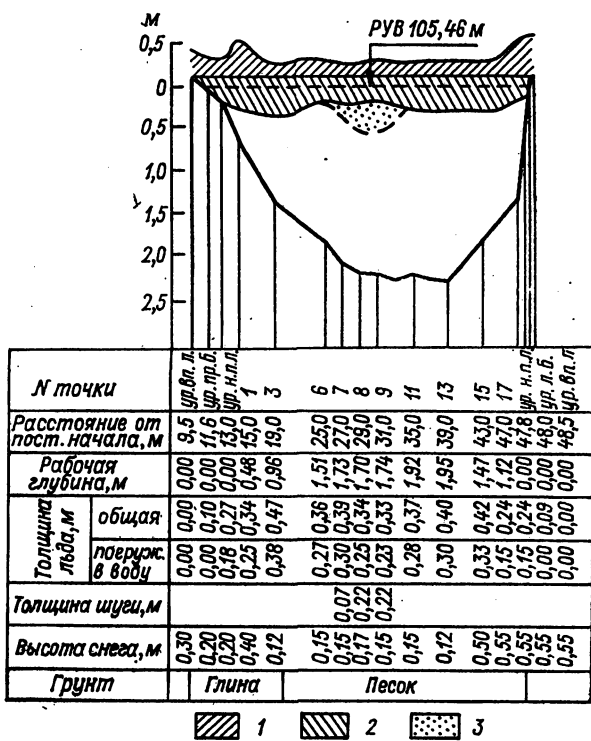


Рис. 2.5. Поперечный профиль реки.
р. Тверца — д. Ряд, промеры от 21/1 1948 г.
1 — снег, 2 — лед, 3 — шуга.

Решение: 1. Поясним получение следующих данных:
а) уреза верхней поверхности льда, б) уреза воды правого (левого) берега, в) уреза нижней поверхности льда.

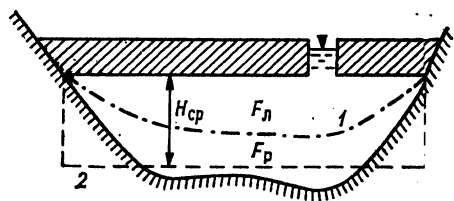


Рис. 2.6. Условное разделение поперечного сечения потока на зону влияния шероховатости льда и русла.
1 — линия раздела зон влияния; 2 — линия средней глубины $H_{ср}$.

Для определения положения уреза верхней поверхности льда, покрытого снегом, от берега прокапываются канавки в снегу на обоих берегах, пока не будет обнаружена поверхность льда. В дан-

ном случае расстояние от постоянного начала до начала верхней поверхности льда на левом берегу 9,5 м, на правом 48,5 м. Для обнаружения уреза воды и начала нижней поверхности льда по створу во льду пробивают канавку до тех пор, пока не будет вскрыт урез нижней поверхности льда.

Следует иметь в виду, что обычно вода под давлением ледяного покрова поднимается в канаве (лунке) выше нижней поверхности льда, что и видно из рис. 2.6.

2. Вычисление основных морфометрических и гидравлических характеристик производится по данным, приведенным в таблице под профилем на рис. 2.5, и указаниям к упражнению 2.5 (расчетная таблица не приводится).

а. Площадь водного сечения F_v определяется по формуле (2.7), значения h_1, \dots, h_n заменяются рабочей глубиной, представляющей собой разность между глубиной, определенной от уровня воды в лунке, и толщиной погруженного льда. Например, для промерной точки № 1 $h_p = 0,73 - 0,25 = 0,48$ м.

Если в лунке была шуга, то рабочая глубина вычисляется с учетом слоя шуги. Например, для промерной точки № 8 $h_p = 2,17 - (0,25 + 0,22) = 1,70$ м; $F_v = 48,8$ м².

б. Общая площадь льда вычисляется по формуле (2.7), только вместо h_1, h_2, \dots, h_n принимается соответственная толщина льда, тогда $F_{о.л} = 13,2$ м².

в. Площадь погруженного льда $F_{п.л}$ и площадь шуги $F_{ш}$ вычисляют по формуле (2.7), принимая вместо h_1, h_2, \dots, h_n толщину погруженного льда и шуги. $F_{п.л} = 10,1$ м² и $F_{ш} = 1,02$ м².

Если расстояния между точками измерения толщины льда, погруженного льда и шуги в промерных точках равны, то вычисления производятся по формуле

$$F_{п.л} = \left(\frac{h_1}{2} + h_1 + h_2 + \dots + \frac{h_n}{2} \right) b + f_1 + f_n,$$

где h_1, h_2, \dots, h_n — соответствующие толщины, b — расстояние между точками; f_1 и f_n — площади, заключенные между урезами воды и ближайшими к ним промерными точками.

г. Общая площадь поперечного сечения реки определяется как сумма площадей водного сечения F_v , льда $F_{п.л}$ и шуги $F_{ш}$. В данном примере $F_0 = 48,8 + 10,1 + 1,02 = 59,9$ м².

д. Ширина реки по нижней поверхности льда $B = 47,8 - 13,0 = 34,8$ м. Ширина реки по уровню воды $B_1 = 48,0 - 11,6 = 36,4$ м. Ширина реки в пределах всего сечения по верхней поверхности льда $B_2 = 48,5 - 9,5 = 39,0$ м.

е. Средняя глубина вычисляется как отношение общей площади поперечного сечения к ширине реки по линии уровня воды $h_{ср} = F_0/B = 59,9 : 36,4 = 1,64$ м.

ж. Наибольшая глубина водного сечения выбирается из наблюдаемых глубин за вычетом погруженного льда (шуга в расчет не принимается). В нашем примере $h_{наиб} = 2,26$ м.

з. Средняя толщина льда $h_{\text{ср. л.}}$, измеренная при промерах, используется при расчетах по технике безопасности при работах со льда, а также при расчетах расхода льда.

Средняя толщина по сечению на данную дату измерения может быть вычислена двумя приемами: 1) как среднее арифметическое из измеренной толщины по сечению

$$h_{\text{ср. л.}} = \sum_1^n h_{\text{л.}}/n, \quad (2.21)$$

где $h_{\text{л.}}$ — толщина льда в промерных точках; n — число точек.

В данном примере $h_{\text{ср.}} = 4,36 : 14 = 0,31$ м;

2) по формуле

$$h_{\text{ср. л.}} = F_{\text{о. л.}}/B_{\text{в. п. л.}}, \quad (2.22)$$

где $F_{\text{о. л.}}$ — общая площадь льда, м^2 ; $B_{\text{в. п. л.}}$ — ширина сечения по верхней поверхности льда, м.

В данном примере $B_{\text{в. п. л.}} = 48,5 - 9,5 = 39,0$ м, тогда $h_{\text{ср.}} = 13,5 : 39,0 = 0,34$ м.

Как видно, значения средней толщины льда по сечению получились близкими в обоих приемах.

и. Приведем некоторые расчетные формулы смоченного периметра и гидравлического радиуса для русла, покрытого льдом [19].

На рис. 2.6 приведено условное разделение водного сечения по зонам влияния льда и русла. Влияние шероховатости нижней поверхности льда условно распространяется на площадь водного сечения $F_{\text{л.}}$, в то время как влияние шероховатости русла сказывается на части водного сечения $F_{\text{р.}}$. Обозначим: $F_{\text{зак}}$ — общая площадь сечения, $\chi_{\text{л.}}$ — смоченный периметр нижней поверхности льда, $\chi_{\text{р.}}$ — смоченный периметр русла; $\chi_{\text{зак}}$ — смоченный периметр руслового потока, закрытого льдом:

$$\chi_{\text{зак}} = \chi_{\text{р.}} + \chi_{\text{л.}}, \quad (2.23)$$

$$F_{\text{зак}} = F_{\text{р.}} + F_{\text{л.}}. \quad (2.24)$$

Гидравлический радиус для закрытого льдом потока может быть вычислен по формуле

$$R_{\text{зак}} = F_{\text{зак}}/\chi_{\text{зак}}. \quad (2.25)$$

Для закрытых льдом водных сечений нельзя заменять гидравлический радиус средней глубиной. Расчет смоченного периметра нижней поверхности льда $\chi_{\text{л.}}$ по данным рис. 2.5 произведен с учетом шуги по формуле (2.12)

$$\begin{aligned} \chi_{\text{л.}} = & \sqrt{(0,34 - 0,27)^2 + 2^2} + \dots \\ & \dots + \sqrt{(0,44 - 0,24)^2 + 2^2} = 35,2 \text{ м.} \end{aligned}$$

Значение смоченного периметра русла $\chi_{\text{р.}}$ по формуле (2.12) получено равным $\chi_{\text{р.}} = \sqrt{0,48^2 + 2^2} + \dots + \sqrt{1,12^2 + 2^2} = 36,5$ м.

Смоченный периметр водного сечения, закрытого льдом, равен $\chi_{\text{зак}} = \chi_{\text{л}} + \chi_{\text{р}} = 35,2 + 36,5 = 71,7$ м.

Гидравлический радиус для закрытого льдом русла вычисляется по формуле (2.25) $R_{\text{зак}} = 48,8 : 71,7 = 0,68$ м.

Как видно, $R_{\text{зак}}$ значительно отличается от $h_{\text{ср}} = 1,64$ м.

При измерении площади в зимний период появляется погрешность за счет недостаточного количества промерных точек. В Методических указаниях [27] предлагается вычислить изменчивость глубины по ширине реки через коэффициент вариации

$$C_{v, h/b} = \sqrt{\sum_1^n (h_i/h - 1)^2 / (n-1)} \quad (2.26)$$

или приближенно

$$C_{v, h/b} = 1,4 \sum_1^n (h_i/h - 1) / (n-1), \quad (2.27)$$

где h_i — измеренная глубина (с включением глубин на урезах $h=0$); h — средняя глубина.

В формуле (2.26) $(h_i/h - 1)$ — модуль, который означает, что суммирование производится без учета знака.

Соотношение между вероятной относительной погрешностью определения площади $r_F = \Delta F/F$, коэффициентом вариации глубин $C_{v, h/b}$ и числом промерных вертикалей n при их равномерном расположении выражается зависимостью

$$r_F = 200 C_{v, h/b} / n^{1,5}. \quad (2.28)$$

В Методических указаниях (3.7) составлена таблица по формуле (2.27), по которой при известном $C_{v, h/b}$ можно найти число вертикалей, необходимых для определения площади с заданной точностью.

В данном примере для измеренных глубин по формуле (2.27) подсчитано значение $C_{v, h/b} = 0,98$. Задаемся относительной погрешностью определения площади $r_F = 2\%$. Число промерных точек при данных условиях рассчитывается по формуле (2.28), $n = 20$.

к. Коэффициент α' , характеризующий степень стеснения потока, определяется по соотношению

$$\alpha' = F_{\text{в}} / F_{\text{полн}}, \quad (2.29)$$

где $F_{\text{в}}$ — площадь водного сечения под ледяным покровом; $F_{\text{полн}}$ — полная площадь сечения, ограниченная сверху линией уровня воды в лунке.

Для данного примера получим $\alpha' = 48,8 : (48,8 + 10,1) = 0,82$.

Коэффициент α' может быть применен при подсчете зимнего стока.

Упражнение 2.8. Построение схематизированного профиля водного сечения.

Д а н о: 1. Сведения о промерах русла реки (табл. 2.8).

2. $B = 45,6$ м, $h_{\text{наиб}} = 3,4$ м.

Таблица 2.8

Журнал измерения глубин

№ промер. точки	Расстояние от уреза, м	Глубина по формуле (2.30), м	Действительная глубина h , м	№ промерной точки	Расстояние от уреза, м	Глубина по формуле (2.30), м	Действительная глубина h , м
Ур. пр.б.	0,00	0,00	0,00	8	24,0	3,37	3,40
1	3,00	0,83	1,05	9	27,0	3,26	3,12
6	18,0	3,23	3,15	14	42,0	0,96	0,73
7	21,0	3,36	3,41	Ур. л. б.	45,6	0,00	0,00

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить глубины схематизированного профиля водного сечения.

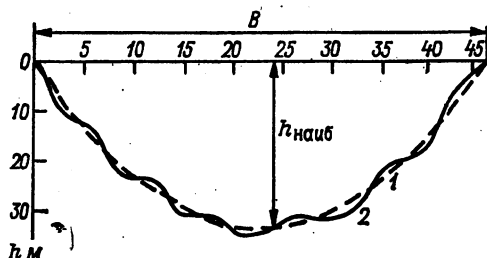


Рис. 2.7. Поперечное сечение русла.

1 — действительное сечение, 2 — рассчитанное по формуле (2.30).

2. Построить профиль водного сечения по полученным глубинам и сопоставить с действительным профилем.

Р е ш е н и е: 1. Форма поперечного сечения с симметричным распределением глубин русла по предложению Железнякова может быть схематизирована по уравнению параболы

$$h = 4h_{\text{наиб}}b(B - b)/B^2, \quad (2.30)$$

где h — глубина на расстоянии b от уреза воды, м; $h_{\text{наиб}}$ — наибольшая глубина в поперечном сечении, м; B — ширина русла, м.

Зная B и $h_{\text{наиб}}$, можно построить профиль водного сечения, получив глубины для заданного расстояния b по этой формуле, не производя промерных работ (табл. 2.8).

2. На рис. 2.7 построен профиль водного сечения по действительным глубинам и схематизированный по рассчитанным глубинам. Как видно из рисунка, получено хорошее совмещение линии дна. Необходимо заметить, что такой расчет глубин можно применять для русла правильной параболической формы.

2.4. План реки в изобатах

Упражнение 2.9. Составление плана участка реки в изобатах.

Д а н о: 1. Данные по промерам (табл. 2.9).

2. Выписка из книжки для записи промеров (табл. 2.10).

Таблица 2.9

Данные к построению плана участка

р. Зеленая — с. Кудрявое, промеры 7/VII 1979 г.

	Расстояние по магистрали до профиля, м	Расстояние от магистрали по профилям и поперечникам до уреза воды, м	
		левого берега	правого берега
Профиль № 1	0,00	4,3	98,7
Поперечник № 1	10,0	7,1	97,1
Профиль № 2	50,0	20,5	104,1
Профиль № 3	100,0	29,2	126,1

П р и м е ч а н и е. Расстояния до урезом между профилями измерялись по четырем поперечникам через 10,0 м.

Таблица 2.10

Книжка для записи промеров

р. Зеленая — с. Кудрявое, профиль № 2 от 7/VII 1979 г.

№ промерной точки	Расстояние от магистрали, м	Измеренная глубина, м	Угол отнoса троса, °	Поправка на отнoс троса, м	Исправленная глубина, м	Срезка уровня, м	Глубина со срезкой, м	Отметка дна, м
Ур. л. б.	20,5	0,00				0,00	0,00	93,05
1	24,9	0,79				-0,03	-0,76	92,29
8	60,2	4,57	10	-0,03	4,54	-0,03	4,51	88,54
16	100,1	0,93				-0,03	0,90	92,15
Ур. пр. б	104,1	0,00				0,00	0,00	93,05

Т р е б у е т с я: 1. Определить условный (срезочный) уровень, ввести срезку уровня для каждого профиля и вычислить отметки дна.

2. Нанести на план расположение створов и линии урезом, определить положение промерных точек на створах и выписать глубины.

3. Построить план участка реки в изобатах.

Р е ш е н и е: 1. Длина участка реки по магистрали 100 м (табл. 2.9). Промеры произведены на профилях № 1, 2 и 3. Уровень

воды во время работ измерялся по ближайшему уровенному посту (на 100 м выше профиля № 1, табл. 2.11). Уровни во время работы изменялись. Чтобы получить сравнимые глубины по профилям, определяется условный (срезочный) уровень.

Таблица 2.11

Срезки уровня при промерах от 7/VII 1979 г.

р. Зеленая — с. Кудрявое

№ профиля	Рабочий уровень		Условный (срезочный) уровень H_1 м абс.	Срезка $\Delta H = H - H_1$ м
	H м абс.	над нулем графика H см		
I	93,14	74	93,05	-0,09
II	93,08	68	93,05	-0,03
III	93,05	65	93,05	0,00

В данном примере условный уровень принимается равным 93,05 м абс. как самый низкий за время работ на профиле № 3. Рабочие уровни, т. е. уровни воды, которые наблюдались на каждом профиле при промерах, приводятся к условному (срезочному) уровню.

Срезка глубин для каждого профиля определяется по формуле

$$\Delta H = H - H_1, \quad (2.31)$$

где H — отметка рабочего уровня; H_1 — отметка условного уровня. Срезки, полученные по этой формуле, приведены в табл. 2.11.

Отметка нуля графика 92,40 м абс.

В общем виде глубина, приведенная к условному уровню воды, или глубина со срезкой $h_{пр}$, вычисляется по формуле

$$h_{пр} = h \pm \Delta H, \quad (2.32)$$

где h — измеренная глубина, м (при наличии отнosa троса измеренная глубина должна быть с поправкой на относ троса, как это указано в табл. 2.10 для точки 8); ΔH — срезка, м. В данном примере срезка вводится со знаком минус.

Отметка дна для каждой промерной вертикали вычисляется как разность абсолютной отметки дна и глубины.

2. На листе плотной белой бумаги (рис. 2.8) проводится меридиан СЮ. От северного конца стрелки откладывается направление азимута $98^{\circ}25'$ и проводится линия, соответствующая положению магистрали. Масштаб построения плана (1 : 1000) выбирается с таким расчетом, чтобы весь чертеж был не менее 15—20 см. На линии магистрали произвольно ставится начальная точка для дальнейшего нанесения профилей так, чтобы весь участок длиной 100 м располагался в выбранном масштабе на листе бумаги. Магистраль начинается с профиля № 1, от которого ведется счет горизонтальных расстояний. По данным табл. 2.10 от профиля № 1 на магистрали

в масштабе откладывается положение профилей № 2 и 3. Под прямым углом к магистрали восстанавливаются линии профилей, на которых в масштабе откладываются расстояния до урезов левого и правого берега и проводятся плавные линии урезов.

Для плана в изобатах около промерных точек выписываются глубины, исправленные на все виды поправок. На рис. 2.8 номера точек написаны только на профиле № 2.

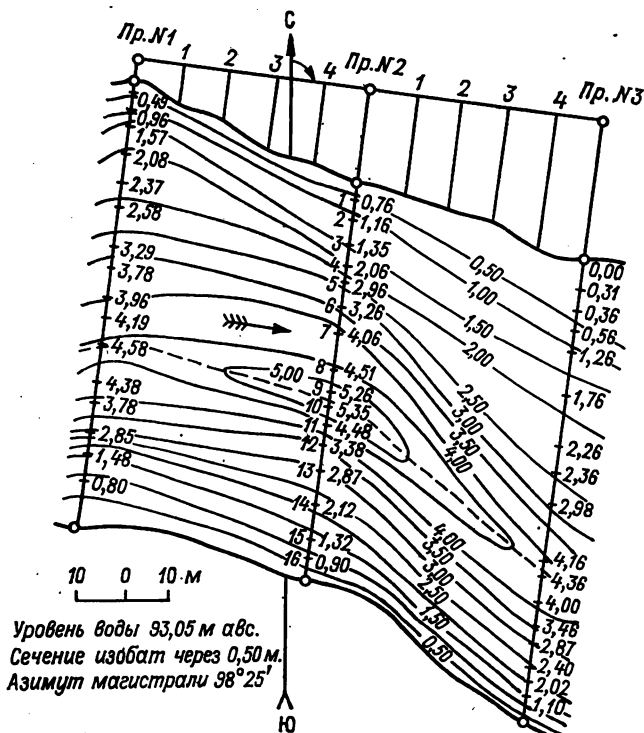


Рис. 2.8. План участка реки в изобатах.

3. **Изобаты** — линии равных глубин на участке реки. Сечение изобат зависит от глубин на участке и масштаба плана (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Сечение изобат в зависимости от масштаба плана русла реки

Масштаб	1 : 1000, 1 : 2000	1 : 5000	1 : 10 000	1 : 25 000
Сечение изобат, м	0,25—0,50	0,50	1,0	2,0

При $h_{наиз} = 5,35$ м для масштаба 1 : 1000 сечение изобат принимается равным 0,50 м. Следовательно, на плане необходимо найти положение изобат 0,50; 1,00; 1,50; 2,50, . . . , 5,00 м.

Изобаты проводятся на основе интерполяции между глубинами на промерных точках, осуществляемой аналитическим и графическим способами, из которых чаще применяется последний.

Аналитическая интерполяция. Приведем пример интерполяции на профиле № 1 у правого берега. По заданному сечению изобат между урезом (где глубина равна нулю) и промерной точкой № 16 с глубиной 0,80 м должна пройти изобата 0,50 м. Для определения местоположения этой изобаты измеряем на плане расстояние между урезом и этой точкой, которое равно 10 мм; разность глубин равна 0,80 м. Делим это расстояние на разность: $10 : 0,80 = 12,5$ мм. Следовательно, на 0,10 м глубины расстояние будет равно 1,25 мм. А так как разность между глубиной в промерной точке и изобатой равна $0,80 - 0,50 = 0,30$ м, то расстояние по профилю от точки до изобаты будет равно $1,25 \cdot 3 = 3,8$ м. Откладываем 3,8 мм в сторону берега от промерной точки 0,80 м и в этом месте ставим точку, через которую должна пройти изобата 0,50 м. Аналогичные расчеты производятся по всем точкам. В некоторых случаях можно допустить интерполяцию на глаз, например на профиле № 1 у левого берега изобата 0,50 м пройдет рядом с промерной точкой 0,49 м.

Получив точки прохождения изобат, соединяют их плавными линиями.

Направление замкнутых изобат должно быть согласовано с точками наибольших или наименьших глубин по смежным профилям. Рассмотрим пример такой интерполяции на участке между профилями № 2 и 3.

На профиле № 2 наибольшая глубина 5,35 м, на профиле № 3 — 4,36 м. Следовательно, изобаты 5,00 и 4,50 м, пересекающие профиль № 2, не пройдут через профиль № 3, а должны замкнуться где-то на участке между профилями № 2 и 3. Для определения мест прохождения изобат 5,00 и 4,50 м к точкам максимумов 5,35 и 4,36 м прикладываем линейку и определяем расстояние между ними, равное 58 мм. Разность глубин равна $5,35 - 4,36 = 0,99$ мм. Следовательно, на 1 м глубины число миллиметров равно $58 : 0,99 = 58,5$ и на 0,01 м будет $0,58 = 0,6$ мм.

От точки 5,35 м до изобаты 5,00 м разность 0,35 м; следовательно, расстояние $0,6 \cdot 35 = 21$ мм. Отложив 21 мм от точки 5,35 м по прямому направлению на точку 4,36 м (на профиле № 3), получим точку прохождения изобаты 5,00 м. Аналогично определяем место прохождения изобаты 4,5 м.

Графическая интерполяция. При графической интерполяции могут быть применены два приема.

Первый прием. Для каждого промерного профиля строится профиль водного сечения. Согласно выбранному сечению изобат, на профиле по вертикальному масштабу глубин определяют точки, соответствующие сечению изобат, и их положение проектируют на поверхность воды, например на рис. 2.9 изобата 0,5 м пройдет в точке б, изобата 1,0 м — в точке в и т. д. (На рисунке

приведена часть профиля водного сечения у левого берега.) Затем определяют расстояния по горизонту воды от точки *a* до точки *b* и т. д. и переносят их на линию профиля на плане. Полученные точки и будут местами прохождения изобат. Удобнее положение изобат отмечать на полоске бумаги, приложенной к линии уровня профиля водного сечения, а затем переносить их на план.

Второй прием. Покажем применение этого приема определения прохождения изобат на профиле № 3 для точек глубиной 4,16 и 2,98 м.

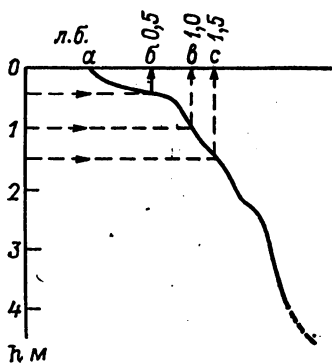


Рис. 2.9. Пример графической интерполяции первого приема.

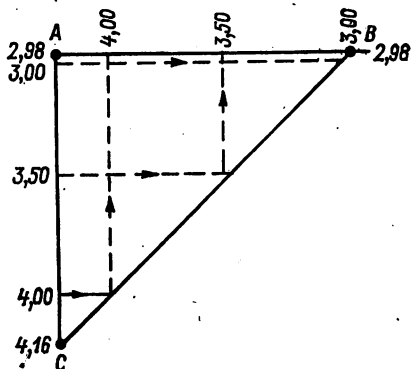


Рис. 2.10. Пример графической интерполяции второго приема.

На миллиметровой бумаге (рис. 2.10) откладывают расстояние между этими точками: *A* (4,16 м) и *B* (2,98 м). У обеих точек представляют глубину 2,98 м. Из точки *A* вниз проводят прямую, на которой в масштабе, в данном случае 1 см = 0,50 м (масштаб можно менять в зависимости от разности глубин), откладывают разность глубин в точках *A* и *B* 4,16—2,98 = 1,18 м и ставят точку *C*, у которой записывают глубину 4,16 м. Точки *C* и *B* соединяют прямой. На линии *AC* по масштабу определяют точки, соответствующие сечениям изобат 3,00; 3,50 и 4,00 м, и через них проводят горизонтальные линии до пересечения с линией *CB*; затем из этих пересечений проводят линии, параллельные *AC*, до пересечения с линией *AB*. Отрезки, полученные на линии *AB*, и дают места прохождения изобат между точками 4,16 и 2,98 м. Совмещая линию *AB* (рис. 2.10) с линией профиля на плане (между точками 4,16 и 2,98 м), графически сносим местоположение изобат на профиль.

Графический способ определения местоположения изобат ускоряет работу, особенно на участках, где проходит несколько изобат.

Изобаты следует проводить плавными линиями; они должны иметь надписи в разрыве. В местах, где изобаты расположены тесно, например у крутых берегов, надписывать изобаты можно через одну или через две. Глубины на плане выписывают черной тушью,

а изобаты вычерчиваются синей; штриховой линией наносится линия наибольших глубин.

План в изобатах используется для нужд судоходства.

План участка может быть построен в горизонталях. Г о р и з о н т а л я м и называются линии равных высот поверхности земли (дна), выраженные в отметках над уровнем моря.

2.5. Обработка данных промеров, произведенных эхолотом

Упражнение 2.10. Обработка данных промеров, произведенных малогабаритным эхолотом.

Д а н о: запись промеров дна в виде эхограммы (рис. 2.11).

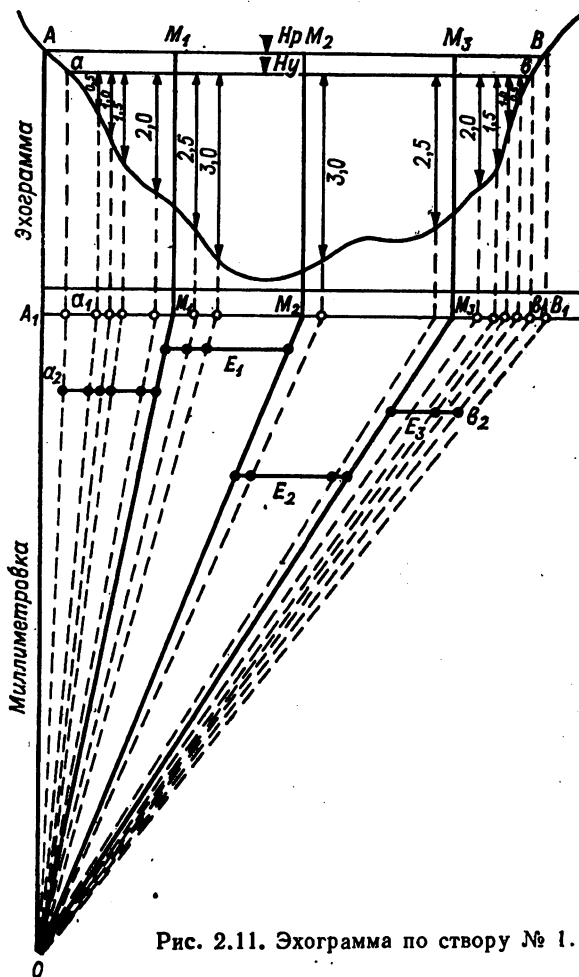


Рис. 2.11. Эхогармма по створу № 1.

Т р е б у е т с я: 1. Определить глубины в характерных точках дна с введением срезки.

2. Обработать эхограмму графическим способом в следующем порядке: а) определить на эхограмме местоположение мензульных засечек и заданных глубин со срезкой, б) произвести графические построения для перенесения глубин на план, в) перенести глубины с эхограммы на план.

Р е ш е н и е: 1. На участке реки произведены промеры глубин эхолотом по нескольким профилям, причем для каждого профиля имеется своя отметка рабочего уровня. Рассмотрим пример обработки эхограммы для профиля № 1 (см. рис. 2.11).

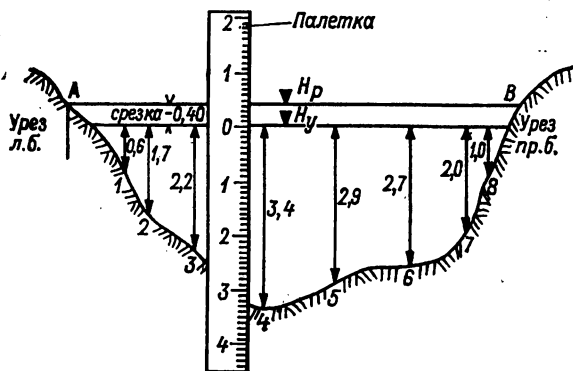


Рис. 2.12. Запись глубин на эхограмме по профилю № 1.

Вертикальный масштаб записи глубин на эхограмме 1 : 100. На профиле нанесены: рабочий уровень H_p (линия AB), в который внесена поправка на глубину погружения вибратора, и условный (срезочный) уровень H_y , к которому будут приведены глубины.

На эхограмме проводится вспомогательная линия A_1B_1 , которая выбирается произвольно как горизонтальная линия сетки эхограммы ниже линии дна. Для удобства отсчетов глубин по эхограмме применяется палетка (рис. 2.12), изготовляемая из прозрачного тонкого целлулоида.

На палетке деления наносятся через 1 мм вверх и вниз от нулевой линии, соответствующей условному уровню. У этих делений в соответствии с масштабом эхограмм указываются значения глубин. Вверх откладываются значения до 1—2 м для определения срезки, а вниз — до 5—6 м для определения глубин с учетом срезки.

Палетка накладывается на эхограмму так, чтобы нулевая линия была смещена относительно рабочего уровня на размер срезки в соответствующем направлении (в зависимости от знака срезки). В данном примере срезка равна — 0,40 м. Следовательно, нулевая линия палетки совмещается с условным уровнем, который на 0,40 м ниже рабочего.

На линии дна намечаются характерные точки: урез л. б., с 1-й по 8-ю точку и урез пр. б. Совмещая нулевую линию палетки с линией условного уровня, получаем глубины в характерных точках с учетом срезки. Эти величины записываются в промерный журнал. Горизонтальные расстояния определяются по соответствующим местам засечек (см. ниже).

2. Одновременно с эхолотированием производились засечки мензулой урезов и судна, передвигающегося с эхолотом. Одновременно с засечкой мензулой по отмашкам производится оперативная отметка на эхограмме. На рис. 2.11 эти отметки соответствуют точкам M_1 , M_2 , M_3 .

Рассмотрим дальнейший порядок графической обработки эхограммы.

а. На плане проводятся изобаты с отметками 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м. На профиле (рис. 2.12) по вертикальному масштабу (1 : 100) палеткой определяются заданные глубины со срезкой от условного уровня.

б. Графические построения производятся следующим образом. К нижней части эхограммы подклеивается миллиметровая бумага. При этом необходимо, чтобы горизонтальные линии миллиметровки были параллельны уровню воды на эхограмме.

На миллиметровой бумаге проводится вспомогательная линия A_1B_1 . Точки A_1 и B_1 являются проекциями урезов при рабочем уровне, точки a_1 и b_1 — проекциями урезов при условном (срезочном) уровне. На линию A_1B_1 переносят положение изобат заданных сечений и положение засечек.

На рис. 2.12 из точки A через точку A_1 проводится линия произвольной длины, в конце которой ставится точка O . Отрезок A_1O может быть произвольной длины, но от его размера, как видно из дальнейших построений, зависит угол направления штриховых линий. Из выбранной точки O проводятся лучи к точкам на вспомогательной линии A_1B_1 : штрихами — лучи для глубин и сплошными линиями — лучи для мензульных засечек.

в. Для построения плана в изобатах надо перенести положение изобат со вспомогательной линии A_1B_1 на план с учетом его масштаба. Для этого берется полоска миллиметровой бумаги, прикладывается к плану и на ней отмечается расстояние между урезами и места засечек положения промерного судна M_1, M_2, M_3 (рис. 2.13). Затем эта полоса миллиметровой бумаги прикладывается к вспомогательной линии A_1B_1 (см. рис. 2.11) точкой уреза левого берега к точке a_1 и перемещается вниз параллельно линии AB до тех пор, пока точка M_1 не совпадет с лучом OM_1 . Точка уреза при этом соответственно переместится в точку a_2 . На полоске бумаги (рис. 2.13, участок E) отмечается положение изобат 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 м. Далее полоску миллиметровой бумаги передвигают параллельно линии A_1B_1 точкой M_1 по лучу OM_1 до тех пор, пока засечка M_2 не совпадет с лучом OM_2 . На участке полоски E_1 отмечается положение изобат 2,5; 3,0 и 3,0 м с соответствующих штри.

ховых лучей. Полоску бумаги точкой M_2 передвигают параллельно линии A_1B_1 по лучу OM_2 до тех пор, пока засечка M_3 не совпадет с лучом OM_3 . На участке полоски E_2 отмечается положение изобат 3,0 и 2,5.

Наконец, передвигают полоску бумаги точкой M_3 по лучу OM_3 до тех пор, пока точка уреза правого берега на бумаге не совпадет с лучом Ob_1 . На полоске бумаги E_3 отмечается положение изобат 2,0; 1,5; 1,0; 0,5 м и точка уреза b_2 . Затем полоска бумаги совме-

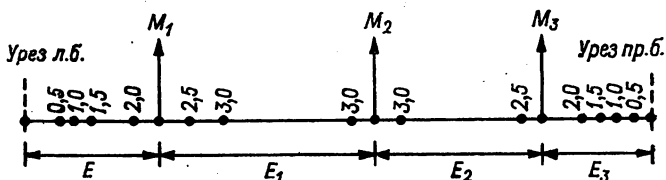


Рис. 2.13. Схема полоски миллиметровой бумаги для приведения эхограммы к масштабу плана.

щается урезами с урезами на плане и положение изобат переносится на план. По обработанным таким образом профилям проводятся изобаты на участке при условном (срезочном) уровне.

2.6. Техника безопасности гидрометрических работ

Упражнение 2.11. Расчет характеристик ездового троса, применяемого при промерных работах с лодки.

Дано: 1. Ширина лодки $B_n = 1,20$ м, длина лодки $L_n = 3,80$ м.

2. Расстояние между опорами на берегах $l = 185$ м.

3. Осадка лодки при полной нагрузке $\Delta h = 0,25$ м.

4. Трос стальной, жесткий, $d = 6$ мм.

Требуется: 1. Определить крепость троса.

2. Определить массу троса.

3. Рассчитать натяжение троса.

Решение: 1. Крепость металлического троса (а также растительного или синтетического каната) — способность его выдерживать определенную нагрузку. Различают два вида крепости: рабочую и разрывную. Рабочая крепость определяется натяжением, которое трос или канат выдерживает в течение продолжительного времени. Разрывная крепость (усилие) определяется натяжением, при котором трос или канат разрывается. Практически рабочая крепость принимается равной $1/6$ разрывной.

Для нейлоновых канатов разрывное усилие значительно выше, чем для пеньковых, масса нейлоновых канатов при тех же диаметрах меньше.

Рабочую крепость троса (каната) можно вычислить по формуле (кг)

$$\rho = kc^2, \quad (2.33)$$

где k — коэффициент, определяемый в зависимости от материала (для стального жесткого троса $k = 4,8$); c — длина окружности троса ($c = 2\pi r$), см.

Если $d = 6$ мм и $c = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 = 18,84$ мм = 1,9 см, то $\rho = 4,8 \cdot 1,9^2 = 16,6$ кг.

2. Масса троса при заданных условиях может быть вычислена по формуле

$$q = 0,03c^{-2}, \quad (2.34)$$

где q — масса 1 м троса, кг.

В данном примере: $c = 18,84$ мм = 1,88 см, $q = 0,03 \cdot 1,9^2 = 0,10$ кг.

При расстоянии между опорами $l = 185$ м масса всего троса равна $ql = 0,10 \cdot 185 = 18,5$ кг.

3. Расчет натяжения ездового троса для работы с лодки производится в следующем порядке:

а. Смоченная поверхность лодки s (м^2) вычисляется по формуле

$$s = L_n (2\Delta h + a_n B_n), \quad (2.35)$$

где a_n — коэффициент формы лодки, равный 0,83.

Смоченная поверхность в данном случае равна $s = 3,8 (2 \cdot 0,25 + 0,83 \cdot 1,20) = 5,70$ м^2 .

б. Сопротивление, испытываемое лодкой и передающееся в виде нагрузки на трос Θ_1 (кг), определяется по формуле

$$\Theta_1 = ksv^2, \quad (2.36)$$

где k — коэффициент, равный 0,35; v — скорость течения, м/с.

Для данного примера $\Theta_1 = 0,35 \cdot 5,70 \cdot 0,85^2 = 1,44$ кг.

в. Натяжение троса z (кг) вычисляется по формуле

$$z = \Theta_1 l / 4f + ql^2 / 8f, \quad (2.37)$$

где f — стрела провеса троса, равная 1,10 м.

Подставим в формулу (2.37) известные значения

$$z = \frac{1,44 \cdot 185}{(4 \cdot 1,10)} + \frac{0,10 \cdot 185^2}{(8 \cdot 1,10)} = 294 \text{ кг.}$$

Упражнение 2.12. Определить численный состав гидromетрического отряда, который может быть помещен в лодку с учетом массы необходимого оборудования.

Д а н о: 1. Длина лодки $L_n = 4,0$ м, ширина лодки $B_n = 1,2$ м, высота борта лодки от сдани (настил в днище) $h = 0,5$ м (рис. 2.14).

2. Масса оборудования, подлежащего перевозу на лодке, 100 кг.

3. Масса одного человека принимается равной 80 кг.

Т р е б у е т с я: 1. Определить грузовместимость V_n .

2. Определить количество людей, которое можно поместить в лодку с учетом груза.

Решение: 1. Грузовместимость лодки можно определить по формуле

$$V_{л} = 0,6L_{л}B_{л}h. \quad (2.38)$$

Подставляя известные значения, имеем $V_{л} = 0,6 \cdot 4,0 \cdot 1,2 \cdot 0,5 = 1,44 \text{ м}^3$.

2. Расчетный объем лодки на одного человека принимается равным $0,23 \text{ м}^3$. Число пассажиров можно получить по формуле

$$n = V_{л}/0,23. \quad (2.39)$$

В данном случае $n = 1,44 : 0,23 = 6,26$.

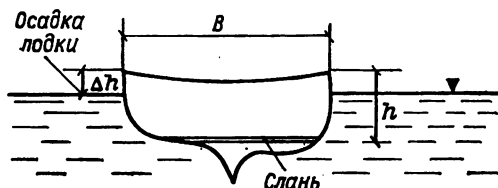


Рис. 2.14. Высота борта лодки от слани и осадка лодки.

Следовательно, можно поместить в лодку шесть человек и еще 21 кг груза (при принятом весе человека 80 кг величина 0,26 соответствует 21 кг). Учитывая необходимость перевозки в данной лодке еще 100 кг груза, можно в лодку поместить пять человек.

Упражнение 2.13. Определение допустимой расчетной толщины льда и допустимой скорости передвижения автомашины по льду к месту работ.

Дано: 1. Температура воздуха $t = -15 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Состав отряда: один рабочий и один техник (средний вес каждого с одеждой 80 кг).

3. Оборудование: вертушка со штанкой, ледовый бур, лом, пешня, лопата.

4. Оборудование и отряд перевозятся к месту работ полуторанной автомашиной при плохом состоянии ледяной дороги через реку.

Требуется: 1. Определить допустимую расчетную толщину льда при передвижении автомашины к месту работы.

2. Определить скорость передвижения автомашины по льду и необходимую толщину льда.

Решение: 1. Допустимая расчетная толщина льда, обеспечивающая безопасность работ и движение транспорта, зависит от различных нагрузок, средней температуры воздуха за трое суток и вида транспорта.

Для данного случая допустимая расчетная толщина льда при работе двух человек, по [37], соответствует 6 см.

Допустимая расчетная толщина льда при передвижении полоторатонной автомашины, учитывая, что вес двух человек и оборудования, погруженных на автомашину, не превышает 0,2 т, равна 24 см.

Допустимую расчетную толщину льда при передвижении автомашины можно определить приближенно по формуле В. А. Туманова

$$h_n = a_1 \sqrt{P}, \quad (2.40)$$

где h_n — допустимая расчетная толщина льда, см; P — общая масса нагрузки, т; a_1 — коэффициент, равный 11 для колесных машин и 9 для гусеничных.

Если температура воздуха во время работы равна $-5 \dots -0^\circ\text{C}$, то расчетная толщина льда должна быть увеличена на 10 %, а при потеплении (температура воздуха выше 0°C) — на 25 %.

В данном примере общая нагрузка $P = 1,5$ т, тогда $h = 11\sqrt{1,5} = 13$ см.

По формуле (2.40) значение h получилось заниженным.

Для приближенного расчета толщины льда можно воспользоваться табл. 2.13.

Таблица 2.13

Расчетная толщина льда [53]

Нагрузка на лед	Минимальная расчетная толщина, см			Интервал между движущимися людьми и транспортом, м
	Гидропроект (Ленинградское отделение)	Лесозаготовительные организации	Госкомгидромет	
Один человек	7	5	3	5
Два человека вместе		7	6	7
Четыре человека вместе		10		10
Нарты груженные (легкая упряжка)	12—13	—	10	—
Возчик с грузом (общая масса 0,8 т)	—	15	16	15
То же до 2 т	18—20	—	—	—
Автотранспорт				
1,5 т	—	18	24	15
3,0 т	—	26	35	20
3,5 т	25—34	—	—	—
6—10 т		35—40		35—40
Трактора (гусеничные)				
3,5—10 т	17—39	—	—	—
10—12,5 т		34—40	—	25—35

2. Скорость, с которой автомашина может передвигаться по льду, определяется по табл. 2.14.

Таблица 2.14

Примерные скорости движения по ледяной дороге в км/ч

Наименование транспорта	Состояние дороги	
	среднее	плхое
Полуторатонная автомашина с грузом или трехтонная машина порожняком	30	15
Трехтонная машина с грузом	20	10
Трактор	до 15	до 10

Скорость передвижения полуторатонной автомашины не должна превышать 15 км/ч.

Предельная температура, ниже которой не могут производиться работы на открытом воздухе без принятия дополнительных мер, является температура — 30 °С.

Передвижение людей и всех видов транспорта по льду должно прекращаться при образовании продольных трещин шириной более 5 см или полыньи на расстоянии 10 м от дороги. Пешая переправа по льду разрешается при толщине льда весной не менее 25 см, а осенью не менее 15 см.

Упражнение 2.14. Правила передвижения лодок при различных погодных условиях.

1. При скоростях течения свыше 1,5 м/с на всех работниках, находящихся в лодках, должны быть надеты спасательные нагрудники, а носовая часть лодки должна быть наглухо закрыта досками или брезентом.

2. При ширине реки более 100 м, скорости течения более 1,5 м/с и глубине 1 м должна дежурить спасательная лодка.

3. Производство гидрометрических работ с лодок запрещается при молевом сплаве леса.

4. Запрещается выезд на гребной лодке при скорости течения свыше 2,5 м/с и при сильном ливневом дожде.

5. Запрещается производство работ с лодок при ветре свыше 4 баллов. Работа с речных катеров прекращается при ветре свыше 5 баллов. В табл. 2.15 приведены (с сокращением) сведения о ветре и силе волнения.

Упражнение 2.15. Правила безопасности при выполнении аэрогидрометрических работ.

При производстве аэрогидрометрических работ необходимо соблюдать следующие правила.

1. В аэрогидрометрический отряд допускаются лица, сдавшие зачеты по технике безопасности и прошедшие специальное обучение по аэрогидрометрическим работам.

Таблица 2.15

Шкала ветров

Ветер	Описание явлений, сопровождающих ветер	Сила ветра, баллы	Скорость, м/с	Сила волнения, течения, баллы
Штиль	Дым поднимается отвесно, листья неподвижны	0	0—0,5	0
Тихий	Движения флюгера незаметны, направление ветра определяется без прибора	1	0,6—1,7	1
Легкий	Дуновение ветра чувствуется лицом, листья шелестят, флюгер начинает двигаться	2	1,8—3,3	1
Слабый	Листья и тонкие ветки деревьев все время колышутся, ветер развивает легкие флаги	3	3,4—5,2	2
Умеренный	Ветер поднимает пыль, приводит в движение тонкие ветки деревьев	4	5,3—7,4	3
Свежий	Качаются тонкие стволы деревьев, на воде появляется волна с гребешками	5	7,5—9,8	4
Сильный	Качаются толстые сучья деревьев, гудят телефонные провода, трудно пользоваться зонтиком	6	9,9—12,4	5

2. Запрещается проводить сбросы поплавков в населенных пунктах.

3. Сбросной створ поплавков должен быть удален на 300—400 м.

4. Перед сбросом поплавков гидролог-оператор должен внимательно осмотреть район сбросного створа. Сброс поплавков и гидробомб может производиться после того, как проверено, что зона свободна от людей и животных по сторонам от него на 150—200 м и вдоль от концов линии сброса на 150—200 м на обоих берегах реки.

5. При работе на судоходных реках необходимо следить за судами и лодками, находящимися на подходе в район сбросного створа. Сброс запрещается производить, если судно подходит к сбросному створу и если оно находится на расстоянии 200 м.

6. Запрещается производить сброс поплавков на участках, заросших кустарником или лесом.

7. На озерах и реках вне зоны измерений сброс поплавков производить нельзя.

8. Зарядку сбрасывателя в воздух следует производить, закрыв открытое отверстие специальной пробкой.

9. Во избежание сноса ветром в открытое окно кабины во время работы необходимо проверить прикрепление к оператору фотоаппарата, секундомера, экспонометра и бинокля.

10. Сбрасывание поплавков и полеты на малых высотах в зоне линии связи и электросетей запрещаются.

11. Все участники аэрогидрометрических работ должны подчиняться всем указаниям летного состава и требованиям руководства гражданской авиации.

Упражнение 2.16. Определение массы якоря при работе с лодки для закрепления на вертикали.

Дано: водоизмещение судов 1,0 и 3,0 т.

Требуется: определить массу якорей.

Решение: при малом водоизмещении судна массу якоря можно определить по следующим данным:

Водоизмещение судна, т	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Масса якоря, кг	5—6	8—10	12—13	14—16	17—18	19—20

При водоизмещении 1,0 т масса якоря 8 т.

Для судов с достаточно большим водоизмещением массу якоря (кг) можно рассчитать по формуле

$$P = k \sqrt[3]{D^2}, \quad (2.41)$$

где k — коэффициент, равный 8—9; D — водоизмещение судна, т.

Подставим $D = 3,0$ т и $k = 9$, получим $P = 9 \sqrt[3]{3^2} = 18,7$ кг.

Глава 3.

Скорость течения воды

3

3.1. Обработка данных градуирования вертушек

Упражнение 3.1. Составить расчетную градуировочную таблицу вертушки № 13338.

Дано: Свидетельство о градуировании (рис. 3.1).

Требуется: 1. Произвести анализ свидетельства градуирования.

2. Составить градуировочную таблицу.

Решение: 1. Градуированием гидрометрической вертушки называется испытание, в результате которого устанавливается зависимость между скоростью течения v м/с и числом оборотов лопастного винта (или ротора) вертушки n об/с (или частотой вращения $1/c$).

При градуировании устанавливается начальная скорость вертушки, которая соответствует наименьшей скорости, при которой начинается вращение лопасти; теоретически v_0 соответствует $n = 0$.

Зависимость между числом оборотов лопастного винта в секунду и скоростью течения обычно представляется в виде двух графиков.

Первый график строится в мелком масштабе для всего диапазона v и n , полученного градуированием; для участка от v_0 до $v = 0,25 \div 0,40$ м/с строится второй график в более крупном масштабе.

Как видно из рис. 3.1, второй график не сливается с первым и доводится до значения скорости, которое отклоняется от первого на отрезок менее 1,5 мм, что в масштабе составит $v = 0,005$ м/с. Заметим, что вертушка градуировалась после ремонта и отклонение графиков вполне закономерное.

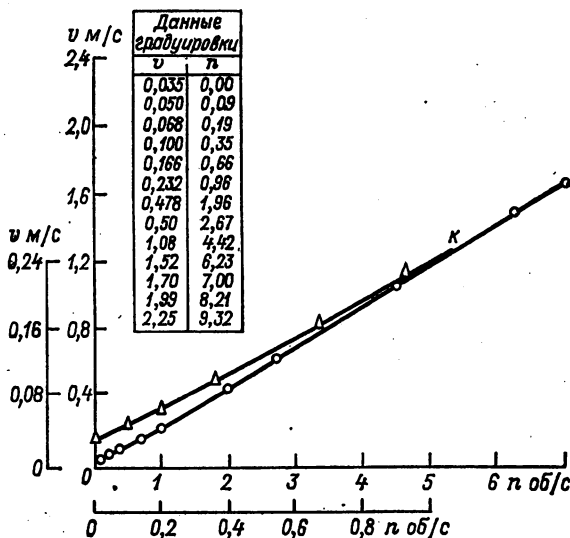


Рис. 3.1. Свидетельство о градуировании вертушки № 13338 после ремонта.

Свидетельство о градуировании считается пригодным, если оно удовлетворяет измерению скорости с точностью $\pm 1\%$ в диапазоне от 0,250 до 2,50 м/с и $\pm 2\%$ в диапазоне от 0,100 до 0,250 м/с. На свидетельстве выписываются наблюдаемые значения v и n и начальная скорость.

2. Расчетная градуировочная таблица значений v и n составляется для удобства пользования по форме, приведенной в табл. 3.1.

Составление градуировочной таблицы производится следующим образом. В графу 1 выписываются значения n от 0,0 до максимального при градуировании. В данном примере ограничимся значением скорости при $n = 1,1$, об/с (таблица приведена с сокращением); в графе 2 для значения $n = 0,00$ выписывается начальная скорость при градуировании $v = 0,035$ м/с.

Выбираются с графиков опорные значения v , причем для графика крупного масштаба значения v снимаются через 0,05 n на

Таблица 3.1
 Градуировочная таблица
 Вертушка № 13338
 21 апреля 1964 г.

Число оборотов в секунду	Скорость течения v м/с									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,0	0,035	0,036	0,037	0,038	0,039	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048
0,1	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058	0,060	0,062	0,064	0,066	0,068
1,0	0,246	0,248	0,250	0,252	0,254	0,256	0,258	0,260	0,262	0,264
1,1	0,266	0,267	0,269	0,270	0,271	0,272	0,274	0,275	0,277	0,279
2,4	0,567	0,569	0,571	0,573	0,575	0,577	0,580	0,583	0,585	0,587
2,5	0,589									

начальном участке с хорошо заметной кривизной и через 0,1 n там, где кривизна мала. Последняя точка, снятая с кривой крупного масштаба при $n = 1,05$ об/с, $v = 0,256$ м/с.

Для графика мелкого масштаба снимаются два опорных значения v : первое, соответствующее конечному (наибольшему) значению n , которое бралось на графике крупного масштаба (точка k на кривой мелкого масштаба на рис. 3.1 совпадает по значению с $v = 0,256$ м/с), и второе для большего значения n , соответствующего скорости около 2 м/с. Так как в данном упражнении составление таблицы ограничивается значением $n = 1,1$ об/с, то значение скорости, снятое с кривой мелкого масштаба, равно $v = 0,266$ м/с.

После снятия опорных значений в графах 3—11 вычисляются промежуточные для всех указанных значений n способом интерполяции. Средние приращения Δv между опорными значениями, соответствующие $\Delta n = 0,01$, вычисляются по формуле

$$\Delta v = (v_2 - v_1) / (n_2 - n_1), \quad (3.1)$$

где v_2 и v_1 — соседние опорные значения скорости; n_2 и n_1 — соответствующие им значения числа оборотов в секунду.

Промежуточные между опорными значениями v получаются последовательным суммированием Δv . Величина Δv вычисляется со следующей точностью: для криволинейного участка — до 0,0001 м/с и для прямолинейного — до 0,00001 м/с. Окончательно вычислительные значения v записываются в табл. 3.1 с точностью до 0,001 м/с, если $v < 0,999$ м/с, и с точностью до 0,01 м/с, если $v > 1,00$ м/с.

Рассмотрим применение интерполяции на участке от $n = 1,00$ до $n = 1,10$; $\Delta v = (0,266 - 0,246) : 0,10 = 0,020 : 0,1 = 0,0020$ м/с.

Значения через каждые 0,01 об/с получаются последовательным суммированием: $v = v_1$; $v_2 = v_1 + \Delta v$ и т. д. На данном участке

получим $v_1 = 0,246$ м/с; $v_2 = 0,246 + 0,0020 = 0,248$ м/с и т. д. Таким образом рассчитывается вся таблица.

Упражнение 3.2. Определение пригодности к работе вертушки способом выбега.

Дано: 1. Продолжительность свободного вращения лопасти вертушки, определенная по получении вертушки из градуировки, $T_0 = 25$ с.

2. Продолжительность свободного вращения вертушки после измерения десяти расходов $T_{10} = 17$ с.

Требуется: определить отношение T_0/T_n .

Решение: Согласно указаниям «Наставления гидрометеорологическим станциям и постам» вып. 2, ч. II, рекомендуется по получении вертушки с градуировочной станции установить опытным путем продолжительность свободного вращения лопасти T_0 . В целях проверки работы вертушки после нескольких измерений расходов повторяется определение продолжительности свободного вращения лопасти T_n (индекс соответствует номеру расхода после градуировки).

Для данного упражнения определяется отношение $T_0/T_{10} = 25 : 17 = 1,47$. Полученное значение записывается в полевую книжку измерения расхода. В табл. 3.2 приведены пределы допустимых отношений T_0/T_n .

Таблица 3.2

Пределы отношения T_0/T_n , при которых вертушка пригодна для измерения скоростей

T_0/T_n	<1,5	1,5—2,5	>2,5
Измеряемая скорость, м/с	0,08—0,25	0,25—0,50	<0,50

Согласно табл. 3.2, данная вертушка пригодна к измерению скоростей только менее 0,25 м/с.

3.2. Скорость и направление течения в точке наблюдения

Упражнение 3.3. Вычислить скорость течения, измеренную в точке на вертикали вертушкой, опускаемой на штанге при многоточечном, основном, ускоренном и сокращенном способах определения расхода воды.

Дано: 1. Выписка из книжки КГ-3М (измерения на скоростных вертикалях) при основном способе измерений (табл. 3.3).

Требуется: 1. Дать пояснения к способам измерения скоростей.

2. Рассмотреть расположение вертушки по глубине вертикали.

3. Вычислить сумму оборотов вертушки N , число оборотов в секунду n и скорость в точках наблюдений.

Решение: 1. Многоточечный способ предусматривает измерение расхода воды по увеличенному против обычного числу скоростных вертикалей с измерением скорости в 5—10

Таблица 3.3

Измерения на скоростных вертикалях

Номер строки	Номер вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Рабочая глубина, м	Глубина погружения вертушки		Скорость, м/с	Средняя скорость, м/с	Осчет по штанге или счетчику в точке	Число сигналов	Сумма оборотов	Продолжительность измерения, с	Число оборотов в с
				в долях глубины	в метрах							
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
= 150	1	125	0,68	0,2	0,14	0,35	0,32	0,54	8	160	103	1,55
= 151				0,8	0,54	0,29		0,14	8	160	127	1,26

точках по вертикали. Этот способ применяется для выполнения специальных методических исследований, для оценки точности измерения расходов воды для определения оптимального числа промерных и скоростных вертикалей.

Определение скорости течения многоточечным способом производится в следующем порядке.

При свободном (ото льда и водной растительности) русле измерение производится: а) в пяти точках по глубине (при глубинах менее 1,5 м) (поверхность, 0,2; 0,6; 0,8 и у дна); б) в десяти точках по глубине (при глубинах более 1,5 м) (поверхность, 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и у дна).

В интервале глубин от 1,5 м до 0,75 м применим только двухточечный способ. При глубине менее 0,75 м применяется одноточечный способ (в точке 0,6 *h*).

При наличии в русле водной растительности и под ледяным покровом к пяти вышеуказанным точкам прибавляется шестая точка 0,4 *h* или принимается равномерное распределение точек по глубине (например, через 0,1 глубины).

Если установка в шести точках невозможна, то измерение следует производить (в диапазоне глубин от 1,05 до 1,0 м) в трех точках: 0,15 *h*; 0,50 *h* и 0,85 *h*. При глубинах от 1,0 до 0,75 м — измерять в двух точках и при глубине менее 0,75 м — в одной точке.

Основной способ предусматривает измерение расхода в двух точках: 0,2 *h* и 0,8 *h*. При оптимальном числе промерных и скоростных вертикалей (но не менее девяти) этот способ по сравнению с многоточечным дает среднее квадратическое отклонение не более 3 %.

Измерение скорости на вертикали при основном способе производится при свободном русле и при ледяном покрове в двух точках 0,2 *h* и 0,8 *h*. В случае недостаточной для двух точек рабочей глубины (менее 0,75 м) измерение производится в одной точке соот-

ветственно на 0,6 *h* или 0,5 *h*. Минимальная глубина потока при одноточечных измерениях 0,30 м.

При наличии в русле водной растительности измерение скорости на вертикали производится в трех точках: 0,15 *h*, 0,50 *h* и 0,85 *h*. В случае недостаточности для трех точек глубина измерения производится в одной точке 0,50 *h*.

Интеграционный способ изложен в упражнениях 3.15 и 9.2.

Ускоренный способ применяется при быстрых изменениях уровня во время измерения расхода воды (при деформации русла, при наличии подпора и пр.). Пояснения к способу приведены ниже.

Сокращенные способы предусматривают измерение скорости на одной—двух репрезентативных вертикалях или единичной скорости в точке 0,2 *h*.

Ниже рассмотрены новые рекомендации к измерениям скорости вертушкой в точке.

Измерение скорости течения производится двумя способами:

- 1) с записью общего числа сигналов за время измерения в точке,
- 2) с записью времени поступления отдельных сигналов.

Первый способ применяется при основном способе измерения расхода и заключается в записи числа сигналов вертушки (или показаний счетчика импульсов вертушки ГР-99) и общей продолжительности наблюдения в секундах в точке.

После установки вертушки на заданную точку по глубине вертикали пропускаются два сигнала и затем по концу или началу следующего звонка включается секундомер и начинается счет сигналов. Наблюдения начинаются от дна к поверхности. Если в течение 60 с поступит два и более сигналов, то по первому поступившему сигналу по истечении 60 с секундомер останавливается и измерение прекращается.

Второй способ применяется только при многоточечном способе измерения и заключается в записи по секундомеру времени поступления отдельных сигналов вертушки. При небольших скоростях, а следовательно, резких сигналах, записывается отсчет времени поступления каждого сигнала, а при частых сигналах — через один или несколько сигналов. Общая продолжительность измерения в точке должна быть не менее 100 с.

Вводится термин «прием», который означает число сигналов, поступающих за промежутки времени между записями. Например: контакт вертушки через 20 оборотов, число оборотов за прием 40, т. е. обороты регистрируются по секундомеру через один сигнал. Получены следующие записи по секундомеру: 18, 38, 55, 74, 93, 111.

Продолжительность первой половины наблюдений по трем приемам 55 с, следовательно, по шести приемам должно было бы получиться 110 с, а получено 111. Если продолжительности первой и второй половины периода измерения различаются больше чем на 5 с, то измерения надо продолжать до восьми приемов. В данном

примере общее число оборотов вертушки $N = 6 \cdot 40 = 240$ оборотов.

Рассмотрим некоторые указания к ускоренному и сокращенному способам измерения скоростей течения. Сущность ускоренного способа заключается в сокращении времени выдержки вертушки в точке до 30 с. Первые два сигнала (они называются нулевыми) пропускаются. Секундомер включается по концу второго сигнала и выключается по концу сигнала, поступившего по истечении 30 с. Записывается число сигналов и отсчет по секундомеру с точностью до 0,2 с. При малых скоростях, если сигналы поступают реже чем

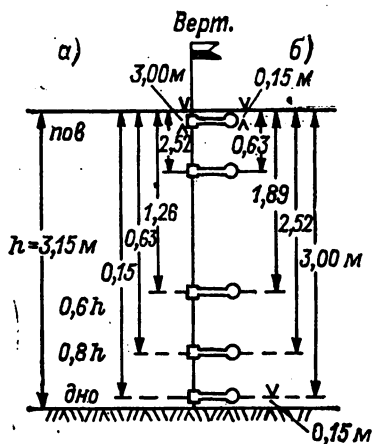


Рис. 3.2. Расположение вертушки в точках по глубине
 а — отсчеты по штанге; б — глубина от поверхности.

через 30 с, выдержка вертушки в точке ограничивается интервалом времени между двумя сигналами вертушки.

Применение ускоренного способа возможно при многоточечном и основном способах при числе скоростных вертикалей не менее пяти. Ускоренный способ не применяется при измерении косоструйного течения. Применение однооборотной вертушки ГР-99 повышает точность при ускоренном способе.

Сокращенный способ уменьшает затраты рабочего времени при измерениях. Способ неприменим на зарастающих, зашугованных и пойменных створах.

Переходу на сокращенный способ предшествует методический анализ большого числа наблюдений на участке реки, произведенных многоточечным и основным способами.

2. При установке вертушки на штанге в различных точках по глубине должны быть выдержаны следующие условия: при измерении скорости «у поверхности» и «у дна» ось вертушек устанавливается на глубину 0,15 м от поверхности. На рис. 3.2 показано расположение вертушки на вертикали. Общая глубина $h = 3,15$ м. Глубина погружения от поверхности воды на точке $0,8 h$ равна $3,15 \cdot 0,8 = 2,52$ м, отсчеты по штанге вычисляются от дна. Следовательно, чтобы получить отсчет по штанге для точки $0,8 h$ следует

из общей глубины вычтуть глубину погружения $3,15 - 2,52 = 0,63$ м.

3. В табл. 3.3 приведена выписка из книжки КГ-3М для вертикали № 1. Наблюдения производились основным способом в точках $0,2 h$ и $0,8 h$. В графе 5 глубина погружения на $0,2 h$ равна $0,68 \cdot 0,2 = 0,136 = 0,14$ м; в графе 8 отсчет по штанге равен, $0,68 - 0,14 = 0,54$ м. Число сигналов на точке $0,2 h$ равно восьми, каждый сигнал через 20 оборотов, следовательно, сумма оборотов $N = 8 \cdot 20 = 160$. Продолжительность наблюдений $t = 103$ с. Число оборотов в 1 с вычисляется по формуле

$$n = N/t, \quad (3.2)$$

где N — сумма оборотов лопасти в точке; t — продолжительность наблюдений в секундах.

Для точки «пов» $n = 160 : 103 = 1,55$ об/с.

Скорость в точке выписывается в графу 6 по градуировочной кривой; в данном примере $v = 0,35$ м/с. Аналогичные вычисления произведены для точки $0,8 h$.

Средняя скорость на вертикали (см. упражнение 3.8) равна $0,32$ м/с.

В гл. 10 приведены пояснения к графе 1 табл. 3.3 и жирной линии в бланке, вызванные условиями автоматизации.

Упражнение 3.4. Расчет глубины погружения вертушки на вертикали при однотоочечном сокращенном способе определения скорости.

Д а н о: 1. Участок реки пойменный, заросший, течение слабое.

2. Глубина реки в месте измерений $h = 0,40$ м.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть влияние шероховатости русла на точки измерения, для которых $v = v_{\text{ср}}$.

2. Рассчитать глубину положения вертушки по исходным данным.

Р е ш е н и е: 1: При небольших глубинах и однотоочечном определении скорости течения вертушку обычно опускают на глубину $0,6 h$ от поверхности и $0,4 h$ от дна. При этом положении вертушки определяется скорость, наиболее близкая к средней вертикали. Введено обозначение η_v — относительная ордината, которая определяет положение точки от дна при скорости $v = v_{\text{ср}}$.

Г. В. Железняков [14] установил, что удаление от дна точки измерения, скорость в которой близка к средней на вертикали, зависит от степени шероховатости дна. Влияние шероховатости можно выразить коэффициентом Шези $C \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

На рис. 3.3 представлена зависимость относительной ординаты от коэффициента Шези, полученная по большому количеству данных наблюдений на пойменных заросших руслах. Из рисунка видно, что чем меньше C , тем выше от дна располагается точка, в которой $v = v_{\text{ср}}$.

Предложена зависимость

$$\eta_B = \left[\frac{kC_B^*}{(1 + kC_B^*)} \right] kC_B^*, \quad (3.3)$$

где k вычисляется по формуле

$$k = 2,1/(1 + C_B^*) + 0,3, \quad (3.4)$$

$C_B^* = C_B/\sqrt{g}$ — безразмерное значение коэффициента Шези C_B .

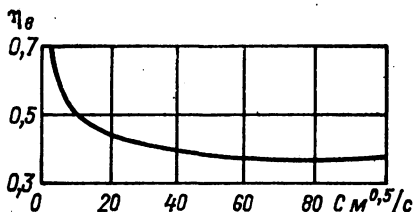


Рис. 3.3. Зависимость между относительной ординатой η_B и коэффициентом Шези C_B .

Установлено, что относительная ордината η_B возрастает с увеличением шероховатости n и уменьшением глубины. Для практических расчетов предложена табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значение η_B в зависимости от шероховатости n и глубины h

Глубина h , м	n				Глубина h , м	n			
	0,03	0,04	0,08	0,20		0,03	0,04	0,08	0,20
0,16	0,42	0,45	0,50	0,67	1,00	0,40	0,41	0,44	0,52
0,14	0,42	0,44	0,49	0,65	1,50	0,40	0,40	0,44	0,50
0,18	0,42	0,44	0,48	0,63	2,00	0,39	0,40	0,43	0,48
0,22	0,41	0,43	0,48	0,62	2,50	0,39	0,40	0,42	0,47
0,28	0,41	0,43	0,47	0,60	3,00	0,39	0,40	0,42	0,46
0,40	0,40	0,42	0,46	0,58	4,00	0,39	0,40	0,42	0,46
0,60	0,40	0,42	0,45	0,55	5,00	0,39	0,40	0,42	0,45
0,80	0,40	0,41	0,44	0,53					

2. Для данного упражнения по характеристике участка определяем значение шероховатости $n = 0,08$. В таком случае при глубине $h = 0,40$ м получим значение относительной ординаты от дна равным $0,46 h$, что соответствует $0,54 h$ от поверхности.

Следовательно, при глубине $h = 0,40$ м вертушку следует поставить на глубину $0,46 \cdot 0,40 = 0,18$ м. В таком случае отсчет по штанге равен $0,22$ м.

Упражнение 3.5. Определение скорости движения воды гидрометрической трубкой в гидравлическом лотке.

Д а н о: 1. Отсчеты по трубке $\left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}\right) = 25$ см и $\frac{p}{\gamma} = 21$ см.

2. Коэффициент $\varphi = 0,95$.

Т р е б у е т с я: определить скорость движения в лотке.

Решение: рассмотрим схему расположения гидрометрической трубки в лотке (рис. 3.4). Если в точку A поместить изогнутую трубку, то вода в ней поднимается на высоту $h_v = v^2/2g$. Из этого соотношения можно определить значение скорости

$$v = \sqrt{2gh_v}, \quad (3.5)$$

где g — ускорение свободного падения, см/с^2 ; h_v — высота поднятия воды в трубке, см .

При измерении скорости движения реальной вязкой жидкости в формулу (3.5) вводится коэффициент φ . Скорость в этом случае может быть вычислена по формуле

$$v = \varphi \sqrt{2gh_v}. \quad (3.6)$$

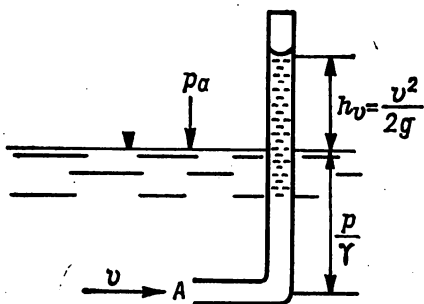


Рис. 3.4. Схема гидрометрической трубки в потоке со скоростью v .

Для определения скорости в лотке определим высоту h_v , которая равна разности отсчетов в трубке

$$h_v = \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) - \frac{p}{\gamma}. \quad (3.7)$$

Подставляя известные данные, имеем $h_v = 25 - 21 = 4$ см . Скорость по формуле (3.6) равна $v = 0,95 \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 4} = 84,1$ $\text{см/с} = 0,84$ м/с .

Упражнение 3.6. Определение скорости и направления течения реки по измерениям морской вертушкой ВММ.

Дано: полевые наблюдения (табл. 3.5 с сокращением).

Требуется: 1. Пояснить запись полевых работ, сопоставить число заряженных и выпавших шариков и число оборотов вертушки.

2. Установить способ вычисления скорости и направления течения для вертикалей.

3. Произвести расчеты скорости и направления арифметическим и геометрическим способами.

Решение: 1. Наблюдения производились в одной точке $0,6$ h на шести вертикалях, расположенных равномерно по ширине реки.

Перед началом работ стрелка счетчика оборотов ставится на нуль, затем вертушка опускается на заданную глубину. Далее через $2-3$ мин, за которые вертушка разворачивается по течению

и магнитная стрелка устанавливается в направлении меридиана, посылается первый груз и включается секундомер. По истечении некоторого времени посылается второй груз и по секундомеру отсчитывается время t . Продолжительность наблюдения между посылкой первого и второго груза зависит от скорости.

Таблица 3.5

Выписка из полевой книжки записи наблюдений вертушкой ВММ

р. Ока — с. Пушино, 24/VIII 1968 г.

№ вертикали	Расстояние от постоянного начала, м	Глубина вертикали h , м	Точка наблюдения	Глубина на вертикали от поверхности воды до точки, м	Продолжительность наблюдения t , с	Отсчеты по счетчику N			Число оборотов в секунду $n = \frac{N}{t}$
						начальный	конечный	разность	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ур. пр. б. 1	5,40								
3	23,5	1,42	0,6	0,85	300	0	627	627	2,09
3	60,1	2,03	0,6	1,22	300	0	625	625	2,08

Продолжение табл. 3.5

Число заряженных частей	Показание компасной коробки	Число выпавших шариков	Скорость течения v м/с		Коэффициент рассеивания l/m	Азимут направления течения	Склонение	Истинный азимут течения
			по градуировочной таблице (арифм. способ)	геометр. способ				
11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	5 ₆ ·6 ₉ ·10 ₆	20	0,82		—	70°	6°	76°
20	1 ₃ ·7 ₈ ·9 ₅ ·10 ₃ ·12 ₂	18	0,82	0,69	0,84	79°	6°	85°

В данном примере продолжительность наблюдений принята одинаковой для всех вертикалей $t = 300$ с. Когда вертушка вынимается на поверхность, снимаются показания счетчика оборотов и записывается отсчет в графу 8 табл. 3.5 (начальный отсчет может быть и не равен нулю). Число заряженных шариков в компасной коробке в данном случае постоянно и равно 20.

По извлечении компасной коробки производится запись числа шариков в графе 12, причем цифрой обозначается номер сектора,

а внизу индексом записывается число шариков, выпавших в данный сектор. Например, может быть такая запись: $34_{,35,0_6}$ — это значит, что в сектор 34 выпали три шарика, в сектор 35 — шесть, в нулевой (т. е. 36-й, или северный) — шесть шариков.

Число выпавших шариков должно быть меньше числа заряженных шариков — в табл. 3.5 (графа 13) это условие выполняется.

Число выпавших шариков и число оборотов вертушки должно находиться в таком соотношении, чтобы выпавший шарик приходился на 33 оборота лопасти. Произведение числа выпавших шариков на 33 должно быть близко к общему числу оборотов. Отклонение допускается в пределах ± 32 оборота. В данном примере для вертикали № 1 число выпавших шариков равно 20; $33 \cdot 20 = 660$. По наблюдениям (табл. 3.5 графа 8) получено 627 оборотов, т. е. в пределах нормы. Для других вертикалей указанное соотношение также выдерживается.

Если направление течения устойчивое и в компасной коробке только единичные шарики имеют крайние пределы отклонения больше чем 90° , эти шарики можно исключить.

2. Скорости и направление течения вычисляются двумя способами: арифметическим и геометрическим. Выбор способа обработки зависит от степени разброса шариков, т. е. от угла между секторами. Исключенные шарики в расчет не принимаются.

Арифметический способ вычисления применяется, если угол разброса шариков меньше вычисленного по формуле

$$A = 30 + 4m, \quad (3.8)$$

где m — число шариков.

Геометрический способ вычисления применяется, если угол разброса шариков больше вычисленного по формуле (3.8).

Для вертикали № 1 угол разброса по формуле (3.8) $30 + 4 \cdot 20 = 94^\circ$. По числу шариков в секциях рассеяние находится в пределах секций 10 и 5, но так как каждая секция составляет 10° , то угол разброса будет $10,5 - 5 \cdot 10 = 50^\circ$. Следовательно, для вертикали № 1 можно применить арифметический способ подсчета.

Для вертикали № 3 угол разброса по формуле (3.8) $30 + 4 \cdot 18 = 102^\circ$. По наблюдаемым данным $11 - 1 = 10$ и угол разброса шариков равен 100° . Следовательно, надо применить геометрический способ расчета.

3. Вычисления скорости и истинного азимута направления течения произведены двумя способами.

Арифметический способ рассмотрим на примере вертикали № 1 в следующем порядке:

а. Определяется разность показаний счетчика оборотов между конечным и начальным отсчетом, т. е. общее число оборотов лопасти вертушки N . Так как при работах нуль счетчика соответствовал начальному отсчету, а конечный имел значение 627, то $N = 627$.

б. Вычисляется число оборотов лопасти в секунду n по формуле (3.2) $n = 627 : 300 = 2,09$ об/с.

в. По расчетной таблице к градуировочной кривой вертушки ВММ (в данном упражнении таблица не приведена) скорость в точке 0,6 h при $n = 2,09$ об/с $v = 0,82$ м/с.

г. Средний магнитный азимут направления течения α вычисляется по формуле

$$\alpha = (k_1 m_1 + k_2 m_2 + \dots + k_n m_n) \cdot 10 / \sum m, \quad (3.9)$$

где k_1, k_2, \dots, k_n — номера секций, в которые выпали шарики; m_1, m_2, \dots, m_n — число шариков, выпавших в секции.

$$\alpha = (5 \cdot 5 + 6 \cdot 9 + 10 \cdot 6) \cdot 10 : 20 = 70^\circ.$$

Азимут вычисляется с точностью до 1° .

д. Истинный азимут определяется введением поправки на магнитное склонение. Если склонение восточное, то поправка вводится со знаком плюс, если западное, то со знаком минус.¹ Для района р. Оки склонение восточное, равное 6° . Следовательно, истинный азимут течения для вертикали будет $70 + 6 = 76^\circ$.

Геометрический способ рассмотрим на примере вертикали № 3 в следующем порядке:

а. Вычисляется скорость течения арифметическим способом с дальнейшими исправлениями, связанными с графическим определением азимута направления течения.

б. Определение магнитного азимута связано с построением векториальных графиков. Предварительно составляется табл. 3.6, в которой для каждой секции выписывается угол в градусах и длина вектора. Так как каждая секция компасной коробки соответствует 10° , то для получения магнитного азимута следует номер секции умножить на 10° . В табл. 3.5 по вертикали № 3 для первого вектора в графе 12 записано 1, следовательно, магнитный азимут равен 10° . Для длины векторов принимается масштаб 1 шарик — 1 см, значит, длина первого вектора равна 3 см.

Таблица 3.6

Магнитные азимуты и длины векторов направления течения

№ вертикали	Характеристика	Номер вектора				
		1	2	3	4	5
3	Магнитный азимут	10°	70	90	100	120
	Длина вектора, см	3	5	5	3	2

в. На рис. 3.5 построен векториальный график для вертикали № 3. Выбираются прямоугольные координаты и из начала координат

¹ Склонение снимается с навигационных карт района и приводится к году наблюдения. Приведение производится умножением годового изменения склонения на число лет от года составления карты. Полученное значение алгебраически прибавляется к склонению.

нат (точка 0) под углом 10° проводится вектор, длина которого по масштабу равна 3 см.

Из конца полученного вектора № 1 откладывается угол вектора № 2, равный 70° , и длина вектора, равная 5 см. Последний вектор № 5 имеет угол 120° и длину 2 см. В конце вектора № 5 ставится точка А. Линия $OA = l$ соединяет начало координат с концом последнего вектора и является равнодействующей векторов. Угол $\alpha = 79^\circ$, составленный меридианом и линией OA , дает среднее направление магнитного азимута. Истинное направление вычисляется, как и в арифметическом способе, с введением поправки на склонение.

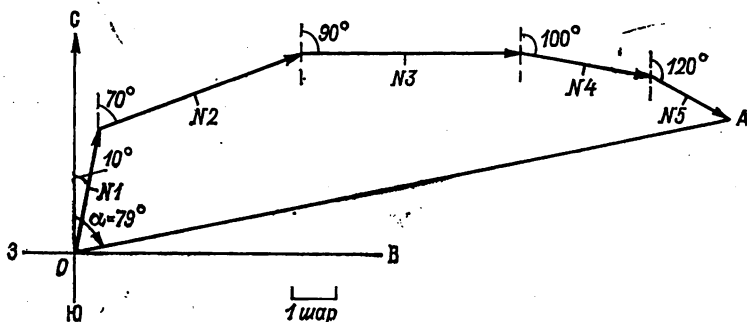


Рис. 3.5. Векториальный график вертикали № 3.

г. Скорость течения определяется по формуле

$$v_1 = vl/m, \quad (3.10)$$

где l — длина равнодействующей векторов, снятая с векториального графика с точностью до 0,1 см; v — скорость из градуировочной таблицы, м/с; m — число выпавших шариков.

Величина l/m характеризует устойчивость направления течения и называется коэффициентом устойчивости, или коэффициентом рассеивания. Если за время наблюдения направление течения не менялось, то отношение l/m равно единице. Обычно отношение l/m меньше единицы и зависит от степени разброса шариков. Для вертикали № 3 при $l = 15,4$ см и $m = 18$ коэффициент рассеивания $l/m = 15,4 : 18 = 0,84$. Следовательно, скорость по формуле (3.10) равна $v_1 = 0,84 \cdot 0,82 = 0,69$ м/с.

Упражнение 3.7. Определить среднее направление течения на вертикали № 1 по данным измерителя течения ГР-42.

Дано: 1. Азимут магистрали $\alpha = 74^\circ$ (табл. 3.7).

2. Расстояние по створу № 1 от магистрали до урезом: левого берега 25,0 м, правого берега 305 м.

Требуется: 1. Составить схему расположения вертикали № 1 на створе.

2. Построить распределение векторов скоростей на вертикали № 1 в плане.

3. Построить эпюры скорости $v = f(h)$ и магнитных азимутов $\alpha = f(h)$ на вертикали № 1.

4. Определить среднее направление течения на вертикали.

Решение: 1. На рис. 3.6 представлена схема расположения вертикали № 1 на створе. По азимуту магистрали $\alpha = 74^\circ$ установлено ее направление (AB). Перпендикулярно магистрали проведено направление створа I—I. В масштабе плана 1 см — 50 м

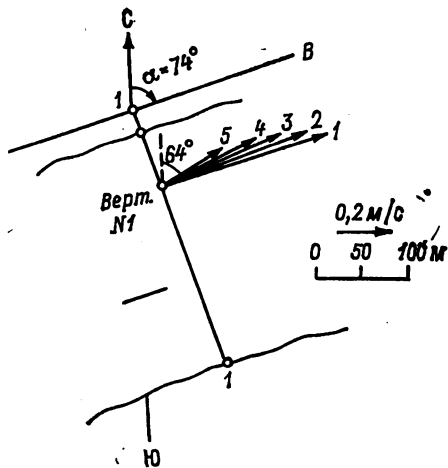


Рис. 3.6. Схема расположения вертикали № 1 и распределение векторов скоростей по глубине в плане
Номера векторов: 1) поверхность, 2) 0,2 h, 3) 0,6 h, 4) 0,8 h, 5) дно.

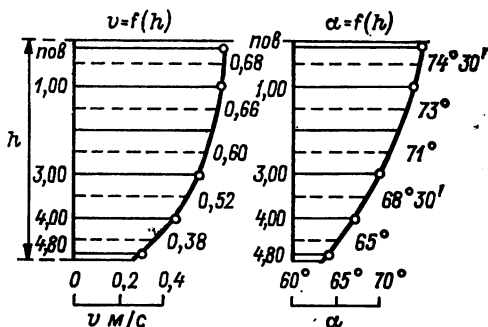


Рис. 3.7. Эпюра скорости $v = f(h)$ и эпюра магнитных азимутов $\alpha = f(h)$ на вертикали № 1

по заданным расстояниям отмечены линии урезов левого и правого берегов. На расстоянии 90,0 м от магистрали определено положение вертикали № 1.

Таблица 3.7

Данные наблюдений на вертикали № 1

№ вертикали	Расстояние от магистрали, м	Глубина h м	Наименование точки	Глубина на вертикали от поверхности воды до точки, м	Скорость в точке v м/с	Магнитный азимут в точках наблюдений α°
1	90,0	5,00	Пов.	0,10	0,58	75
			0,2	1,00	0,67	73
			0,6	3,00	0,58	70
			0,8	4,00	0,46	67
			Дно	4,80	0,31	64

2. На плане участка для вертикали № 1 наносятся векторы направления течения, при этом угол, под которым наносится вектор, отсчитывается от северного конца магнитной стрелки (рис. 3.6), для точки № 5 (дно) — при азимуте $\alpha = 64^\circ$. Длина векторов в масштабе скоростей 1 см — 0,20 м/с соответствует значению скоростей в точках по табл. 3.7. Например, для точки № 5 вектор в принятом масштабе соответствует скорости 0,31 м/с.

3. На рис. 3.7 в принятом масштабе построена эпюра скорости $v = f(h)$ и эпюра магнитных азимутов $\alpha = f(h)$. Эпюры можно разделить на равные части по вертикали. В данном примере эпюра разделена на пять равных частей. По середине каждой части снимается по масштабу значение v и α , которые выписываются с правой стороны эпюры.

4. Среднее направление течения на вертикали определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{ср}} = \sum v_i \sin \alpha_i / \sum v_i \cos \alpha_i, \quad (3.11)$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ — средний магистральный азимут; v_i и α_i — значения скорости и азимутов направлений, установленные по средней линии каждой части эпюр.

Для простоты расчета составляется табл. 3.8.

Таблица 3.8
Расчет среднего направления течения на вертикали

№ части	Скорость v м/с	Азимут α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$v \sin \alpha$	$v \cos \alpha$
1	0,68	74°30'	0,9636	0,2672	0,655	0,182
5	0,38	65°00'	0,9063	0,4226	0,344	0,161
Сумма					2,681	0,922

По данным таблицы определяется $\operatorname{tg} \alpha_{\text{ср}}$; по формуле (3.11) $\operatorname{tg} \alpha = 2,681 : 0,922 = 2,907$. По $\operatorname{tg} \alpha$ получим средний азимут направления течения на вертикали $\alpha = 71^\circ$.

3.3. Средняя скорость на вертикали и в сечении

Упражнение 3.8. Вычисление средней скорости на вертикали, измеренной вертушкой многоточечным способом в русле, свободном ото льда, при ледяном покрове, незаросшем и заросшем растительностью, аналитическим и графическим методами.

Д а н о: сведения об измеренных скоростях (табл. 3.9).

При наличии косины струи и данных о направлении течения скорости в каждой точке приводятся к перпендикулярному направлению по формуле

$$v = v_0 \cos \alpha, \quad (3.12)$$

где v_0 — измеренная скорость; α — угол между направлением течения и перпендикуляром к створу.

Таблица 3.9
Измерения скорости на вертикалях

Наименование	Вертикаль № 1		Вертикаль № 2	
	глубина h м	скорость v м/с	глубина h м	скорость v м/с
Общая глубина, м	5,50	—	1,73	—
Толщина льда, м	—	—	0,37	—
Точки наблюдений				
пов.	0,15	1,75	0,15	0,12
0,2	1,10	1,82	0,35	0,24
0,3	1,65	1,80		
0,4	2,20	1,75	0,69	0,32
0,5	2,75	1,68		0,34
0,6	3,30	1,60	1,04	0,36
0,7	3,85	1,48		
0,8	4,40	1,39	1,38	0,31
0,85				0,28
0,9	4,95	1,27		—
дно	5,35	1,15	1,58	0,22

Примечание. Расстояние от оси вертушки до низа поддона 0,15 м.

Если угол направления течения измерен в каждой точке, то можно взять среднее его значение.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить скорость аналитическим методом.

2. Определить скорость графическим методом в следующей последовательности: а) построить эпюры скоростей, б) определить цену деления планиметра, площадь эпюры и скорость.

Р е ш е н и е: 1. Аналитический метод вычисления.

В табл. 3.9 сведения об измеренных скоростях для вертикали № 1 приведены при свободном (ото льда и водной растительности) русле и для вертикали № 2 при наличии ледяного покрова и растительности. Согласно указаниям о числе точек измерения скоростей по глубине, при различном состоянии русла применяются формулы:

А. При свободном (ото льда и растительности) русле:¹

$$v_5 = 0,050v_{\text{пов}} + 0,347(v_{0,2} + v_{0,6}) + 0,173v_{0,8} + 0,083v_{\text{дно}}, \quad (3.13)$$

$$v_5 = 0,1(v_{\text{пов}} + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}), \quad (3.14)$$

$$v_{10} = 0,1(v_{\text{пов}} + v_{0,2} + v_{0,3} + v_{0,4} + v_{0,5} + v_{0,6} + v_{0,7} + v_{0,8} + v_{0,9} + v_{\text{дно}}), \quad (3.15)$$

$$v_2 = (v_{0,2} + v_{0,8})/2, \quad (3.16)$$

$$v_1 = v_{0,6}, \quad (3.17)$$

$$v_1 = kv_{0,2}. \quad (3.18)$$

¹ В Наставлении [37] есть указание о том, что формула (3.14) может быть применима при правильном распределении скорости (монотонном убывании скорости от поверхности ко дну).

Индексы у скоростей в приведенных формулах соответствуют глубинам измерений.

Коэффициент k в формуле (3.18) может быть установлен путем сопоставления скорости, измеренной в точке $0,2 h$, и скорости, вычисленной по формуле (3.13). При отсутствии наблюдений принимается $k \approx 0,9$.

Используя исходные данные, вычисляются скорости по вертикали № 1 по приведенным выше формулам:

$$v_5 = 0,05 \cdot 1,75 + 0,347(1,82 + 1,60) + 0,173 \cdot 1,33 + 0,083 \cdot 1,15 = 1,61 \text{ м/с,}$$

$$v_5 = 0,1(1,75 + 3 \cdot 1,82 + 3 \cdot 1,60 + 2 \cdot 1,39 + 1,15) = 1,59 \text{ м/с,}$$

$$v_{10} = 0,1(1,75 + 1,82 + 1,80 + 1,75 + 1,68 + 1,60 + 1,48 + 1,39 + 1,27 + 1,15) = 1,60 \text{ м/с,}$$

$$v_2 = (1,82 + 1,39) : 2 = 1,60 \text{ м/с,}$$

$$v_1 = 1,60 \text{ м/с,}$$

$$v_1 = 0,9 \cdot 1,82 = 1,64.$$

Б. При наличии ледяного покрова и растительности.

Вычисления средней скорости производятся по формулам:

$$v_6 = 0,1(v_{\text{пов}} + 2v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}), \quad (3.19)$$

$$v_3 = (v_{0,15} + v_{0,5} + v_{0,85})/3, \quad (3.20)$$

$$v_2 = (v_{0,2} + v_{0,8})/2, \quad (3.21)$$

$$v_1 = kv_{0,5}. \quad (3.22)$$

Следует принять $k = 0,9$.

Используя исходные данные, вычисляются скорости по приведенным выше формулам:

$$v_6 = 0,1(0,12 + 2 \cdot 0,32 + 2 \cdot 0,36 + 2 \cdot 0,31 + 0,22) = 0,32 \text{ м/с,}$$

$$v_3 = (0,12 + 0,34 + 0,28) : 3 = 0,37 \text{ м/с,}$$

$$v_2 = (0,24 + 0,31) : 2 = 0,28 \text{ м/с,}$$

$$v_1 = 0,9 \cdot 0,34 = 0,31 \text{ м/с.}$$

Существуют еще аналитические способы вычисления средней скорости на вертикали при отсутствии вертушечных наблюдений поверхностных скоростей, которые рассмотрены подробно в упражнениях 3.9—3.11.

2. Графический метод.

а. При графическом методе определения средней скорости строится эпюра распределения скоростей течения на вертикали (годограф): по вертикали откладываются глубины, по горизонтали — скорости (рис. 3.8).

Выбор горизонтального масштаба производится в зависимости от наибольшей скорости и глубины с таким расчетом, чтобы отношение числа сантиметров по горизонтали при наибольшей скорости к числу сантиметров по глубине было 0,7—1,0. Например, выбран вертикальный масштаб 1 см — 1,00 м, горизонтальный 1 см — 0,50 м/с. Таким образом, число сантиметров по горизонтали 3,9 см, а по вертикали 5,5 и отношение $3,9 : 5,5 = 0,70$ удовлетворяет указанному требованию.

Расстояния от поверхности воды и ото дна до точек измерения скоростей зависят от типа вертушки, установки ее на штанге или крепления на тросе. Эти расстояния не могут быть всегда стандарт-

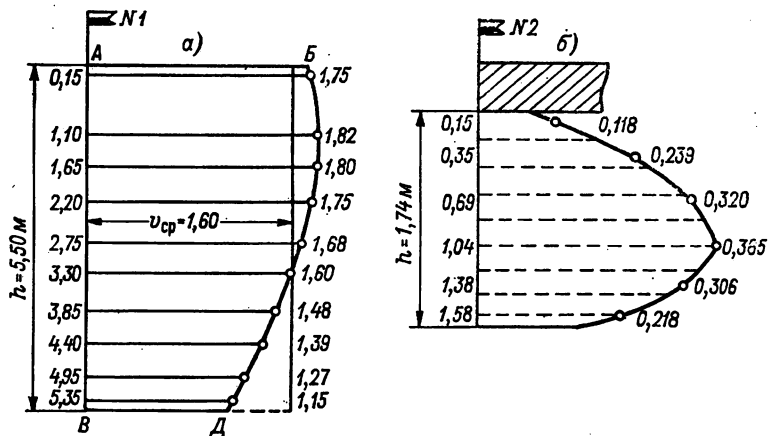


Рис. 3.8. К вычислению средней скорости на вертикали.

ными и колеблются в зависимости от условий работ. Для данного примера расстояние от поверхности воды и у дна до точки измерения скорости равно 0,15 м, а при измерении скорости у дна расстояние от оси вертушки до низа поддона равно 0,25 м. Таким образом, при построении эпюры (3.8 а) для вертикали № 1 точки по глубине, отсчитанные от поверхности при $h = 5,50$ м, имеют следующие значения: у поверхности 0,15 м; для 0,2 h $0,2 \cdot 5,50 = 1,10$ и т. д.

На рис. 3.8, а в принятом масштабе на соответствующих глубинах отложены векторы скорости. Около конца векторов справа выписываются значения скорости и проводится плавная линия эпюры скорости. Построение эпюры для условий зимнего периода приведено на рис. 3.8 б. При построении эпюры расстояния для скоростных точек определяются от нижней поверхности льда.

б. Средняя скорость на вертикали графическим способом определяется по формуле

$$v_{cp} = F'/h, \quad (3.23)$$

где F' — площадь эпюры, m^2/c ; h — глубина вертикали, м.

Площадь эюры скорости численно равна расходу воды через вертикаль, т. е. расходу воды на единицу ширины потока. Формула расхода ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$q = vh. \quad (3.24)$$

Площадь эюры определяют планиметром или непосредственно по миллиметровой бумаге, отсчитывая число квадратиков в масштабе.

Определение площадей графических построений планиметрированием при обработке гидрометрических материалов применяется часто, поэтому здесь приведены некоторые общие указания по этому вопросу. Планиметрирование производится на гладкой чертежной доске (или гладкой поверхности стола). Под чертеж подкладывается лист бумаги. Планиметр должен быть установлен так, чтобы угол между рычагами планиметра при обводе был от 30 до 120°. Планиметрирование площади может быть произведено при положении планиметра вне и внутри контура. Чаще всего для гидрометрических построений положение полюса планиметра находится вне контура и площадь вычисляется по формуле

$$F' = k(n_2 - n_1), \quad (3.25)$$

где k — цена деления планиметра; n_1 — начальный отсчет; n_2 — конечный отсчет; n_1 и n_2 — определяются как средние из трех отсчетов, причем расхождение в отсчетах не должно быть больше 1/200 доли среднеарифметического значения.

Для определения цены деления планиметра строится квадрат со сторонами 5 × 5 или 10 × 10 см и вычисляется площадь квадрата A в масштабе определяемой площади. Квадрат обводится рычагом планиметра не менее трех раз и определяется разность отсчетов B , которая является площадью этого квадрата в делениях планиметра. Разность между показаниями не должна превышать 2%. Цена деления планиметра вычисляется по формуле

$$k = A/B, \quad (3.26)$$

Таблица 3.10

Определение цены деления планиметра для вычисления площади эюры скорости

Планиметр «Геофизика», № 1916

Размер обводимой планиметром фигуры A см ²	Отсчет	Площадь фигуры B при обводе планиметром			средняя разность	Площадь фигуры в масштабе эюры A м ² /с	Цена деления планиметра $k = \frac{A}{B}$ м ² /с (ед)
		отсчет по планиметру					
		1	2	3			
5×5 = 25	Начальный Конечный Разность	1867 2102 235	1482 1716 234	8333 8569 236	234	12,5	0,05342

Точность цены деления планиметра k принимается до четырех значащих цифр (например, 24,48; 0,4583; 0,09864).

При определении площади квадрата A следует помнить, что вертикальный и горизонтальный масштабы при графических построениях могут быть разными. Рассмотрим определение цены деления при планиметрировании эпюры скорости (табл. 3.10).

Квадрат для определения цены деления принят $5 \times 5 = 25 \text{ см}^2$. Масштаб построения эпюры: вертикальный 1 см — 1,0 м, горизонтальный 1 см — 0,5 м/с, площадь квадрата $A = 1,0 \cdot 0,50 \cdot 25 = 12,5 \text{ м}^2/\text{с}$. Площадь квадрата B в делениях планиметра равна 234; следовательно, цена деления планиметра с учетом заданной выше точности равна $k = 12,5 : 234 = 0,05342 \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{ед})$.

Планиметрирование эпюры скорости, приведенной на рис. 3.8, произведено согласно вышеизложенным указаниям (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Вычисление средней скорости на вертикали № 1

Планиметр № 1916, цена деления $k = 0,05342 \text{ м}^2/(\text{с} \cdot \text{ед})$

	Отсчет по планиметру			Средняя разность отсчетов	Площадь эпюры $F' = k(n_2 - n_1)$ $\text{м}^2/\text{с}$	Глубина h м	Средняя скорость $v_{\text{ср}} = F'/h$ м/с
	1	2	3				
Начальный	1212	5605	3176				
Конечный	1378	5769	3341				
Разность	166	164	165	165	8,82	5,50	1,60

Вычисление средней скорости графическим методом для вертикали при наличии ледяного покрова производится аналогично: $v = 0,37 \text{ м/с}$.

В табл. 3.12 произведено сопоставление значений средней скорости на вертикалях № 1 и 2, полученных различными методами.

Таблица 3.12

Вертикаль № 1	Формула	(3.13)	(3.14)	(3.15)	(3.16)	(3.17)	(3.18)	графический метод
		v м/с	1,61	1,59	1,60	1,60	1,60		1,64
Вертикаль № 2	Формула	(3.19)	(3.20)	(3.21)	(3.22)	графический метод		
	v м/с	0,32	0,37	0,28	0,31	0,37		

Для периода свободного русла все результаты очень близки. Для ледового периода формула (3.19) наиболее полно учитывает распределение скорости по глубине.

Упражнение 3.9. Вычисление скорости течения реки по гидравлическим формулам.

Д а н о: 1. Равнинная река небольшая, с незасоренным чистым прямым руслом, со спокойным течением; $I = 0,0004$, $R = 0,62 \text{ м}$.

2. Горная река; русло реки сжато небольшим ущельем, сложено галькой, валунами; $I = 0,002$, $h_{cp} = 2,10$ м, $B = 64,0$ м.

Требуется: 1. Вычислить коэффициенты Шези по формулам Н. Н. Павловского и Г. В. Железнякова и скорость течения для равнинной реки.

2. Вычислить скорость для горной реки.

Решение: 1. Гидравлические методы определения средней скорости речного потока имеют большое значение при отсутствии измерений скоростей, в частности при экстраполяции кривых расхода.

В условиях равномерного движения воды для определения средней скорости в сечении речного потока используется формула Шези

$$v = C\sqrt{RI}, \quad (3.27)$$

где C — коэффициент Шези $m^{0.5}/c$, который зависит от степени шероховатости и поперечных размеров русла; R — гидравлический радиус по формуле (2.13); I — уклон водной поверхности. R можно заменить средней глубиной h_{cp} , и тогда формула (3.27) будет иметь вид

$$v = C\sqrt{h_{cp}I}. \quad (3.28)$$

При расчетах по формулам (3.27) и (3.28) следует по данным промерных работ определить R или h_{cp} , по наблюдениям на уклоновых постах или нивелированием — уклон I , а значение коэффициента Шези C рассчитать по гидравлическим формулам. Величину C можно определить для данного участка обратным путем, т. е. по измеренным гидравлическому уклону, скорости течения и гидравлическому радиусу

$$C = v/\sqrt{RI}. \quad (3.29)$$

Для определения среднего значения C вычисления по формуле (3.29) следует производить при различных значениях уровня.

Классификацию русел по степени их шероховатости подробно разрабатывали многие исследователи: М. Ф. Срибный, Б. В. Поляков, Н. М. Носов. Классификация Срибного приведена в [23]. В приложении 1 приведена уточненная шкала шероховатости, предложенная М. Ф. Карасевым [18]. В данном примере для равнинной реки можно принять значение $n = 0,025$. Для определения коэффициента C существует много гидравлических формул. В данном упражнении рассмотрим формулы Н. Н. Павловского и Г. В. Железнякова.

а. Формула Павловского (при $R < 3,0$ м)

$$C = R^y/n, \quad (3.30)$$

где n — коэффициент шероховатости; R — гидравлический радиус, м; y — показатель степени, зависящий от R и n и вычисляемый

приближенно по формулам:

$$\text{при } R < 1,0 \text{ м} \quad y = 1,5 \sqrt{n}, \quad (3.31)$$

$$\text{при } R > 1,0 \text{ м} \quad y = 1,3 \sqrt{n}. \quad (3.32)$$

Для данного примера $C = 35,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Г. В. Железняков [13] предложил формулу для C , которую можно применять для любых значений n и R :

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0,13} \left(\frac{1}{n} + \sqrt{g} \lg R \right)}. \quad (3.33)$$

Ввиду сложного вида этой формулы для определения C необходимо пользоваться приложением 2. По данным упражнения получим $C = 36,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Значения C по двум формулам получены близкими.

Скорость при $C = 35,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ $v = 35,8 \sqrt{0,62 \cdot 0,0004} = 0,56 \text{ м/с}$, при $C = 36,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ $v = 0,58 \text{ м/с}$.

2. Для горной реки приводится формула Р. А. Шестаковой [14], в которой коэффициент C определяется в зависимости от ширины и уклона реки:

$$\text{при } B > 100 \text{ м} \quad C = 18,5 I^{-0,10}, \quad (3.34)$$

$$\text{при } B < 100 \text{ м} \quad C = 22,0 I^{-0,07}, \quad (3.35)$$

$$\text{при } B < 50 \text{ м} \quad C = 7,21 I^{-0,25}. \quad (3.36)$$

Для данного примера получим $C = 22,0 \cdot 0,002^{-0,07}$; $C = 33,9 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Скорость для горной реки равна $v = 33,9 \sqrt{2,10 \cdot 0,002} = 2,20 \text{ м/с}$.

Упражнение 3.10. Рассчитать по формулам Железнякова: 1) донную скорость на вертикали и среднюю донную скорость в сечении, 2) скорость течения в точке и среднюю на вертикали.

Д а н о: 1. Глубина вертикали $h = 12,2 \text{ м}$, $I = 0,00004$, средняя скорость на вертикали $v = 1,12 \text{ м/с}$, коэффициент Шези $C_v = 63,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; $C_* = 7,92 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$. Параметр формы водного сечения $\beta_* = 1,1$.

2. Глубина вертикали $h = 3,50 \text{ м}$, наибольшая скорость на поверхности $v_{\text{наиб}} = 0,95 \text{ м/с}$. Уклон на участке $I = 0,0002$. Коэффициент шероховатости русла $n = 0,033$ и значение $C = 40,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Т р е б у е т с я: рассмотреть методику расчета и вычислить скорости.

Решение: 1. Измерение донных скоростей связано с рядом трудностей (большие размеры лопасти гидрометрической вертушки, деформации дна и пр.), поэтому возникает необходимость определить донные скорости на вертикали и среднюю донную скорость по сечению с использованием некоторых известных элементов водного сечения. Железняков предложил следующие формулы:

$$v_{д. в} = v_{ср. в} - 3v_*/k', \quad (3.37)$$

$$v_{д. ср. с} = v_{ср} (1 - 3\beta_* C_{*в} / C), \quad (3.38)$$

где $v_{д. в}$, $v_{ср. в}$, $v_{д. ср. с}$ и $v_{ср}$ — соответственно скорости донная и средняя на вертикали; средняя донная по сечению и средняя по сечению; v_* — динамическая скорость, вычисляется по формуле

$$v_* = \sqrt{gh_{ср} I}. \quad (3.39)$$

Коэффициент k' вычисляется по формуле

$$k' = 2 / (1 + C_{*в}) + 0,3, \quad (3.40)$$

где $C_{*в} = C_v / \sqrt{g}$ — относительное значение коэффициента Шези C_v .

Как видно, расчет достаточно прост.

Используя исходные данные, получим $v_* = \sqrt{9,81 \cdot 12,2 \cdot 0,00004} = 0,068$ м/с.

Значение безразмерного коэффициента Шези $C_{*в} = 63,0 : \sqrt{9,81} = 20,1$. Значение $k' = 2 : (1 + 20,1) + 0,3 = 0,39$. Донная скорость на вертикали по формуле (3.37) $v_{дв} = 1,12 - (3 \times 0,068) / 0,39 = 0,60$ м/с. Средняя донная скорость всего сечения по формуле (3.38) $v_{д. ср. с} = 1,24 (1 - 3 \cdot 1,1 \cdot 7,92 / 63,0) = 0,76$ м/с.

2. Часто возникает необходимость получить распределение скоростей в точках по глубине и среднюю скорость на вертикали при отсутствии многоточечных измерений на основании теоретических положений. В этом случае исходными данными являются: наибольшая скорость, шероховатость русла, уклон. Применение таких зависимостей имеет большое практическое значение, так как методика определения коэффициента Шези разработана достаточно полно, а значение поверхностной скорости практически легко определить, не производя детальных измерений по глубине. Железняков рассматривает логарифмическое и параболическое распределения скоростей по вертикали, принимая следующие расчетные формулы:

$$v = v_{наиб} - (v_*/k') \ln(h/y), \quad (3.41)$$

где $v_{наиб}$ — наибольшая скорость на вертикали; v_* — динамическая скорость по формуле (3.39); k' — коэффициент из (3.40); h — глубина вертикали; y — расстояние от дна до точки с рассчитываемой скоростью;

$$v = v_{наиб} (y^{1/m} / h), \quad (3.42)$$

где m — вычисляется по формуле

$$m = C_v(2\sqrt{g}(\sqrt{g} + C_v) + 0,30)/\sqrt{g}. \quad (3.42')$$

Для определения m на рис. 3.9 представлена зависимость $m = f(C_v)$, составленная по формуле (3.42).

Для вычисления средней скорости на вертикали может быть использована формула

$$v_{cp} = mv_{наиб}/(1+m). \quad (3.43)$$

Для вычисления скорости в точке $0,2 h$ по логарифмической зависимости определены значения динамической скорости по формуле (3.39) $v_* = \sqrt{9,81 \cdot 3,50 \cdot 0,0002} = 0,082$ м/с.

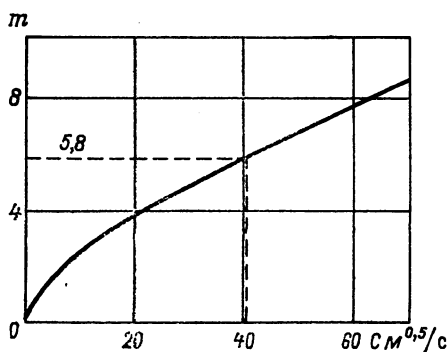


Рис. 3.9. Зависимость $m = f(C_v)$

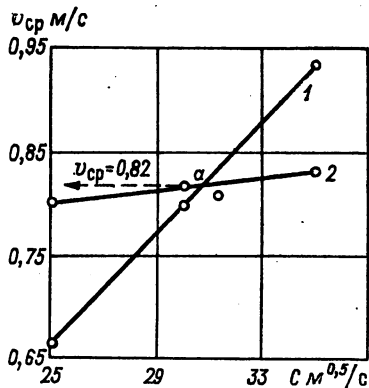


Рис. 3.10. Графическое решение системы уравнений для определения средней скорости течения
1 — по уравнению $v_{cp}^* = 0,0266 C$,
2 — по уравнению $v_{cp} = 0,95 K$

Глубина в точке $0,2 h$ $h = 0,2 \cdot 3,50 = 0,70$ м, тогда значение $y = 3,50 - 0,70 = 2,80$ м. Подставим все известные значения в формулу (3.41) $v_{0,2} = 0,95 - (0,082 : 0,39) \cdot \ln(3,50 : 2,80) = 0,92$ м/с.

При вычислении скорости $v_{0,2}$ по формуле (3.42) значение m определяется по рис. 3.9 и равно 5,8. Подставляя в формулу известные данные, получаем $v_{0,2} = 0,95 \cdot 2,80^{1/5,8} : 3,50 = 0,95 \times \times 2,80^{0,17} : 3,50 = 0,91$ м/с. Как видно, значения скорости в точке $0,2 h$ по логарифмическому и степенному распределению оказались близкими. Аналогично можно получить значение скорости в любой точке.

Средняя скорость на вертикали по формуле (3.43) равна $v_{cp} = = 5,8 \cdot 0,95 : (1 + 5,8) = 0,78$ м/с.

Упражнение 3.11. Произвести расчеты скоростей течения на вертикали по формулам А. В. Караушева.

Д а н о: 1. Измеренные скорости р. Оки у г. Пушино в створе № 1 на вертикали № 2 (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Измеренные скорости течения

р. Ока — г. Пущино, 18/VII 1968 г.

№ вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Глубина вертикали, м	Глубина погружения вертушки		Скорость в точке, м/с	Средняя скорость, м/с	Примечание
			точка наблюдения	м			
2	40,0	1,38	Пов.	0,10	0,78	0,70	Расстояние от поверхности воды до оси вертушки 0,10 м, от дна до оси 0,15 м
				0,28	0,79		
				0,83	0,67		
				1,10	0,62		
			Дно	1,23	0,56		

2. Расход воды 18/VII 1968 г. в створе № 1 $Q = 143 \text{ м}^3/\text{с}$, по данным которого подсчитан коэффициент Шези $C = 42,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Требуется: рассмотреть формулы, предложенные Караушевым и применить их для: а) распределения скорости по вертикали, б) вычисления средней скорости на вертикали. Сопоставить полученные значения с измеренными.

Решение: прежде чем перейти к расчетным формулам, рассмотрим предложенные Караушевым параметры, вывод которых здесь не приведен:

P — безразмерный параметр, который связан с коэффициентом Шези C следующими соотношениями:

при $10 \leq C \leq 60$

$$P = 0,57 + 3,3/C. \quad (3.44)$$

при $60 \leq C \leq 90$

$$P = 0,0222C - 0,000197C^2; \quad (3.45)$$

M — функция коэффициента Шези, имеющая ту же размерность $\text{м}^{0,5}/\text{с}$. При различных значениях C величина M выражается следующим образом:

при $10 \leq C \leq 60$

$$M = 0,7C + 6, \quad (3.46)$$

при $C > 60$

$$M = 48 = \text{const}. \quad (3.47)$$

Рассмотрим расчетные формулы Караушева.

а. Если измерения скоростей по глубине отсутствуют, то можно применить следующую расчетную формулу вычисления скорости в любой точке по глубине:

$$v = v_{\text{пов}} \sqrt{1 - Py^2}, \quad (3.48)$$

где $v_{\text{пов}}$ — измеренная поверхностная скорость; P — безразмер-

ный коэффициент по формулам (3.44) и (3.45); \bar{y} — относительная высота точки по глубине вертикали, для которой вычисляется скорость, $\bar{y} = y/h$; y — расстояние точки определения скорости от поверхности; h — глубина вертикали.

Определяем значение P по формуле (3.44) $p = 0,57 + 3,3 : 42,2 = 0,57 + 0,078 = 0,648$.

Расчеты скоростей в заданных точках удобно производить в табл. 3.14 (в данном примере расчет для точки 0,2 h).

Таблица 3.14

Вычисление скорости в точках вертикалей по формуле (3.48)

р. Ока — г. Пушино, 1968 г.

Точка наблюдения	Глубина в точке, м	$\bar{y} = \frac{y}{h}$	\bar{y}^2	P	$P\bar{y}^2$	$1 - P\bar{y}^2$	$\sqrt{1 - P\bar{y}^2}$	$\frac{v_{\text{пов}} \times}{\sqrt{1 - P\bar{y}^2}}$	Наблюдаемая скорость v м/с	Средняя скорость на вертикали $v_{\text{ср}}$ м/с
Пов. 0,2	0,10 0,28	— 0,2	— 0,040	— 0,648	— 0,026	— 0,974	— 0,987	0,78 0,77	0,78 0,79	0,69

Сопоставление полученных по формуле (3.48) значений скоростей с наблюдаемыми скоростями показывает, что расхождение очень незначительное, оцениваемое примерно 1,4 %.

Следует отметить, что в данном примере исключена ошибка определения коэффициента C с применением шкалы коэффициентов шероховатости, так как C было получено из фактических определений расхода воды и уклона на участке р. Оки.

б. В расчетной схеме Караушева используется значение безразмерного параметра P в виде

$$P = Mv_{\text{ср}}/Cv_{\text{пов}}, \quad (3.49)$$

где $v_{\text{ср}}$ и $v_{\text{пов}}$ — средняя и поверхностная скорости на вертикали; M — функция коэффициента Шези по формулам (3.46) и (3.47); C — коэффициент Шези.

Из формулы (3.49) получено значение средней скорости на вертикали

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{PCv_{\text{пов}}/M}. \quad (3.50)$$

Для определения $v_{\text{ср}}$ необходимо определить параметр M по формуле (3.46) $M = 0,7 \cdot 42,2 + 6 = 35,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

По известным значениям P , C , M и наблюдаемой поверхностной скорости $v_{\text{пов}} = 0,78 \text{ м/с}$ получим значение средней скорости $v_{\text{ср}} = \sqrt{0,648 \cdot 42,2 \cdot 0,78 : 35,5} = 0,68 \text{ м/с}$.

Приведем из работы [19] дополнительные варианты связи $v_{\text{ср}}$ с $v_{\text{пов}}$ и C

$$v_{\text{пов}}/v_{\text{ср}} = 1 + m/3C. \quad (3.51)$$

Отсюда

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{пов}} / (1 + m/3C). \quad (3.52)$$

Значение m зависит от C и имеет вид

$$m = M/2 = 0,35C + 3. \quad (3.53)$$

Отсюда $m = 17,8$ и средняя скорость на вертикали $v_{\text{ср}} = 0,78 : [1 + 17,8 : (3 \cdot 42,2)] = 0,68$ м/с.

Одной из расчетных формул является следующая:

$$v_{\text{пов}}/v_{\text{ср}} = 1,11C/(C-1). \quad (3.54)$$

Отсюда

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{пов}} (C-1)/1,11C. \quad (3.55)$$

Подставляя известные данные в формулу (3.55), получаем $v_{\text{ср}} = 0,78 (42,2-1) : (1,11 \cdot 42,2) = 0,69$ м/с.

Сопоставление значений средней скорости на вертикали, вычисленных по формулам Караушева и по пятиточечной аналитической формуле, приведено в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Средние скорости на вертикали

Формула	$v_{\text{ср}}$ м/с	Примечание
Аналитическая пятиточечная	0,70	По наблюдаемым скоростям
А. В. Караушева (3.48)	0,69	Значение скорости в точке по формуле $v = v_{\text{пов}} \sqrt{1 - Py^2}$
(3.50)	0,68	
(3.52)	0,68	
(3.55)	0,69	

Как видно, сопоставление значений средних скоростей по формулам Караушева с наблюдаемыми значениями указывает на их хорошее совпадение.

Упражнение 3.12. Определение средней скорости течения при измерении поверхностных скоростей поплавками при высоких уровнях (вертушечные наблюдения отсутствуют).

Д а н о: 1. Фиктивный расход воды $Q_{\text{ф}} = 327$ м³/с, подсчитанный по поплавочным измерениям.

2. Площадь водного сечения $F_{\text{в}} = 344$ м², $B = 98,3$ м.

3. Река равнинная, русло ровное, песчаное, незаросшее, $l = 0,00020$.

Т р е б у е т с я: 1. Определить среднюю фиктивную скорость и среднюю глубину.

2. Составить два уравнения для определения скорости течения.

3. Построить график $v_{\text{ср}} = f(C)$ и определить среднюю скорость.

Решение: 1. Средняя фиктивная скорость и глубина вычисляются по известным формулам:

$$v_{\text{ср. ф}} = Q_{\text{ф}}/F_{\text{в}} = 327 : 344 = 0,95 \text{ м/с},$$

$$h_{\text{ср}} = F_{\text{в}}/B = 344 : 98,3 = 3,50 \text{ м}.$$

2. В данном упражнении можно определить значение средней скорости по поплавочным наблюдениям совместным решением двух уравнений:

первое — известное уравнение Шези

$$v_{\text{ср}} = C \sqrt{h_{\text{ср}} I},$$

второе уравнение

$$v_{\text{ср}} = K v_{\text{ср. ф}}, \quad (3.56)$$

где K — коэффициент, связанный со значением коэффициента Шези C .

В данном примере $v_{\text{ср}} = C \sqrt{3,50 \cdot 0,00020} = 0,0266C$ и $v_{\text{ср}} = K v_{\text{ср. ф}} = 0,95 K$.

Задаваясь несколькими значениями C , вычисляем соответствующие им значения $v_{\text{ср}} = 0,0266 C$. Скоростной коэффициент K изменяется от 10 до 70 м^{0,5}/с.

Таблица 3.16

Совместное решение системы уравнений
для определения средней скорости при поплавочных измерениях

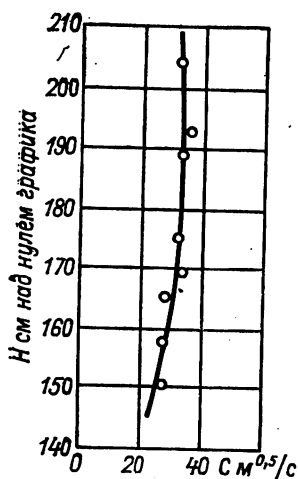
$C \text{ м}^{0,5}/\text{с}$	$v_{\text{ср}} = 0,0266 C \text{ м/с}$	K	$v_{\text{ср}} = 0,95 K \text{ м/с}$
25	0,665	0,84	0,798
30	0,798	0,86	0,817
35	0,931	0,87	0,826

При расчете по формуле $v_{\text{ср}} = 0,95 K$ значение K может быть получено по формуле (3.57) при заданном значении C . Расчеты производятся в табл. 3.16.

3. На рис. 3.10 (на стр. 85) построены две зависимости $v_{\text{ср}} = f(C)$ по соотношению (3.56). Пересечение двух прямых в точке a при округлении дает искомое значение средней скорости $v = 0,82$.

Таким образом, пользуясь предложенным методом определения средней скорости для вычисления действительного расхода, можно, имея данные о профиле водного сечения, уклоне и вычисленном фиктивном расходе воды по поплавочным измерениям в период высокого уровня, получить действительный расход воды. В данном примере $Q = 0,82 \cdot 344 = 282 \text{ м}^3/\text{с}$. Переходный коэффициент K в этом случае будет вычислен по соотношению $K = Q/Q_{\text{ф}} = 282 : 327 = 0,86$.

Упражнение 3.13. Определение переходного коэффициента K при условии неполного охвата амплитуды уровня детальными вертушечными наблюдениями в период паводка.



Дано: выписка из ведомости измеренных расходов воды (табл. 3.17).

Требуется: 1. Вычислить значения скоростного коэффициента Шези C .

2. Построить зависимость $C = f(H)$.

3. Вычислить переходный коэффициент K .

Решение: 1. Вычисление скоростного коэффициента из формулы Шези производится в табл. 3.17 по формуле (3.28).

2. Построение зависимости $C = f(H)$ производится по данным табл. 3.17 (рис. 3.11). Расположение точек позволяет провести

Рис. 3.11. Зависимость $C = f(H)$
р. Куршаб — с. Гульча, период паводка, 1969 г.

плавную кривую, и, как видно, при более высоких уровнях кривая приближается к прямой. С полученной кривой $C = f(H)$ снимается несколько значений C через равные интервалы уровня, по которым вычисляется среднее арифметическое значение $C = 31,6 \text{ м}^{0.5}/\text{с}$.

Таблица 3.17

Вычисление скоростного коэффициента C по данным наблюдений
р. Куршаб — с. Гульча, паводок 1969 г.

Дата измерения	Уровень H см над нулем графика	h_{cp} м	l	$h_{cp} l$	$\sqrt{h_{cp} l}$	v_{cp}	$C = \frac{v_{cp}}{\sqrt{h_{cp} l}}$	B м
20/V	169	0,68	0,0071	0,0048	0,0692	2,09	30,2	26,5
15/VI	158	0,95	0,0057	0,0054	0,0734	1,98	26,9	26,9

3. Вычисление переходного коэффициента K производится по следующей формуле:

$$K = C^{2/3} / (C^{2/3} + 1,6), \quad (3.57)$$

где C — среднее значение скоростного коэффициента, $\text{м}^{0.5}/\text{с}$.

Значение K по формуле (3.57) вычисляется с точностью до 0,001 с дальнейшим округлением до 0,01 $K = 31,6^{2/3} : (31,6^{2/3} + 1,6) = 0,862 = 0,86$.

Упражнение 3.14. Определение переходного коэффициента от поверхностных скоростей к средним с учетом влияния ветра.

Таблица 3.18

Значение K_1 , w и α
р. Волхов — с. Буриги, 1967 г.

$K_1 = Q_0/Q_\Phi$	w м/с	α°	$\cos \alpha$	$w \cos \alpha$
0,84	2,6	44	0,719	1,87
0,84	2,0	43	0,731	1,50

Д а н о: 1. Средняя скорость ветра w и угол между направлением ветра и перпендикуляром к створу α за период паводка (табл. 3.18).

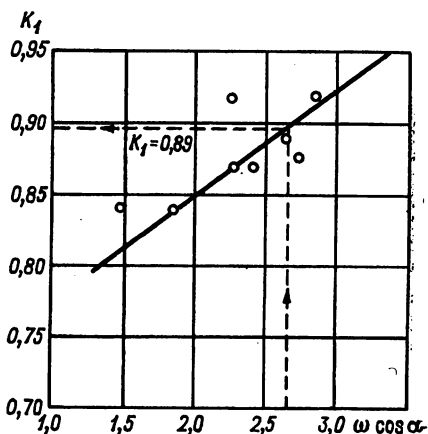


Рис. 3.12. График связи переходного коэффициента K_1 с нормальной составляющей скорости ветра $w \cos \alpha$

2. При поплавочных наблюдениях 3/V 1967 г. ветер по течению со средней скоростью $w = 3,3$ м/с, угол $\alpha = 36^\circ$.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить нормальную составляющую скорости ветра для каждого измерения.

2. Построить график связи переходного коэффициента K_1 и нормальной составляющей скорости ветра.

3. Определить переходный коэффициент K_1 с введением поправки.

Р е ш е н и е: 1. В табл. 3.18 вычисляются $\cos \alpha$ и $w \cos \alpha$.

2. На рис. 3.12 по данным табл. 3.18 построен график связи переходного коэффициента K_1 и $w \cos \alpha$. Разброс точек получился незначительным. Кривая связи проводится графически по полю точек.

3. Переходный коэффициент K_1 за 3/V 1967 г. определяется графически по рис. 3.12. При $w \cos \alpha = 3,3 \cdot 0,809 = 2,67$ $K_1 = 0,89$.

В полученный коэффициент вводится поправка с учетом влияния направления ветра.

При ветре по течению поправка вводится со знаком плюс (+), со знаком минус (—) при ветре против течения, при ветре по направлению гидроствора поправка не вводится.

В данном примере при ветре по течению $w=3,3$ м/с по табл. 3.19 поправка $\Delta K = 3,4$ %, следовательно, переходный коэффициент $K_1 = 0,89 - 0,029 = 0,86$.

Таблица 3.19

Значения ΔK

Ветер по течению, м/с	ΔK_1 , %	Ветер против течения, м/с	ΔK_1 , %
1,0	1,0	1,0	1,0
2,0	3,0	2,0	1,8
3,0	4,0	3,0	3,3
4,0	6,0	4,0	3,5
5,0	8,0	5,0	4,0

Упражнение 3.15. Вычисление скорости на вертикали, измеренной поплавком-интегратором.

Д а н о: выписка из книжки измерений скорости течения поплавком-интегратором (табл. 3.20).

Т р е б у е т с я: вычислить среднюю скорость на вертикали: а) без градуировки поплавка-интегратора, б) с учетом градуирования поплавка.

Р е ш е н и е: а. Поплавки-интеграторы применяются для определения средней скорости на вертикали при скорости течения не более 0,20 м/с. Поплавок, опущенный на дно в точке А (рис. 3.13), будет всплывать и на каком-то расстоянии L от вертикали появится на поверхности в точке В. Расстояние L (снос поплавка) пропорционально скорости течения. Расстояние определяется по рейке

Таблица 3.20

Измерения скорости течения

р. Волхов —

№ вертикали	Глубина, м	Измерения						
		1	2	3	4	5	6	сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,74	1,40 8,8	1,40 8,7	1,30 8,7	1,40 8,8	1,40 8,8	—	6,9 43,8

П р и м е ч а н и е. В графах 3—9 приведен снос поплавка L (первая строка)

в направлении точки В. Если наблюдения производятся несколько раз, то средняя скорость вычисляется по соотношению

$$v_{\text{ср}} = \Sigma L / \Sigma t.$$

Для данного примера по табл. 3.20 $v_{\text{ср}} = 6,9 : 43,8 = 0,16$ м/с.

б. Измерения средней скорости на вертикали поплавком-интегратором можно упростить и не определять время всплывания-

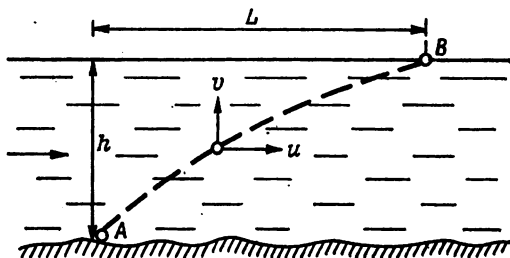


Рис. 3.13. Схема всплывания поплавка-интегратора

а измерять только снос поплавка L . Для этого предварительно следует градуировать поплавок в стоячей воде.

Средняя скорость вычисляется по формуле (3.58)

$$v_{\text{ср}} = cL_{\text{ср}},$$

Таблица 3.21

Значения коэффициента c в с^{-1} для поплавка-интегратора № 1

Глубина, м ↓	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,10	0,800	0,760	0,720	0,680	0,640	0,600	0,560	0,520	0,486	0,440
0,70	0,144	0,112	0,111	0,100	0,108	0,107	0,106	0,104	0,103	0,101
...

поплавками-интеграторами

с. Буриги, 1967 г.

Среднее	Средняя скорость по вертикали, м/с		$\cos \alpha$	$v_{\text{испр}} = v_{\text{ср}} \cdot \cos \alpha$
	без градуировки	с градуировкой		
10	11	12	13	14
1,38	0,16	0,15	$\alpha = 7^\circ$ $\cos \alpha = 0,998$	0,15

и время всплытия поплавка t (вторая строка).

где c — коэффициент, полученный по данным градуировки поплавок; определяется по табл. 3.21.

По табл. 3.20 (графа 10) $L_{\text{ср}} = \sum L/n = 6,9 : 5 = 1,38$ м.

По табл. 3.21 при глубине вертикали $h = 0,74$ м $c = 0,108$. Таким образом средняя скорость по формуле (3.58) равна $v_{\text{ср}} = 0,108 \cdot 1,38 = 0,15$ м/с.

При наблюдениях был определен угол отклонения рейки от нормали к створу $\alpha = 7^\circ$; в этом случае следует ввести поправку на $\cos \alpha$. Ввиду малого значения α поправка на $\cos \alpha$ не изменила полученное значение средней скорости. Отметим, что без учета градуировки поплавок скорость получена несколько большей, хотя расхождение находится в пределах точности измерения.

3.4. Гидравлико-гидрометрический способ вычисления переходных коэффициентов от средней и наибольшей поверхностной скорости к средней по сечению

Упражнение 3.16. Определение переходных коэффициентов при расчете действительных расходов.

Д а н о: 1. Глубины: $h_{\text{ср}} = 3,50$ м, $h_{\text{наиб}} = 5,38$ м.

2. Скорости: $v_{\text{пов}} = 0,95$ м/с, $v_{\text{наиб}} = 1,30$ м/с.

3. Уклон водной поверхности $I = 0,0002$.

4. Гравийное русло, чистое, со спокойным течением, коэффициент шероховатости $n = 0,030$.

Т р е б у е т с я: произвести расчеты, если известны: а) средняя поверхностная скорость и уклон водной поверхности, б) средняя поверхностная скорость и шероховатость русла, в) средняя и наибольшая поверхностная скорость, г) средняя, а также наибольшая поверхностные скорости и шероховатость русла, д) наибольшая поверхностная скорость, уклон и шероховатость русла, е) характеристика участка и средние глубины.

Р е ш е н и е: при измерении скоростей поверхностными поплавками расходы воды $Q_{\text{д}}$ вычисляются по средним поверхностным и наибольшим скоростям по формулам:

$$Q_{\text{д}} = K_1 Q_{\text{ф}}, \quad (3.59)$$

$$Q_{\text{д}} = K_2 v_{\text{наиб}} F, \quad (3.60)$$

где $Q_{\text{ф}}$ — расход, вычисленный по средним поверхностным скоростям; $v_{\text{наиб}}$ — наибольшая поверхностная скорость; F — площадь водного сечения; K_1 и K_2 — переходные коэффициенты, методика расчета которых рассматривается ниже.

В последние годы с развитием аэрометодов в гидрометрии вопрос перехода от поверхностных скоростей течения к средним по сечению требует развития теоретических обоснований к выбору коэффициентов K_1 и K_2 .

Г. В. Железняков разработал гидравлико-гидрометрический способ определения переходных коэффициентов [13—21], который

в настоящее время одобрен Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды и приведен в Наставлении [37] и Методических рекомендациях по измерению расходов воды рек аэрометодами [25].

Поясним некоторые элементы, применяемые в методике расчета K_1 и K_2 .

Используемый в схеме расчета параметр формы водного сечения β_* для беспойменных русел рассмотрен в упражнении 2.6. Вводится безразмерное число Фруда Fr (или параметр кинетичности потока). Число Фруда может быть вычислено для различных скоростей течения:

локальное число Фруда

$$fr = v^2/g(h-y), \quad (3.61)$$

на вертикали

$$fr_v = v_v^2/gh, \quad (3.62)$$

относительно средней скорости

$$Fr = \alpha v_{cp}^2/gh_{cp}, \quad (3.63)$$

относительно поверхностной скорости

$$Fr_1 = v_{пов}^2/gh_{cp}, \quad (3.64)$$

относительно наибольшей скорости

$$Fr_2 = v_{наиб}^2/gh_{cp}, \quad (3.65)$$

где v , v_v , v_{cp} , $v_{пов}$ и $v_{наиб}$ — соответственно скорость в точке, средняя по вертикали, средняя в сечении, поверхностная и наибольшая в сечении скорости; h — глубина вертикали; y — расстояние от дна до точки измерения; h_{cp} — средняя глубина; g — ускорение свободного падения.

Численные значения коэффициента C для равнинных русел находятся в пределах 10—70 м^{0,5}/с. В гидравлико-гидрометрическом способе дополнительно используются следующие выражения для коэффициента Шези: C_0 — нижнее значение, равное 9,1 м^{0,5}/с; C_* — безразмерное значение, вычисленное по формуле:

$$C_* = (\sqrt{g} + C)/(2,3 + 0,3C/\sqrt{g}), \quad (3.66)$$

где C определяется по формулам (3.29), (3.30) и (3.33).

Значения C_* , вычисляемое по формуле (3.66) при различных величинах C , помещены в табл. 3.22.

Таблица 3.22

Значения коэффициента Шези по формуле (3.66)

C м ^{0,5} /с	1,0	5,0	7,5	10	15	20	30
C_* м ^{0,5} /с	1,72	2,93	3,56	4,03	4,85	5,49	6,40
C м ^{0,5} /с	40	50	60	70	80	90	100
C_* м ^{0,5} /с	7,03	7,49	7,84	8,12	8,34	8,53	8,68

Если нельзя определить C_* из-за отсутствия сведений о значении скоростного коэффициента C , то в этом случае Железняков предлагает воспользоваться для равнинных и горных русел средним значением $C_* = 6,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Рассмотрим применение гидравлико-гидрометрического способа, используя приведенные выше элементы расчета β_* , a_h , C , C_0 , C_* , F_r , F_{r1} и F_{r2} .

а. Известна средняя поверхностная скорость $v_{\text{пов}}$, измеренная поплавками, уклон водной поверхности I и профиль водного сечения. Переходный коэффициент K_1 от поверхностной скорости к средней вычисляется по формуле

$$K_1 = 1 - (\beta_* C_* / \sqrt{g}) \sqrt{I / F_{r1}} \quad (3.67)$$

Для определения параметра формы живого сечения β_* определяем отношение $a_h = h_{\text{ср}} / h_{\text{наяб}} = 3,50 : 5,38 = 0,65$.

По табл. 2.7 при $a_h = 0,65$ $\beta_* = 1,10$.

Число Фруда $F_{r1} = 0,95^2 : (9,81 \cdot 3,50) = 0,0262$.

Из формулы (3.67), принимая $C_* = 6,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, получим

$$K_1 = 1 - (1,1 \cdot 6,0 : \sqrt{9,81}) \sqrt{0,00020 : 0,0262} = \\ = 1 - 2,11 \cdot 0,087 = 0,82.$$

б. При известных средней поверхностной скорости $v_{\text{пов}}$ и шероховатости русла переходный коэффициент K_1 может быть вычислен по формуле

$$K_1 = C / (C + \beta_* C_*). \quad (3.68)$$

Подставим в формулу (3.67) C_* , полученное по формуле (3.66):

$$K_1 = \frac{(2,3 \sqrt{g} + 0,3C) C}{[(2,3 + \beta_*) \sqrt{g} + 0,3C] C + \beta_* g}. \quad (3.69)$$

При $\beta_* = 1,0$ получим

$$K_1 = \frac{(2,3 \sqrt{g} + 0,3C) C}{(2,3 \sqrt{g} + 0,3C) C + g}. \quad (3.70)$$

Таблица 3.23

Значения K_1

C $\text{м}^{0,5}/\text{с}$	β_*								
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
5	0,63	0,61	0,59	0,57	0,55	0,53	0,52	0,49	0,46
10	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,61	0,58	0,55
15	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,66	0,63	0,61
20	0,78	0,77	0,75	0,74	0,72	0,71	0,70	0,67	0,64
30	0,82	0,81	0,80	0,78	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70
40	0,85	0,84	0,83	0,81	0,80	0,79	0,78	0,76	0,74
50	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,82	0,79	0,77

Значения K_1 в зависимости от C и β_* приведены в табл. 3.23.

В данном примере определим C по формуле (3.30); показатель степени вычислим по формуле (3.32) $y = 0,23$; значение $R \approx h_{cp}$. Скоростной коэффициент равен $C = \frac{1}{n} = \frac{1}{0,030} \cdot 3,50^{0,23} =$

$= 40,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$. Для вычисления K_1 по формуле (3.68) определим интерполяцией значение C_* по табл. 3.22 при $C = 40,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; $C_* = 7,04 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Подставляя известное значение $\beta_* = 1,10$, получим

$$K_1 = \frac{40,1}{40,1 + 1,1 \cdot 7,04} = 0,84.$$

По табл. 3.23 при $C = 40,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ и $\beta_* = 1,10$ $K_1 = 0,84$.

Для определения коэффициента K_1 можно использовать формулу И. Ф. Карасева [18]

$$K_1 = 0,77 + 0,043 \sqrt{C_*} - 3,8. \quad (3.71)$$

Подставляя $C_* = 7,04 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, получим $K_1 = 0,77 + 0,043 \times \sqrt{7,04} - 3,8 = 0,84$.

в. При известной средней поверхностной $v_{пов}$ и наибольшей $v_{наиб}$ скорости переходный коэффициент может быть вычислен по формуле

$$K_1 = 1,5 - 0,5 \frac{v_{наиб}}{v_{пов}}. \quad (3.72)$$

Для данного примера $K_1 = 1,5 - 0,5 \cdot 1,30 : 0,95 = 1,5 - 0,5 \times 1,37 = 1,5 - 0,68 = 0,82$.

г. Известны средняя поверхностная $v_{пов}$ и наибольшая $v_{наиб}$ скорости и коэффициент шероховатости русла n .

По шероховатости n определяется коэффициент Шези по приложению 1 $C = 40,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, значение $C_* = 7,04 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, параметр $\beta_* = 1,10$ и нижнее значение $C_0 = 9,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$. Имея эти параметры, расчет можно выполнить в двух вариантах:

1) определяем коэффициент K_1

$$K_1 = \frac{\left(1 + \frac{\sqrt{g}}{C_*} \cdot \frac{C}{C_0}\right) - \beta_* \frac{v_{наиб}}{v_{пов}}}{1 + \frac{\sqrt{g}}{C_*} \cdot \frac{C}{C_0} - \beta_*}. \quad (3.73)$$

Подставим все известные значения

$$K_1 = \frac{1 + \frac{\sqrt{9,81}}{7,04} \cdot \frac{40,1}{9,1} - 1,1 \cdot \frac{1,30}{0,95}}{1 + \frac{\sqrt{9,81}}{7,04} \cdot \frac{40,1}{9,1} - 1,1} = 0,80;$$

2) вычисляется средняя скорость по формуле

$$v_{\text{ср}} = 0,5 (3v_{\text{пов}} - v_{\text{наиб}}). \quad (3.74)$$

Подставим соответствующие значения в эту формулу $v_{\text{ср}} = 0,5 (3 \cdot 0,95 - 1,30) = 0,78$ м/с. Значение переходного коэффициента в этом случае может быть получено так: $K_1 = v_{\text{ср}}/v_{\text{пов}} = 0,78 : 0,95 = 0,82$.

Для расчета K_1 по формуле (3.70) приведена табл. 3.24.

Таблица 3.24

Средние значения K_1 в зависимости от коэффициента C [38]

C м ^{0,5} /с	K_1	C м ^{0,5} /с	K_1
20	0,82	40	0,88
25	0,84	45	0,89
30	0,86	50	0,90
35	0,87	60	0,91

д. Известна наибольшая поверхностная скорость $v_{\text{наиб}}$, уклон водной поверхности I , коэффициент шероховатости, а следовательно, и C . При этих условиях переходный коэффициент K_2 может быть вычислен в трех вариантах:

1) по известным C_* , C_0 , C , I , Fg_2

$$K_2 = 1 - \left(\frac{C_*}{\sqrt{g}} + \frac{C}{C_0} \right) \sqrt{\frac{I}{Fg_2}}. \quad (3.75)$$

Для данного упражнения вычислим значение Fg_2 по формуле (3.65) $Fg_2 = 1,30^2 : 9,81 \cdot 3,5 = 1,69 : 34,3 = 0,0492$.

Подставим известные значения в формулу (3.75)

$$K_2 = 1 - \left(\frac{7,04}{\sqrt{9,81}} + \frac{40,1}{9,1} \right) \sqrt{\frac{0,00020}{0,0492}} = 0,58;$$

2) коэффициент K_2 может быть получен по формуле

$$K_2 = \frac{C}{(1,34C + C_*)}. \quad (3.76)$$

Для данного примера $K_2 = 40,1 : (1,34 \cdot 40,1 + 7,04) = 0,66$;

3) коэффициент K_2 может быть вычислен по формуле

$$K_2 = \frac{[(2,3\sqrt{g} + 0,3C) C]}{[(4,1\sqrt{g} + 0,4C) C + g]}. \quad (3.77)$$

Подставляя известные значения, получим

$$K_2 = \frac{[(2,3\sqrt{9,81} + 0,3 \cdot 40,1) 40,1]}{[(4,1\sqrt{9,81} + 0,4 \cdot 40,1) 40,1 + 9,81]} = 0,66.$$

Для расчета K_2 по формуле (3.77) составлена табл. 3.25;

Таблица 3.25

Значение K_2

$C_{M^{0,5}/c}$	K_2	$C_{M^{0,5}/c}$	K_2	$C_{M^{0,5}/c}$	K_2
1,0	0,33	20	0,62	70	0,69
2,5	0,45	30	0,64	80	0,69
5,0	0,52	40	0,66	90	0,70
10	0,57	50	0,67	100	0,70
15	0,61	60	0,68	110	0,70

е. Для приближенных расчетов при отсутствии опытных данных, при рекогносцировках значения K_1 и K_2 можно определить по табл. 3.26 при различных значениях средних глубин в зависимости от характеристики русла.

Таблица 3.26

Приближенные значения переходных коэффициентов по Г. В. Железнякову

Характеристика русла	Средняя глубина, м					
	>1		1—5		>5	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
Русла прямые, чистые земляные (глина, песок), галечные, гравийные	0,80	0,64	0,84	0,66	0,86	0,67
Русла извилистые, частично заросшие травой, каменные. Поймы сравнительно разработанные, с растительностью (травы, редкий кустарник)	0,75	0,60	0,80	0,63	0,83	0,65
Русла и поймы значительно заросшие, с глубокими промоинами. Русла извилистые с наличием крупных валунов	0,65	0,55	0,74	0,59	0,80	0,62
Поймы сплошь лесные таежного типа	0,57	0,46	0,69	0,56	0,75	0,60

По табл. 3.26, зная характеристику русла и среднюю глубину, определяем $K_1 = 0,84$ и $K_2 = 0,66$.

Различные способы расчета переходного коэффициента применяются тогда, когда на участке реки можно определить только наибольшую поверхностную скорость.

Следует отметить, что для прямого чистого русла расчеты K_1 и K_2 по всем формулам хорошо согласуются с приближенными значениями по табл. 3.26.

3.5. Направление гидрометрического створа

Упражнение 3.17. Определение направления гидрометрического створа по измерениям скоростей поверхностными поплавками.

Д а н о: 1. Данные наблюдений в створе (табл. 3.27).

Таблица 3.27

Определение скорости поверхностными поплавками

№ поплавка	Место прохождения через средний створ от пост. начала, м	Отсчет времени прохождения поплавка через створ		Продолжительность хода поплавок t с	Поверхностная скорость $v = L/t$ м/с
		верхний	нижний		
1	11,5	0 мин 00с	1 мин 58с	118	0,85
7	63,6	2 53	4 20	87	1,15
11	106,5	0 00	1 31	91	1,10

2. Расстояние между створами 50 м, общая длина пути $L = 100$ м.

3. Азимут магистрали 74° .

4. План участка реки с засечками, определяющими положение поплавков по створам (рис. 3.14).

5. Уровень воды 90,49 м усл.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить скорость движения поплавков.

2. Провести траектории хода поплавков.

3. Построить векторы скорости движения поплавков на среднем створе.

4. Построить векторный многоугольник скоростей, определить равнодействующую многоугольника и установить направление гидрометрического створа.

Р е ш е н и е: 1. Гидрометрический створ — закрепленный на местности поперечник через реку, в котором измеряются расходы воды и наносов. Гидрометрический створ назначается перпендикулярно среднему направлению течения на прямолинейном участке. Место гидрометрического створа должно удовлетворять условиям, при соблюдении которых обеспечивается оптимальная точность измерений и безопасность их производства.

В табл. 3.27 приведены (с сокращением) результаты наблюдений по 11 поверхностным поплавкам, расстояние которых от магистрали определяющее их положение на среднем створе, снято с плана.

Скорость каждого поплавка вычисляется по формуле

$$v = L/t, \quad (3.78)$$

где L — общая длина пути поплавка между верхним и нижним створами, м; t — время хода поплавка между створами с.

2. На рис. 3.14 представлен план с расположением створов, и на каждом створе по мензульным засечкам отмечено местополо-

жение поплавков. Точки пересечения поплавок линий створов, соединенные прямыми штриховыми линиями, образуют траектории хода поплавков. Траектории поплавков могут пересекаться.

3. Для каждой траектории по касательной в точке пересечения среднего створа наносится вектор скорости. Для поплавок № 10 показана линия RM , соединяющая точки траектории на верхнем и нижнем створах. Графически параллельно переносится направ-

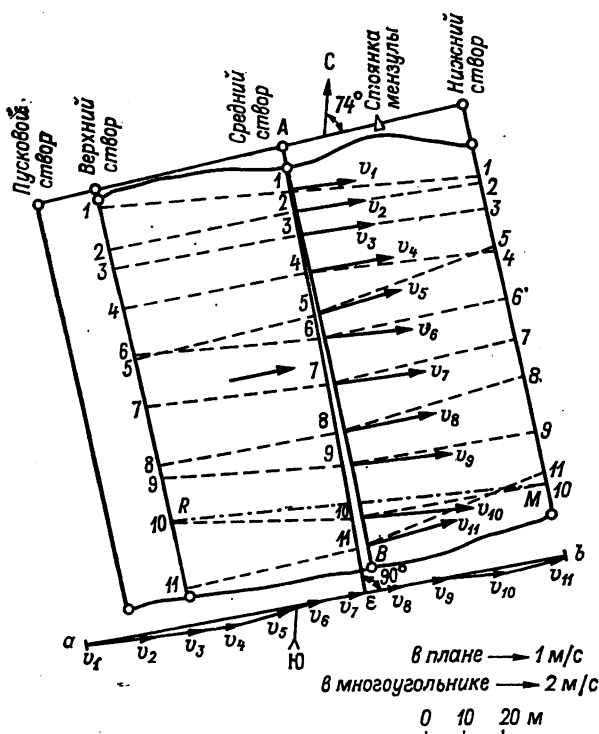


Рис. 3.14. Определение направления гидрометрического створа поверхностными поплавками

р. Ока — г. Пущино, отметка уровня воды 30,49 м усл., 22/VII 1969 г.

ление линии RM к точке среднего створа, на котором откладывается вектор скорости в выбранном масштабе (1 см — 1,0 м/с).

4. На плане выше магистрали или, как указано на рис. 3.14, вдоль линии правого берега от произвольно выбранной точки строится векторный многоугольник. Векторы переносятся параллельно своему положению по порядку их расположения от берега (независимо от номера поплавок). Длина вектора определяется циркулем-измерителем. Масштаб для построения векторов многоугольника в рассматриваемом примере принят более мелким, чем

масштаб векторов, помещенных на плане русла. Это сделано с целью сокращения размера чертежа многоугольника. Соединяя начало первого вектора (точка a) с концом последнего вектора, (точка b), получаем равнодействующую векторов, которая и будет соответствовать среднему направлению поверхностного течения реки на участке. Перпендикуляр (линия AE) к равнодействующей определяет направление гидрометрического створа; он проводится через точку A среднего створа.

После определения на плане направления гидрометрического створа описанным выше способом его положение закрепляется на местности.

Упражнение 3.18. Определение направления гидрометрического створа по данным измерений вертушкой.

Д а н о: 1. Выписка из полевой книжки измерения скоростей вертушкой ВММ (табл. 3.28).

Таблица 3.28

Пример подсчета расходов воды на вертикали и
частичных расходов на участке

р. Ока — г. Пущино, вертикаль № 1, 24/VII 1968 г.

№ скоростной вертикали	Расстояние от магистралей, м	Глубина, м	Наменованные точки	Скорость в точке, м/с	Азимут в точке α°	Расход на вертикали q м ³ /с	Ширина участка b м	Частичный расход на участке q_f м ³ /с
Ур. л. б. 1	5,40 23,5	0,00 1,42	— 0,6	0,00 0,82	76	1,16	26,0	30,2

2. Схема расположения створа измерений и магистраль КЛ (азимут $\alpha = 74^\circ$) (рис. 3.15).

3. Уровень воды на гидрологическом посту 90,49 м усл.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить расходы на каждой вертикали.

2. Определить по плану ширину участков реки по створу.

3. Вычислить частичные расходы воды на участках профиля.

4. Построить векторы частичных расходов.

5. Построить векторный многоугольник частичных расходов, определить равнодействующую многоугольника и направление гидрометрического створа.

Р е ш е н и е: 1. На рассматриваемом участке измерены вертушкой скорости течения на глубине 0,6 h на каждой скоростной вертикали; скорость, измеренная в этой точке, принималась за среднюю на вертикали. По числу шариков в компасной коробке определялся азимут направления течения в точке 0,6 h (порядок обработки данных показан в упражнении 3.6).

В табл. 3.28 приведен подсчет расходов на каждой вертикали по формуле (3.24).

2. На рис. 3.15 по ширине реки на линии створа выделены участки b_1, b_2, \dots, b_6 , в центре которых расположены вертикали. Ширина этих участков, измеренная по плану, записана в табл. 3. 28.

3. Частичные расходы воды (в $\text{м}^3/\text{с}$), соответствующие выбранным участкам реки, записанные в табл. 3.28, вычисляются по формуле

$$q_4 = qb. \quad (3.79)$$

4. На рис. 3.15 для каждой вертикали в принятом масштабе нанесены векторы частных расходов; направления этих векторов соответствуют величинам азимутов скоростей, определенных вертушкой ВММ.

5. Построение векторного многоугольника проводится аналогично указаниям упражнения 3.18 (без изменения масштаба векторов). К равнодействующей ab восстанавливается перпендикуляр AE через точку A , который и определяет направление гидрометрического створа (рис. 3.15).

Упражнение 3.19. Расчет скоростей селевых потоков.

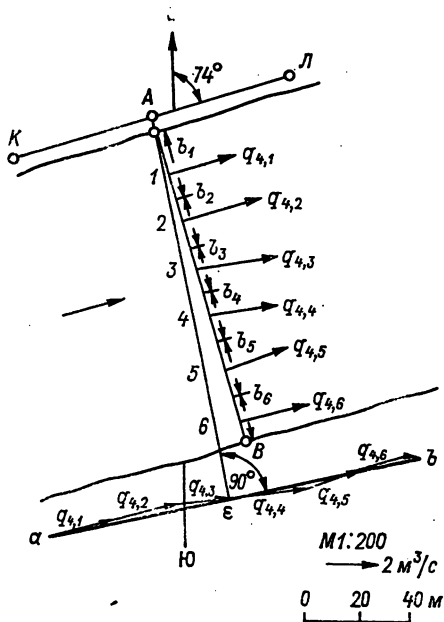


Рис. 3.15. Определение направления гидрометрического створа по наблюдениям вертушкой ВММ
р. Ока — г. Пущино, отметка уровня воды 90,52 м усл., 24/VII 1968 г.

Д а н о: четыре группы исходных данных о селевых потоках: 1) средняя глубина $h_{\text{ср}} = 30$ м, уклон $I = 0,16 \text{ ‰}$, рыхлообломочные грунты с преобладанием глинистой массы; 2) плотность селевой массы $\rho_{\text{см}} = 1,7 \text{ г/м}^3$; средняя глубина $h_{\text{ср}} = 2,5$ м и коэффициент Шези $C = 20 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; 3) средняя глубина $h_{\text{ср}} = 30$ м и уклон $I = 0,16 \text{ ‰}$; 4) $h_{\text{ср}} = 2,0$ и $I = 0,16 \text{ ‰}$.

Т р е б у е т с я: рассчитать скорости селевых потоков различной структуры.

Р е ш е н и е: основными количественными характеристиками селевых потоков являются расходы, ширина, глубина потока, скорость движения, гранулометрический состав, плотность селевой массы и объем селевого стока. Одной из главных характеристик является средняя скорость движения селевого потока.

Приводится ряд формул, расчет по которым для четырех групп исходных данных рассмотрен ниже.

1. Русла без поймы

$$v_c = 1,14 \sqrt{h_{cp}} \sqrt[3]{IW_p}, \quad (3.80)$$

здесь h_{cp} — средняя глубина, м; I — средний уклон водотока в пределах рассматриваемого участка, ‰ (например, если уклон горного потока 0,14, то в формулу надо поставить 140); W_p — коэффициент текучести селевой массы, равный $W_p = 1 - \rho_{от}/\rho_{пн}$, где $\rho_{от}$ — объемная концентрация твердой фазы в селевой массе (величина безразмерная)

$$\rho_{от} = (\rho_{см} - \rho)/(\rho_n - \rho), \quad (3.81)$$

где $\rho_{см}$ — плотность селевой массы; ρ_n — плотность твердой фазы (для песка 2,65 т/м³, для глины 2,75 т/м³; ρ — плотность воды, равная 1 т/м³; $\rho_{пн}$ — предельная объемная концентрация твердой фазы, при которой она утрачивает текучесть (для рыхлообломочных грунтов 0,70). Используя исходные данные, рассчитаем объемную концентрацию твердой фазы $\rho_{от} = (1,7 - 1) : (2,75 - 1) = 0,7 : 0,75 = 0,40$.

Коэффициент текучести $W_p = 1 - 0,40 : 0,70 = 0,43$.

Средняя скорость по формуле (3.80) равна $v_{cp} = 1,14 \sqrt{3,0} \times \sqrt[3]{160 \cdot 0,43} = 8,08$ м/с.

Формула (3.80) применяется при условии, что $(\rho_{от}/\rho_{пн} \leq 0,95)$. В данном примере это условие соблюдено.

2. На участке наблюдается резкое сужение долины, в этом случае средняя скорость может быть вычислена по формуле

$$v_{cp} = 3,14 \sqrt{h_{cp}/\alpha_c}, \quad (3.82)$$

где α_c — коэффициент Кориолиса для селевого потока вычисляется в зависимости от коэффициента Шези:

C м ^{0,5/с}	5	10	15	20
α_c	1,90	1,63	1,51	1,43

Значение α_c селевого потока больше, чем для водного.

Средняя скорость по формуле (3.82) равна $v_{cp} = 3,14 \sqrt{2,5} : \sqrt{1,43} = 4,14$ м/с.

3. При движении селевого потока, состоящего из тонкоглинистой фракции, скорость вычисляется по формуле

$$v_c = 0,001 h_{cp}^2 I. \quad (3.83)$$

4. Для селевых потоков, транспортирующих большое количество взвешенных и влекомых наносов:

$$v_c = 4,5 h_{cp}^{0,67} I^{0,17}. \quad (3.84)$$

Для грязевых и грязе-каменных потоков

$$v_c = 3,75 h_{cp}^{0,50} I^{0,17}. \quad (3.85)$$

3.6. Точность определения скорости течения

Упражнение 3.20. Определить среднее и максимальное значения погрешности измерения скорости в точке при ограниченной продолжительности измерения.

Дано: 1. Глубина вертикали $h = 2,65$ м, скорость течения в точке $0,6 h$ $v = 0,50$ м/с, наибольшая скорость $v_{\text{наиб}} = 0,70$ м/с.

2. Продолжительность наблюдения при определении скорости $t = 20$ с.

Требуется: 1. Вычислить число Фруда.

2. Рассчитать среднее и максимальное значения погрешности измерения скорости.

Решение: 1. По рекомендации Железнякова среднее и максимальное значения погрешности, которая возникает при ограниченной продолжительности наблюдения в точке, могут быть определены в зависимости от локального числа Фруда, вычисляемого по формуле (3.61). Для точки $0,6 h$ при $h = 2,65$ м, $y = 1,06$ м число Фруда $fr = \frac{0,50^2}{9,81(2,65 - 1,06)} = 0,016$; при измерении скорости

у поверхности $y = h = 2,65$ м, тогда $fr = \frac{0,70^2}{9,81 \cdot 2,65} = 0,015$.

2. Формулы погрешности имеют вид:

$$\Delta v/v_{\text{ср}} = 1,1/\sqrt{fr}, \quad (3.86)$$

$$\Delta v/v_{\text{наиб}} = 3,1/\sqrt{fr}. \quad (3.87)$$

Для данного примера $\Delta v/v_{\text{ср}} = 1,1 : \sqrt{0,016} = 8,7\%$ и $\Delta v/v_{\text{наиб}} = 3,1 : \sqrt{0,015} = 2,5\%$.

Как видно, при $t = 20$ с погрешность определения средней скорости получается более высокой.

Упражнение 3.21. Рассчитать погрешность определения коэффициента Шези.

Дано: 1. Относительные значения погрешности скорости $\Delta v/v = 3\%$, гидравлического радиуса $\Delta R/R = 1\%$, уклона $\Delta I/I = 6\%$.

2. Гидравлический радиус $R_1 = 6,0$ м и $R_2 = 1,2$ м.

3. Коэффициент шероховатости по приложению 1 $n_1 = 0,030$ и $n_2 = 0,025$.

Требуется: вычислить погрешность коэффициента Шези при определении его по фактическим измерениям и по эмпирическим формулам.

Решение: в зависимости от метода определения коэффициента C изменяется и метод определения его точности.

а. При наличии данных измерений $C = v/\sqrt{RI}$, и относительная погрешность определения C зависит от погрешности измерений v , R , I и может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta R}{(2R)} + \frac{\Delta I}{(2I)}. \quad (3.88)$$

На значение C большое влияние оказывает погрешность измерения v и I , так как значение гидравлического радиуса может быть определено с достаточной точностью.

Для данного примера по формуле (3.88) получим $\Delta C/C = 5,5\%$.

б. При определении коэффициента C по эмпирическим формулам в данном упражнении для оценки точности рассмотрим только формулу Н. Н. Павловского при $R > 1,0$ м.

Г. В. Железняков и Б. Б. Данилевич предложили формулу относительной погрешности C в виде

$$\frac{\Delta C}{C} = 1,3 \sqrt{n} \frac{\Delta R}{R} + (1 - 1,3 \sqrt{n} \ln R) \frac{\Delta n}{n}. \quad (3.89)$$

В формуле известно все, кроме погрешности определения n . Значение n получено по приложению 1.

Для определения погрешности коэффициента шероховатости предлагается табл. 3.29, полученная следующим образом: например для n равных 0,040 и 0,050 среднее значение коэффициентов $(0,040 + 0,050) : 2 = 0,045$, разность $0,050 - 0,040 = 0,010$. Разность по отношению к среднему значению в % равна $\frac{0,010}{0,450} \cdot 100 = 22\%$. Таким образом, разность двух смежных значений n составляет 10—35 % по отношению к среднему значению. Считая, что при выборе n из таблицы всегда возможна ошибка порядка полуразности двух смежных градаций, примем относительную погрешность $\Delta n/n$ равной 5—18 %.

Таблица 3.29

Коэффициенты шероховатости n
и их разности по приложению 1

Коэффициент шероховатости	Разность смежных значений Δn в %	Коэффициент шероховатости	Разность смежных значений Δn в %
		0,050	22
0,020	12	0,065	26
0,025	18	0,080	21
0,030	16	0,100	22
0,035	13	0,140	32
0,040		0,200	35

Рассмотрим для данного примера $\Delta n/n$. Коэффициент шероховатости был задан $n = 0,030$. По табл. 3.29 две смежные разности 18 и 16. Исходя из вышеизложенного $\Delta n/n = (9 + 8) : 2 = 8,5\%$.

Подставляя в формулу (3.89) известные значения, получим $\Delta C/C = 1,3 \sqrt{0,030} \cdot 1 + (1 - 1,3 \sqrt{0,030} \ln 6) \cdot 8,5 = 5,38\%$.

Погрешности значений коэффициента Шези, вычисленных различными способами при одинаковых исходных данных, получились очень близкими: 5,5 и 5,38 %.

Произведем аналогичный расчет $\Delta C/C$. При $R_2 = 1,2$ м, $n_2 = 0,025$ $\Delta n/n = (6 + 9) : 2 = 7,5$ %. По формуле (3.89) $\Delta C/C = 1,3 \sqrt{0,025 \cdot 1 + (1 - 1,3 \sqrt{0,025} \ln 1,2)}$ $7,5 = 7,43$ %.

Упражнение 3.22. Вычисление погрешности измерения скорости течения воды поверхностными поплавками на небольшой и широкой реках.

Д а н о: 1. Результаты измерений на небольшой реке: расстояние между створами $L = 25$ м, время прохождения поплавком этого расстояния $t_n = 30$ с, толщина створной веши $d = 0,025$ м, расстояние от наблюдателя до створной веши $l = 5$ м, от створной веши до поплавка $b = 15$ м.

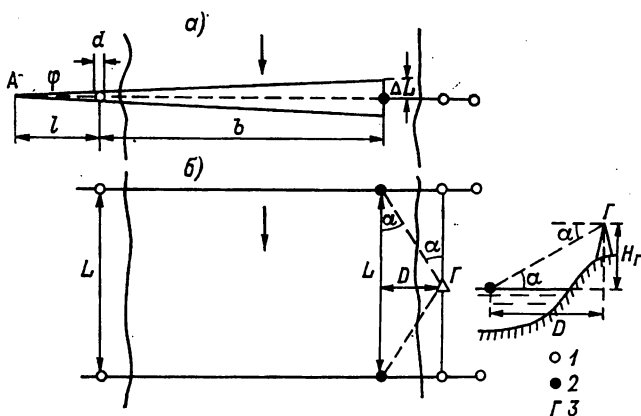


Рис. 3.16. Схема к определению погрешностей измерения скоростей течения поплавками

1 — поплавок, 2 — створные знаки, 3 — стойка инструмента

2. Результаты измерений на широкой реке: высота инструмента над уровнем воды $H_r = 24$ м, расстояние от инструмента до поплавка $D = 20$ м, угол между направлением на поплавок и направлением на магистраль $\alpha = 17^\circ$, время прохождения поплавком расстояния между створами $t_n = 59$ с.

Т р е б у е т с я: рассчитать относительные погрешности определения скоростей.

Р е ш е н и е: погрешности, возникающие при измерении поверхностных скоростей поплавками, рассмотрим по рекомендациям, приведенным в [17]. Поверхностная скорость измерения поплавками определяется по формуле (3.78). Относительная погрешность вычисления скорости складывается из погрешности измерения расстояния и времени

$$\frac{\Delta v_n}{v_n} = \frac{\Delta t_n}{t_n} + \frac{\Delta L}{L} \quad (3.90)$$

Расстояние между створами назначается с таким расчетом, чтобы время движения поплавок было не менее 20 с (допускается 10 с при $v = 2$ м/с на извилистых участках рек). При точности определения времени по секундомеру 0,1 с пределы относительной погрешности от $0,1 \cdot 100 : 20 = 5\%$ до $0,1 \cdot 100 : 10 = 1\%$. Относительная погрешность измерения магистрали при измерении ее стальной лентой равна $\Delta L/L = 1 : 2000 = 0,05\%$.

1. Измерения на небольшой реке. На рис. 3.16 в точке А находится наблюдатель, который отмечает момент прохождения поплавок через створ. На расстоянии l от наблюдателя установлена створная веха толщиной d . Угол φ между двумя касательными к боковым поверхностям вехи равен

$$\varphi = d\rho/l, \quad (3.91)$$

где ρ — число минут в одном радиане, равно 3438.

При расстоянии до поплавок b погрешность ΔL равна

$$\Delta L = \varphi b/(2\rho). \quad (3.92)$$

Относительная погрешность $\Delta L/L$ выражается формулой

$$\Delta L/L = \varphi b/(2\rho L), \quad (3.93)$$

где L — длина пути поплавок.

Рассмотрим погрешность измерения скорости течения по исходным данным:

а) $\Delta t_n/t_n = 0,1 \cdot 100 : 30 = 0,33\%$;

б) $\varphi = 0,025 \cdot 3438 : 5 = 17'$, $\Delta L/L = 17 \cdot 15 \cdot 100 : (2 \cdot 3438 \cdot 25) = 0,15\%$;

в) общая относительная погрешность измерения скорости поверхностными поплавками в данном примере равна $\Delta v_n/v_n = 0,33 + 0,15 = 0,48\%$.

Как видно из полученных данных, при небольших ширине и длине участка погрешность определения скорости поверхностными поплавками незначительна.

2. Измерения на широкой реке. Место прохождения поплавок по створу определяется инструментальными засечками. Возникают погрешности определения расстояния от инструмента до поплавок D (см. рис. 3.16 б). Относительная погрешность определяется по формуле [17]:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta H_r}{H_r} + \frac{2\Delta\alpha}{(\rho \sin 2\alpha)}, \quad (3.94)$$

где H_r — высота инструмента над поверхностью воды; α — вертикальный угол.

Рассмотрим подсчет $\Delta D/D$ на конкретном примере.

При $H_r = 24$ м примем $\Delta H_r = 5$ мм = 0,005 м, погрешность измерения вертикального угла $1'$. При $\alpha = 17^\circ$, $\sin 2\alpha = \sin 34^\circ = 0,55919$ по формуле (3.94) получаем

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{0,005}{24} + \frac{2 \cdot 1}{(3438 \cdot 0,55919)} = 0,00021 + \frac{2}{1922} = 0,12\%.$$

Значение $\Delta D/D$ будет увеличиваться с уменьшением угла α и высоты инструмента.

Погрешность определения расстояния двумя засечками $\Delta L/L = 2\Delta D/D = 0,24 \%$.

$$\frac{\Delta t_n}{t_n} = 0,1 \cdot 100 : 59 = 0,17\%.$$

Общая погрешность определения скорости течения поверхностным поплавком на широкой реке

$$\frac{\Delta v_n}{v_n} = \frac{\Delta t_n}{t_n} + \frac{\Delta L}{L} = 0,17 + 0,24 = 0,41\%.$$

Как видно из полученных значений, погрешности поплавочных измерений на небольших и широких реках имеют один порядок.

Упражнение 3.23. Вычисление погрешности определения средней скорости на вертикали.

Д а н о: 1. Глубина вертикали, исправленная на относ троса (при угле 20°), $h = 5,87$; погрешность исправленной глубины $\Delta h = 0,12$ м, высота точки закрепления троса над поверхностью воды $H = 5,60$ м.

2. Угол между направлением скорости и нормалью (косина струи) $\beta = 15^\circ$.

3. Средняя скорость на вертикали, вычисленная аналитически по пятиточечной формуле, $v_{cp} = 1,52$ м/с.

4. Значение коэффициента Шези в зависимости от условий шероховатости $C = 30$ м^{0,5}/с.

5. Погрешность градуирования вертушки принимается 1,2 %.

Т р е б у е т с я: вычислить погрешности: 1) определения скорости в полевых условиях, 2) обработки, 3) средней скорости на вертикали.

Р е ш е н и е: 1. Погрешность определения средней скорости на вертикали получается за счет: а) градуирования вертушек, б) полевых измерений, в) способов вычисления средней скорости на вертикали.

Рассмотрим порядок вычисления погрешностей соответственно пунктам, требуемым данным упражнением.

Погрешности полевых измерений делятся на два вида:

1) за счет несовпадения оси вертушки в данной точке с направлением потока. Эта погрешность зависит от косины струи и типа вертушек.

При $\beta = 15^\circ$ для некомпонентной вертушки $\Delta v/v = 2,0 \%$, (табл. 3.30).

2) за счет неточной установки вертушки на вертикали — вычисляется по формуле

$$\Delta v/v = \Delta h/(0,17hC), \quad (3.95)$$

где h — исправленная глубина, м; Δh — погрешность исправленной глубины, м; C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с.

Таблица 3.30

Погрешность $\Delta v/v$ % за счет несовпадения оси вертушки с направлением потока

№ п.п	Угол косины струй, °	Вертушка		№ п.п	Угол косины струй, °	Вертушка	
		компонентная	некомпонентная			компонентная	некомпонентная
1	5	0,3	0,6	5	25	1,6	3,1
2	10	0,6	1,3	6	30	2,0	4,3
3	15	0,9	2,0	7	35	2,4	5,2
4	20	1,3	2,8				

Подставив известные значения в формулу (3.95), получим погрешность за счет неточной установки вертушки $\Delta v/v = \frac{0,12}{0,17 \cdot 5,87 \cdot 30} 100 = 4 \%$.

2. Погрешности за счет неточности формул для вычисления средней скорости (а также и за счет неточности графического способа) зависят от глубины и коэффициента Шези. Эта зависимость представлена в табл. 3.31.

Таблица 3.31

Погрешность $\Delta v/v$ % вычисления средней скорости по пятиточечной формуле

$C \text{ м}^{0,5}/\text{с}$	$h \text{ м}$				
	1,0	3,0	5,0	7,5	10,0
10	5,1	1,7	-1,2	-3,5	-4,6
35	2,0	-0,7	-0,5	-1,4	-1,9
50	1,0	-0,4	-0,2	-0,7	-0,9

Для данного примера по табл. 3.31 при $C = 30 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ и $h = 5,8 \text{ м}$, интерполируя, получим погрешность $-0,7 \%$.

3. Общая относительная погрешность определения средней скорости на вертикали равна сумме всех рассмотренных выше

$$\Delta v/v = 1,2 + 0,4 - 0,7 = 0,9\%$$

Погрешность при средней скорости $v = 1,52 \text{ м/с}$ получится равной $0,13 \text{ м/с}$.

Упражнение 3.24. Определение коэффициента Кориолиса водотока.

Д а н о: исходные материалы упражнения 4.2.

Т р е б у е т с я: 1. Построить тахиграфическую кривую.

2. Вычислить коэффициент Кориолиса.

Решение: 1. При изучении потока возникает необходимость определения коэффициента Кориолиса α , т. е. коэффициента кинетической энергии (корректива скорости).

Железняков [13] рекомендует использовать для вычисления α графический способ изотах.

В табл. 4.4а приведены сведения о расходах воды, а в табл. 3.32 — о площадях, ограниченных изотахами, по которым производятся вычисления.

По данным табл. 3.32 на рис. 3.17 представлена тахиграфическая кривая. Коэффициент Кориолиса можно выразить в виде интеграла

$$\alpha = \int_0^1 \left(\frac{v}{v_{\text{ср}}} \right)^3 \frac{df_v}{F} \quad (3.96)$$

Полученная на рисунке площадь, ограниченная тахиграфической кривой и осями ординат, численно равна значению α по формуле (3.96).

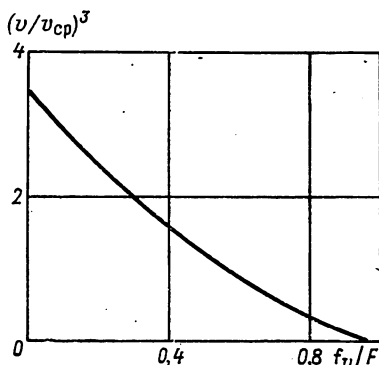


Рис. 3.17. Тахиграфическая кривая

Площадь, ограниченная тахиграфической кривой, определена планиметрированием и $\alpha = 1,50$.

Таблица 3.32

К расчету коэффициента Кориолиса
р. Педедзе — с. Литене, 20/VII 1962 г.

v м/с	Площадь, ограниченная изотаксой f_v м ²	f_v/F	$v/v_{\text{ср}}$	$(v/v_{\text{ср}})^3$
0,90	6,04	0,079	1,53	3,56
0,80	14,3	0,186	1,36	2,40
0,10	75,0	0,983	0,17	0,049
0,00	76,4	1,00	0	0

2. В упражнении 1.2 рассмотрен пример использования формулы (1.6) для определения α . Здесь приводится другая формула Железнякова для вычисления α через число Фруда, применимая для равнинных и горных рек:

$$\alpha = 1 + 0,88 \left(0,34 + \frac{1 + \sqrt{I/\text{Fr}}}{2,3 + 0,3 \sqrt{\text{Fr}/I}} \right)^2 \quad (3.97)$$

По данным упражнения 4.2 $v = 0,59$ м/с, $h_{\text{ср}} = 2,30$ м; определяем число Фруда $Fr = 0,0165$. Подставим в формулу (3.97) значение $I = 0,0017$, получим $\alpha = 1,51$. Как видно, значения α получились близкими.

Глава 4.

4

Расход воды

4.1. Приведение расхода воды к расчетному уровню

Упражнение 4.1. Определение расчетного уровня при измерении расхода воды.

Дано: 1. В начале измерения расхода воды уровень был 350 см над нулем графика, к концу работ уровень понизился на 35 см (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Наблюдения за уровнем на гидрологическом посту
р. Сырдарья — с. Чиназ, 8/VI 1968 г.

Наблюдения на основном посту		№ вертикали	Время работы в точке 0,6 л. ч мин	Уровень с графика H см
ч/мин	уровень над нулем графика, см			
10 10	350	1	10 10	350
11 00	337	2	10 25	346
12 00	322	8	12 30	315
12 30	315			

2. Сведения о расходах воды на вертикалях (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Выписка из книжки для записи измерения расхода воды основным способом
р. Сырдарья — с. Чиназ, 8/VI 1968 г.

№ скоростной вертикали	Расстояние от постоянного начала b м	Расход воды на вертикали q м ³ /с
Ур. пр. б. 1	2,00 39,0	0,00 3,18
..... 8	..... 150	..... 1,66
Ур. л. б.	184	0,00

- Т р е б у е т с я: 1. Вычислить уровень для каждой вертикали.
2. Определить расчетный уровень расхода воды.

Р е ш е н и е: 1. Измерение уровня воды во время определения расхода производится на основном посту и, если имеется пост, на гидростворе. На рис. 4.1 приведен график хода уровня, построенный по данным за четыре срока наблюдений (табл. 4.1). Вертикальный масштаб для такого графика следует брать 1 мм — 1 см. Зная время работы на каждой вертикали, путем линейной интерполяции получаем по графику уровень на каждой вертикали H_1, H_2, \dots, H_n (табл. 4.3).

2. Определение расчетного уровня производится в зависимости от расстояния между вертикалями. При неравномерном распределении вертикалей, когда расстояния b между ними (кроме при-

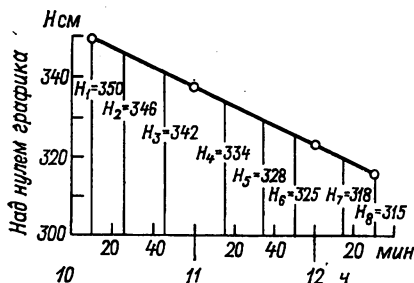


Рис. 4.1. Ход уровня в период измерения расхода воды
р. Сырдарья — с. Чиназ, 3/VI 1968 г.

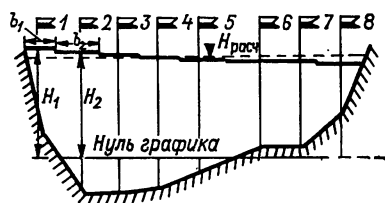


Рис. 4.2. Схема к вычислению расчетного уровня
р. Сырдарья — с. Чиназ, 3/VI 1968 г.

брежных вертикалей) различаются более чем на 25 %, для расчета среднего уровня применяется формула

$$H_{\text{расч}} = \frac{(H_1 q_1 b_1 + H_2 q_2 b_2 + \dots + H_n q_n b_n)}{(q_1 b_1 + q_2 b_2 + \dots + q_n b_n)}, \quad (4.1)$$

где H_1, H_2, \dots, H_n — уровень над нулем графика, см; относящийся по времени к моменту измерения скорости на глубине $0,6 h$, q_1, q_2, \dots, q_n — расходы воды на вертикалях $q = v h$ м³/с; b_1, b_2, \dots, b_n — частичные ширины реки, приходящиеся на 1, 2, ... n -ю скоростные вертикали.

На рис. 4.2 представлена схема к вычислению расчетного уровня для данного расхода.

Если расстояния между скоростными вертикалями почти одинаковы, то расчет уровня можно производить по более простой формуле

$$H_{\text{расч}} = \frac{(H_1 q_1 + H_2 q_2 + \dots + H_n q_n)}{(q_1 + q_2 + \dots + q_n)}. \quad (4.2)$$

В табл. 4.3 приведено вычисление расчетного уровня по формулам (4.1) и (4.2). Подставив известные значения в эти формулы,

получим: $H_{\text{расч}} = 304\,616 : 911,2 = 335$ см; $H_{\text{расч}} = 13\,081 : 39,13 = 334$ см.

Таблица 4.3

Вычисление расчетного уровня воды
р. Сырдарья — с. Чиназ, 8/VI 1968 г.

№ вертикали	Уровень	Частичная ширина b м	Расход на вертикали q м ³ /с	Hqb	qb	Hq
1	350	37	3,18	41 300	118	1 113
8	315	34	1,66	17 766	56,4	523
			39,13	304 616	911,2	13 081

На рис. 4.2 $H_{\text{расч}} = 334$ см. После определения расчетного уровня следует произвести срезку глубин для каждой промерной вертикали и подсчитать площадь по новым глубинам.

4.2. Расход воды, измеренный вертушкой при свободном русле

Упражнение 4.2. Вычисление расхода воды аналитическими и графическими методами и сопоставление полученных данных.

Дано: запись полевых измерений расхода производится на сети в новые формы книжек КГ-3М. Порядок помещения полевых данных с учетом принятых в настоящее время кодов для автоматизированной обработки рассмотрен в упражнении 10.3. В связи с невозможностью помещения в пособие большого числа таблиц приведены только сокращенные сведения, необходимые для вычисления расходов всеми методами без примеров их кодирования и без общих условий обстановки работ.

Сведения о промерах, измерении скоростей, вычислении площади водного сечения и расхода воды приведены в табл. 4.4. Измерения скоростей производились вертушкой ГР-21, число оборотов за прием 40.

Рассмотрим общие положения о применении методов вычисления расхода воды.

В данном упражнении рассматривается большое число методов, методически связанных между собой; порядок выполнения каждого состоит из большого числа операций, которые по структуре данного пособия обычно перечисляются в пункте «Требуется». В данном случае автор считает удобным дать дополнительные для каждого способа разделы «Требуется» и «Решение», оставив в настоящем разделе только общие пояснения.

Расходом воды называется количество воды, протекающей через живое сечение потока в единицу времени. Расход воды в реках выражается в кубических метрах в секунду и обозначается Q м³/с. Расход является главной характеристикой речного потока, от которой зависит колебание уровня, скорость течения, уклон водной поверхности, движение наносов и пр.

На рис. 4.3 представлено поперечное сечение русла, в котором выделена элементарная площадка со сторонами dh и db и площадью

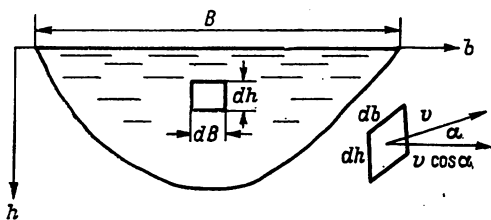


Рис. 4.3. Схема и вычислению расхода воды

$df = dhdb$. К площадке подходит поток со скоростью, направленной под некоторым углом α к нормали. Расход воды через элементарную площадку dq выражается формулой

$$dq = v \cos \alpha df. \quad (4.3)$$

Расход через элементарные площадки изменяется по сечению в зависимости от расположения их по отношению к берегу, дну и поверхности воды, так как $v = f(h)$.

Расход через все поперечное сечение русла может быть представлен зависимостью

$$Q = \int_F v \cos \alpha df. \quad (4.4)$$

Если вектор скорости для каждой элементарной площадки направлен по нормали (что обычно достигается выбором направления гидрометрического створа), то $\cos \alpha = 1$, тогда формула будет иметь вид

$$Q = \int_F v df. \quad (4.5)$$

Если на некоторых участках реки наблюдается косина струй, то вводятся соответствующие поправки.

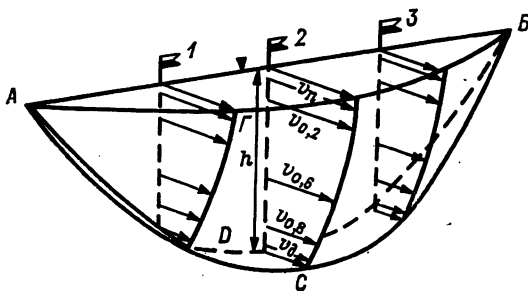


Рис. 4.4 Модель расхода воды

Таблица 4.4
 Запись и обработка данных полевых измерений
 р. Пеледзе — с. Лигене, 20/VIII 1962 г.
 а. Промеры

1	2	Глубина, м			6	Площадь живого сечения, м ²		9	Вычисленные расходы воды			
		3	4	5		7	8		10	11	12	13
№ промерной или скоростной вертикали	Расстояние от пост. начала, м	измеренная	Рабочая со срезкой	между вертикалями	Расстояние между вертикалями, м	между промерными вертикалями	между скоростными вертикалями	№ скоростной вертикали	Средняя скорость, м/с	Между скоростью вертикалями	площадь живого сечения между вертикалями, м ²	расход между вертикалями, м ³ /с
Ур. л. б.	7,80	0,00	0,00	0,34	1,20	0,41		Ур. л. б.	0,00	$k = 0,7$		
1	9,00	0,66	0,67					1	0,36	0,25	4,87	1,22
...
1/4	12,0	2,14	2,15					...	...	...	...	...
...
32	40,0	0,59	0,60					7	0,48	0,34	7,82	2,66
Ур. пр. б.	41,0	0,00	0,00	0,30	1,00	0,30	7,82	Ур. пр. б.	0,00	$k = 0,7$		
												$Q = 44,8$

$$F = 76,5 \quad f = 76,5$$

б. Измерения на скоростных вертикалях

№ вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Рабочая глубина, м	Скорость, м/с	Средняя скорость	Глубина погружения вертушки		Отсчет по шап-ге или счетчику глубин	Число сигналов	Сумма оборотов	Продолжительность измерения, с	Число оборотов в секунду		
					в долях глубины	в метрах							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	12,0	2,15	0,44	0,36	0,00	0,10	2,05	6	240	120	2,00		
			0,40		0,2	0,43	1,73	6	240	134	1,79		
					0,15								
					0,4								
			0,35		0,6	1,30	0,76	4	160	101	1,58		
	0,5												
	0,32	0,8	1,73	0,43	4	160	111	1,44					
		0,85											
	0,30	1,0	1,90	0,25	4	160	117	1,37					

Расход воды на вертикали, исходя из эпюры скоростей, может быть выражен формулой

$$q = \int_0^h v dh. \quad (4.6)$$

Общий расход воды равен

$$Q = \int_0^B q db. \quad (4.7)$$

Для пояснения полученных формул рассмотрим рис. 4.4, на котором представлена площадь поперечного сечения потока, ограниченная линией смоченного периметра *АДБ*. В поперечном сечении намечены три скоростные вертикали, на которых нанесены эпюры скоростей, полученные в результате многоточечных измерений скоростей в пяти точках по глубине *h*. Если представить себе большее число скоростных вертикалей с известным уменьшением скоростей на них к урезам и дну, то можно провести для всего сечения линию поверхностных скоростей *АГБ* и линию донных скоростей *АСБ*. В результате такого построения, как видно на рисунке, получен объем водного тела, который называется моделью расхода воды. Модель расхода ограничивается сложными криволинейными поверхностями *АГБСА* и *АДБСА*.

Вычисление расхода воды в речном потоке сводится к задаче определения объема модели расхода. Определить этот объем можно было бы интегрированием приведенных уравнений, но, так как закон распределения скорости с глубиной и шириной $v = f(h, v)$ в настоящее время не имеет еще точного математического решения, интегрирование заменяется рядом приближенных решений.

Приближенные решения основаны на разделении модели расхода плоскостями в различных направлениях.

Вычисление расходов воды производится аналитическими и графическими методами.

Аналитическим методом вычисляются расходы вне зависимости от степени детальности измерения сразу после его определения. Аналитические методы применяются при: многоточечном способе измерения и основном способе.

Графическим методом вычисляются расходы, измеренные многоточечным способом, в сложных случаях (при сильно зашугованных руслах, измерении расхода под мостом) и при измеренных расходах основным способом. К графическим методам относятся: 1) основной с построением эпюр на вертикалях, 2) графоаналитический, 3) способ изотах и 4) способ изотах с использованием тахиграфической кривой.

Независимо от метода вычисления расхода воды необходимо произвести первичную обработку книжки полевых измерений, состоящую из: а) общего критического просмотра записей в книжке, б) вычисления расчетного уровня при промерах и расходе; определения срезки; в) проверки записи на каждой скоростной вертикали и вычисления скорости в точке.

Рассмотрим указанные этапы обработки.

а. Просматривая книжку для записи измерения расхода воды, следует проверить полноту и согласованность заполнения всех граф. В данном примере гидроствор совпадает со створом водомерного поста. Водное сечение не содержит мертвого пространства и является полностью живым сечением. В полевых условиях при измерении расхода воды многоточечным способом техник строит в книжке эпюры скорости на вертикали и эпюру скорости по ширине реки над профилем и анализирует эпюры, так как по их чертанию можно обнаружить ошибку.

б. Промеры и определение расхода производились в один день, причем уровень воды при промерах принят 292 см над нулем графика.

Уровень воды во время измерения скоростей течения принят 293 см над нулем графика.

Срезка уровня ΔH определяется как разность между уровнем при расходе и промерах; она может быть положительной и отрицательной

$$\Delta H = H_{\text{расх}} - H_{\text{пром}} \quad (4.8)$$

В данном примере $H = 293 - 292 = + 1 \text{ см} = + 0,01 \text{ м}$.

Полученная срезка введена в значение рабочей глубины (графа 4 табл. 4.4 а); глубина со срезкой для вертикали № 1 равна $0,66 + + 0,01 = 0,67 \text{ м}$.

в. Проверка записи на каждой скоростной вертикали и вычисление скорости в точке производится согласно указаниям упражнения 3.3.

После произведенной предварительной обработки книжки приступают к вычислению расхода воды перечисленными выше методами.

Аналитические методы вычисления расхода воды

При аналитических методах вычисления расхода воды по данным измерений вертушкой модель расхода разделяется вертикальными плоскостями, перпендикулярными площади водного сечения. Число этих плоскостей соответствует числу скоростных вертикалей, для которых известны эпюры скорости.

В основу расчета положена формула $Q = \int_F vdf$. Этот способ получил название «скорость — площадь».

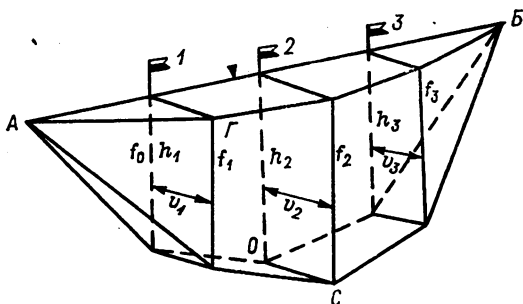


Рис. 4.5. Расчетная модель расхода

На рис. 4.5 представлена расчетная модель расхода к аналитическому методу, которая, в отличие от модели расхода на рис. 4.4 упрощена следующим образом. Для каждой вертикали определена средняя скорость v_1 , v_2 и v_3 , и каждая эпюра скорости в этом случае представляет собой прямоугольник (около урезов — пирамида) с основанием v_1 , v_2 и v_3 и высотой соответственно h_1 , h_2 и h_3 . При таком построении эпюр линии поверхностных скоростей $AГБ$ и донных скоростей ACB являются уже ломаными. Площадь водного сечения между скоростными вертикалями может быть подсчитана точно. При большом числе промерных вертикалей линия смоченного периметра заменяется ломаными отрезками. Таким образом, сложное водяное тело — модель расхода — заменяется рядом правильных геометрических фигур, объем которых может быть подсчитан точно и интеграл $Q = \int vdf$ аппроксимируется следующим образом:

$$Q = kv_1f_0 + (v_1 + v_2) f_1/2 + \dots + (v_{n-1} + v_n) f_{n-1}/2 + kv_n f_n, \quad (4.9)$$

где Q — полный расход воды, m^3/c ; v_1, v_2, \dots, v_n — средние скорости на вертикалях, m/c ; f_0 — площадь водного сечения между берегом (границей мертвого пространства) и первой скоростной вертикалью, m^2 ; f_1, f_2, \dots, f_{n-1} — площадь между скоростными

вертикалями, m^2 ; f_n — площадь водного сечения между последней скоростной вертикалью и берегом (границей мертвого пространства); k — коэффициент для скоростей на прибрежных вертикалях, принимаемый по табл. 4.5.

Таблица 4.5

Значения коэффициента k

Условия прибрежных зон	k
Пологий берег с глубиной на урезе $h = 0$ м	0,7
Обрывистый берег или неровная стенка	0,8
Гладкая стенка	0,9
Наличие мертвого пространства	0,5

Рассмотрим разновидности аналитических методов и порядок расчета расхода воды.

1. Многоточечный способ измерения расхода воды.

Т р е б у е т с я: 1. Обработать данные промеров и вычислить площади водного сечения между скоростными вертикалями.

2. Вычислить средние скорости на вертикалях.

3. Вычислить расход воды.

4. Заполнить таблицы «Обстановка работ» и «Принятые данные».

Р е ш е н и е: 1. В табл. 4.4 а (в графах 1—4) приведены записи полевых измерений. Глубины измерены на 32 вертикалях, из них на семи скоростных; мертвого пространства не было; расстояние между промерами 1 м. Глубина измерялась в один ход.

Вычисление площади водного сечения начинается с вычисления площадей между промерными вертикалями.

В графе 5 приведены средние глубины $h_1, (h_1 + h_2)/2$ и т. д., а в графе 6 — расстояния между промерными вертикалями b_1, b_2, \dots, b_{n+1} ; в графе 7 — площадь на участке л. б.— верт. № 1 $0,67 \cdot 12,0 : 2 = 0,41 \text{ м}^2$. Аналогично вычисляются площади между промерными вертикалями.

На рис. 4.6 приведена схема, согласно которой вычисляется площадь водного сечения между скоростными вертикалями № 1 и 7. Дополнительные пояснения схема не требует. Значения площадей $f_0 = 4,87 \text{ м}^2$ и $f_n = 7,82 \text{ м}^2$ записываются в графу 8 табл. 4.4 а. Сумма площадей в графе 8 $F = 76,5 \text{ м}^2$.

2. Средние скорости на вертикалях табл. 4.4 б (графа 5) вычислены по формуле (3.14).

Для вертикали № 1 $v_{ср} = 0,1 (0,44 + 3 \cdot 0,40 + 3 \cdot 0,35 + 2 \times 0,32 + 0,30) = 0,36 \text{ м/с}$. Средняя скорость близка к скорости, измеренной в точке $0,6 h$. Аналогично вычисляются скорости для всех вертикалей.

3. Вычисление расхода воды проводится в табл. 4.4 а в графах 9—13 в следующем порядке:

а) в графу 9 выписываются урез левого берега, все скоростные вертикали и урез правого берега; б) из графы 5 табл. 4.4 б выписываются вычисленные средние скорости (графа 10); в) из графы 8 табл. 4.4 а выписываются площади между скоростными вертикалями; г) вычисление расхода воды проводится по формуле (4.9).

Приведем пример расчета для участка урез л. б.— верт. № 1

$$Q = kv_1 b_0.$$

По табл. 4.5 при пологом берегу и глубине на урезе $h = 0$ можно принять $k = 0,7$. Подставим все известные значения $Q_{\text{част}} = 0,7 \cdot 0,36 \cdot 4,87 = 1,22 \text{ м}^3/\text{с}$.

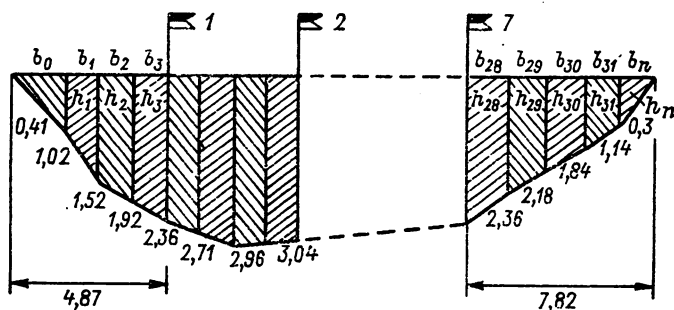


Рис. 4.6. Схема к вычислению площадей водного сечения между скоростными вертикалями

Аналогично рассчитываются все частичные расходы между скоростными вертикалями и подсчитывается общий расход воды $Q = 44,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

4. По окончании вычисления расхода воды необходимо заполнить в книжке КГ-ЗМ таблицы «Обстановка работ» и «Принятые данные». В упражнении 10.2 для расхода р. Оки у г. Калуги за 5/II 1979 г. подробно изложена методика применения кодов для этих разделов (табл. 10.5, строки 2—6).

В данном упражнении для расхода р. Педезде у с. Литене средняя скорость вычисляется по формуле

$$v_{\text{ср}} = Q/F,$$

где Q — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; F — площадь водного сечения, м^2 ; $v_{\text{ср}} = 44,8 : 76,5 = 0,58 \text{ м/с}$.

Наибольшая скорость выбирается из измеренных скоростей в точках $v_{\text{наиб}} = 0,94 \text{ м/с}$, что соответствует поверхностной скорости на вертикали № 5. Ширина по уровню воды B_y может быть определена по профилю для расчетного уровня, если уровень за время работ не изменялся, как разность между расстояниями от постоянного начала до урезов $B = 41,0 - 7,80 = 33,2 \text{ м}$.

Средняя глубина вычисляется по формуле (2.10) $h_{\text{ср}} = 76,5 : 33,2 = 2,30 \text{ м}$.

Наибольшая глубина выбирается из всех измеренных глубин, в данном примере $h_{\text{наиб}} = 3,06$ м. Уклон водной поверхности вычисляется в промилле ‰ (падение в метрах на 1 км) $I = 1,7 ‰$.

2. Основной способ измерения расхода воды (упрощенный аналитический метод).

Т р е б у е т с я: вычислить средние скорости на вертикалях и расход воды в сечении.

Р е ш е н и е: считается, что основной способ измерения расхода воды при количестве вертикалей не менее пяти и при измерении скорости в одной-двух точках на вертикали обеспечивает точность $\pm 3 \%$ по сравнению с расходом, измеренным многоточечным способом. Метод применяется для русел, свободных от растительности и льда. Полевые наблюдения за скоростями при основном способе измерения несколько отличны от наблюдений при многоточечном способе и подробно рассмотрены в упражнении 3.8.

Для данного примера при вычислении средней скорости на вертикали используется аналитическая формула (3.13).

Вычисление расхода воды производится по формуле аналитического метода в табл. 4.6 (графы 7—10).

Сущность упрощенного аналитического способа заключается в том, что площадь поперечного сечения вычисляется только по глубинам скоростных вертикалей. Этот способ может быть применен только при правильной корытообразной форме поперечного сечения, небольших глубинах и ширине русла.

Вычисление площади водного сечения по глубинам семи скоростных вертикалей произведено по формуле (2.7) в табл. 4.6, (графы 4—6).

В случае если число скоростных вертикалей совпадает с числом промерных, то в Наставлении [37] рекомендуется применять видоизмененный вариант аналитического способа.

Частичный расход для каждой вертикали подсчитывается по следующему соотношению:

$$q_4 = v_4 (b_5 - b_4) h_4 / 2, \quad (4.10)$$

где q_4 — частичный расход, например четвертой вертикали; v_4 — средняя скорость на этой вертикали; h_4 — глубина данной вертикали; b_5 и b_4 — расстояния от постоянного начала последующей от данной вертикали и предыдущей от нее. Полный расход равен сумме частичных расходов. Способ с 1959 г. используется как основной в США и целесообразен для ввода данных в ЭВМ.

Графические методы вычисления расхода воды

При графических методах модель расхода воды разделяется плоскостями в двух направлениях: 1) перпендикулярно площади сечения; в этом случае в основу расчета принимается формула (4.5) и вычисление расхода воды производится графическим и графоаналитическим методами; 2) параллельно площади водного сече-

Таблица 4.6

Вычисление расхода воды упрощенным аналитическим методом
р. Педдезе — с. Литене, 20/VIII 1962 г.

№ скоростной вертика- ли	Расстояние от пост. начала, м	Глубина, м	Площадь водного сечения, м ²			Вычисление расхода воды			
			расстояние между вертика- лями	глубина между вертикалями, м	площадь между скоростными вертикалями, м ²	Скорость средняя, м/с		площадь между скоростными вертикалями, м ²	расход между вертикалями, м ³ /с
						на ско- ростной вертикали	между вертика- лями		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
							$k = 0,7$		
Ур. л. б.	7,80	00,0				0,00			
			4,20	1,08	4,54		0,25	4,54	1,14
1	12,0	2,15				0,36			
...	...	...	...	...	...	...	0,56	9,52	5,33
7	36,0	2,36				0,48			
Ур. пр. б.			5,00	1,18	5,90		0,34	5,90	2,01
	41,0	0,00				0,00			
							$k = 0,7$		
								$F = 73,9 Q = 41,0$	

ния; в этом случае расход воды вычисляется методом изотак или изотак с использованием тахиграфической кривой.

Графические методы могут быть применены при многоточечных вертушечных измерениях. В отличие от аналитических методов, графические способы обеспечивают получение более точных решений при определении объема модели расходов. Это является следст-

Принятые данные	
$H_{см}$	293
$Q, м^3/с$	45,0
$F, м^2$	76,4
$U_{ср}, м/с$	0,59
$U_{наиб}, м/с$	0,94
$B, м$	33,2
$h_{ср}, м$	2,30
$h_{наиб}, м$	3,06
$I, ‰$	1,7

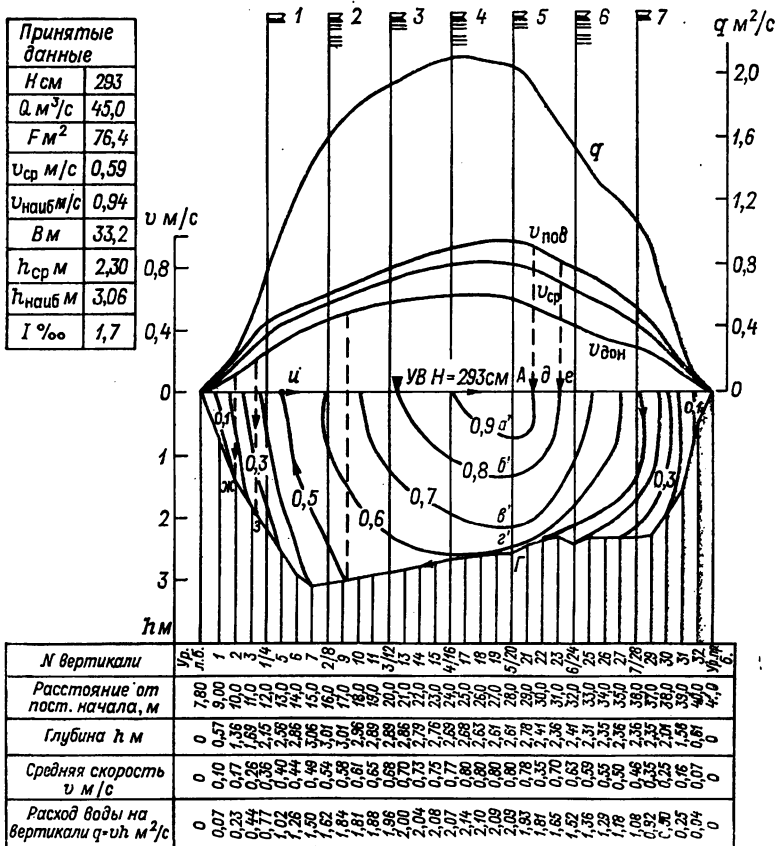


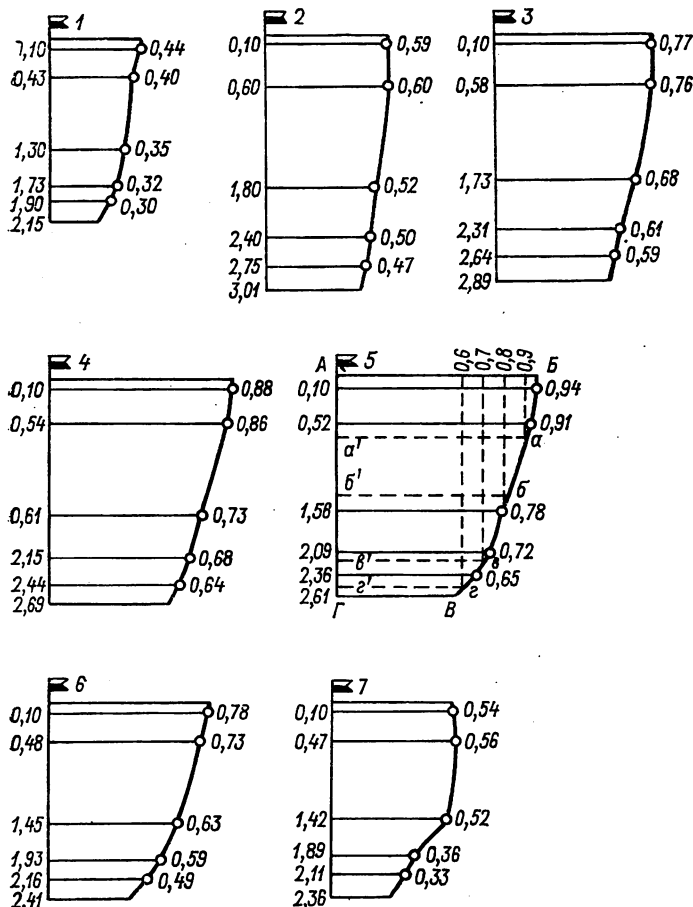
Рис. 4.7. Вычисление расхода воды графическим методом

вием того, что построение эпюры скоростей на вертикалях, эпюры средних скоростей и расходов, а также линий изотак позволяет точнее отобразить распределение этих элементов в русле. Наглядность всех построений дает возможность выявить ошибки как полевых измерений, так и возникающих при обработке исходных данных.

1. Графический метод с построением эпюр

Т р е б у е т с я : 1. Построить на миллиметровой бумаге профиль водного сечения.

2. На этом же листе миллиметровой бумаги построить эпюры скоростей на вертикалях и вычислить среднюю скорость графическим способом.



и по изотаксам. р. Педедзе — с. Литене, 20/VIII 1962 г.

3. Построить над профилем эпюру средних скоростей и определить скорость для каждой промерной вертикали.

4. Определить расход на каждой промерной вертикали и построить эпюру распределения расходов по ширине реки.

5. Вычислить расход воды, определив площадь эпюры расхода планиметрированием.

6. Составить таблицу «Принятые данные».

Решение: 1. На рис. 4.7 по данным табл. 4.4 строится профиль водного сечения. Вертикальный масштаб выбирается так, чтобы максимальная глубина была не менее 6—10 см, ширина русла — в пределах 12—20 см. Рекомендуются следующие горизонтальные масштабы: 1 : 50; 1 : 100; 1 : 200; 1 : 500; 1 : 1000; 1 : 2000; 1 : 5000; вертикальные масштабы назначаются в 5—20 раз

крупнее горизонтальных. В данном примере горизонтальный масштаб принят 1 : 200, а вертикальный 1 : 50. Скоростные вертикали в профиле водного сечения обозначаются вертикальными линиями с указанием номера вертикали. Под профилем выписываются: номера промерных и скоростных (в числителе) вертикалей, расстояния от постоянного начала и расчетные глубины.

2. Эпюры скоростей на вертикалях строятся под профилем или справа от него. Вертикальный масштаб глубины для вертикали должен совпадать с вертикальным масштабом профиля водного сечения (на рис. 4.7 1 : 50), а горизонтальный масштаб для скоростей выбирается с таким расчетом, чтобы у эпюр центральных вертикалей отношение наибольших скоростей к глубине было 0,7—1,0. В данном примере горизонтальный масштаб можно принять 1 см — 0,20 м/с, при котором для вертикалей № 4 и 5 отношение наибольшей скорости к глубине в пределах 0,81—0,90. Справа около эпюры выписываются значения скорости, слева — глубины точек измерения. Линия эпюры скорости проводится плавно по точкам.

Средняя скорость на вертикали вычисляется делением площади эпюры на глубину вертикали. Определение площади эпюры скоростей производится планиметрированием согласно указаниям упражнения 3.8.

Для вертикали № 1 площадь эпюры скоростей равна $82 \cdot 0,009440 = 0,77 \text{ м}^2/\text{с}$. При глубине $h = 2,15 \text{ м}$ средняя скорость

$$v_{\text{ср}} = \frac{\text{площадь эпюры, м}^2/\text{с}}{\text{глубина, м}} = \frac{0,77}{2,15} = 0,36 \text{ м/с}.$$

Аналогично вычисляются средние скорости графическим методом для всех вертикалей.

3. С левой стороны профиля наносится вертикальный масштаб, равный масштабу скоростей, который был принят при построении эпюр скоростей. На каждой скоростной вертикали в принятом масштабе откладывается средняя скорость. По полученным точкам проводится плавная кривая $v_{\text{ср}}$. Следует учитывать, что на участках от уреза до первой вертикали и от последней вертикали к урезу скорость изменяется медленно вследствие влияния трения у берегов и прибрежной подводной зоны, поэтому эпюру скоростей на этих участках следует проводить плавно, избегая резкого подъема кривой. Полученная эпюра средних скоростей показывает их распределение по ширине реки; с эпюры снимаются значения средней скорости для каждой промерной вертикали и выписываются в таблицу над профилем (см. рис. 4.7) в графу «средняя скорость» с точностью до 0,01 м/с.

4. Для каждой промерной вертикали вычисляется значение расхода воды по формуле $q = v h$. Значение расхода записывается с точностью до 0,01 м³/с под профилем на рис. 4.7. Следует проверить значение расхода q , которое должно быть равно площади эпюры скорости. Например, для вертикали № 1 площадь эпюры v

равна $0,77 \text{ м}^2/\text{с}$, значение расхода по вертикали № 1 $q = 0,36 \times 1,25 = 0,77 \text{ м}^2/\text{с}$.

Масштаб для построения эпюры распределения расходов по вертикалям намечается справа от профиля (см. рис. 4.7) и выбирается с таким расчетом, чтобы наибольшее значение расхода было 7—10 см. В выбранном масштабе 1 см — $0,20 \text{ м}^2/\text{с}$ по значениям q для всех промерных вертикалей строится эпюра расхода по всей ширине реки. В данном примере эпюра плавно повторяет ход эпюры средней скорости и линии дна. В случае резкого изменения кривой следует проверить вычисления и построение. Если около урезных участков есть граница мертвого пространства, то эпюра заканчивается у этой границы.

5. Расход воды вычисляется планиметрированием эпюры расхода по ширине реки, т. е. осуществляется интегрирование зависимости $Q = \int_0^B qdb$.

Планиметрирование производится согласно указаниям упражнения 3.8. Получаем $Q = 45 \text{ м}^3/\text{с}$ и $F = 76,4 \text{ м}^2$. Следует отметить, что при отсутствии планиметра площади эпюр скоростей на вертикалях, расход по ширине реки, а также площадь водного сечения можно определить палеткой или подсчетом квадратов на миллиметровой бумаге, хотя эти способы несколько снижают точность результатов. Можно применить и графо-аналитический способ, который рассматривается ниже.

6. Составление таблицы «Принятые данные» производится в соответствии с указаниями, приведенными к аналитическому методу вычисления расхода.

2. Графо-аналитический метод

При графо-аналитическом методе вычисление расхода воды применяется формула $Q = \int_0^B qdb$. Интегрирование заменяется аналитическим расчетом расхода по формуле

$$Q = kq_1b_0 + (q_1 + q_2)b_1/2 + \dots + (q_{n-1} + q_n)b_{n-1}/2 + kq_nb_n, \quad (4.11)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n — расходы на промерных вертикалях, $\text{м}^2/\text{с}$; b_1, b_2, \dots, b_n — расстояния между промерными вертикалями, м; $k = 0,7$.

Расход, вычисленный по формуле (4.11), равен $Q = 44,4 \text{ м}^3/\text{с}$ (расчет не приводится).

3. Метод изотак

Т р е б у е т с я: 1. Построить профиль водного сечения и эпюры скоростей на вертикалях.

2. Провести эпюры распределения поверхностных и донных скоростей по ширине реки.

3. Провести изотакхи в профиле водного сечения.

4. Определить планиметрированием площади, ограниченные изотакхами, и вычислить расход воды.

Решение: 1. Изотакхами называются линии равных скоростей течения, проведенные на чертеже скоростного поля водного сечения. Если модель расхода воды разделить плоскостями, параллельными плоскости водного сечения (рис. 4.8), то линии пересечения этих плоскостей с граничными поверхностями будут линиями изотакх.

Вычисление расхода методом изотакх производится с использованием профиля водного сечения и эпюр скоростей на вертикалях. Этот профиль и эпюры рассмотрены в графическом методе (рис. 4.7), поэтому построение не повторяется.

2. Для проведения эпюр поверхностных и донных скоростей по ширине реки с каждой эпюры скоростей на вертикали, приведенной на рис. 4.7, снимается значение поверхностной и донной скоростей и откладывается над профилем. Например, для вертикали № 4 $v_{\text{пов}} = 0,88$ м/с, а $v_{\text{дон}} = 0,58$ м/с (при измеренной у дна $v = 0,64$ м/с).

По полученным точкам плавно проводятся эпюры распределения поверхностных и донных скоростей, которые на рис. 4.7 обозначены $v_{\text{пов}}$ и $v_{\text{дон}}$.

3. Для проведения изотакх назначается определенная градация (сечение) их в зависимости от наибольшей скорости течения. Об-

Рис. 4.8. Модель к вычислению расхода по изотакхам

щее количество изотакх рекомендуется назначать не менее пяти, но не больше восьми—десяти. В данном примере $v_{\text{наиб}} = 0,94$ м/с. Следовательно, сечение изотакх можно принять равным 0,10 м/с, соответственно их количество будет девять: 0,90; 0,80; 0,70; 0,60; 0,50; 0,40; 0,30; 0,20; 0,10 м/с. Если количество изотакх получается недостаточным, то их сечение нужно уменьшить, например, до 0,05 м/с. При избыточно большом количестве изотакх их сечение можно увеличить до 0,20—0,25 м/с. Для точного проведения изотакх в водном сечении необходимо на поверхности каждой вертикали (см. рис. 4.7) на линии AB наметить в масштабе рисунка положение скоростей, соответствующих избранным по сечению изотакхам, например по вертикали № 5, наибольшая скорость которой $v_{\text{наиб}} = 0,94$ м/с, пройдут изотакхи: 0,90; 0,80; 0,70; 0,60 м/с.

Для определения места положения указанных изотакх по глубине вертикали сносим их на линию BB эпюры скорости точки a , b , v и z , а затем положение этих точек переносим в горизонтальной плоскости на линию AG ; в профиле водного сечения это будут

точки a' , b' , e' и z' , которые и определяют положение изотак 0,90; 0,80; 0,70; 0,60 м/с по глубине сечения на данной вертикали.

В период, свободный ото льда, изотак выходят на линию поверхности воды; точки выхода изотак увязываются с эпюрой распределения поверхностных скоростей. Например, на рис. 4.7 между вертикалями № 5 и 6 на поверхность выходят изотак 0,90 и 0,80 м/с. По эпюре $v_{\text{пов}}$ определяется в масштабе положение 0,90 и 0,80 м/с и проектируется на поверхность воды в точки d и e , которые и будут местом выхода изотак на поверхность.

Изотак в придонном слое подходят очень близко к линии дна. Выход изотак ко дну должен быть согласован с эпюрой распределения донных скоростей. Например, на вертикали № 1 по эпюре $v = 0,24$ м/с; следовательно, изотак 0,10 и 0,20 м/с не пройдут дальше, а замкнутся в дно на участке урез правого берега — вертикаль № 1. Положение этих изотак у дна определяют по эпюре донных скоростей, проектируя эти значения пунктиром в точке $ж$ и $з$.

Расположение изотак в поперечном сечении можно установить приближенно без построения эпюр скоростей на вертикалях. Для этого над профилем строят эпюры поверхностных и донных скоростей по измеренным точкам $v_{\text{пов}}$ и $v_{\text{дон}}$. На скоростных вертикалях в профиле выписываются скорости в точках наблюдений (пов., 0,2 h ; 0,6 h ; 0,8 h и дно). По значениям этих скоростей, применяя линейную интерполяцию, проводят изотак. Определение точек выхода изотак на поверхность и у дна производится аналогично вышеизложенному. Проведенные изотак закрепляются тушью. В русле, покрытом льдом, характер изотак иной (см. упражнение 4.3).

4. Вычисление расхода воды методом изотак основано на определении объема модели расхода по формуле

$$Q = \int_0^{v_{\text{наиб}}} f_v dv. \quad (4.12)$$

Интеграл формулы (4.12) аппроксимируется в виде

$$Q = (f_{v_0} + f_{v_1}) a/2 + (f_{v_1} + f_{v_2}) a/2 + \dots + (f_{v_{n-1}} + f_{v_n}) a/2 + Q_k, \quad (4.13)$$

где f_{v_0} , f_{v_1} , ..., f_{v_n} — площади, ограниченные изотакami, м² (площадь f_{v_0} — соответствует площади нулевой изотак или площади водного сечения); a — сечение между изотакami, м/с.

На рис. 4.8 приведена схема, иллюстрирующая вычисление расхода воды по изотакам. Площади ограниченные изотакami, отстоят друг от друга на одинаковые расстояния a (в данном примере сечение изотак $a = 0,10$ м/с). В результате такого сечения модель расхода делится на ряд объемов. Объем одного заштрихованного, участка Q_{n-1} может быть выражен формулой

$$Q_{n-1} = (f_{v_{n-1}} + f_{v_n}) a/2. \quad (4.14)$$

Объем последнего отсека модели Q_k в формуле (4.13) можно приближенно определить по формуле

$$Q_k = \frac{2}{3} f_n (v_{\text{наиб}} - v_n), \quad (4.15)$$

где f_n — площадь, ограниченная последней изотаксой, м^2 ; $v_{\text{наиб}}$ — наибольшая наблюдаемая скорость, м/с ; v_n — скорость последней изотаксы, м/с .

Изотаксы делят модель расхода на равные интервалы скоростей; сечение изотак a принимается постоянным, тогда формула (4.13) будет иметь вид

$$Q = a \left(\frac{fv_0}{2} + fv_1 + \dots + fv_{n-1} + \frac{fv_n}{2} \right) + Q_k. \quad (4.16)$$

Из приведенных расчетных формул видно, что для вычисления расхода воды по методу изотак необходимо определить площадь изотак. Обычно площадь изотак определяется планиметрированием. Цена деления планиметра принимается равной цене деления, установленной при определении площади водного сечения графическим способом. Вычисление расхода приведено в табл. 4.7. При обводе изотак планиметром линии обвода замыкаются по линии поверхности воды. В случае примыкания изотак ко дну обвод их производится по линии дна. На рис. 4.8 стрелками указано направление обвода изотак $0,50 \text{ м/с}$ с замыканием в точке u .

Таблица 4.7

Вычисление расхода воды способом изотак (основным)
р. Педедзе — с. Литене, 20/VIII 1962 г.

Площадь изотак, м^2	Вычисление расхода воды		
	ср. площадь между изотаксами, м^2	сечение изотак, м/с	Расход воды между изотаксами, $\text{м}^3/\text{с}$
1	2	3	4
76,4	75,7	0,10	7,57
6,04	10,2	0,10	1,02
			$Q_k = 0,16$
			$Q = 45,1$

Расчет расхода последнего отсека $Q_k = \frac{2}{3} \cdot 6,04 (0,94 - 0,90) = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход воды получается суммированием расходов между изотаксами (графа 4 табл. 4.7).

4. Метод изотак с использованием тахиграфической кривой

Требуются: 1. Провести все построения, включая проведение изотак в поперечном сечении, как указано в предыдущем методе.

2. Определить планиметрированием площади, ограниченные изотактами.

3. Построить тахиграфическую кривую.

4. Определить площадь, ограниченную тахиграфической кривой, и расход воды.

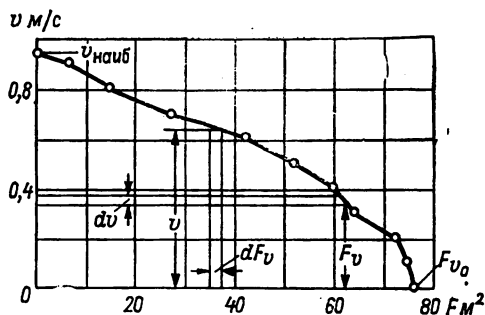


Рис. 4.9. Тахиграфическая кривая к расходу воды.
р. Педдзе — с. Литене, 20/VIII 1962

Решение: 1—2. В методе изотак, примененном для вычисления расхода воды, рассмотрены пункты 1 и 2, включая планиметрирование площадей, ограниченных изотактами.

3. Порядок построения тахиграфической кривой указан на рис. 4.9. Вертикальный масштаб для скорости выбирается с расчетом на $v_{\text{наиб}}$, масштаб площадей изотак по горизонтали берется с учетом наибольшей площади нулевой изотакти, которая соответствует площади водного сечения. В выбранном масштабе по данным табл. 4.7 наносятся значения, по которым и проводится тахиграфическая кривая.

4. Введем обозначения (рис. 4.10): dF_v — элементарная площадка, v — соответствующая ей скорость; dv — элементарная скорость и F_v — соответствующая ей площадь.

Площадь тахиграфической кривой может быть выражена известными уже интегралами:

$$Q = \int_F v dF_v \quad \text{или} \quad Q = \int_0^{v_{\text{наиб}}} f dv.$$

Интегрирование заменяется планиметрированием площади тахиграфической кривой, в результате которого получена площадь кривой $Q = 45,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

*Сопоставление расходов воды, вычисленных
различными методами*

Как видно из табл. 4.8, расходы воды, вычисленные различными методами, очень близки между собой, что можно отчасти объяснить правильной формой поперечного сечения и закономерным распределением скоростей на вертикалях выбранного для расчета участка р. Педедзе — с. Литене, а также точность разработанной методики вычисления расходов воды при наличии многоточечных гидрометрических наблюдений.

Таблица 4.8

Сопоставление расходов воды, вычисленных различными методами
р. Педедзе — с. Литене, 20/VIII 1962 г.

Метод вычисления	Расход воды, м ³ /с	Расхождение по отношению к графическому основному методу, %
Аналитические:		
многоточечный способ измерения расхода	44,8	0,5
основной способ измерения расхода	45,0	0,0
упрощенный аналитический метод	44,0	2,0
Графические:		
с построением эпюр на вертикалях	45,0	0,0
графо-аналитический метод	44,4	1,4
метод изотах	45,1	0,1
метод изотах по тахиграфической кривой	45,1	0,1

При выборе методов вычисления расходов воды следует руководствоваться следующими указаниями:

1. Аналитический метод применяется на всех станциях Госкомгидромета СССР независимо от детальности измерения расхода воды. Метод прост и при правильной форме русла дает хорошие результаты.

2. Аналитический метод при основном способе измерения расхода воды является главным и, как видно из полученных результатов, дает хорошее совпадение с наиболее точным графическим способом.

3. Упрощенный аналитический метод применяется в случае необходимости срочно получить приближенное значение расхода воды для нужд гидрологической информации. В случае если по условиям работ не представляется возможным произвести детальные промерные работы по створу, можно для вычисления расхода воды применить упрощенный аналитический метод. Как видно из сопоставления расходов (табл. 4.8), упрощенный метод дает расхождение 2 % по сравнению с остальными методами.

4. Графические способы вычисления расхода воды применяются для расходов, измеренных многоточечным способом, и имеют целью

уточнение значения расхода, изучение распределения скоростей по глубине и ширине потока. В результате наглядного представления об этом распределении можно правильно назначить места скоростных вертикалей и решить вопрос о точности вычисления расхода в зависимости от числа намеченных скоростных вертикалей.

Рекомендуется применять графические способы при следующих условиях а) сильно зашугованном русле в зимний период, б) наличии большого количества мертвых пространств в сечении, в) измерении расхода воды под мостом в нескольких пролетах, г) вычислении расхода взвешенных наносов и одновременно расхода воды, д) на всех вновь открываемых гидрометрических створах.

5. Графо-аналитический способ может быть рекомендован в случае отсутствия планиметра. Вычисление расхода воды частично производится с графическим построением эпюры расходов по ширине реки, а подсчет ее площади производится аналитически.

Вычисление расходов воды независимо от применяемого метода требует тщательных вычислений, использования правил округления чисел, четких записей в бланках, что облегчает контроль всех вычислений.

4.3. Расход воды, измеренный вертушкой при ледяном покрове

Упражнение 4.3. Вычисление расхода воды аналитическими и графическими способами и сопоставление полученных значений расходов.

Д а н о: книжка для записи измерения расхода воды (вертушкой, многоточечным способом) (табл. 4.9 дается с большим сокращением).

Приступая к вычислению расхода воды, измеренного в зимних условиях, рассмотрим пояснения к полевым записям, а затем произведем первичную обработку книжки полевых измерений.

Промеры записываются в графах 1—6 табл. 4.9, а.

Примем следующие обозначения: h — средняя глубина в лунке из данных по двум ходам измерений (в данном примере работы произведены в один ход); l_1 — общая толщина льда; l_2 — глубина погруженного льда и, если есть шуга, то $l_{ш}$ — глубина погружения шуги (в данном примере шуга отсутствует); h_p — рабочая глубина. На рис. 4.10 приведена схема к записям промерных работ. Согласно принятым обозначениям, можно написать $h_p = h_1 - l_2$ (рис. 4.10 а) и $h_p = h - (l_2 + l_{ш})$ (рис. 4.10 б). При наличии висячего льда рабочая глубина* равна глубине, измеренной в лунке, $h_p = h$, (рис. 4.10 в).

Разберем изложенное на примере промерной вертикали № 5 и скоростной вертикали № 3: $h = 0,98$ м, $l_1 = 0,20$ м, $l_2 = 0,18$ м, следовательно, рабочая глубина $h_p = 0,98 - 0,18 = 0,80$ м.

Скорости в зимний период измерялись в точках: пов., $0,2 h$, $0,4 h$, $0,6 h$, $0,8 h$ и у дна. Глубина опускания вертушки опреде-

Таблица 4.9

Книжка для записи измерения расхода воды
 р. Ирбе — с. Вичаки
 Расход воды № 3, 10/II 1966 г.
 Створ № 1 расположен в 0,03 км ниже гидрологического поста
 Уровень воды 174 см
 Особые замечания: $K_{зим} = 6,82 : 12,2 = 0,56$
 а) уровни и промеры

Высота уровня воды на гидростворе при промерах, см	<i>H</i>	№ сваи (рейки)	Отсчет	Приводка	Над нулем графика	Расчетный уровень над нулем графика, см	промера 174 расхода 174 срезка +0
	начальный конечный						
		8	76	98	174		
		8	76	98	174		

Начало 10 ч 00 мин

Промеры

Конец 1 ч 10 мин

№ вертикали		Расст. от постановки начала, м	Глубина средняя, м	Толщина льда, м	Глубина погружения ледя, м	Глубина, м		Расст. между вертикалями, м	Площадь водного сечения, м ²	
промерной	скоростной					рабочая	между вертикалями		между промерными вертикалями	между скоростными вертикалями
Ур. л. б. 1		20,7	0,00	0,10	0,08	0,0	0,12	0,3	0,04	..
		21,0	0,33	0,10	0,08	0,25				

№ вертикали	скорост- ной	Расст. от постоян. нача- ла, м	Глубина средн., м	Толщина льда, м	Глубина пог- руж. льда, м	Глубина, м		Расст. между промер- ными вер- тикали- ми, м	Площадь водного сечения, м ²	
						рабочая	между вертика- лями		между промер- ными вертикалями	между скорост- ными вертикалями
5	3	28,0	0,98	0,20	0,18	0,80	0,82	2,0	1,64	3,36
15	•••••	47,5	0,61	0,12	0,10	0,51	•••••	•••••	•••••	•••••
Ур. пр. 6.	•••••	48,1	0,00	0,08	0,06	0,0	0,26	0,6	0,16	1,06
										$F = 20,8$

6) скорости

№ вертикали	Рабочая глубина, м	Глубина опускания вертушки, м	Отсчет по штанге	Число обо- ротов за прием	Отсчет по секундомеру	Сумма обо- ротов	Число оборотов в сек.	Скорость, м/с	Средняя скорость на вертикали, м/с	
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,57	Пов. 0,4 Дно 0,8	0,10 0,23 0,46 0,48	0,47 0,34 0,11 0,99	20 20 20 20	114 105 113 117	100 100 100 100	0,88 0,95 0,88 0,86	0,22 0,24 0,22 0,22	0,23

ляется от нижней поверхности льда. При определении скорости у поверхности вертушки (в данном примере) может быть опущена на глубину 0,10 м от поверхности льда и поднята на расстояние от низа поддона до оси на 0,09 м. Глубины опускания вертушки

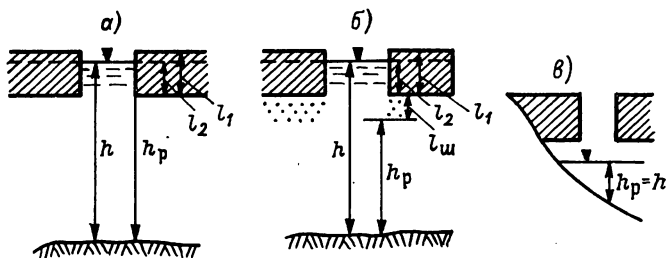
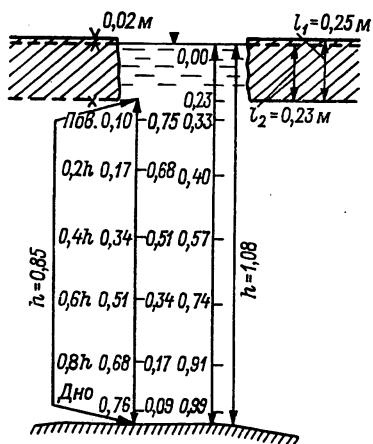


Рис. 4.10. Схема к записям глубин воды и глубин погружения льда и шуги

могут быть рассчитаны от уровня воды в лунке с учетом глубины погруженного льда. Значение глубины для всех точек вертикали № 5 от уровня воды в лунке выписаны на рис. 4.11.



На рис. 4.11 показано расстояние уровня воды в лунке от верхней поверхности льда, в данном примере оно равно $l_1 - l_2 = 0,25 - 0,23 = 0,02$ м.

Все замечания о проверке полевых записей, указанные в упражнении 4.2, справедливы и для зимних условий.

Расход воды вычисляется всеми методами, рассмотренными в уп-

Рис. 4.11. Схема к расчету глубины опускания вертушки до вертикали № 5

ражнении 4.2. При этом даются только дополнительные пояснения применительно к зимним условиям без повторения всей методики.

Аналитические методы вычисления расхода воды

1. Многоточечный способ измерения расхода.

Требуется: вычислить площади водного сечения и погруженного льда.

2. Вычислить скорости в точках измерения и средние на вертикали.

3. Вычислить расход воды.

4. Заполнить таблицу «Принятые данные».

Решение. 1. В табл. 4.9 а приведены записи глубин, толщины льда и глубин погружения льда. Рабочие глубины h_p вычислены как было указано в начале данного упражнения. Срезка не вводится, вычисление площади водного сечения между промерными и скоростными вертикалями производится по формуле (2.7) и дополнительных пояснений не требует. Следует обратить внимание на то, что общая толщина льда на 0,02 м отличается от глубины погружения льда; следовательно, уровень воды в лунке на 2 см ниже верхней поверхности льда, как это показано на рис. 4.11.

Площадь погруженного льда вычисляется аналитически по приведенной выше формуле (2.7) $F = 5,64 \text{ м}^2$.

Общая площадь водного сечения по табл. 4.9 а $F = 20,8 \text{ м}^2$.

2. Вычисление скорости в точке произведено согласно указаниям упражнения 3.3 (табл. 4.9 б).

Значения скоростей в точках, выписанные в графе 10, не вызывают сомнения, так как скорости закономерно (для зимних условий) увеличиваются к центру вертикали.

Вычисление средних скоростей на вертикали при многоточечном способе производится по формуле (3.18) — см. гр. 11 табл. 4.9 б.

3. Расход воды, вычисленный по формуле (4.9), $Q = 6,80 \text{ м}^3/\text{с}$.

4. Таблица «Принятые данные» заполняется согласно указаниям упражнения 4.2 и для данного расхода не приводится.

2. Основной способ измерения расхода воды

В Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам [38] рекомендуется при недостаточной глубине для русел при наличии ледяного покрова измерять скорость в точках: $0,15 h$, $0,5 h$ и $0,85 h$ или в одной точке $0,5 h$. При этих измерениях средняя скорость на вертикали подсчитывается по формулам (3.19) и (3.21). При определении расхода воды р. Ирбе у х. Вичаки 10/II 1966 г. скорости измерялись в шести точках по глубине. По этим измерениям построены эпюры скоростей на вертикалях для графического метода и метода изотак (см. рис. 4.12). С этих эпюр сняты значения скоростей в точках $0,15 h$, $0,5 h$, $0,85 h$ (на рис. 4.12 в эпюрах приведены тонкие сплошные линии и соответствующие им скорости выписаны справа около эпюр).

В табл. 4.10 приведены примеры вычисления расхода воды в русле при наличии ледяного покрова по формуле (4.9), в которой средние скорости подсчитаны по формуле (3.21).

Графические методы вычисления расхода воды

1. Основной графический метод с построением эпюр

Т р е б у е т с я: 1. Построить на миллиметровой бумаге профиль водного сечения.

2. Построить эпюры скоростей на вертикалях и вычислить среднюю скорость графическим способом.

Таблица 4.10

Вычисление расхода воды аналитическим методом при измерении скорости в точке 0,5 h
р. Ирбе — хут. Вичаки, 10/II 1966 г.

№ скоростной вертикали	Скорость с эпюры в точке 0,5h $v_{0,5h}$	$v_{cp} = kv_{0,5h}$ $k=0,9$	Скорость между вертикалями, м/с	Площадь водного сечения между скорост. вертикалями, м ²	Расход воды между вертикалями, м ³ /с.
			$k = 0,7$		
Ур. л. б.	0,00	0,00			
			0,15	0,45	0,07
1	0,24	0,22			
...
8	0,24	0,22			
			0,15	1,06	0,16
Ур. пр. б.	0,00	0,00	0,15		
			$k = 0,7$		$Q = 6,75$

3. Построить эпюры средних скоростей в сечении и определить скорость для каждой промерной вертикали.

4. Определить расход для каждой промерной вертикали и построить эпюру распределения расходов по ширине реки.

5. Вычислить расход воды, определив площадь эпюры планиметрированием.

Решение: 1. Строится профиль водного сечения (рис. 4.12) в масштабах согласно указаниям по их выбору: вертикальный 1 : 20, горизонтальный 1 : 200. На профиле водного сечения по данным табл. 4.10 наносится для каждой промерной вертикали общая толщина льда и глубина погруженного льда. Нижняя граница льда указана ломаной линией. Около урезов наблюдается припай льда к берегу.

Скоростные вертикали на профиле водного сечения обозначаются вертикальными линиями с указанием номера вертикали.

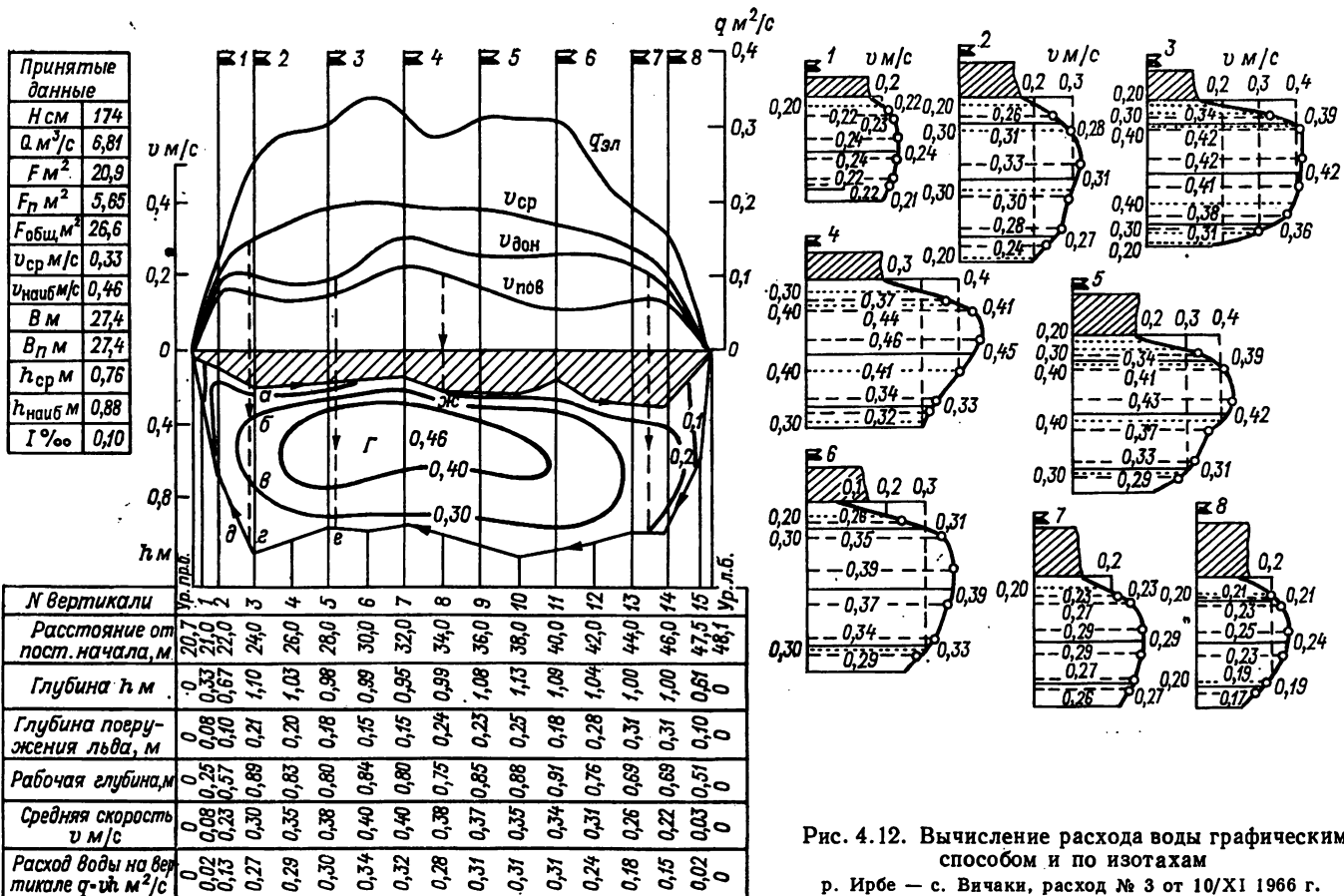


Рис. 4.12. Вычисление расхода воды графическим способом и по изотхам

р. Ирбе — с. Вичаки, расход № 3 от 10/XI 1966 г.

В таблице под профилем помещается графа «Глубина погружения льда».

2. Эпюра скоростей на вертикали строится в вертикальном масштабе, совпадающем с масштабом профиля (1 см — 0,20 м), и в горизонтальном — 1 см — 0,10 м/с. На каждой вертикали в масштабе наносится толщина льда. Значения скоростей в точках измерения $v_{\text{пов}}$, $v_{0,2h}$, $v_{0,4h}$, $v_{0,6h}$, $v_{0,8h}$, $v_{\text{дно}}$ выписываются в середине эпюры на соответствующих глубинах (в разрыве пунктирных линий). По точкам наблюдений проводится плавная линия эпюры, причем направление эпюры от точки измерения у поверхности (равное 0,10 м по условию работ) до нижней поверхности льда проводится согласно общему направлению скорости на участке $0,2 \cdot h$ — пов. Как видно из приведенных построений, скорости у нижней поверхности льда значительно отличаются от скоростей, измеренных на глубине 0,10 м от нижней поверхности льда.

На участке от точки измерения скорости у дна (на расстоянии 0,15 м от дна) к линии дна эпюра проходит, согласуясь с направлением участка 0,8 — дно. Как видно из приведенных эпюр, скорости у дна больше, чем скорость у нижней поверхности льда, что объясняется большой шероховатостью поверхности льда. На эпюрах определено сплошными линиями положение глубин $0,15 h$, $0,5 h$ и $0,85 h$, а значения скорости для этих глубин, снятые с эпюры, выписаны справа от эпюры.

Средняя скорость на вертикали вычисляется делением площади эпюры скорости на глубину вертикали. Определение площади эпюры скорости производится планиметрированием согласно указаниям упражнения 3.8.

3. С левой стороны профиля наносится шкала скоростей в принятом масштабе; этот же масштаб принят при построении эпюр скоростей; в данном примере 1 см — 0,10 м/с. В принятом масштабе строится эпюра средних скоростей, с которой снимается значение скорости для каждой промерной вертикали и записывается в таблицу под профилем.

4. Для каждой промерной вертикали вычисляется расход $q = v \cdot h$ м³/с и в масштабе 1 см — 0,05 м³/с (этот масштаб обозначен справа над профилем), по полученным значениям q строится эпюра расхода по ширине реки.

5. Вычисление расхода воды производится планиметрированием площади эпюры расхода. Одновременно планиметрированием определяется площадь водного сечения. Площадь погруженного льда определяется путем обвода планиметром линии уровня воды в лунках и нижней поверхности льда. (Данные планиметрирования не приводятся.)

2. Графо-аналитический метод

В зимних условиях расход воды вычисляется графо-аналитическим способом по формуле (4.11). Значение $Q = 6,84$ м³/с.

3. Метод изотак

Т р е б у е т с я: 1. Построить профиль водного сечения и эпюры скоростей на вертикалях.

2. Провести эпюры распределения поверхностных и донных скоростей по ширине реки.

3. Провести изотакхи в профиле водного сечения.

4. Определить площади, ограниченные изотакхами, и вычислить расход воды.

Р е ш е н и е: 1. Для вычисления расхода методом изотакх используется профиль водного сечения и эпюры скоростей на вертикалях (см. рис. 4.12).

2. Для построения эпюры распределения поверхностных (в данном случае подледных) и донных скоростей по ширине потока значения скоростей снимаются с эпюр распределения скоростей по вертикали. Поверхностные скорости в зимний период, как указывалось, меньше донных, поэтому эпюра поверхностных (подледных) скоростей располагается на чертеже ниже эпюры донных скоростей. Над ними проходит эпюра средних скоростей.

3. Для назначения сечения изотакх выбирается наибольшая скорость; $v_{\text{наиб}} = 0,46$ м/с. Следовательно, сечение изотакх можно назначить через 0,10 м/с и их значение будет 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 м/с. Масштаб скоростей на скоростных вертикалях наносится по линии, совпадающей с нижней поверхностью льда. С линии масштаба на эпюру проектируются значения скорости, соответствующие избранному сечению изотакх, а затем с эпюры положение скоростей сносится на рабочую глубину, где подписывается их значение (см. рис. 4.12).

Положение изотакх переносится на профиль водного сечения следующим образом: на полоске бумаги, приложенной к эпюре, отмечается карандашом рабочая глубина вертикали от нижней поверхности льда до дна и положение изотакх. Прикладывая полоску бумаги к соответствующей вертикали на профиле, переносят положение засечек и выписывают значение изотакх.

Для вертикали № 2 (см. рис. 4.12) в профиле водного сечения изотакхи 0,2; 0,3; 0,3 и 0,2 м/с, перенесенные вышеизложенным приемом, обозначены *а*, *б*, *в*, *г*. По полученным точкам в водном сечении проводятся плавные линии — изотакхи.

На рис. 4.12 между вертикалями № 1 и 2 изотакха 0,20 м/с очень близко подходит ко дну, и ее выход по эпюре донных скоростей обозначен в точке *д*. Между вертикалями № 3 и 4 изотакха 0,20 м/с подходит ко дну в точке *е*. Между вертикалями № 4 и 5 к нижней поверхности льда по эпюре поверхностных (подледных) скоростей изотакха выходит в точке *ж*, а примыкает ко дну между вертикалями № 7 и 8 в точке *з*. Положение точки выхода изотакхи 0,20 м/с на рис. 4.12 показано штриховой линией со стрелками. Буквой *А* обозначен небольшой участок площади, ограниченный линией изотакхи 0,20 м/с и линией дна.

Как видно на рис. 4.12, в зимний период изотакхи в водном сечении имеют совсем иное очертание, чем при открытом русле. Наибольшие скорости располагаются в центре рабочих глубин. На вертикали № 4 наибольшая скорость 0,46 м/с отмечена на глубине 0,4 h. Отсутствие подледной шуги на реке Ирбе у х. Вичаки несколько сглаживает распределение изотакх в сечении.

4. Расход воды вычисляется по формулам (4.13) и (4.16). Площади, ограниченные изотакхами, определяются планиметрированием; при обводе площадей изотакх 0,00; 0,10 и 0,20 м/с границами служат нижняя поверхность льда и линия дна. Для изотакхи 0,10 м/с линия обвода на рис. 4.12 обозначена стрелками. Расход последнего отсека по формуле (4.15) равен $Q = \frac{2}{3} \cdot 6,56 (0,46 - 0,40) = 0,26 \text{ м}^3/\text{с}$. Сумма расходов между изотакхами по данным планиметрирования $Q = 6,56 \text{ м}^3/\text{с}$ и общий расход $Q = 6,79 \text{ м}^3/\text{с}$.

4. Метод изотакх с использованием тахиграфической кривой

Требуется: выполнить весь порядок работ, указанный в разделе «Требуется» упражнения 4.2.

Решение: для построения тахиграфической кривой используются площади, ограниченные изотакхами (см. рис. 4.12). Схема подсчета площади тахиграфической кривой не приводится, значение расхода $Q = 6,80 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сопоставление расходов воды, вычисленных различными методами

Как видно из табл. 4.11, расходы воды, вычисленные различными методами, очень близки между собой, что можно объяснить правильной формой русла, детальностью полевых измерений и точностью методики вычислений.

Таблица 4.11

Значения расхода воды, вычисленные различными методами
р. Ирбе — хут. Вичаки, 10/II 1966 г.

Методы вычисления	Расход воды, м ³ /с	Расхождения в % по отношению к графическому методу
Аналитические:		
многоточечный способ измерения расхода	6,80	0,2
основной способ измерения расхода:		
при измерениях в трех точках	6,81	0,0
при измерениях в одной точке	6,75	0,9
Графические:		
с построением эпюр на вертикалях	6,81	0,0
графо-аналитический	6,81	0,0
метод изотакх	6,79	0,3
метод изотакх по тахиграфической кривой	6,80	0,2

При выборе метода вычисления расхода воды в зимний период следует также руководствоваться указаниями Наставления [38].

При многоточечном способе измерения расхода методы графический и изотак являются главными. На примере р. Ирбе — х. Вичаки показаны все существующие методы вычисления расхода воды при наличии детальных вертушечных измерений. Выводы об использовании этих методов, приведенные для открытого русла, справедливы и для зимних условий.

Точность измерения зимнего расхода зависит от погрешности измерения глубины и скорости. Случайная погрешность расхода воды выражается соотношением

$$r_{0Q} = \sqrt{r_{0н}^2 + r_{0F}^2 + r_{0в}^2}, \quad (4.17)$$

где $r_{0н}$ — погрешности измерения в зависимости от способа; r_{0F} и $r_{0в}$ — соответственно погрешности за счет подробности определения площади и средней скорости по сечению.

Как показали исследования, соотношение погрешностей можно регулировать подбором числа вертикалей и совершенствованием методики измерения скорости, оно выражается значением

$$\sqrt{r_{0F}^2 + r_{0в}^2} \leq 0,5r_{0н}. \quad (4.18)$$

Оптимальные погрешности измерений составляют: при ледоставе для площади сечения около 1,5 %, для скорости 2,6 %, при зашугованном русле для площади около 2 %, для скорости 4,0 %.

С учетом оптимальных погрешностей предложены формулы определения необходимого числа промерных n_h и скоростных n_v вертикалей:

при ледоставе:

$$n_h = \left(\frac{200C_{v, h/b}}{1,5} \right)^{2/3}, \quad (4.19)$$

$$n_v = \left(\frac{200C_{v, h/b}}{2,6} \right)^{2/3}; \quad (4.20)$$

при зашугованном русле:

$$n_h = \left(\frac{200C_{v, h/b}}{2} \right)^{2/3}, \quad (4.21)$$

$$n_v = \left(\frac{200C_{v, h/b}}{4} \right)^{2/3}, \quad (4.22)$$

где $C_{v, h/b}$ — коэффициент вариации глубины по ширине русла.

Указанные формулы расчета числа промерных и скоростных вертикалей необходимо учитывать при составлении программы зимних работ.

4.4. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками

Упражнение 4.4. Вычисление расхода воды, измеренного поплавками.

Д а н о: книжка КГ-7М для записи измерений расхода поплавками (табл. 4.12) с сокращением.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть полевые записи в книжке.

2. Вычислить расчетный уровень воды.

3. Обработать данные промерных работ.

4. Построить эпюру распределения продолжительности хода поплавков.

5. Наметить скоростные вертикали и вычислить фиктивный расход.

6. Вычислить действительный расход и заполнить таблицу «Принятые данные» (табл. 4.12 б).

Р е ш е н и е: 1. Общий просмотр полевой книжки имеет целью проверить полноту записей. При производстве поплавочных наблюдений в данном упражнении приняты промеры, произведенные 20/VII 1968 г. Расстояния определялись засечками, поэтому необходимо данные графы 2 табл. 4.12 г, д сверить с журналом, в котором вычисляются расстояния по данным засечек. По полевым записям из 21 поплавок забракованы 1, 2 и 4-й. Следовало бы осветить измерениями скорость движения на участке левого берега на расстоянии от уреза до 17,0 м.

Таблица 4.12

Книжка для записи измерения расхода воды поплавками
№ 10 22 июля 1968 г.

Река Ока

Пост (станция) г. Пущино

Створ № 3 0,5 км выше гидрологического поста

а.

Код информации	Номер поста	Год, месяц, число	Номер расхода воды	Номер протоки
1	2	3	4	5
..12013	242	22/VII 1968	10	—

Адрес	Количество проток	Номер створа	Признак перфорации промеров, скоростей	Единицы измерения расходов воды, м ³ /с, л/с
	0			1	2	3
32=	—	3	—	м ³ /с

б. Принятые данные

Расчетный уровень воды над «0» графика, см	Основной пост	37 =	—
	Гидроствор	38 =	158
Расход воды, м ³ /с		39 =	142

в.

Адрес	40 =
Состояние реки:	
гидрологический пост	чисто
гидроствор	чисто
Расчетный уровень воды над «0» графика <i>H</i> см:	
гидрологический пост	—
гидроствор	158
Расход воды, м ³ /с	142
Площадь водного сечения <i>F</i> м ²	165

в.

Адрес	50 =
Скорость, м/с	
средняя	0,86
наибольшая	1,09
Ширина, м	
по уровню воды <i>B_y</i>	118
Глубина, м	
средняя <i>h_{ср}</i>	1,40
наибольшая <i>h_{наиб}</i>	1,91
Уклон, ‰	0,22
Способ измерения расхода воды	пп
Метод вычисления	а

г. Скорости

№ поплавка	Место прохождения поплавка через средний створ от постоянного начала, м	Продолжительность хода поплавка между верхним и нижним створами, с	Скорость движения поплавка, м/с	№ группы, к которой отнесен поплавок
1	2	3	4	5
1	6,7		затракован	
2	17,5	121	0,83	I
4	28,6		затракован	
21	118	126	0,79	VI

д.

Высота уровня воды на гидростворе при промерах, см	Уровень	№ свая (рейки)	Отсчет	Приводка	Над нулем графика
	начальный	1	119	50	169
	конечный	1	117	50	167

Расчетный уровень над нулем графика, см	промера	168
	расхода	158
	срезка ± м	-0,10

е.

№ промерной вертикали	Площадь, м ²		Средняя продолжительность хода поплавков, с.	Средняя поверхностная скорость в интервале, м/с	Расход воды в интервале м ³ /с
	между промерными вертикалями	в интервале			
1	2	3	4	5	6
Ур. л. б.					
1	1,04	13,9	121	$k = 0,7$	8,00
2	1,57			0,58	
1/4	—				
—	3,36	3,36	115	0,61	2,05
Ур. пр. б.				$k = 0,7$	
		$F = 165$			$Q = 159$

2. Расчетный уровень над нулем графика для промеров и расхода воды определяется по рейке № 1 гидрологического поста.

Расчетный уровень при промерах получен как среднее арифметическое (168 см над нулем графика).

Уровень воды при измерении скоростей поплавками 158 см над нулем графика.

Необходимо определить срезку уровня: $168 - 158 = 10 \text{ см} = 0,10 \text{ м}$. Срезка в данном случае должна вводиться в измеренные глубины со знаком минус.

3. Обработка данных промерных работ производится в табл. 4.12д (раздел таблицы сокращен) и не требует пояснений.

4. В табл. 4.12г приведены данные наблюдений за продолжительностью хода поплавков. Всего был пущен 21 поплавок.

Для построения рис. 4.13 выбираются масштабы горизонтальный — расстояния от постоянного начала и вертикальный — для продолжительности хода поплавков. Вертикальная шкала может начинаться не с нулевого значения, а в зависимости от наименьшей наблюдаемой продолжительности. В данном случае за начальную точку шкалы принято 70 с. Около нанесенных на график в принятом масштабе точек надписываются номера поплавков. Продолжи-

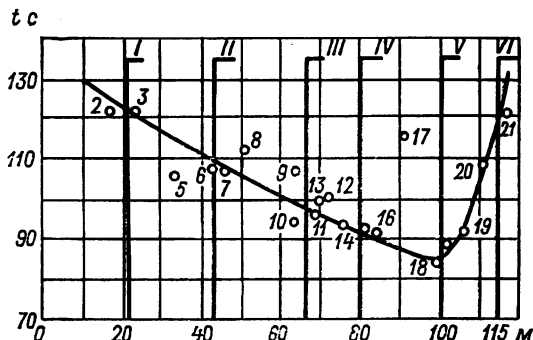


Рис. 4.13. Распределение продолжительности хода поплавков по ширине реки на среднем створе

тельности хода поплавков не должны различаться более чем на 10 %. Из нанесенных на рис. 4.13 поплавков расхождение в 10 % наблюдается для поплавков № 9 и 10, но их можно принять для расчета, так как они согласуются с общим ходом поплавков. Продолжительность хода поплавка № 17 отклоняется от общего фона и он исключается из расчета.

По полученному полю точек проводится на глаз плавная эпюра продолжительности хода поплавков по ширине реки.

5. Скоростные вертикали намечают в местах перегибов эпюры распределения, а если она имеет плавный характер, то через равные расстояния, но обязательно совмещая их с промерными вертикалями.

На рис. 4.13 намечено шесть вертикалей (I—VI); как видно, около каждой из них поплавок хорошо группируется (вертикали являются как бы центрами тяжести полученных групп).

В графе 1 табл. 4.12е для каждой скоростной вертикали выписывается в числителе ее номер на соответствующей промерной вертикали.

В графе 3 той же таблицы записываются площади водного сечения в интервале. Для участка урез левого берега — скоростная вертикаль № 1 площадь, равная 13,9 м², получена как сумма площадей первых четырех площадок между промерными вертикалями.

Продолжительности хода поплавков t , снятые с эпюры для каждой вертикали, записываются в табл. 4.12е.

Для первого интервала продолжительность $t = 121$ с и скорость равна $v = L/t = 100 : 121 = 0,83$ м/с. Умножением на коэффициент для урезного участка $K = 0,7$, получаем скорость в интервале $v = 0,58$ м/с.

Вычисление фиктивного расхода воды производится аналитически по формуле (4.9) $Q_{\text{фикт}} = 159$ м³/с.

6. Действительный расход вычисляется по формуле

$$Q_d = KQ_{\text{фикт}}. \quad (4.23)$$

Для вычисления коэффициента K можно применить несколько методов.

По данным поплавочных наблюдений р. Оки у г. Пущино за 22/VII 1968 г., $Q_{\text{фикт}} = 159$ м³/с, $F = 165$ м², $h_{\text{ср}} = 1,40$ м и $I = 0,00022$ 0/00.

$v_{\text{фикт}} = Q_{\text{фикт}}/F = 159 : 165 = 0,96$ м/с. Составим два уравнения:

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{фикт}}K,$$

$$v_{\text{ср}} = C \sqrt{h_{\text{ср}}i}.$$

Подставим имеющиеся значения: $v_{\text{ср}} = 0,96 K$, $v_{\text{ср}} = C = \sqrt{1,40 \cdot 0,00022} = 0,0175 C$.

Задаемся несколькими значениями C и вычисляем соответствующие им значения $v_{\text{ср}}$. Значение K определяется по табл. 4.13.

Таблица 4.13
Совместное решение двух уравнений

C м ^{0,5} /с	$v_{\text{ср}} = 0,0175 C$	K	$v_{\text{ср}} = 0,96 K$
40	0,70	0,88	0,84
45	0,79	0,89	0,85
50	0,88	0,90	0,86

На рис. 4.14. приведено графическое решение уравнений. Пересечение полученных зависимостей $v_{\text{ср}}$ от C дает искомое значение средней скорости, соответствующее действительному расходу. В точке пересечения скорость $v_{\text{ср}} = 0,855$ м/с, округленно можно принять $v_{\text{ср}} = 0,86$ м/с. Переходный коэффициент $K = v_{\text{ср}}/v_{\text{фикт}} = 0,86 : 0,96 = 0,89$.

Действительный расход воды р. Оки у г. Пущино за 22/VII 1968 г. равен $Q_{\text{дейст}} = KQ_{\text{фикт}} = 0,89 \cdot 159 = 142$ м³/с.

Действительный расход воды можно определить, используя среднюю поверхностную скорость $v_{\text{ср}} = 0,86$ м/с, тогда действительный расход равен $Q_{\text{дейст}} = v_{\text{ср}}F = 0,86 \cdot 165 = 142$ м³/с.

Проверим полученное выше значение $K = 0,89$ по гидравлико-гидрометрическому способу Г. В. Железнякова, применяя одну

из формул для K_1 . Произведем вычисления согласно указаниям упражнения 3.17. Безразмерные параметры $F_{r1} a_h, \beta_*$ получим следующим образом:

$$\text{число Фруда } F_{r1} = v_{\text{пов}}^2 / (g h_{\text{ср}}) = 0,96^2 : (9,81 \cdot 1,40) = 0,0672, \\ \text{морфометрический параметр } a_h = h_{\text{ср}} / h_{\text{наиб}} = 1,40 : 1,91 = 0,73.$$

Параметр формы живого сечения β_* определяется по табл. 2.9 в зависимости от a_h и равен 1,05.

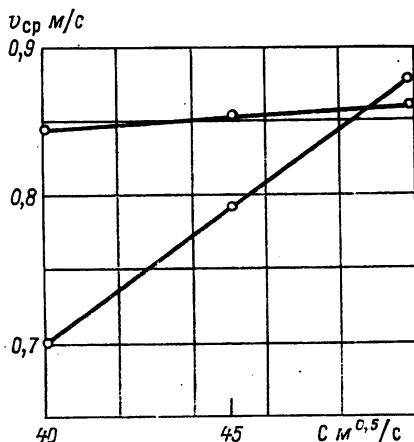


Рис. 4.14. Графическое решение системы двух уравнений для определения средней скорости

р. Ока — г. Пущино, 22/VII 1966 г.

Принимая приведенное значение $C_* = 6,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, переходный коэффициент получим по формуле (3.67)

$$K_1 = 1 - \frac{1,05 \cdot 6,0}{\sqrt{9,81}} \sqrt{\frac{0,00022}{0,0672}} = 0,89.$$

Как видим, полученное значение $K = 0,89$ совпадает с приведенным выше.

4.5. Расход воды, измеренный интеграционными способами

Упражнение 4.5. Вычисление расхода воды, измеренного интеграционным способом по всему живому сечению реки.

Дано: выписка из книжки записи измерения расхода воды вертушкой интеграционным способом (табл. 4.14).

Требуется: 1. Привести общие пояснения к способу интеграции скорости.

2. Вычислить неисправный расход воды Q_n .

3. Определить поправки к расходу Δ_1, Δ_2 и Δ , вычислить исправленный расход Q_n .

Решение: 1. Интеграционный способ измерения скорости по всему сечению в реке применяется при скоростях $v > 0,20 \text{ м/с}$ и заключается в определении осредненной скорости течения по потоку.

Таблица 4.14

Книжка для записи измерения расхода воды
интеграционным способом по всему живому сечению

р. Чаткал — устье р. Терс, 16/VI 1968 г.

а. Измерение скорости

Расстояние от пост. начала, м		Рабочая ширина B_p , м	Число сигналов вертушки	Конечный отсчет по секундомеру	Общая продолжительность T , с
начальной точки	конечной точки				
12,0	56,0	44,0	72	2 мин 08 с	128

б. Вычисление расхода воды

Дата	Уровень над нулем графика H , см	Общее число оборотов вертушки N	Общая продолжительность T , с	Число оборотов в секунду n	Средняя скорость по градуировочной кривой w	Расход воды неисправлен Q_H	Поправка, %			Суммарная поправка к расходу ΔQ , м ³ /с	Расход исправленный Q_H , м ³ /с
							Δ_1	Δ_2	Δ		
16/VI 1968 г.	434	1440	128	11,2	2,85	253	-4	-1	-5	-12,6	240

в. Вспомогательные данные

z , м	$h_{ср}$	$z/h_{ср}$	v_r	v_r/w	F , м ²
0,20	1,81	0,11	0,34	0,19	88,7

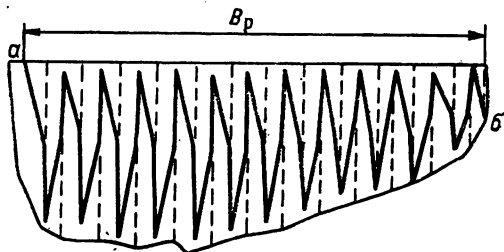
Имеются два варианта интеграционного способа определения скорости по всему сечению: а) способ В. В. Дементьева, при котором вертушка перемещается равномерно с постоянной скоростью между вертикалями, с остановками на вертикалях, продолжительность которых зависит от глубины вертикали (рис. 4.15); б) способ Б. А. Симбирского, при котором вертушка перемещается с постоянной скоростью по ширине реки (рис. 4.16).

Как показали наблюдения, точность интеграционных способов колеблется от 1 до 4 % (при наибольшей погрешности 10 %).

Оборудованное судно (паром, лодка) или люлька устанавливается как можно ближе к урезу воды (на рис. 4.15 в точке a). Вертушка опускается на поверхность (вода покрывает лопасти). Расстояние начальной точки от постоянного начала ($a = 12$ м) записывается в табл. 4.14 а. По сигналу включается секундомер и одновременно начинается перемещение судна (люльки) с постоян-

ной горизонтальной скоростью v_r до ближайшей вертикали. В это время вертушка опускается равномерно со скоростью v_b . На первой вертикали судно останавливается, а вертушка опускается до момента касания дна. После сигнала «дно» судно (люлька) передвигается по створу до следующей вертикали, а вертушка поднимается до поверхности. Далее цикл горизонтального и вертикального перемещения продолжается. Секундомер выключается в тот момент,

Рис. 4.15. Схема передвижения вертушки в живом сечении реки при интеграционном способе измерения В. В. Дементьева



когда вертушка достигает точки $b = 56$ м. Таким образом, рабочая ширина реки равна $B_p = 44,0$ м. За время работы ведется устный счет сигналов вертушки, число которых в данном случае равно 72 при последнем отсчете по секундомеру в 2 мин. 8 с.

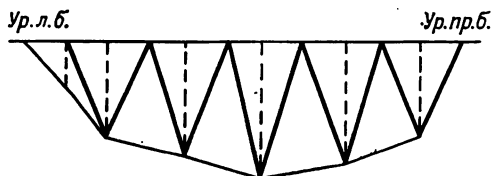


Рис. 4.16. Схема передвижения вертушки в живом сечении реки при интеграционном способе измерения Б. А. Симбирского

Вертикальная и горизонтальная скорости перемещения вертушки должны быть постоянны в период измерения. Вертикальная скорость v_b назначается 0,05—0,10 м/с. Горизонтальная скорость перемещения вертушки по гидроствору назначается по соотношению

$$v_r \geq B_p v_b / h_{cp},$$

где B_p — рабочая ширина; h_{cp} — средняя глубина.

Горизонтальная скорость v_r не должна превышать $1/4$ средней скорости течения.

2. Вычисление неисправленного расхода Q_n производится в следующем порядке (табл. 4.146).

а) общая продолжительность измерения скорости T вычисляется переводом в число секунд конечного отсчета по секундомеру $T = 2 \text{ мин } 8 \text{ с} = 128 \text{ с}$; б) общее число оборотов вертушки N равно произведению числа сигналов на число оборотов за прием 20 $N = 72 \cdot 20 = 1440$; в) число оборотов в секунду $n = N/t = 1440 : 128 = 11,2 \text{ об/с}$; г) средняя скорость в результате интеграции

определяется по градуировочной таблице вертушки (таблица в данном упражнении не приводится) при $n=11,2$ м/с, $\omega=2,85$ м/с; д) неисправленный расход воды вычисляется по формуле

$$Q_n = \omega F, \quad (4.24)$$

где ω — средняя скорость течения реки, полученная в результате интеграции, м/с; F — площадь водного сечения, м².

Подставим известные данные $Q_n = 2,85 \cdot 88,7 = 253$ м³/с.

3. Полученный неисправленный расход является завышенным. Для определения исправленного расхода вычисляются поправки Δ_1 , Δ_2 и Δ . Поправка Δ_1 — на преувеличение расхода при расчете малых скоростей придонного слоя. Вычисление поправки Δ_1 требует определения дополнительных вспомогательных данных (табл. 4.15).

Таблица 4.15

Поправки Δ_1 к расходу воды, измеренному интеграционным способом, в процентах (со знаком минус)

z/n	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05	0,025
Δ_1	14	11	8	6	4	2	1

а. Вычисляется отношение z/h_{cp} , где z — расстояние от оси вертушки до низа груза, h_{cp} — средняя глубина в метрах. По известным данным искомое отношение $z/h_{cp} = 0,2 : 1,81 = 0,11$.

Значение поправки Δ_1 определяется в зависимости от z/h_{cp} по табл. 4.15.

При промежуточных значениях z/h_{cp} поправки находятся по интерполяции с округлением до 1 %.

Для данного примера при $z/h_{cp} = 0,11$ получено $\Delta_1 = -4$ %.

Следует отметить, что интеграционные измерения начинаются не от самого уреза, а на некотором расстоянии от него. Следовательно, не учитываются малые скорости прибрежной зоны.

Поправка Δ_2 — на преувеличение расхода из-за того, что измеряется не скорость течения, а равнодействующая течения и бокового передвижения вертушки. При интеграционном способе измерения скорости вертушка при передвижении находится под воздействием трех компонентов скорости: v — скорости течения реки, v_r — горизонтальной скорости перемещения вертушки (вместе с паромом или лодкой) и v_b — вертикальной скорости перемещения (опускания или подъема вертушки). Под влиянием трех скоростей вертушка регистрирует равнодействующую этих скоростей. Значение скорости ω всегда больше ее составляющих, вследствие чего неисправленный расход преувеличен. Все три скорости взаимно перпендикулярны, и равнодействующая вычисляется по формуле

$$\omega = \sqrt{v^2 + v_r^2 + v_b^2}. \quad (4.25)$$

Практически скорость v_b очень мала и ею можно пренебречь, тогда получаем

$$\omega = \sqrt{v^2 + v_r^2}, \quad (4.26)$$

а истинная средняя скорость вычисляется по формуле

$$v = \sqrt{\omega^2 - v_r^2}. \quad (4.27)$$

Горизонтальная скорость вычисляется по формуле

$$v_r = B_p / T, \quad (4.28)$$

где B_p — рабочая ширина реки, м; T — общая продолжительность измерения, с.

В нашем примере $v_r = 44,0 : 128 = 0,34$ м/с.

Вычисляется отношение горизонтальной скорости к равнодействующей скоростей ω , полученной по градуировочной кривой вертушки: $v_r/\omega = 0,34 : 2,85 = 0,12$. Поправка Δ_2 определяется по табл. 4.16 в зависимости от отношения v_r/ω . Для $v_r/\omega = 0,12$ поправка $\Delta_2 = -1$.

Таблица 4.16

Поправки Δ_2 к расходу воды, измеренному интеграционным способом, в процентах (со знаком минус)

v_r/ω	0,00—0,10	0,11—0,16	0,17—0,22	
Δ_2	0	1	2	
v_r/ω	0,23—0,25	0,26—0,29	0,30—0,32	0,33—0,35
Δ_2	3	4	5	6

Суммарная поправка $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$; подставляя полученные значения, получаем $\Delta = -5$ %.

Суммарная поправка к расходу вычисляется по формуле

$$-\Delta Q = Q_n / 100. \quad (4.29)$$

Для данного примера $-\Delta Q = 253 \cdot 5 : 100 = -12,6$ м³/с.

Исправленный расход Q_n вычисляется по формуле

$$Q_n = Q_n - \Delta Q. \quad (4.30)$$

$$Q_n = 253 - 12,6 = 240 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Полученное значение расхода выписывается в табл. 4.14. Средняя скорость по сечению $v_{cp} = Q/F = 240 : 88,7 = 2,70$ м/с.

Упражнение 4.6. Вычисление расхода воды, измеренного способом интеграции поверхностной скорости по ширине реки.

Таблица 4.17

Измерение скорости

Расстояние от пост. начала, м		Число сигналов вертушки	Конечный отсчет по секундомеру	Общая продолжительность T_c
до начальной точки	до конечной точки			
12	56	76	1 мин 58 с	118

Дано: сведения об измерении интеграционной скорости, (табл. 4.17).

Т р е б у е т с я: 1. Привести общие пояснения к способу интеграции поверхностной скорости по ширине реки.

2. Вычислить среднюю интеграционную поверхностную скорость по ширине реки ω_n и фиктивный расход $Q_{\text{фикт}}$.

3. Вычислить действительный расход.

Р е ш е н и е: 1. Способ интеграции скорости по ширине реки рекомендуется в том случае, когда требуется срочно измерить расход воды или измерение производится на горных реках и опускать вертушку в придонный слой нельзя из-за возможного ее повреждения. Полевые работы производятся следующим образом. Судно (люлька) устанавливается возможно ближе к урезу, вертушка опускается на поверхность, отмечается расстояние от постоянного начала и при равномерном перемещении судна по створу включается секундомер при первом сигнале вертушки. Равномерность хода судна контролируется числом секунд при прохождении судном расстояний между вертикалями. В момент остановки судна около уреза противоположного берега включается секундомер и по устному счету сигналов отмечается номер последнего сигнала.

Переход от полученной поверхностной скорости к средней осуществляется введением переходного коэффициента $K_{\text{инт}}$, способ получения которого пояснен ниже.

2. В этом упражнении используются все исходные данные упражнения 4.5. Расчетный уровень $H = 434$ см, площадь водного сечения $F = 88,7$ м², средняя глубина $h_{\text{ср}} = 1,81$ м. В табл. 4.17 записано расстояние от постоянного начала для начального и конечного момента интеграции и вычислена общая продолжительность наблюдений $t = 118$ с при 76 сигналах вертушки за пройденное расстояние.

Вычисление средней поверхностной интеграционной скорости ω_n производится по градуировочной таблице вертушки по числу оборотов $n = N/t = 1520 : 118 = 12,9$ об/с; $\omega_n = 3,17$ м/с.

Фиктивный расход воды вычисляется по формуле

$$Q_{\text{фикт}} = \omega_n F, \quad (4.31)$$

$Q_{\text{фикт}} = 3,17 \cdot 88,7 = 281$ м³/с. Все данные приведены в табл. 4.18.

3. Вычисление действительного расхода воды производится по формуле

$$Q = K_{\text{инт}} Q_{\text{фикт}}, \quad (4.32)$$

где $K_{\text{инт}}$ — переходный коэффициент от средней поверхностной скорости к средней интеграционной скорости по ширине реки.

При интеграционном способе определения поверхностных скоростей по ширине реки возникают систематические погрешности вследствие следующих причин: 1) неравномерности горизонтального перемещения вертушки, 2) влияния горизонтальной скорости перемещения вертушки. Эти погрешности имеют различные знаки,

Таблица 4.18

Вычисление расхода воды

р. Чаткал — у устья р. Терс

Дата	Уровень над нулем графика H см	Общее число оборотов N	Общая продолжительность t с	Число оборотов в секунду	Средняя поверхностная скорость по градуировочной кривой $\omega_{\text{П}}$ м/с	Площадь водного сечения F м ²	Фиктивный расход $Q_{\text{фikt}}$ м ³ /с	Переходный коэффициент $K_{\text{нт}}$	Действительный расход Q м ³ /с
16/IV	434	1520	118	12,9	3,17	88,7	281	0,87	244

взаимно компенсируются и учитываются значением переходного коэффициента $K_{\text{нт}}$.

Измеренные способом интеграции поверхностные скорости, как и скорости, при поплавочных наблюдениях, требуют введения переходных коэффициентов $K_{\text{нт}}$ и $K_{\text{пол}}$.

Как показали наблюдения, при отсутствии деформаций русла значения $K_{\text{нт}}$ достаточно устойчивы. Переходные коэффициенты определяются по формулам:

$$K_{\text{нт}} = v_{\text{ср}} / \omega_{\text{пор. ср}}, \quad (4.33)$$

$$K_{\text{пол}} = v_{\text{ср}} / v_{\text{пор. ср}}. \quad (4.34)$$

Из многочисленных наблюдений известно, что $\omega_{\text{пов. ср}} < v_{\text{пов. ср}}$ а следовательно, $K_{\text{нт}} > K_{\text{пол}}$, но при осреднении большого числа значений $K_{\text{нт}}$ и $K_{\text{пол}}$ расхождения почти отсутствуют.

При вычислении действительного расхода необходимо пользоваться следующими указаниями.

При большом диапазоне колебания уровня на участке реки производится 5—10 измерений расхода воды многоточечным или основным способом. По значениям Q и F вычисляется средняя скорость по сечению. Одновременно при этих же уровнях производится определение средней поверхностной скорости при интеграции по ширине реки.

Вычисляется переходный коэффициент $K_{\text{нт}}$ по формуле (4.33) для каждого уровня измерений.

Не приводя всех вычислений, принимаем среднее за десять измерений значение $K_{\text{нт}} = 0,87$. По формуле (4.32) $Q = K_{\text{нт}} Q_{\text{фikt}} = 0,87 \cdot 281 = 244 \text{ м}^3/\text{с}$.

Значение действительного расхода, полученное способом интеграции скорости по ширине реки, $Q = 240 \text{ м}^3/\text{с}$ (по упражнению 4.5) очень близко к действительному расходу, полученному способом интеграции скоростей по всему живому сечению, $Q = 244 \text{ м}^3/\text{с}$. Способ интеграции поверхностной скорости по ширине реки отличается наименьшими затратами труда и быстротой выполнения при достаточной точности полученных данных.

Упражнение 4.7. Определение расхода воды, измеренного способом интеграции скорости по вертикали.

Д а н о: данные наблюдений (табл. 4.19).

Таблица 4.19

Измерения скорости на вертикали

р. Белая — с. Ильинка, 17/IV 1973 г.

№ вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Глубина, м	Сумма оборотов вертушки N	Продолжительность измерения (показания t_c секундомера)	Число оборотов в 1 с $n = N/t$	Средняя скорость на вертикали (по градуировочной таблице) v м/с
4	120	3,4	184	40,6	4,52	1,18

Т р е б у е т с я: 1. Привести пояснение к способу интеграции скорости по вертикали.

2. Рассчитать скорость по вертикали № 4 и дать указание к вычислению расхода воды.

Р е ш е н и е: 1. При определении расхода указанным способом для измерения скорости применяется интеграционная установка с лебедками с лодки или катера. Установка ГР-101 может работать совместно с лебедками «Нева», «Луч», ГР-36, ГР-65 и гидрометрическими дистанционными установками ГР-64, ГР-64М, ГР-70. В комплект ГР-101 входят: 1) пульт измерительный; 2) грузы гидрометрические 25 и 50 кг; 3) специальная гидрометрическая вертушка. Пульт служит для регистрации числа оборотов лопастного винта и времени. Грузы имеют донные контакты и кронштейны для установки вертушки. Гидрометрическая вертушка разработана на базе вертушки ГР-21М. Контактное устройство вертушки обеспечивает получение электрических импульсов при каждом обороте лопастного винта.

При работе вертушка перемещается с заданной постоянной скоростью от поверхности до дна потока при условии: 1) глубина вертикали должна быть не менее 1,0 м; 2) средняя скорость должна быть не ниже 0,20 м/с (в пределах прямолинейной части градуировочной кривой вертушки); 3) наличия точной регистрации каждого оборота лопасти вертушки; 4) охвата всей глубины вертикали.

Измерение средней скорости установкой ГР-101 на заданной вертикали производят в следующем порядке:

а) гидрометрический груз с вертушкой погружается в воду так, чтобы ось груза совпала с поверхностью воды;

б) показания секундомера, счетчика оборотов и глубина сбрасываются на нуль. Груз с вертушкой опускается до покрытия лопасти вертушки водой;

в) в зависимости от глубины на вертикали по табл. 4.19 назначается скорость перемещения вертушки с грузом;

г) в зависимости от типа лебедки системой рукояток вертушка устанавливается в требуемое положение;

д) включается секундомер и счетчик оборотов и одновременно начинается равномерное погружение вертушки до дна. В момент достижения дна автоматически останавливаются секундомер и счетчик оборотов;

е) показания секундомера с точностью до 0,2 с и счетчика оборотов и глубины записываются в книжку наблюдений.

2. В табл. 4.19 приведены записи наблюдений по интеграционной установке ГР-101. Расход воды по данным измерений средней скорости на вертикали интеграционным способом вычисляется с учетом измерений на всех вертикалях и данных промерных работ (расчет не приводится).

4.6. Расход, измеренный способом ионного паводка

Упражнение 4.8. Вычисление расхода воды, измеренного способом ионного паводка (смещением) (ГР-67).

Д а н о: Результаты полевых определений расходов (табл. 4.20). Река горная, с бурным пенистым течением, русло сложено валунами.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть общие указания по применению метода ионного паводка для определения расхода воды.

2. а) проанализировать записи наблюдений, б) построить график ионного паводка, в) подсчитать площадь графика ионного паводка, г) определить расчетную электрическую проводимость исходного раствора и вычислить расход воды.

Р е ш е н и е: 1. Способ ионного паводка является разновидностью метода смещения и рекомендуется для применения на малых горных реках с большими скоростями, с расходами воды до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ и небольшой минерализацией (общее содержание ионов $10\text{—}100 \text{ мг/л}$). Сущность способа заключается в том, что в поток в верхнем створе вводится раствор-индикатор (поваренная соль в виде концентрированного раствора или сухого порошка), который перемешивается по пути движения, и на сравнительно коротком расстоянии от места введения образуется створ полного перемешивания, т. е. по всему сечению потока наблюдается более или менее одинаковая концентрация ионов с последующим спадом. Изменение концентрации ионов изменяет электрическую проводимость речной воды, которая измеряется измерителем расхода воды ГР-67. Хорошее перемешивание на пути движения индикатора наблюдается на участке с бурным течением. В пределах участка не должно быть сбросов вод, боковой приточности и интенсивного выхода подземных вод. Длина участка перемешивания L зависит от условий протекания потока и ширины реки. При ширине менее 10 м — длина L от 75 до 250 м ; при ширине $10\text{—}20 \text{ м}$ — L от $150\text{—}500 \text{ м}$ и при ширине $20\text{—}50 \text{ м}$ L изменяется от 250 до 1000 м . Длину участка сле-

Таблица 4.20

Расход воды по способу ионного павodka 20/VI 1968 г.

Река А — пункт Б

а. Общие сведения

Электроизмерительный прибор ГР-67

Уровень воды над нулем графика $H = 58$ смРасстояние между створами $L = 400$ мПродолжительность добегания раствора $\tau_1 = 9$ сСкорость течения воды $v = L/T = 0,59$ м/сШирина реки $B = 10,0$ м. Наибольшая глубина $h = 0,47$ м
$$\text{Масса соли } G = 5 \text{ кг. Удельный расход соли } \frac{G}{Q} = \frac{5 \text{ кг}}{2,70 \text{ м}^3/\text{с}} =$$
 $= 1,85 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^3$

б. Время измерения

Выпуск раствора	12 ч 00 мин 00 с
Начало ионного павodka	9 00
Конец ионного павodka	21 15
Общая продолжительность павodka	12 15

в. Основные расчетные данные

Величина	Обозначение	Значение	Единица измерения
Объем исходного раствора	V_1	0,03	м ³
Объем речной воды для разбавления	W_0	10 000	мл
Объем исходного раствора для разбавления	W_1	1	мл
Кратность разбавления $n = \frac{W_0}{W_1}$	n	10 000	—
Сопrotивление речной воды в потоке	R_0	9	ом
Сопrotивление речной воды в баке	R	—	—
Сопrotивление смеси	R_c	512	ом
Относительная электрическая проводимость смеси:			
по реохорду	P_c	190	0/00
по формуле ¹	P_c	—	0/00
Расчетная электропроводимость исходного раствора	P_p	$190 \cdot 10^4$	0/00

г. Наблюдение за изменением относительной электрической проводимости воды

Время, ч мин с	P 0/00	Время, ч мин с	P 0/00	Время, ч мин с	P 0/00	Время, ч мин с	P 0/00
12 00 00	0	12 12 30	68	12 16 30	13	12 20 30	5
8 00	0	45	54 ²	45	11	45	5

¹ Расчет по формуле производится, если относительная электрическая проводимость высока и не хватает шкалы реохорда.

² При подсчете исправлено на 62 0/00.

Время, ч мин с	P ‰	Время, ч мин с	P ‰	Время, ч мин с	P ‰	Время, ч мин с	P ‰
$\tau' = 9\ 00$	$P_0 = 0$	13 00	57	17 00	10	21 00	5
		15	51	15	9	$\tau_n = 21\ 15\ \text{с. } P_n = 5$	
15	3	30	47	30	8	$\Sigma P = 1530$	
30	8	45	42	45	8		
45	15	14 00	38	18 00	7		
10 00	34	15	35	15	7		
15	58	30	31	30	7		
30	73	45	28	45	7		
45	86	15 00	26	19 00	7		
11 00	97	15	22	15	6		
15	103	30	18	30	6		
30	97	45	16	45	6		
45	90	16 00	14	20 00	6		
12 00	79	15	13	15	6		
15	75						

д. Вычисление расхода воды

Элементы расчета	Обозначение	Значение	Единица измерения
Время между сроками наблюдений	$\Delta\tau$	15	с
Сумма ординат графика ионного паводка	ΣP	1530	‰
Площадь графика ионного паводка	F'	22 950	‰·с
Поправка к площади	ΔF	-1838	‰·с
Площадь графика ионного паводка с учетом поправки	F	21 112	‰·с
Расход воды	Q	2,70	м ³ /с

дует уточнить контрольными и опытными измерениями. Продолжительность ионного паводка должна быть не менее 12—15 мин. Количество поваренной соли, необходимое для измерения, зависит от степени минерализации речной воды (измеренной заранее) и от расхода.

В данном упражнении масса соли $G = 5$ кг, а объем исходного раствора $V = 0,03$ м³. Последовательность работ по измерению расхода следующая: приготовление и отмеривание раствора индикатора, взятие пробы раствора; введение раствора в пусковом створе (следует вводить на середине потока); измерение относительной электрической проводимости воды в измерительном створе прибором ГР-67, определение расчетной электрической проводимости и вычисление расхода. На берегу в удобном месте (лучше в автобусе) устанавливается пульт аппаратуры ГР-67 (не далее 20 м от реки). Результаты наблюдений за измерением относительной электрической проводимости воды ионного паводка записываются

в табл. 4.20. Через постоянные интервалы времени $\Delta\tau = 15$ с производится отсчет по шкале реохорда. Относительная электрическая проводимость за время прохождения паводка вначале возрастает, а затем медленно убывает. Если четыре-пять отсчетов по шкале реохорда остаются без изменения, наблюдения прекращаются. В табл. 4.20 записываются основные расчетные данные.

2. Вычисление расхода воды производится в следующем порядке:

а. Просматривается книжка записи наблюдений и анализируются данные записи хода относительной электропроводимости (табл. 4.20 г). Первое наблюдение произведено в 12 ч 00 мин 00 с и соответствует моменту выпуска раствора. Время $\tau_1 = 12$ ч 9 мин 00 с принимается за момент появления ионов раствора, так как далее начинается увеличение электрической проводимости. Моменту τ_1 соответствует $P_0 = 0$ ‰ (эта строчка в бланке подчеркнута). Время $\tau_n = 12$ ч 21 мин 15 с принимается за момент окончания ионного паводка, когда отсчеты относительной электрической проводимости становятся устойчивыми; конечный отсчет $P_n = 5$ ‰. Первые порции раствора индикатора прошли путь $L = 400$ м за $\tau = 9$ с. Это время записывается в табл. 4.20.

б. На рис. 4.17 приведен график ионного паводка. Плавный ход графика указывает на нормальный ход измерений. Если на графике есть две-три точки (не более), отклоняющиеся от общего направления, то их можно исправить. В данном случае при $\tau = 12$ ч 12 мин 45 с по наблюдениям $P = 54$ ‰ на графике исправлено на 62 ‰. Иногда относительная электрическая проводимость не падает до нуля, тогда линия этой величины условно ограничивается в точке a , которая в данном случае соответствует $\tau_n = 12$ ч 21 мин 15 с и $P_n = 5$ ‰. На рис. 4.17 проводится прямая линия от начала координат до точки a . Линия относительной электрической проводимости и линия Oa ограничивает площадь графика ионного паводка.

в. Для определения площади графика вычисляется сумма чисел относительной электрической проводимости от P_1 до P_n (табл. 4.20) $\sum P = 1530$ ‰. Подсчет площади графика ионного паводка производится по формуле

$$F' = \Delta\tau \cdot \sum P, \quad (4.35)$$

где $\Delta\tau = 15$ с. Подставляя полученное значение, получим $F' = 15 \cdot 1530 = 22\,950$ ‰·с.

г. В том случае, если к концу наблюдений относительная электрическая проводимость не равна нулю, в площадь графика ионного паводка вводится поправка по формуле

$$\Delta F = 0,5 (P_0 + P_n) (\tau_n - \tau_1), \quad (4.36)$$

где P_0 и P_n — начальная и конечная относительная электрическая проводимость, ‰; τ_n и τ_1 — время появления и исчезновения раствора. Если относительная электрическая проводимость после

окончания прохождения ионного павodka установилась выше нуля, то ΔF вводится со знаком минус, а если ниже — со знаком плюс. В данном случае

$$-\Delta F = 0,5(0 + 5)(21 \text{ мин } 15 \text{ с} - 9 \text{ мин } 00 \text{ с}) = -1838 \text{ ‰}.$$

Площадь графика ионного павodka F равна

$$F = F' - \Delta F = 22\,950 - 1838 = 21\,112 \text{ ‰} \cdot \text{с}.$$

г. Расчетная электрическая проводимость раствора вычисляется по соотношению

$$P_p = P_c n,$$

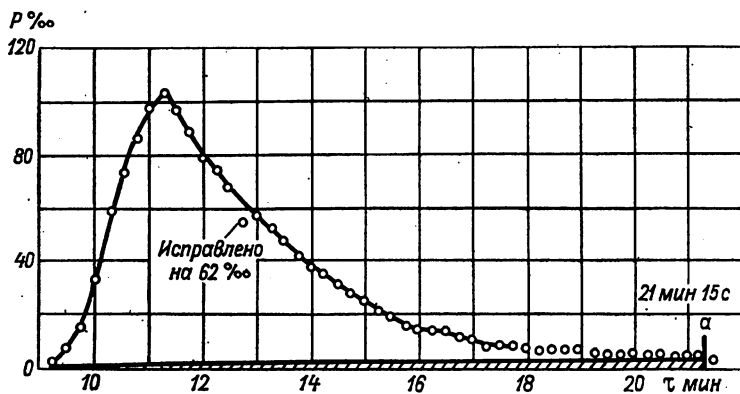


Рис. 4.17. График ионного павodka

где P_c — относительная электрическая проводимость смеси по реордору, ‰; n — кратность разбавления по табл. 4.20. Для данного примера $P_p = 190 \cdot 10\,000 = 190 \cdot 10^4 \text{ ‰}$.

Расход воды по способу ионного павodka вычисляется по формуле

$$Q = V_1 P_p / (F' \pm \Delta F), \quad (4.37)$$

где V_1 — объем исходного раствора, м^3 (по табл. 4.20); P_p — расчетная электрическая проводимость, ‰; $F \pm \Delta F$ — площадь ионного павodka с поправкой.

Подставляя в формулу (4.37) известные значения, имеем $Q = 0,03 \cdot 190 \cdot 10^4 : 21\,112 = 2,70 \text{ м}^3/\text{с}$.

Определив расход, в табл. 4.20а вычисляют:

1. Скорость течения по формуле $v = L/T$, где T — время в секундах от момента пуска раствора до пика павodka. По табл. 4.20а время $\tau = 11 \text{ мин } 15 \text{ с} = 675 \text{ с}$ при пике относительной электрической проводимости $P = 103 \text{ ‰}$. Скорость течения воды $v = 400 : 675 = 0,59 \text{ м/с}$.

2. Удельный расход соли определяется по отношению массы соли G кг к расходу воды Q $\text{м}^3/\text{с}$; значение удельного расхода, $G/Q = 5 : 2,70 = 1,85 \text{ кг} \cdot \text{с}/\text{м}^3$.

4.7. Расход, измеренный электролитическим способом

Упражнение 4.9. Вычисление расхода воды горной реки, измененного электролитическим способом с применением прибора ГР-54.
Д а н о: книжка измерения расхода воды (табл. 4.21).

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть общие указания по применению электролитического способа определения расхода воды.

2. Вычислить расход воды в следующем порядке: а) проанализировать записи в бланке, б) выделить периоды нарастания и спада электрической проводимости, в) определить естественную электрическую проводимость, г) вычислить сумму приращений электрической проводимости, д) вычислить постоянный коэффициент K и расход воды Q .

Р е ш е н и е. 1. Электролитический способ определения расхода воды, предложенный Н. В. Пикушем [39], применяется на горных реках при расходах до $50 \text{ м}^3/\text{с}$. В качестве электролита, вводимого в поток, используется поваренная соль в небольшом количестве ($0,1-0,8 \text{ кг}$ на расход воды $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$); в данном примере взято 3 кг соли при $Q = 2,95 \text{ м}^3/\text{с}$. В отличие от способа ионного паводка, в электролитическом способе не требуется полного перемешивания электролита с речной водой по ширине реки.

Рассмотрим сущность предложенного способа. Введем следующие обозначения: C_0 — естественная концентрация поваренной соли в потоке, $\text{кг}/\text{м}^3$; M — масса сухой поваренной соли для определения расхода, кг ; W_s — объем воды, в котором растворяется сухая поваренная соль, м^3 ; C_1 — концентрация поваренной соли в объеме воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Введенный в верхнем створе участка концентрированный раствор поваренной соли, равномерно распределяясь в речном потоке, образует облако, которое появится в нижнем створе по истечении времени t .

Объем воды (в м^3), который пройдет через нижний створ, $W = Qt$, где Q — расход воды в $\text{м}^3/\text{с}$; средняя концентрация в этом объеме речной воды обозначается C , тогда можно записать

$$C_0W + M = CW. \quad (4.38)$$

Объем воды W можно получить из соотношения

$$W = M/(C - C_0). \quad (4.39)$$

Расход воды вычисляется по формуле

$$Q = W/t = M/[(C - C_0)t]. \quad (4.40)$$

Массу поваренной соли в формуле (4.40) можно заменить соотношением $M = C_1W_s$, в кг , тогда расход воды можно записать в таком виде:

$$Q = C_1W_s/[(C - C_0)t]. \quad (4.41)$$

Таблица 4.21

Измерение расхода воды электролитическим способом
20/IX 1979 г.

Река А — пункт Б

а. Общие сведения

Прибор ГР-54
Створ 12 м ниже моста
Уровень воды над нулем графика,
см 181
Отметка нуля графика 129,30 м абс.
Длина участка $L = 140$ м
Ширина участка В от 10 до 18 м
Характеристика участка:
русло гравелистое, течение бур-
ное

Расход воды $Q = 2,95$ м³/с
Число рабочих электродов 46 пар
Объем раствора $W_0 = 33,65$ л
Объем речной воды для растворения
 $W_B = 11,15$ л
Объем раствора для разбавления $W_P =$
 $= 1,25$ мл
Способ введения раствора:
выпуск из четырех ведер с левого
берега

б. Полевое градуирование электродов

Электрическая проводимость	Отсчет		Принято
	1	2	
Электроды в баке с водой E_B	47,5	47,5	40,0
Электроды в баке с раствором E_P	88,0	87,0	
Приращение $\Delta E = E_P - E_B$	41,5	39,5	

в. Измерение электрической проводимости

$\frac{\text{мин} \rightarrow}{\text{с} \downarrow}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
5	37	37,5	43	67	60	52	47	40,5	40,0
10	37	37,5	45	65	58	52	46	40,5	40,0
15	37,5	37,5	49	64	58	51	46	40,0	40,0
20	37,5	38	54	64	57	51	45	40,0	40,0
25	37,5	38	56	63	57	51	45	40,0	40,0
30	37,5	38	59	63	56	50	44	40,0	40,0
35	37,5	38	63	62	55	50	44	40,0	40,0
40	37,5	38	64	62	55	50	43	40,0	40,0
45	37,5	38	66	62	54	49	43	40,0	40,0
50	37,5	38	66	61	54	48	42	40,0	40,0
55	37,5	39	67	60	53	48	41	40,0	40,0
60	37,5	40	67	60	53	47	41	40,0	40,0
ΣE_i		79	699	753	670	599	527	81	3408

Средний из отсчетов перед началом и после окончания движения раствора

через створ $E_0 = \frac{E_t + E_i}{2} = \frac{38 + 40}{2} = 39$ дел.

Количество отсчетов при движении раствора через створ $n = 64$.Сумма показаний при движении раствора створ $\Sigma E_i = 3408$ дел.Произведение $nE_0 = 2496$ Сумма приращений показаний $S = \Sigma E_i - nE_0 = 912$ дел.Время между отсчетами $\Delta t = 5$ с.

Концентрация электролита (поваренной соли) связана с его электрической проводимостью функциональной зависимостью

$$C = KE, \quad (4.42)$$

где K — коэффициент пропорциональности, E — электропроводимость.

В связи с этим измерение концентраций C_0 , C и C_1 можно заменить измерением электрической проводимости речной воды (до пуска раствора и после перемешивания) и электрической проводимости раствора. Измерение производится измерителем электрической проводимости воды ИЭВ, входящим в состав аппаратуры ГР-54.

В полевых условиях измеряется приращение электрической проводимости в условных единицах по шкале прибора (в делениях шкалы милливольтметра), разделенной на 160 делений. Между числом делений и электрической проводимостью в омах составлена зависимость. При числе делений свыше 10 зависимость имеет прямолинейный характер, что позволяет все отсчеты производить в делениях, не переводя их в омы. Шкала прибора связана с цепочными электродами, опускаемыми в воду. Определение электрической проводимости концентрированного раствора, вводимого в реку, производится после разбавления раствора. Измерение электрической проводимости разбавленного раствора представляет собой полевую градуировку электродов.

Введем обозначения:

W_B — объем отобранной речной воды для разбавления в градуировочном сосуде, W_p — объем раствора для разбавления в градуировочном сосуде, E_B — электрическая проводимость отобранной речной воды, E_p — электрическая проводимость разбавленного раствора.

Уравнение баланса массы электролита в единицах массы имеет вид

$$C_0 W_B + C_1 W_p = C(W_B + W_p). \quad (4.43)$$

Определим значение C_1 из формулы (4.43)

$$C_1 = [C(W_B + W_p) - C_0 W_B] / W_p. \quad (4.44)$$

Значение W_p по сравнению с W_B мало, им можно пренебречь, тогда

$$C_1 = W_B (C - C_0) / W_p. \quad (4.45)$$

Заменим концентрацию электрической проводимостью, получим

$$C_1 = K W_B (E_p - E_B) / W_p. \quad (4.46)$$

Введем в формулу (4.41) значение концентрации через электропроводимость

$$Q = (W_B W_p / W_p) (E_p - E_B) / [(E - E_0) t], \quad (4.47)$$

где E_0 и E_B — электрическая проводимость речной воды до и после

введения раствора; E_b — электрическая проводимость воды в пробе речной воды; E_p — электрическая проводимость раствора.

Значение приращения $\Delta E = E_p - E_b$ должно быть не менее 30 и определяется градуировкой электродов.

Обозначим мгновенную электрическую проводимость через E_i . Для получения осредненной электрической проводимости во времени E наблюдения производятся через интервал Δt , равный 5 или 10 с за период T_1 — момента увеличения электрической проводимости — до T_2 — момента прекращения влияния электролита. По шкале измерителя электрической проводимости за этот промежуток времени определяется n (число отсчетов) и вычисляется сумма $\sum E_i$. Формула расхода будет иметь вид

$$Q = (W_b W_s / W_p) (E_p - E_b) / [(\sum E_i - n E_0) \Delta t]. \quad (4.48)$$

Вводятся обозначения:

$$K = W_b / (W_p \Delta t), \quad (4.49)$$

$$\Delta E = E_p - E_b, \quad (4.50)$$

$$S = \sum E_i - n E_0. \quad (4.51)$$

Расчетную формулу расхода (4.48) можно представить в виде

$$Q = K W_s \Delta E / S. \quad (4.52)$$

Практически при определении расхода воды электролитическим способом раствор следует приготовить из расчета на 1 л воды не менее 400 г соли.

2а. При анализе табл. 4.21 необходимо проверить полноту записей. Максимальное приращение электрической проводимости должно быть не менее 20—30 делений. В данном примере оно равно $67 - 39 = 28$ делений.

б. Выделение периода нарастания и спада электрической проводимости производится в табл. 4.21 в, где проводятся две черты: первая между последним отсчетом до подхода раствора ($E_i = 38$ дел.) и первым отсчетом в начале резкого повышения электрической проводимости. Вторая черта ставится между последним отсчетом повышенной электрической проводимости и первым отсчетом естественной электрической проводимости $E_i = 40$ делений. Положение второй черты уточняется по соотношению между количеством отсчетов на подъеме и спаде электрической проводимости. Например: в данном случае от начала подъема электрической проводимости до пика (включительно) было 13 отсчетов; значит, общее число отсчетов будет не более 65. И действительно, между чертами число отсчетов 64.

в. Среднее значение естественной электрической проводимости потока E_0 вычисляется по формуле

$$E_0 = (E_i' + E_i'') / 2. \quad (4.53)$$

$E_0 = (38 + 40) : 2 = 39$ дел. Точность вычисления E_0 до 0,2 деления.

г. Для вычисления сумм приращения электрической проводимости суммируются показания E_i (табл. 4.21 в), заключенные между выделенными чертами по графам, а затем находится общая сумма. Вычисляется произведение количества отсчетов n на значение естественной электрической проводимости $nE_0 = 64 \cdot 39 = 2496$ дел.

Сумма приращений электрической проводимости по формуле (4.51) $S = 3408 - 2496 = 912$ дел. Значение S должно быть ≥ 200 делений.

Значения $\sum E_i$, nE_0 и S вычисляются с точностью до одного деления.

д. Постоянный коэффициент K вычисляется по формуле (4.49) $K = 11,5 : (1,25 \cdot 5) = 1,78 \text{ с}^{-1}$. Точность определения $K = 0,001 \text{ с}^{-1}$.

Расход воды вычисляется по формуле (4.52) $Q = 1,78 \cdot 33,65 \times 40 : 912 = 2,63 \text{ м}^3/\text{с}$.

4.8. Расход воды, определяемый объемным способом и способом смешения

Упражнение 4.10. Определение расхода воды объемным способом.

Д а н о: 1. Время наполнения сосуда $t = 27 \text{ с}$, объем воды в мерном сосуде $W = 87,510 \text{ л}$.

2. Начальный отсчет в бассейне резервуара $H_n = 61 \text{ мм}$, конечный $H_k = 74 \text{ мм}$, продолжительность наблюдений $t = 12 \text{ с}$.

Т р е б у е т с я: вычислить расход воды по времени наполнения мерного сосуда и приращению уровней в бассейне резервуара.

Р е ш е н и е: объемный способ применяется для определения расхода воды по объему воды W , собранной в специальном мерном сосуде, в который вливается поток воды в течение измеренного периода времени t :

$$Q = W/t. \quad (4.54)$$

Способ применяется для определения расхода ключей и родников с устойчивым режимом, а также при градуировании лотков и водосливов. Точность зависит от точности измерения объема в мерном сосуде и оценивается $\pm 0,5 \%$.

Измерение расхода объемным способом производится двумя приемами: а) по времени наполнения мерного сосуда; б) по приращению уровня воды в нем. Определение расхода по времени наполнения применяется при малых расходах, до 5 л/с .

Точность отсчета времени по секундомеру $0,2 \text{ с}$, а объем измеряется с точностью до $0,001 \text{ л}$; таким образом время заполнения мерного сосуда должно быть не менее 40 с . Если это время не может быть соблюдено, то производится несколько измерений, при которых отклонение объема должно быть менее 5% .

Объем мерного сосуда зависит от расхода воды; при расходе в несколько миллиметров применяются мензурки или мерные лит-

ровые кружки; при расходе до 1 л/с применяется ведро, а свыше — специальные переносные баки.

Определение расхода по приращению уровня применяется при расходах до 20 л/с. На участке устанавливается мерный резервуар объемом 1—2 м³, куда отводится вода по желобу или лотку. Мерный сосуд заранее градуируется; для каждого деления уровня H мм известен объем воды; высота уровня измеряется крючковой рейкой с точностью до 1 мм. Перед измерением и после него производится отсчет уровня в мерном сосуде. По разности отсчетов между измерениями и времени наблюдения определяется расход воды.

Точность способа зависит от точности измерения объема в мерных сосудах и оценивается $\pm 0,5\%$. Для данного первого примера $Q = 87,510 : 27 = 3,2$ л/с.

Во втором случае разность уровней $H_k - H_n = 74 - 61 = 13$ мм. По градуировочной таблице объем воды, соответствующий 13 мм, равен 64,875 л. Следовательно, расход воды равен $Q = 64,875 : 12 = 5,4$ л/с.

Упражнение 4.11. Определения расхода воды способом смешения.

Д а н о: 1. Ширина реки $B = 7$ м, средняя глубина $h_{ср} = 0,8$ м, разработанное галечное русло горной реки с уклоном $I = 0,002$.

2. Продолжительность выпуска раствора $t = 10$ мин, естественная концентрация поваренной соли $C_0 = 0$, расход вводимого раствора $Q_p = 0,03$ м³/с.

Т р е б у е т с я: 1. Определить: а) расстояние между пусковым и измерительным створами, б) количество поваренной соли.

2. Определить расход воды Q .

Р е ш е н и е: 1. Способ смешения основан на использовании турбулентных свойств потока, обеспечивающих хорошую перемешиваемость водной массы, применяется на порожистых участках равнинных рек или на горных реках, на участке намечается пусковой и измерительный створы. На пусковом створе в течение некоторого времени (длительный пуск) или мгновенно¹ вводится определенное количество растворенного вещества-индикатора с известной концентрацией. Индикатором может служить поваренная соль. Кроме поваренной соли, применяются нитрит натрия или красителя — флюоресцеин и др. Степень понижения концентрации вещества в пробах, полученных в измерительном створе (или створе достаточного перемешивания), является показателем расхода воды. Введение индикатора должно быть безопасным для питьевых и хозяйственных нужд на участке.

Введем обозначения C_1, C_2, C_0 — концентрация вещества соответственно в пусковом, измерительном створах и в естественном русле, кг/м³; Q — измеренный расход, м³/с; Q_p = расход вводи-

¹ При мгновенном пуске раствора для определения расхода применяются способы, рассмотренные в упражнениях 4.9 и 4.10.

мого раствора, м³/с. Формула для определения расхода воды

$$Q = Q_p (C_1 - C_2) / (C_2 - C_0). \quad (4.55)$$

так как C_1 во много раз больше C_2 , то формулу (4.55) можно записать в виде

$$Q = Q_p C_1 / (C_2 - C_0). \quad (4.56)$$

Если естественная концентрация в потоке C_0 очень мала, то формула имеет вид

$$Q = Q_p C_1 / C_2. \quad (4.57)$$

а. Расстояние между пусковым и измерительным створами приближенно определяется по формуле

$$L = 0,13B^2C(0,7C + 6)/(gh), \quad (4.58)$$

где B и h — ширина и средняя глубина, м; C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с; g — ускорение свободного падения, м/с².

Для данного примера: коэффициент шероховатости по приложению 1 $n = 0,040$; коэффициент Шези по приложению 2 при $h_{cp} = 1,8$ $C = 28,7$ м^{0,5}/с. Подставим известные значения в формулу (4.58)

$$L = 0,13 \cdot 7^2 \cdot 28,7 (0,7 \cdot 28,7 + 6) / 9,8 \cdot 0,8 = 437 \text{ м.}$$

б. Количество поваренной соли определяется по формуле

$$G = QtC_2, \quad (4.59)$$

где Q — примерное значение расхода, м³/с; t — продолжительность выпуска раствора в секциях, с; C_2 — концентрация в измерительном створе, кг/м³.

Кратность разбавления исходного раствора не более $n' = 25\,000$ раз. Концентрация C_2 в измерительном створе должна быть примерно в десять раз больше естественной концентрации. Следовательно, минимальная концентрация C_2 должна составлять $C_2 = C_1/n' = 0,008 = 0,01$ кг/м³.

Таким образом, потребное количество поваренной соли при измерении расхода воды в 1 м³/с составит $G = 1,0 \cdot 10 \cdot 60 \cdot 0,01 = 6$ кг.

Пробы отбираются в измерительном створе после начала поступления раствора из поверхностного слоя по две у берегов и одна по середине реки. Всего берется 4—5 серий через 0,5—1 мин. Одновременными по концентрации считаются пробы, в которых отклонение у берегов и на середине не более 5 %.

2. После лабораторного анализа производится расчет расхода по формуле (4.57) $Q = 0,03 \cdot 0,25 : 0,01 = 0,75$ м³/с.

Кроме перечисленных выше способов, расходы воды могут быть вычислены еще следующими:

а) способом уклон—площадь, при котором расходы получают расчетным способом с вычислением скорости по формуле Шези;

б) определения расхода на гидрометрических лотках и водосливах;

в) использования гидротехнических сооружений ГЭС, гидрозлов, насосных установок.

Последние два способа изложены в работах [36, 37].

4.9. Погрешность определения расходов воды

Упражнение 4.12. Произвести анализ расходов, измеренных многоточечным способом, с целью выяснения возможности перехода на основной способ.

Д а н о: 1. Материалы вычисления расхода воды графическим способом (см. упражнение 4.2, рис. 4.8, табл. 4.4).

2. Расходы воды, вычисленные различными способами за период 11/IV 1962 г.— 18/VIII 1968 г.

Т р е б у е т с я: 1. Выбрать характерные вертикали с целью использования их в качестве основных при измерении расхода воды.

2. Вычислить расходы воды по сокращенному числу вертикалей аналитическим способом с уменьшением количества точек на вертикали.

3. Произвести анализ возможного сокращения вертикалей и дать рекомендации о возможности перехода на основной способ измерения.

Р е ш е н и е: 1. На гидрологических станциях измерения расходов часто производятся многоточечным способом по большому количеству вертикалей. Однако в некоторых случаях (в частности, для устойчивых русел) измерения расходов можно производить по меньшему числу скоростных вертикалей, обеспечив при этом достаточную точность окончательных результатов. Для перехода от многоточечного способа измерения расхода воды на основной следует произвести тщательный анализ материала за ряд лет.

С этой целью выбираются 34 расхода, измеренные за несколько лет при различных фазах режима (в период, свободный ото льда, и при ледяном покрове). Все расходы должны быть измерены многоточечным способом и вычислены графическим методом. В их число вошел и расход р. Педезде — с. Литене от 20/VIII 1962 г., вычисление которого показано в упражнении 4.2. Анализ расходов заключается в отборе части скоростных вертикалей, по значениям скоростей которых можно построить эпюру распределения скорости по ширине реки, по своему очертанию близкую к эпюре, построенной по всем вертикалям.

Выбор характерных вертикалей следует произвести по эпюре распределения средней скорости по ширине реки.

На эпюре намечаются постоянные для всех расходов вертикали, расположенные в точках перелома эпюры средней скорости; одна из вертикалей должна быть на стрежне, где скорость наибольшая.

Подбор вертикалей должен быть представлен в двух, а в зави-

симости от точности, указанной ниже, и более вариантах сокращения.

На рис. 4.7 построена эпюра средней скорости по семи вертикалям для расхода воды, вычисленного графическим способом. Намежим два варианта сокращения: а) пять вертикалей: № 2, 3, 4, 5, 6 и б) три вертикали: № 2, 4, 6.

На рис. 4.7 первый вариант отмечен двумя черточками у скоростных вертикалей, второй вариант — тремя черточками.

2. По сокращенному числу вертикалей все 34 расхода, принятые для анализа, вычисляются вторично аналитическим методом.

3. Для анализа возможного сокращения числа вертикалей производятся расчеты в следующей последовательности: а) выписывается значение расхода Q_1 , вычисленное графическим способом по полному числу вертикалей, принимаемое за эталон; б) выписываются расходы, вычисленные аналитическим способом по сокращенному числу вертикалей и точек на них; в) определяются отклонения расходов в %, вычисленных аналитически, от расходов, вычисленных графически, с учетом знака отклонения и определяются три вида погрешностей:

1) систематическая погрешность — среднее алгебраическое отклонение с учетом знака; в данном примере систематическая погрешность для обычного аналитического способа равна — 2,8 %;

2) суммарная погрешность — среднее отклонение без учета знака; для обычного аналитического способа равна 3,3 %;

3) наибольшая погрешность отдельного расхода; при обычном аналитическом способе составляет — 9,2 %.

Переход на сокращенное число вертикалей считается допустимым, если: 1) систематическая погрешность расходов, вычисленных основным аналитическим методом, не превышает 2 %; 2) суммарная погрешность не превышает 3 %; 3) наибольшая погрешность отдельного расхода за вычетом систематической не превышает 5 % (если систематическая меньше 2 %, то допускается разность наибольшей и систематической до 65 %).

В данном примере для первого варианта погрешности полного аналитического метода выше указанного предела. В таком случае рекомендуется перейти ко второму варианту сокращения вертикалей (до трех). Погрешности при втором варианте (систематическая 0,72 %, суммарная 2,8 % и наибольшая за вычетом систематической 6,28 %) находятся в допустимых пределах.

Упражнение 4.13. Вычисление погрешности определения расхода воды.

Д а н о: 1. Исходные данные упражнения 4.2.

2. По данным измерения и условиям работ вычислены погрешности за счет: а) градуирования вертушки (2 %), б) неточности установки оси вертушки (0,6 %), в) возможного смещения вертушки на вертикали (0,2 %), г) применения пятиточечной формулы (2 %), д) использования исправленных глубин ($\Delta h = 0,02$ м), е) определения положения промерных вертикалей ($\Delta b = 0,05$ м).

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть формулы вычисления погрешностей.

2. Определить погрешности расхода ΔQ и σ_Q .

Р е ш е н и е: 1. Измеренный расход $Q_{\text{изм}}$ отличается от действительного Q на величину ΔQ , которая возникает вследствие погрешностей измерения скорости и геометрических элементов площади сечения b и h . Погрешность вычисления расхода (в %) определяется в общем виде по формуле

$$\Delta Q = (Q_{\text{изм}} - Q) \cdot 100/Q. \quad (4.60)$$

При нормальных условиях измерения погрешности расхода при многоточечном способе составляют 2—3 %, при основном 3—5 %, а при неблагоприятных условиях — соответственно 3—10 и 5—15 %.

Причины возникновения погрешностей и вероятная погрешность при различных условиях измерения расхода рассмотрены в работе Г. Ф. Железнякова и Б. Б. Данилевича [23]. Разработаны формулы оценки погрешности ΔQ и средней квадратической погрешности σ_Q расхода Q :

$$\Delta Q = f'_v \Delta h + f' \Delta v + \frac{1}{2} F_n (vh) \Delta b, \quad (4.61)$$

$$\Delta Q = f_v \Delta h + f \Delta v + \sum q \Delta b. \quad (4.62)$$

В данных формулах Δh , Δv и Δb представляют собой погрешности определения глубин, скорости и ширины, они устанавливаются по обстановке работ и приведены в условии данного упражнения.

Значения коэффициентов f'_v , f' и $\frac{1}{2} F_n (vh)$ приведены ниже, во втором пункте решения. В данном упражнении применяется формула (4.61), причем для расчета используется аналитический способ вычисления расхода. Пример вычисления погрешностей по полному аналитическому и графо-аналитическому способам с использованием всех формул из работы Железнякова подробно рассмотрен в первом издании настоящего пособия. Вывод формулы средней квадратической погрешности σ_Q приведен в работе [23].

2а. Определение погрешности расхода ΔQ и относительного значения $\Delta Q/Q$ производится в следующем порядке.

Вычисляется относительная погрешность определения средней скорости на вертикали суммирования всех погрешностей, влияющих на ее значение (см. упражнение 3.25), $\Delta v/v = 2 + 0,6 + 0,2 + 2 = 4,8 \%$.

Абсолютная погрешность вычисления скорости при средней скорости $v = 0,58$ м/с равна $\Delta v = 4,8 \cdot 0,58 : 100 = 0,03$ м/с.

б. На рис. 4.18 приведена схема, на которой показаны промерные и скоростные вертикали, использованные при вычислении расхода воды полным аналитическим способом. Не приводя вывода формулы средней квадратической погрешности расхода σ_Q , введем некоторые обозначения и приведем их значения для данного рас-

хода: K — коэффициент для скоростей на прибрежных вертикалях, равный 0,7; n — число скоростных вертикалей, равное семи; m — число всех вертикалей (промерных и скоростных), равное 32; p — число площадок между урезом левого берега и 1-й скоростной вертикалью, равное четырем; r — число площадок между скоростными вертикалями, равное четырем; x — число площадок между $n-2$ и $n-1$ -й скоростными вертикалями; y — число площадок между $n-1$ и n -й скоростными вертикалями; $z = m + 1 - (p + r + \dots + x + y)$ — число площадок между n -й скоростной вертикалью и правым урезом воды; $z = 32 + 1 - (4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4) = 33 - 28 = 5$; B — ширина реки; $b = B / (m + 1) = 33,2 : (32 + 1) = 1,01$. В приведенной ниже фор-

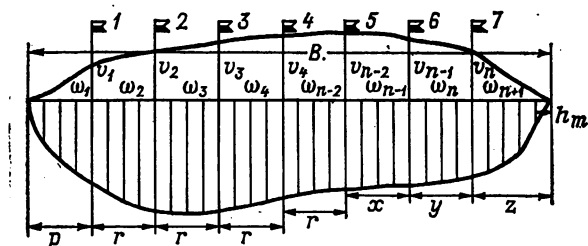


Рис. 4.18. Схема к вычислению средней квадратической погрешности расхода
р. Педеезе — с. Литене,
20/VIII 1962 г.

муле средней квадратической погрешности число членов приводится не в общем виде, а соответственно числу h , v и f для данного расхода:

$$\begin{aligned} \sigma_Q^2 = & b^2 \left[(p-1) k^2 v_1^2 + \frac{1}{4} \left(k v_1 \frac{v_1 + v_2}{2} \right)^2 + (r-1) \times \right. \\ & \times \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_3 + v_4}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_4 + v_{n-2}}{2} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{4} \left(\frac{v_{n-2} + v_{n-1}}{2} + \frac{v_{n-1} + v_n}{2} \right)^2 + (y-1) \left(\frac{v_{n-1} + v_n}{2} \right)^2 + \\ & + \frac{1}{4} \left(\frac{v_{n-1} + v_n}{2} + k v_n \right)^2 + (z-1) k^2 v_n^2 \left. \right] \sigma_h^2 + \\ & + \left[\left(k f_1 + \frac{f_2}{2} \right)^2 + \frac{1}{4} (f_2 + f_3)^2 + \frac{1}{4} (f_3 + f_4)^2 + \right. \\ & + \frac{1}{4} (f_4 + f_{n-2})^2 + \frac{1}{4} (f_{n-2} + f_{n-1})^2 + \frac{1}{4} (f_{n-1} + f_n)^2 + \\ & \left. + \left(k f_{n+1} + \frac{f_n}{2} \right)^2 \right] \sigma_v^2 + k^2 v_n^2 \frac{h^2}{4} \sigma_b^2. \end{aligned} \quad (4.63)$$

Для определения коэффициентов формулы (4.63) приведено их значение не в общем виде, а применительно к количеству промерных и скоростных вертикалей, использованных при аналитическом методе вычисления расхода.

Рассмотрим формулы коэффициентов f'_v , f' и $\frac{1}{2} F_n (hv)$:

$$f'_v = \left(\frac{k}{2} v_1 b_1 + \frac{v_1 + v_2}{2} b_2 + \dots + \frac{v_6 + v_7}{2} + \frac{k}{2} v_7 b_7 \right), \quad (4.64)$$

$$f' = \left(\frac{k}{2} h_1 b_1 + \frac{h_1 + h_2}{2} b^2 + \dots + \frac{h_6 + h_7}{2} + \frac{k}{2} h_7 b_7 \right), \quad (4.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} F_n (vh) = \frac{1}{2} \left[kh_1 v_1 + \frac{v_1 + v_2}{2} (h_1 + h_2) + \dots + \right. \\ \left. + \frac{v_6 + v_7}{2} (h_6 + h_7) + kv_7 h_7 \right]. \end{aligned} \quad (4.66)$$

При $k = 0,7$, подставляя известные значения, получаем: $f'_v = 16,79 \text{ м}^2/\text{с}$, $f' = 70,75 \text{ м}^2$, $\frac{1}{2} F_n (vh) = 7,30 \text{ м}^2/\text{с}$.

Подставляя значения коэффициентов и заданные значения Δh , Δv , Δb в формулу (4.61), определяем абсолютную погрешность расхода воды, вычисленного аналитическим способом: $\Delta Q = 16,79 \cdot 0,02 + 70,75 \cdot 0,022 + 7,30 \cdot 0,05 = 2,98 \text{ м}^3/\text{с}$.

Относительная погрешность равна $\Delta Q/Q = 2,98 \cdot 100 : 44,0 = 6,3 \%$.

Значения средних квадратических погрешностей σ_h , σ_v и σ_b связаны с погрешностями Δh , Δv и Δb соотношениями $\sigma_h = 5/4 \Delta h$; $\sigma_v = 5/4 \Delta v$ и $\sigma_b = 5/4 \Delta b$, а следовательно, при введении численных значений в формулу будут приняты значения $\sigma_h = 0,025 \text{ м}$; $\sigma_v = 0,04 \text{ м/с}$; $\sigma_b = 0,06 \text{ м}$.

По результатам вычисления расхода воды аналитически при многоточечном способе измерения из табл. 4.4 имеем: $v_1 = 0,36$; $v_2 = 0,54$; $v_3 = 0,69$; $v_4 = 0,76$; $v_5 = 0,81$; $v_6 = 0,64$; $v_7 = 0,48 \text{ м/с}$; $f_1 = 4,87$; $f_2 = 11,1$; $f_3 = 11,8$; $f_4 = 11,2$; $f_5 (n-2) = 10,6$; $f_6 (n-1) = 9,74$; $f_7 (n) = 9,41$ и $f_1 (n+1) = 7,82 \text{ м}^2$. Подставим все известные значения в формулу (4.63): $\sigma_Q^2 = 1,23 \text{ м}^3/\text{с}$ и $\sigma_Q = \sqrt{1,23} = 1,11 \text{ м}^3/\text{с}$.

Относительная погрешность равна $\sigma_Q/Q = 1,11 \cdot 100 : 44,8 = 2,3 \%$.

Как видим, погрешность расхода, вычисленного аналитическим методом с учетом всех вертикалей, значительно выше, чем погрешность 6,3 %, полученная ранее.

Оценить погрешность определения расхода можно по формуле Железнякова и Данилевича

$$\tilde{\sigma}_Q = \frac{b}{Q} \left[\sum_{i=1}^{i=n} q_i^2 (\tilde{\sigma}_v^2 + \tilde{\sigma}_h^2) + \left(\sum_{i=1}^{i=n} q_i \right)^2 \tilde{\sigma}_b^2 \right]^{1/2}, \quad (4.67)$$

выведенной на основе аппроксимированной формулы расход $Q =$

$$= \int_0^B qdb.$$
 В этой формуле: b — среднее расстояние между промерными вертикалями, м; $\tilde{\sigma}_Q$ — измеренный расход, м³/с; q_i — расход воды на вертикали, м²/с; $\tilde{\sigma}_Q$, $\tilde{\sigma}_v$, $\tilde{\sigma}_h$ и $\tilde{\sigma}_b$ — соответственно относительные средние квадратические погрешности расхода, скорости, глубины и расстояний между промерными вертикалями.

Рассчитаем среднюю квадратическую относительную погрешность при: $Q = 5580$ м³/с, $B = 860$ м, $v_{cp} = 0,31$ м/с, $h_{cp} = 7,2$ м и $b = 39$ м.

Исходные данные погрешностей по работе [23] принимаем $\tilde{\sigma}_v = 3\%$, $\tilde{\sigma}_h = 2\%$. Для $B = 850$ м средняя квадратическая абсолютная погрешность измерения расстояний между промерными вертикалями может быть принята равной $0,3$ м, откуда $\tilde{\sigma}_b = 0,3 \cdot 100 : 39 = 0,8\%$. По данным обработки известно, что $\sum q_i^2 = 1017$ м⁶/с²; $(\sum q_i)^2 = 18\,444$ м⁶/с². Подставляя в формулу (4.67) известные значения, получаем:

$$\tilde{\sigma}_Q = \frac{39}{5580} [11017(0,03^2 + 0,02^2) + 18\,444 \cdot 0,008^2]^{1/2} = 1\%.$$

При значении $\tilde{\sigma}_Q \approx 1\%$ можно ожидать значение предельной погрешности, в 2—3 раза большее. Следует отметить, что формула (4.67), как и другие подобные соотношения, выражают значение погрешности расхода, зависящей от погрешности измерений v , h и b .

Вопрос оценки точности измеренных расходов разрабатывается в ГГИ и изложен в работах [18] и др.

Для определения средней квадратической погрешности измерения расходов воды $\tilde{\sigma}_Q$ Карасевым предложена зависимость:

$$\tilde{\sigma}_Q = [\beta (\tilde{\sigma}_{w_s}^2 + \tilde{\sigma}_{v_s}^2) / N]^{1/2}, \quad (4.68)$$

где $\tilde{\sigma}_{w_s}$ и $\tilde{\sigma}_{v_s}$ — относительные погрешности измерения соответственно площадей отсеков между скоростными вертикалями и средних скоростей потока в этих отсеках; N — число отсеков; β — метрологический параметр, определяемый по формуле

$$\beta = N \sum_1^N q_s^2 / Q^2, \quad (4.69)$$

где при равномерном размещении скоростных вертикалей по ширине потока в прямоугольном русле $\beta = 1$, речном беспойменном $\beta = 1,2 \div 1,8$, при наличии поймы $1,8 < \beta < 3,0$, q_s — частичные расходы, Q — общий расход.

Некоторые исследователи рассматривают формулу Херши, по которой случайная погрешность измерения расхода имеет вид:

$$X'_q = \pm \sqrt{X_m'^2 + (X_b'^2 + X_d'^2 + X_v'^2) / m}, \quad (4.70)$$

где

$$X'_0 = \pm \sqrt{X_t^2 / \rho + X_0}, \quad (4.71)$$

где X'_m — погрешность выбора числа вертикалей; X_t — погрешность выбора продолжительности выдержки вертушки в точке измерения; X_0 — погрешность за счет выбора точек измерения на вертикали; ρ — число точек измерения скорости на вертикали; X'_b , X'_d и X'_v — случайные погрешности измерения ширины, глубины и скорости; m — число вертикалей.

Глава 5.

Связь расходов воды и уровней; подсчет стока

5

5.1. Построение кривой расхода при однозначной зависимости между расходами и уровнями

Упражнение 5.1. Построение кривой зависимости расходов воды от уровней $Q = f(H)$.

Д а н о: 1. Измеренные расходы воды (табл. 5.1).

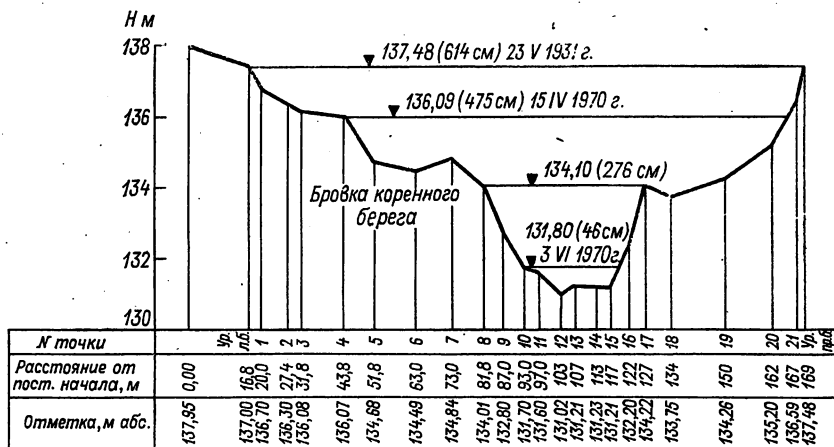


Рис. 5.1. Профиль водного сечения до наивысшего уровня
• р. Истра — с. Павловская Слобода

2. Отметка нуля графика поста 131,34 м. Наивысший уровень за многолетний период, наблюдавшийся 23/V 1931 г., 614 см и низший, наблюдавшийся 2/V 1970 г., 46 см.

3. Профиль гидроствора № 2 до уровня высоких вод по нивелировке от 6/IX 1966 г. (рис. 5.1).

Таблица 5.1
Измеренные рас
р. Истра — с. Павловская

№ расхода	Дата измерения	№ створа	Состояние реки на участке гидроствора	Уровень воды над нулем графика, см	Расход воды, м ³ /с	Площадь водного сечения, м ²
1	2	3	4	5	6	7
1	9/I	3	лдст	110	9,00	31,4/23,1
10	10/IV	2	рлдж	284	66,5	100
13	12/IV	2	св	461	188	291
17	15/IV	2	св	475	196	309
57	8/XII	3	заб	108	14,3	30,1
59	30/XII	3	лдст	168	18,8	49,8/46,1

Т р е б у е т с я : 1. Проанализировать исходные материалы.

2. Установить амплитуду колебания уровня и выбрать масштабы для кривой расходов и построить кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v = f(H)$.

3. Произвести увязку построенных кривых и рассчитать отклонения в процентах.

4. Составить расчетную таблицу к кривой $Q = f(H)$.

5. Произвести проверку расчетной таблицы расходов.

Р е ш е н и е : 1. Построение кривых расходов и вычисление средних суточных расходов воды является наиболее сложным и ответственным разделом гидрометрии.

Независимо от способа построения и экстраполяции кривой расходов необходимо в первую очередь произвести тщательный анализ исходных материалов.

Выбору способа построения кривой расходов должно предшествовать нанесение на график точек расходов, площадей живых сечений и средних скоростей в зависимости от уровней. При нанесении точек на график возможны три случая:

1) точки расходов, площадей и скоростей группируются так, что позволяют провести кривые;

2) точки скоростей образуют правильно расположенную систему, а точки площадей и расходов разбросаны или же образуют несколько систем;

3) точки площадей живого сечения группируются в одну систему, а точки скоростей и расходов разбросаны в поле координат или же образуют несколько систем.

Скорость течения, м/с		Ширина реки, м	Глубина, м		Уклон водной поверхности, %	Способ измерения расхода
средняя	наибольшая		средняя	наибольшая		
8	9	10	11	12	13	14
0,39	0,54	30,2	1,04	1,42	—	В 6/18
0,61	0,79	64,0	1,70	3,14	—	В 9/17
0,65	0,91	120	2,42	4,92	0,18	В 16/65
0,63	1,02	122	2,53	5,00	0,20	В 16/73
0,48	0,78	30,2	1,00	1,45	—	В 7/29
0,41	0,79	35,1	1,42	2,10	—	В 7/39

Изучая совместное размещение точек на графиках расходов, площадей водного сечения и средних скоростей, можно получить представление о причинах, вызывающих их отклонение от кривых.

Если точки расходов, площадей и скоростей образуют на графике правильно расположенные системы, то это свидетельствует об устойчивости русла и отсутствии явления переменного подпора. В этом случае кривая расходов строится обычным графическим способом. Отдельные точки расходов, отклоняющиеся от кривой, следует проверить по кривым площадей и скоростей, а в случае необходимости — по журналам измерения расходов воды. Точки расходов, измеренных поплавками, могут отклоняться от кривой не только вследствие неточного установления переходного коэффициента, но и вследствие влияния ветра, что может быть установлено на основе сведений, характеризующих состояние погоды и реки. Окончательно проводить кривые можно только после тщательного анализа всех отклонившихся от кривых точек (в особенности на концах кривых) и установления наиболее надежных (опорных) точек. Следует иметь в виду, что некоторое расстояние точек на графиках расходов может вызываться неточностью измерения расходов воды, неблагоприятными условиями погоды и состояния реки, а также измерением расходов воды вертушками различных систем, применением различных методов измерения скоростей течения на вертикалях и различных методов вычисления расходов воды. Точки расходов, отклоняющиеся от общего их расположения в пределах 5—10 %, должны быть учтены при прове-

дении осредненной кривой расходов, а отдельные, резко выпадающие точки отброшены.

Если измерение расходов воды производилось не в одном, а в нескольких створах (например, в половодье и в межень), то кривые расходов строятся отдельно для каждого створа.

Однозначной называется такая связь между расходом воды и уровнем, при которой для любых изменений расхода каждому его значению соответствует всегда одно значение уровня. Неоднозначной называется такая связь, когда значение расхода воды зависит не только от уровня, но и от какой-либо переменной во времени величины (например, от уклона, деформации русла и др.).

Расход является независимой переменной, а уровень — функцией, т. е. связь должна рассматриваться как $H = f(Q)$. Однако практически определение расхода воды за каждый день производится по уровню, поэтому за независимую переменную принято считать уровень воды и выражать связь между расходом и уровнем в виде кривой расхода $Q = f(H)$. Кривые могут быть временными, когда связь $Q = f(H)$ устойчива в течение 1,5—2 лет, и многолетними, когда связь $Q = f(H)$ устойчива в течение длительного периода.

Однозначность связи может быть временно нарушена в период ледовых явлений, зарастания русла или под влиянием подпора и пр., но с исчезновением нарушающих факторов однозначность восстанавливается.

При просмотре гидрометрических материалов на гидрологической станции установлено, что связь расходов и уровней р. Истра—с. Павловская Слобода является примером хорошей многолетней однозначной зависимости. Измеренные с 1947 г. расходы подтверждают установившуюся зависимость $Q = f(H)$. В данном упражнении невозможно представить измеренные расходы за многолетний период, поэтому ограничимся анализом измеренных расходов за 1970 г. и сопоставим их с многолетней кривой.

Как указывалось в упражнении 4.2, обработка расходов заканчивается составлением таблицы «Принятые данные», по сведениям которой заполняется таблица «Измеренные расходы воды» за год. В 1970 г. было измерено 59 расходов, из них: 10 расходов в период ледостава, 4 расхода в переходные периоды, 14 расходов при заросшем русле и 29 расходов при свободном русле. Все расходы измерены вертушкой, вычислены детальным и основным аналитическим способами. Расходы измерены при ширине русла в пределах 25,2 — 122 м, число скоростных вертикалей колеблется от 6 до 16, а число точек измерений — от 13 до 75, что указывает на большую детальность полевых измерений. В период, свободный ото льда, измерены уклоны водной поверхности. Таблица «Измеренные расходы воды» дается с сокращением (табл. 5.1).

На профиле гидроствора № 2 (см. рис. 5.1) видно, что при уровне выше 134,10 м (276 см) вода затапливала пойму.

При просмотре таблицы измеренных расходов следует сопоставить уровни в день измерения расхода и уровни за эту же дату в водомерной книжке и в годовой таблице. Проверка записей уровней осуществляется особенно тщательно, если основной гидрологический пост не совпадает с гидрометрическим створом. Гидроствор № 2 расположен в 44 м выше основного поста.

При сопоставлении уровней следует учитывать, что несоответствие может быть и за счет того, что в годовой таблице приводятся средние суточные уровни, а расходы могли быть отнесены к срочным наблюдениям. Например, в годовой таблице уровней за 12/IV 1970 г. приведен средний суточный уровень, равный 451 см, а расход № 13 за 12/IV измерен на подъеме в конце дня при уровне 461 см. В полевой книжке записано, что с 14 до 22 ч уровень поднимался от 405 до 470 см, следовательно, запись уровня при расходе № 13 находится в соответствии с данными наблюдений и не вызывает сомнений. В таблице измеренных расходов воды проверяются значения $v_{cp} = Q/F$ и $h_{cp} = F/B$, а также просматриваются записи уклона, состояния ледовых явлений и зарастаемости русла.

2. Кривая расходов воды в данном упражнении будет построена по измерениям 1970 г., и дополнительно для этого поста в упражнении 5.2 приведены методы экстраполяции кривой $Q = f(H)$. В связи с этим установим полную многолетнюю амплитуду колебаний уровня.

За многолетний период, согласно исходным данным, амплитуда колебания уровня равна $614 - 46 = 568$ см, а за 1970 г. $481 - 46 = 435$ см и освещена измеренными расходами на 99 %. Кривая расходов воды считается достаточно надежной, если амплитуда уровней освещена измеренными расходами не менее чем на 80 %. На профиле поперечного сечения (см. рис. 5.1), построенного по данным нивелировки до уровня высоких вод, нанесены наивысший и наименьший уровень за многолетний период, а также уровень, соответствующий наибольшему расходу воды за 1970 г. Профиль построен по абсолютным отметкам. Кривая $Q = f(H)$ строится в системе прямоугольных координат совместно с кривыми $F = f(H)$ и $v = f(H)$. Масштаб для построения кривых выбирается таким образом, чтобы хорда, соединяющая концы кривой $Q = f(H)$, была расположена примерно под углом 45° к оси абсцисс, а для кривых $F = f(H)$ и $v = f(H)$ — под углом 60° . При выборе масштабов следует учитывать точность графического определения расходов воды, снимаемых с кривой для составления расчетной таблицы.

В данном примере принимаем масштаб: вертикальный для уровня 1 см — 50 см (вертикальный масштаб уровней приведен в отметках над нулем графика), горизонтальный для расхода 1 см — $25 \text{ м}^3/\text{с}$, для площади 1 см — 50 м^2 , для скорости 1 см — 0,1 м/с. При значительной амплитуде колебания уровня выбирается увеличенный масштаб для построения нижней части кривой $Q = f(H)$. Для данного примера нижняя часть кривой построена

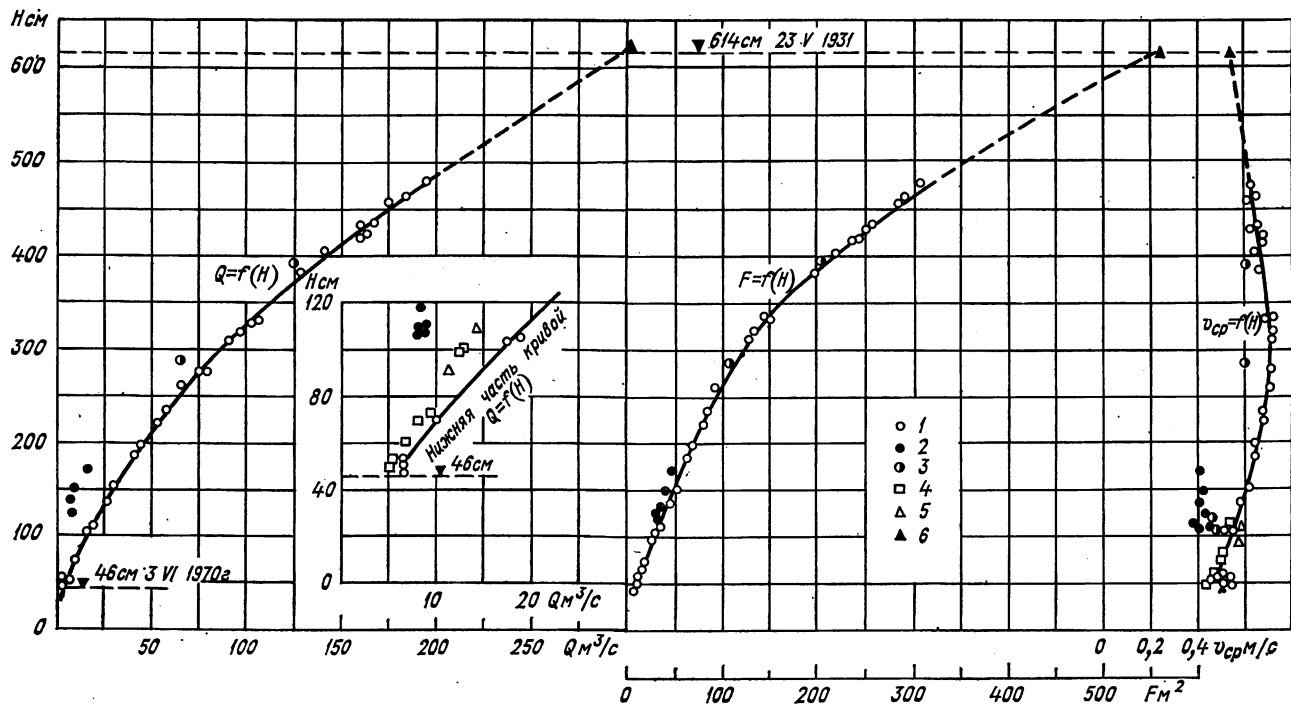


Рис. 5.2. Кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v_{cp} = f(H)$

р. Истра — с. Павловская Слобода, 1970 г.

Отметка нуля графика 131,34 м абс

1 — период, свободный ото льда; 2 — ледостав; 3 — редкий ледоход; 4 — зарастание; 5 — забереги; 6 — экстраполированные значения

до $H = 120$ см в масштабе для уровней 1 см — 20 см, а для расходов 1 см — $5 \cdot \text{м}^3/\text{с}$. На рис. 5.2 в принятых масштабах наносятся значения Q , F и v в зависимости от H . Условными знаками отмечаются расходы, измеренные в период, свободный ото льда, при редком ледоходе, ледоставе и зарастании русла. Для контроля построения рекомендуется около нанесенных точек с правой стороны ставить номер расхода, соответствующий номеру в табл. 5.1 (в данном примере номера на рис. 5.2 не приведены). В нижней части поля точек $Q = f(H)$ в пределах выбранной амплитуды нанесены расходы, измеренные при зарастании, ледоставе и свободном русле. В мелком масштабе выше $H = 120$ см наносятся расходы, измеренные только при свободном русле и ледоставе. Точки средней скорости нанесены для всех фаз режима. Точки площади при зарастающем русле в пределах уровней 50—111 см сливаются со значением площадей в период свободного русла и не обозначены.

При построении кривых $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v = f(H)$ следует учитывать только измеренные расходы в период, свободный ото льда; значения расходов зимнего периода и периода зарастания наносятся для сопоставления, так как в дальнейшем сток за эти периоды рассчитывается с введением переходных коэффициентов. Анализируя расположение нанесенных точек за период, свободный ото льда, следует проверить соблюдения правила, чтобы на каждый 10 %-ный интервал амплитуды уровня приходилось 2—5 расходов. Из табл. 5.2 видно, что для всех интервалов это требование соблюдено, а в интервале 350—400 см измерен только один расход, так как спад наблюдался только одни сутки.

При выходе воды на пойму, которая начинает действовать при уровне выше 276 см (см. рис. 5.1), увеличивается площадь водного сечения и на рис. 5.2 точки F отклоняются вправо, в то же время значения средних скоростей уменьшаются и точки v отклоняются влево.

Таблица 5.2
Расположение точек в интервале уровня
р. Истра — с. Павловская Слобода

Интервал уровня, см	Число точек	Интервал уровня, см	Число точек	Интервал уровня, см	Число точек
46—100	5	200—250	2	350—400	1
100—150	3	250—300	3	400—450	5
150—200	3	300—350	4	450—500	3

При нанесении точек необходимо проверить, чтобы для каждой даты измеренного расхода значения Q , F и $v_{\text{ср}}$ точно соответствовали одному положению уровня.

При изменении условий течения и неустойчивом русле расположение точек различно. При наличии водной растительности и ле-

дыного покрова точки расходов и скорости располагаются влево от кривых. Большие отклонения бывают при густой растительности и при наличии шуги, зажоров и заторов льда. В период лесосплава точки расходов также отклоняются влево. В случае неустойчивого русла точки расходов при размыве отклоняются вправо, при намыве—влево. Наибольшие размывы наблюдаются при подъеме паводков, а намывы — при спаде. В периоды переменных подпоров связь расходов и уровней нарушаются.

В данном упражнении кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v = f(H)$ проводятся только в пределах уровней измеренных расходов; все, что касается экстраполяции, рассмотрено в упражнении 5.2.

Построение кривых начинается с проведения кривой $F = f(H)$. Для устойчивого русла (каким является русло р. Истры) точки ложатся очень тесно и дают возможность провести плавную кривую с заметным увеличением площади выше уровня $H = 276$ см.

Затем строится зависимость $v = f(H)$. Кривая проходит плавно по полю точек; имеется вогнутость, обращенная к оси ординат выше уровня $H = 276$ см, так как в связи с выходом на пойму скорости уменьшаются. Скорости, измеренные в период развития растительности, располагаются достаточно тесно, подтверждая общее направление кривой.

Далее строится нижняя часть кривой $Q = f(H)$. Причем иногда возникает необходимость выделения центров тяжести точек, по которым в дальнейшем и проводится кривая. Верхний конец нижнего участка кривой $Q = f(H)$ проводится с учетом расходов при более высоких уровнях, которые нанесены на всей кривой $Q = f(H)$ в более мелком масштабе. Наименьший уровень за многолетний период (46 см) совпадает с уровнем расхода, измеренного 3/VI 1970 г., и поэтому нет необходимости в экстраполяции нижней части кривой $Q = f(H)$. Кривая $Q = f(H)$ проводится по полю точек вогнутостью к оси абсцисс. Построенная нижняя часть кривой переносится по координатам в поле точек кривой в уменьшенном масштабе. Выше было указано, что расходы воды р. Истры у с. Павловская Слобода за многолетний период из года в год подтверждают кривую расходов 1947 г. В табл. 5.3 приведены опорные значения расходов из расчетной таблицы $Q = f(H)$ для многолетнего периода.

Таблица 5.3
Координаты кривой $Q = f(H)$ за многолетний период
р. Истра — с. Павловская Слобода

H см	Q м ³ /с	H см	Q м ³ /с	H см	Q м ³ /с
50	6,60	200	47,2	460	145
100	17,0	360	87,5	500	237

Как видно, точки 1970 г. очень хорошо подтверждают многолетнюю кривую по всей амплитуде уровня.

3. Кривые $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v_{\text{ср}} = f(H)$ связаны между собой равенством $Q = F v_{\text{ср}}$, по которому производится увязка кривых.

В табл. 5.4 производится сопоставление расходов для выборочных значений уровня H (практически это следует делать для всей амплитуды). Расхождение между расходами, вычисленными по произведению $F v_{\text{ср}}$ и снятыми с кривой, должно быть не более 1 %; если оно больше, то следует в соответствующем интервале исправить кривые.

Таблица 5.4
Увязка кривых $Q = f(H)$, $F = f(H)$ и $v_{\text{ср}} = f(H)$
р. Истра — с. Павловская Слобода

H см	F м ² с кривой	v м/с с кривой	$Q_{\text{в}} = Fv$ м ³ /с	$Q_{\text{к}}$ м ³ /с с кривой	$\Delta Q = Q_{\text{в}} - Q_{\text{к}}$	$\Delta \sigma = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{к}}} 100 \%$
400	219	0,67	146	145	1,0	0,69
350	166	0,69	114	114	0,0	0,00
300	123	0,71	87,3	87,5	-0,2	0,23
250	94	0,70	65,8	65,0	0,8	1,18

4. Полученная кривая $Q = f(H)$ используется для определения расхода воды по уровню, для чего составляется расчетная таблица. При составлении таблицы с кривой снимаются значения расходов через интервалы уровня от 5 до 20 см, а промежуточные значения расходов через 1 см определяются по способу прямолинейной интерполяции между расходами, снятыми с кривой. Интервалы уровня, при которых значения расходов снимаются с кривой, принимаются в зависимости от кривизны отдельных участков с тем, чтобы расходы, определенные интерполяцией, отклонялись от кривой не более чем на 1,0—1,5 % в верхней и средней частях кривой и не более чем на 2—3 % в нижней части.

В табл. 5.5 приведен пример составления расчетной таблицы для кривой $Q = f(H)$.

Таблица 5.5
Расчетная таблица $Q = f(H)$ за многолетний период
р. Истра — с. Павловская Слобода, 1947—1970 гг.

Приращение расходов, м ³ /с	H см	0	1	2	3	4
1,40	40	5,20	5,34	5,48	5,62	5,76
	50	6,60	6,78	6,96	7,14	7,32
2,10	80	12,4	12,6	12,8	13,0	13,2
	90	14,5	14,8	15,0	15,2	15,5
.....

Приращение расходов, м ³ /с	H см	5	6	7	8	9
1,40	40	5,90	6,04	6,18	6,32	6,46
	50	7,50	7,68	7,86	8,04	8,22
2,10	80	13,4	13,7	13,9	14,1	14,2
	90	15,8	16,0	16,2	16,5	16,8

Интервалы для всей кривой $Q = f(H)$ приняты равными 10 см. Расходы до уровня $H = 120$ см снимаются с кривой, построенной в увеличенном масштабе.

Приращение расходов по отдельным интервалам должно равномерно увеличиваться или оставаться постоянным с увеличением уровня. Интерполяция расходов внутри интервала производится следующим образом. Для уровня $H = 80$ см $Q = 12,4$ м³/с, для $H = 90$ см $Q = 14,5$ м³/с. Разность на 10 см составит $14,5 - 12,4 = 2,10$ м³/с, а на 1 см — $0,21$ м³/с. Следовательно, прибавляя через каждый 1 см уровня $0,21$ м³/с и округляя полученные расходы до третьей значащей цифры, получим: $H = 81$ см, $Q = 12,4 + 0,21 = 12,6$ м³/с и т. д. Если расходы меньше 1 м³/с, то табл. 5.5 составляется с точностью до 0,001 м³/с.

Если расчетная таблица составляется для временных кривых, то в примечании обязательно указывается срок применения данной расчетной таблицы.

5. При проверке найденной зависимости $Q = f(H)$ вычисляются: а) вероятная погрешность отклонений измеренных расходов от кривой $Q = f(H)$, б) обеспеченность отклонений.

Вычисление вероятной погрешности построения кривой производится по всем измеренным расходам (табл. 5.6).

Таблица 5.6
Подсчет вероятной погрешности построения кривой

Измеренные		Q ₂ м ³ /с по расчетной таблице	ΔQ = Q ₁ - Q ₂	Δσ = $\frac{\Delta Q}{Q_1} \cdot 100$ %	Δσ ²
H см	Q ₁ м ³ /с				
461	188	194	-6,0	-3,09	3,51
46	6,30	6,04	0,26	4,33	18,8
54	6,66	7,32	-0,66	-3,02	81,2
					396,76

Средняя вероятная погрешность вычисляется по формуле

$$\sigma = \pm 0,674 \sqrt{\sum (\Delta\sigma)^2/n}, \quad (5.1)$$

где $\Delta\sigma$ — отклонения, %; n — число измеренных расходов.

Полученную зависимость $Q = f(H)$ можно считать надежной, если вероятная погрешность находится в пределах 2—4 %.

Для данного примера $\sigma = \pm 0,674 \sqrt{396,76 : 59} = 2,52$ %. Таким образом, зависимость $Q = f(H)$ удовлетворяет заданному условию.

Обеспеченность отклонений измеренных расходов вычисляется по данным табл. 5.6, а результаты сводятся в табл. 5.7.

Таблица 5.7
Обеспеченность отклонений измеренных расходов

Пределы отклонений, %	Число случаев		Обеспеченность	
	абс.	%	абс.	%
0—5	23	82,1	23	82,1
6—10	5	17,9	28	100
11—15	—	—	—	—
15	—	—	—	—

Найденная зависимость $Q = f(H)$ может считаться надежной, если число случаев отклонений расходов в пределах 0—5 или 0—10 % близко к 90 %-ной обеспеченности. В данном примере отклонения расходов до 10 % обеспечены на 100 %, следовательно, и это требование удовлетворено. К построению кривой $Q = f(H)$ должна быть составлена пояснительная записка.

5.2. Экстраполяция кривых расходов для пойменных створов

Упражнение 5.2. Экстраполяция кривой расхода до наивысшего уровня всеми основными способами.

Д а н о: исходные данные упражнения 5.1.

Т р е б у е т с я: Выполнить экстраполяция кривой $Q = f(H)$ и произвести сопоставление вычисленных расходов: А) по элементам расхода F и v_{cp} ; Б) по уравнению равномерного движения при: 1) наличии измеренных уклонов водной поверхности с применением зависимостей $h_{cp} = f(H)$, $I = f(H)$, $C = f(H)$, $v_{cp} = f(M\sqrt{h_{cp}})$, $C = f(\sqrt{h_{cp}})$, 2) отсутствии измеренных уклонов водной поверхности способами Д. Стивенса, М. А. Великанова, по параметру кинетичности.

Р е ш е н и е: экстраполяция кривой $Q = f(H)$ до наивысшего уровня вызвана необходимостью определения расхода воды при уровнях, не освещенных измеренными расходами.¹ Наивысшие

¹ Экстраполяция $Q = f(H)$ до наинизшего уровня не рассматривается, так как уровень измеренного расхода 46 см совпадает с наинизшим многолетним уровнем.

уровни могут быть естественные, тогда экстраполяция производится для подсчета стока, и проектные, связанные с задачами гидротехнического строительства. Экстраполяция кривой $Q = f(H)$ вверх считается надежной, если она производится в пределах $0,2 (H_{\text{наиб}} - H_{\text{наим}})$ при достаточной освещенности амплитуды измеренными расходами. В данном упражнении экстраполяция проводится по данным 1970 г.; амплитуда уровня за этот год равна 435 см и освещена измерениями на 99 %.

Наивысший уровень экстраполяции $H = 614$ см, наинизший $H = 46$ см. Следовательно, по условию надежности экстраполированный участок должен быть равен $0,2 (614 - 46) = 114$ см. Уровень воды, при котором измерен наибольший расход 1970 г., равен 475 см, значит, высота экстраполированного участка составляет 139 см, что несколько превышает допустимый предел.

Отметим, что в целях уменьшения объема пособия вспомогательные вычисления по данным измеренных расходов для всех способов экстраполяции приведены в таблицах с сокращениями, в то время как на рисунках представлены все исходные данные. Приведены примеры вычисления только наивысшего экстраполированного расхода, промежуточные значения опущены.

А. Экстраполяция по элементам расхода F и $v_{\text{ср}}$.

При наибольшем уровне $H = 614$ см по профилю водного сечения (см. рис. 5.1) определяется площадь $F = 560$ м². Кривая $v_{\text{ср}} = f(H)$, обоснованная измерениями, может быть продолжена до уровня $H = 614$ см. Как видно из рис. 5.1, выше отметки бровки коренного берега $H = 276$ см кривая $v_{\text{ср}} = f(H)$ имеет вогнутость к оси ординат, что дает основание определить по ее продолжению значение $v_{\text{ср}} = 0,54$ м/с. Расход воды при наибольшем уровне вычисляется по соотношению $Q = F v_{\text{ср}} = 560 \cdot 0,54 = 302$ м³/с.

При значительной экстраполяции и большой пологости кривой $F = f(H)$ можно вычислить дополнительно два-три промежуточных значения. В данном примере ограничимся одним значением, которое, как видно из рис. 5.2, хорошо согласуется с общим направлением $Q = f(H)$ в пределах измеренных расходов 1970 г. Нанесение экстраполяционных расходов всеми методами будет произведено после окончательного сопоставления всех способов. К разновидности экстраполяции по этому способу можно отнести непосредственное продолжение обоснованной измерениями части кривой расхода. В этом случае следует обратить внимание на характер крутизны склонов берегов. Если крутизна склонов уменьшается, то кривая $Q = f(H)$ будет более полой. Следует учитывать влияние растительности на берегах в пределах экстраполируемого участка профиля водного сечения. В данном примере видно, что непосредственное продолжение кривой $Q = f(H)$ совпадает с направлением, полученным по элементам расходов.

Вопрос взаимодействия руслового и пойменного потока в последнее время подробно разрабатывается Г. В. Железняковым, Н. Б. Барышниковым, А. А. Радюком и др.

Пропускная способность русла с поймами меньше беспойменных русел за счет дополнительных сопротивлений, возникающих при выходе потока на участок выше отметок прирусловых бровок. Глубина водотока в пойме значительно меньше, чем в русле, а шероховатость больше, поэтому скорость пойменных водотоков существенно меньше скорости руслового потока. Установлено, что уменьшение пропускной способности пойменных русел из-за турбулентного воздействия достигает 30—50 % и более.

В ЛГМИ предложены два варианта экстраполяции кривых $Q = f(H)$ и $v = f(H)$ при наличии данных измерений уровней выше отметок бровки прируслового вала.

1. При четко выраженной тенденции кривых $Q = f(H)$ и $v = f(H)$ предлагается метод экстраполяции кривой $M' = f(h_{cp})$, где параметр $M' = v/\sqrt{h_{cp}}$, расчет которого не требует уклонов свободной поверхности.

2. При возможности построения кривых $Q = f(H)$ и $v = f(H)$ в основном русле и выше бровки поймы если перегиб кривых не освещен измерениями, рекомендуется применять построения $C = f(h_{cp})$ и $M' = f(h_{cp})$ отдельно для руслового и пойменного участка с последующей увязкой данных со скоростями и расходами по соответствующим отсекам. Применяя указанные методы экстраполяции, необходимо учитывать погрешность за счет взаимодействия русла и поймы.

Б. Экстраполяция по уравнению равномерного движения.

Уравнение равномерного движения для расхода воды с применением формулы Шези имеет вид

$$Q = FC \sqrt{RT}, \quad (5.2)$$

или, как указывалось выше, при соответствующем допущении с заменой $R = h_{cp}$

$$Q = FC \sqrt{h_{cp}T}. \quad (5.3)$$

При использовании этих уравнений задача расчетов сводится к определению экстраполированного значения скорости $v_{cp} = C\sqrt{h_{cp}T}$, так как предполагается, что профиль водного сечения, а соответственно и его морфометрические элементы F , B и h_{cp} известны для всей рассматриваемой амплитуды колебания уровня. Скорости, вычисленные по гидравлическим формулам, могут быть использованы при экстраполяции кривой $Q = f(H)$, но этот прием является вспомогательным. Основные способы включают использование гидравлических элементов измеренных расходов в пределах изученной амплитуды уровня.

Основные случаи применения уравнения равномерного движения делятся в зависимости от наличия и отсутствия измеренных уклонов водной поверхности.

1. Наличие измеренных уклонов водной поверхности

Для данного русла проверим правомерность замены гидравлического радиуса средней глубиной. Из табл. 5.1 находим $H =$

H см	F м ²	B м	$h_{cp} = F/B$ м	$\sqrt{h_{cp}}$ м ^{0,5}	I	\sqrt{I}
475	309	122	2,53	1,59	0,000 20	0,014 1
46	11,6	25,2	0,46	0,46	0,000 14	0,011 8

$= 475$ см, $B = 122$ м, $h_{cp} = 2,53$ и отношение $2,53 : 122 = 0,22$, что удовлетворяет требованию.

Формулу Шези можно записать в виде

$$v_{cp} = C \sqrt{h_{cp} I} = C \sqrt{I} \sqrt{h_{cp}} = M \sqrt{h_{cp}}. \quad (5.4)$$

Коэффициент Шези из формулы (3.27) имеет вид

$$C = v / \sqrt{h_{cp} I}. \quad (5.5)$$

Для определения экстраполированной скорости v , в пределах измеренных значений из табл. 5.1 для каждого уровня выписываются в табл. 5.8 и вычисляются все необходимые для расчета элементы: F , B , h_{cp} , I , \sqrt{I} , $h_{cp} I$, v , C , $\sqrt{h_{cp} I}$ и M .

Рассчитанные значения всех приведенных элементов наносятся на рис. 5.3 в зависимости от уровня. Рассмотрим полученные зависимости: $h_{cp} = f(H)$, $I = f(H)$, $\sqrt{h_{cp}} = f(H)$, $C = f(H)$ и $M = f(H)$.

Зависимость $h_{cp} = f(H)$ имеет изогнутость на участке $H = 250 \div 300$ см, который соответствует выходу воды на пойму. При уровне выше 300 см зависимость $h_{cp} = f(H)$ получает устойчивое очертание и может быть легко экстраполирована до $H = 614$ см. Выполнив эту операцию, получим $h_{cp} = 3,70$ см. Отметим, что по профилю при $H = 614$ см, $F = 560$ м², $B = 152$ м; следовательно, фактическое значение $h_{cp} = 560 : 152 = 3,67$ м.

Зависимость $I = f(H)$ имеет очень устойчивый характер с отклонениями только в нижней ее части. Экстраполяция до $H = 614$ см особых пояснений не требует, так как значения $I = 0,0002$ при уровнях $H > 300$ см подтверждены измерениями.

Зависимость $\sqrt{h_{cp}} = f(H)$ точно повторяет $h_{cp} = f(H)$ и экстраполируется на значение $\sqrt{h_{cp}} = 1,92$ м^{0,5}.

Зависимость $C = f(H)$ имеет перелом, соответствующий участку изменения направления кривой $v = f(H)$, в связи с уменьшением скоростей при выходе на пойму. В нижней части кривой $C = f(H)$ наблюдается увеличение C , связанное с уменьшением уклона и средних глубин на этом участке. Это следует из формулы (5.5), в которой величины h_{cp} и I входят в знаменатель в степени 0,5.

при наличии измеренных уклонов

h_{cp} м	$\sqrt{h_{cp} I}$ м ^{0,5}	v м/с	$C = \frac{v}{\sqrt{h_{cp} I}}$ м ^{0,5} /с	$M = C\sqrt{I}$ м ^{0,5} /с
0,000 506 0	0,022 5	0,63	28,0	0,39
0,000 064 4	0,008 0	0,56	70,0	0,76

Экстраполированное значение C , полученное по продолжению устойчивого направления $C = f(H)$ на участке H от 350 до 475 см, получалось равным $C = 20,0$ м^{0,5}/с.

$M = f(H)$ является отображением зависимости $C = f(H)$, и значение $M = 0,28$ м^{0,5}/с, полученное по экстраполяции, сомнений не вызывает.

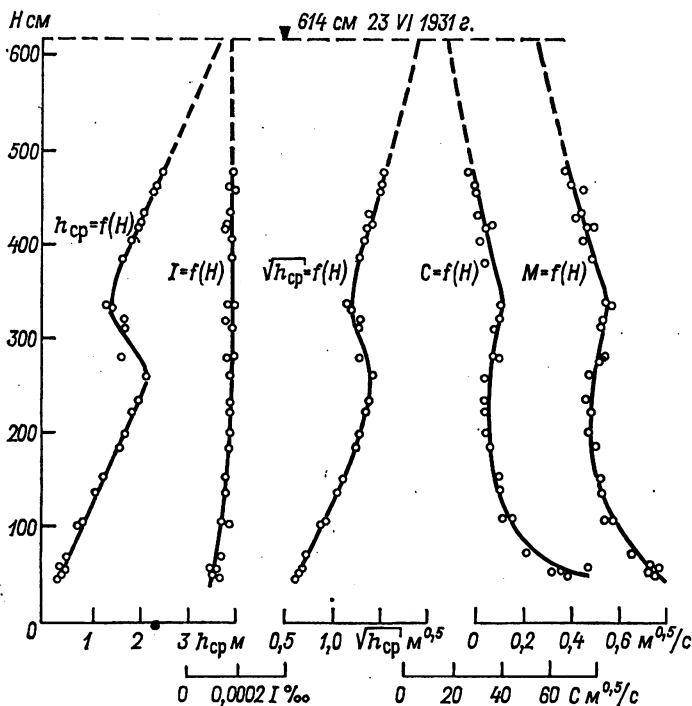


Рис. 5.3. Зависимости $h_{cp} = f(H)$, $I = f(H)$, $\sqrt{h_{cp}} = f(H)$, $C = f(H)$ и $M = f(H)$
р. Истра — с. Павловская Слобода, 1970 г.

Таким образом, полученные путем экстраполяции значения I , h_{cp} , $\sqrt{h_{cp}}$, C и M подтверждены измерениями и могут быть использованы для расчетов, которые разделим на два варианта:

1) вычисление экстраполированного значения v_{cp} по формуле

$$v_{cp.э} = C \sqrt{h_{cp} I}; \quad v_{cp.э} = 20,0 \sqrt{3,70 \cdot 0,0002} = 0,54 \text{ м/с.}$$

Соответственно экстраполированный расход $Q_э = 560 \cdot 0,54 = 302 \text{ м}^3/\text{с};$

2) вычисление экстраполированного значения v_{cp} по формуле $v_{cp.э} = M \sqrt{h_{cp}}$ дает $v_{cp.э} = 0,28 \sqrt{3,70} = 0,54 \text{ м/с.}$ Соответственно экстраполированный расход $Q_э = 560 \cdot 0,54 = 302 \text{ м}^3/\text{с.}$ Расхождения, как видим, нет.

Рассмотрим зависимость $C = f(\sqrt{h_{cp}})$, представленную на рис. 5.4. Как видно, имеется возможность экстраполировать ее до $h = 3,70 \text{ м};$ при этом $C = 20,0 \text{ м}^{0,5} / \text{с},$ что подтверждает ранее полученное значение C по кривой $C = f(H)$. Следовательно, $Q_э = 560 \cdot 20,0 \sqrt{3,70 \cdot 0,0002} = 302 \text{ м}^3/\text{с.}$

2. Отсутствие измеренных уклонов водной поверхности

В этом случае экстраполяция производится несколькими способами.

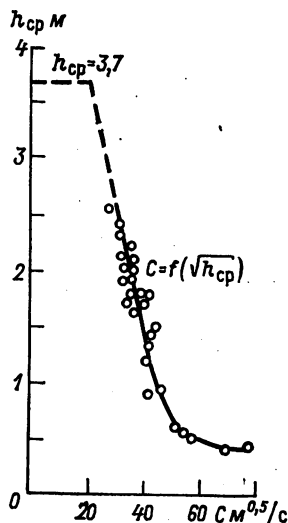


Рис. 5.4. Зависимость $C = f(h_{cp})$

Способ Д. Стивенса основан на использовании формулы (5.3).

Известно, что при высоких уровнях можно принять $C \sqrt{I} = \text{const}$, тогда расход воды выразится функцией только геометрических размеров водного сечения в виде

$$Q = f(F \sqrt{h_{cp}}). \quad (5.6)$$

Как показали исследования, зависимость (5.6) приближается к прямой линии и легко поддается экстраполяции. Способ не применим, если в верхней части зависимость $Q = f(F \sqrt{h_{cp}})$ имеет большую кривизну. Для выполнения экстраполяции произведем следующие вычисления.

По измеренным при свободном русле расходам за 1970 г. (можно использовать расходы при уровнях выше меженных) составляется табл. 5.9.

Строится кривая $Q = f(H)$ и кривая $Q = f(F \sqrt{h_{cp}})$ (рис. 5.5), причем значения Q определяются в том же горизонтальном масштабе, что и для построения $Q = f(H)$, а для $F \sqrt{h_{cp}}$ выбирается

Таблица 5.9 †

Вычисление расчетных данных к способу Д. Стивенса

H см	F м ²	B м	h_{cp} м	$\sqrt{h_{cp}}$ м ^{0,5}	$F\sqrt{h_{cp}}$ м ^{2,5}	Q м ³ /с
475	309	122	2,53	1,59	491	196
46	11,6	25,2	0,46	0,68	7,89	6,52

дополнительный вертикальный масштаб. Полученные точки Q и $F\sqrt{h_{cp}}$ дают возможность получить надежное направление кривой $Q = f(F\sqrt{h_{cp}})$ в пределах измеренных расходов. Лучшим условием экстраполяции является более спрямленный верхний участок кривой $Q = f(F\sqrt{h_{cp}})$. Полученная кривая может быть экстраполирована до наибольшего значения $F\sqrt{h_{cp}}$, которое можно определить по профилю. Для данного примера площадь водного сечения при наивысшем уровне $H = 614$ см определена планиметрированием и равна $F = 560$ м², $B = 152$ м, следовательно, $F\sqrt{h_{cp}} = 1075$ м^{2,5}. По кривой $Q = f(F\sqrt{h_{cp}})$, как показано на рис. 5.5, определено $Q = 301$ м³/с.

В развитие способа Д. Стивенса М. А. Великановым предложен способ экстраполяции, в котором принимается также $C\sqrt{I} = \text{const}$. Формула (5.3) представляется в виде

$$Q = Bh_{cp}^{3/2} C \sqrt{I}. \quad (5.7)$$

Величина $Bh_{cp}^{3/2}$ называется фиктивной площадью водного сечения и может быть определена по профилю водного сечения до любого уровня. В пределах измеренных значений расходов определяется зависимость $Q = f(Bh_{cp}^{3/2})$, которая может быть экстраполирована до наивысшего уровня.

Вычисления производятся в табл. 5.10 для измеренных наибольших расходов.

Таблица 5.10

Вычисления к способу М. А. Великанова

H см	F м ²	B м	h_{cp} м	Q м ³ /с	$h_{cp}^{3/2}$	$Bh_{cp}^{3/2}$
475	309	122	2,59	196	3,94	476
384	200	144	1,75	132	3,14	346

На рис. 5.6 производится построение для экстраполяции кривой в следующем порядке: а) наносится кривая $Q = f(H)$ до $H =$

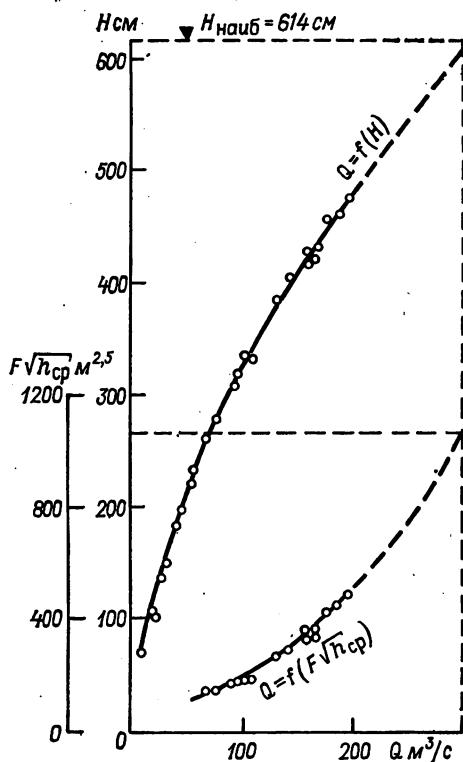


Рис. 5.5. Экстраполяция $Q = f(H)$ по способу Д. Стивенса

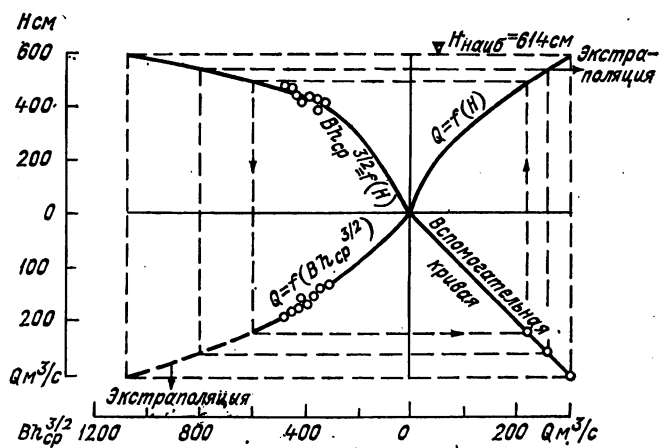


Рис. 5.6. Экстраполяция $Q = f(H)$ по способу М. А. Великанова

= 500 см; б) по данным измерений для уровней от 384 до 475 см нанесены значения $Bh_{\text{ср}}^{3/2} = f(H)$. При уровне 614 см значение $Bh_{\text{ср}}^{3/2} = 1079$, до которого доводится зависимость $Bh_{\text{ср}}^{3/2} = f(H)$; в) зависимость $Q = f(Bh_{\text{ср}}^{3/2})$ в пределах измеренных расходов проводится в виде плавной кривой с экстраполяцией до $Bh_{\text{ср}}^{3/2} = 1079$; г) графически переносятся точки с кривых $Bh_{\text{ср}}^{3/2} = f(H)$ и $Q = f(Bh_{\text{ср}}^{3/2})$ на вспомогательную кривую, а с нее на кривую $Q = f(H)$, как это показано стрелками. Вспомогательная кривая проходит под углом 45° . Экстраполированный расход в результате графических построений получен равным $305 \text{ м}^3/\text{с}$. Необходимо отметить, что применяя данный способ, следует построения производить в более крупном масштабе и наносить все измеренные значения Q и $Bh_{\text{ср}}^{3/2}$.

Г. В. Железняков [13] предложил в развитие способа М. А. Великанова вычислять расход по формуле

$$Q = \beta_* C B h_{\text{ср}}^{3/2} \sqrt{I}, \quad (5.8)$$

где β_* — параметр формы водного сечения.

Зависимость $\beta_* B h_{\text{ср}}^{3/2} = f(H)$ при высоких уровнях дает возможность экстраполировать кривую.

Г. В. Железняков [19] предложил также метод экстраполяции кривой расходов по параметру кинетичности (по числу Фруда). Параметр кинетичности выражен безразмерным соотношением $\text{Fr} = \alpha v^2 / g h_{\text{ср}}$. Число Фруда можно выразить через ширину русла

$$\text{Fr}_B = v^2 / (gB), \quad (5.9)$$

где v — средняя скорость, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; B — ширина, м.

При исследовании параметра кинетичности Fr и Fr_B Г. В. Железняковым и Т. А. Неговской установлено, что зависимости $\text{Fr} = f(H)$ и $\text{Fr}_B = f(H)$ при высоких уровнях имеют прямолинейный характер, что позволит применять их для экстраполяции.

В табл. 5.11 приведены вычисления значений Fr и Fr_B по данным измерений расходов. Величины Fr и Fr_B выражаются малыми числами и поэтому для удобства дальнейших построений увеличены соответственно в 10 и 10^8 раз.

Таблица 5.11
Подсчет параметров кинетичности
р. Истра — с. Павловская Слобода, 1970 г.

H см	v м/с	v^2 м ² /с ²	g м/с ²	$h_{\text{ср}}$ м	$g h_{\text{ср}}$ м ² /с ²	$\text{Fr} \cdot 10$	B м	gB м ² /с ²	$\text{Fr}_B \cdot 10^8$
475	0,63	0,40	9,81	2,53	24,8	0,16	122	1196	0,33
46	0,56	0,31	9,81	0,46	4,52	0,07	25,2	245	1,26

На рис. 5.7 нанесены значения $F\Gamma$ и $F\Gamma_B$ в зависимости от уровня. Расположение точек для $H = 300$ см имеет криволинейное очертание, что связано с выходом воды на пойму. Для уровня выше 350 см можно провести достаточно прямолинейные зависимости, которые экстраполируются до $H = 614$ см, и с них снимаются значения $F\Gamma = 0,08 \cdot 10^3$ м и $F\Gamma_B = 0,20 \cdot 10^3$.

Значения экстраполяционных скоростей течения вычисляются по формулам:

$$v_{\text{ср. } \varnothing} = \sqrt{F\Gamma g h_{\text{ср}}}, \quad (5.10)$$

$$v_{\text{ср. } \varnothing} = \sqrt{F\Gamma_B g b}. \quad (5.11)$$

Подставляя в формулы известные значения, получим

$$v_{\text{ср. } \varnothing} = \sqrt{0,008 \cdot 9,81 \cdot 3,70} = 0,54 \text{ м/с}, \quad v_{\text{ср. } \varnothing} =$$

$$= \sqrt{0,00020 \cdot 9,81 \cdot 152} = 0,54 \text{ м/с.}$$

Экстраполированный расход при наивысшем уровне вычисляется по формуле $Q = F v_{\text{ср.}}$. Для полученных скоростей при $F\Gamma = 0,008$, $Q_3 = 560 \cdot 0,54 = 302 \text{ м}^3/\text{с}$, при $F\Gamma_B = 0,0002$, $Q_3 = 560 \cdot 0,54 = 302 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рис. 5.7. Зависимости $F\Gamma = f(H)$ и $F\Gamma_B = f(H)$

Сопоставление полученных значений расходов. Как видно из табл. 5.12, из восьми рассмотренных способов экстраполяции семь дают равные значения расхода а один — отклонения на 1,7 %.

Таблица 5.12

Сопоставление экстраполированных значений расхода
р. Истра — с. Павловская Слобода, $H = 614$ см

Способ экстраполяции	Значение Q м ³ /с	Способ экстраполяции	Значение Q м ³ /с
По элементам расхода F и $v_{\text{ср}}$ По уравнению равномерного движения при наличии уклонов:	302	По уравнению равномерного движения при отсутствии уклонов	
$v_{\text{ср}} = C \sqrt{h_{\text{ср}} l}$	302	по Д. Стивенсу	302
$v_{\text{ср}} = M \sqrt{h_{\text{ср}}}$	302	по М. А. Великанову	305
$C = f(\sqrt{h_{\text{ср}}})$	302	по параметру $F\Gamma$	302
		по параметру $F\Gamma_B$	302

Значение $Q = 302 \text{ м}^3/\text{с}$, нанесенное на кривую (см. рис. 5.2), очень хорошо совпадает с общим направлением кривой, построенной для многолетнего периода и подтвержденной данными 1970 г. Такое совпадение значений расходов, полученных различными способами экстраполяции, можно объяснить устойчивостью русла, хорошим гидрометрическим материалом наблюдений 1970 г. и теоретической обоснованностью рассматриваемых способов.

Упражнение 5.3. Определение расхода паводочной петли.

Дано: 1. Расход воды при установившемся режиме $Q_y = 640 \text{ м}^3/\text{с}$ при уклоне $I = 0,0004$.

2. Скорость бегания паводочной волны $C_n = 3,6 \text{ м/с}$. Уровень повысился на $0,65 \text{ м}$ за время 3 ч .

Требуется: вычислить расход паводочной волны.

Решение: расход воды в период неустановившегося движения при наличии паводочной петли кривой расхода можно вычислить по формуле

$$Q_n = Q_y \sqrt{1 + \frac{1}{I_y C_n} \frac{\partial H}{\partial t}}, \quad (5.12)$$

где Q_n и Q_y — расходы воды соответственно при неустановившемся и установившемся движении; I_y — уклон поверхности при установившемся движении; C_n — скорость движения гребня паводка; $\partial H/\partial t$ — изменение уровня во времени в данном створе (при повышении уровня производная имеет знак плюс; при понижении — минус).

Вычисляется изменение уровня во время работ $\partial H/\partial t = 0,65 : 1080 = 0,0006 \text{ м/с}$.

Подставляя известные значения в формулу (5.12), получаем:

$$Q_n = 640 \sqrt{1 + \frac{1}{0,0004 \cdot 3,6} \cdot 0,0006} = 640 \cdot 1,19 = 762 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Упражнение 5.4. Определение гидроморфологических параметров русла.

Дано: 1. Расход воды $Q = 228 \text{ м}^3/\text{с}$, ширина водного сечения $B = 112 \text{ м}$, средняя глубина $h_{cp} = 3,31 \text{ м}$, средняя скорость $v_{cp} = 0,62 \text{ м/с}$.

2. Средний диаметр донных наносов $d_{cp} = 0,12 \text{ мм}$.

Требуется: рассмотреть параметры В. Г. Глушкова, М. А. Великанова и Г. В. Железнякова.

Решение: гидроморфологические параметры представляют собой характеристику взаимодействия размываемого русла и водного потока и используются при расчетах расходов воды в условиях размыва русел рек и каналов и экстраполяции кривых расходов.

Вычисляется число Фруда по формуле (3.63)

$$Fr = \alpha v_{cp}^2 / (gh_{cp}),$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; α — коэффициент

Кориолиса, принимаемый в данном случае примерно равным единице.

$$Fr = 1 \cdot 0,62^2 : (9,81 \cdot 3,31) = 0,012.$$

Параметр Глушкова вычисляется по формуле (2.15) $\Gamma = \sqrt{B/h_{cp}}$ и для данного примера $\Gamma = \sqrt{112 : 3,31} = 3,20 \text{ м}^{-0,5}$.

Параметр Великанова представляет собой безразмерную величину и вычисляется по формуле

$$Gd = \sqrt{Bd_{cp}}/h_{cp}, \quad (5.13)$$

$$Gd = \sqrt{112 \cdot 0,00012} : 3,31 = 0,035.$$

Параметр Железнякова [16] рассчитывается путем следующих преобразований.

Если в число Фруда ввести величину $1/\Gamma^2 = h_{cp}^2/B$ в качестве линейного размера, то получим

$$\alpha v^2 B / (gh_{cp}^2) = C_r. \quad (5.14)$$

В этом случае получается произведение числа Фруда на параметр геометрического подобия.

Пропускная способность русла зависит от соотношения B/h_{cp} , которое может быть морфологически наивыгоднейшим.

Среднюю скорость можно представить в виде $v_{cp} = Q/F$ и, подставляя ее в формулу (5.14), получаем

$$C_r = \alpha Q^2 / (gBh_{cp}^4). \quad (5.15)$$

Для данного примера $C_r = 1 \cdot 228^2 : (9,81 \cdot 112 \cdot 3,31^4) = 0,40$.

Расход воды из формулы (5.15) можно записать в виде

$$Q = (C_r/\alpha)^{0,5} (gB)^{0,5} h_{cp}^2, \quad (5.16)$$

откуда

$$h_{cp} = (\alpha/C_r)^{0,25} Q^{0,25} / (gB^{0,25}). \quad (5.17)$$

Обозначим параметр Железнякова

$$M_r = (\alpha/C_r)^{0,25}. \quad (5.18)$$

Подставим его в формулу (5.17)

$$h_{cp} = M_r Q^{0,25} / (gB)^{0,25}. \quad (5.19)$$

В данном примере (принимаем $\alpha = 1$) $M_r = (1 : 0,40)^{0,25} = 1,26$.

При значении $M_r = 1$ формула (5.16) принимает вид

$$Q_M = (gB)^{0,5} h_{cp}^2, \quad (5.20)$$

где Q_M называется морфологическим расходом.

Для данного примера $Q_M = \sqrt{9,81 \cdot 112 \cdot 3,31^2} = 361 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сравнивая формулы (5.16) и (5.20), получаем

$$M_r = \sqrt{Q_M/Q}. \quad (5.21)$$

Величина M_r в данном примере равна $\sqrt{361 : 228} = 1,25$.

В работе [16] указывается, что для ирригационных каналов и рек обнаруживается непостоянство параметра M_r , связанное с коэффициентом Шези.

Из формулы (5.15) можно записать

$$Q = (C_r/\alpha)^{0,5} Q_M. \quad (5.22)$$

Если C_r сохраняет приблизительно постоянное значение в пределах данного створа реки или для группы рек с аналогичными русловыми процессами, то зависимость между Q и Q_M должна быть линейной. Железняков предлагает использовать ее при экстраполяции кривой $Q = f(H)$.

Упражнение 5.5. Вычисление расхода воды в русле сложной формы.

Д а н о: 1. В основном русле: ширина $B_p = 10$ м, средняя глубина $h_{ср.р} = 2,0$ м, параметр $\beta_{*p} = 1,08$, коэффициент шероховатости $n_p = 0,025$.

2. В пойме: $B_n = 10$ м (пойма симметрична), $h_{ср.п} = 1,0$ м, $\beta_{*n} = 1,00$, $n_n = 0,1$.

3. На границе бровки: $B_b = 10$ м, $h_{ср.б} = 1,3$ м, $\beta_{*b} = 1,08$, $h_b = 0,03$.

4. Уклон по всей ширине потока $I = 0,0009$.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть метод расчета.

2. Вычислить расход воды с учетом взаимодействия водотоков.

Р е ш е н и е: 1. При выходе водотока на пойму уменьшается пропускная способность русла. Это явление Железняков назвал кинематическим эффектом безнапорного потока [22]. Предложена формула определения расхода воды с учетом взаимодействия водотока в русле со сложной формой живого сечения и различной шероховатостью дна при выходе на пойму

$$Q = Q'_p + Q'_n - (k_p - k_n) Q_b, \quad (5.23)$$

где Q'_p — расход воды в русле при отсутствии взаимодействия потоков, имеющих различную шероховатость дна; Q'_n — расход в пойме при отсутствии взаимодействия водотоков; k_p — относительное уменьшение расхода в русле, определенное по формуле

$$k_p = (Q'_p - Q_p) / Q_b, \quad (5.24)$$

где Q_p — расход воды в русле при взаимодействии водотоков; Q_b — расход воды при заполнении русла до бровок; k_n — относительное увеличение расхода в пойме по формуле

$$k_n = (Q_n - Q'_n) / Q_b, \quad (5.25)$$

где Q'_n — расход в пойме при отсутствии взаимодействия водотоков.

Вводится безразмерный параметр

$$\eta_p = h_{ср.р} / h_{ср.б}, \quad (5.26)$$

где $h_{ср.р}$ — средняя глубина русла; $h_{ср.б}$ — средняя глубина

русла при его заполнении до бровок. Значения k_p и k_n изменяются в зависимости от η_p . На рис. 5.8 представлена такая зависимость для k_p , полученная опытным путем.

Если при определении Q'_p и Q'_n ввести значение параметра формы живого сечения β_* по формуле (2.17), то формула (5.23) будет иметь вид:

$$Q = \beta_* C_p F_p \sqrt{h_{ср. p} I} + \beta_* C_n F_n \sqrt{h_{ср. n} I} - (k_p - k_n) Q_6, \quad (5.27)$$

$$Q_6 = \beta_* C_6 F_6 \sqrt{h_{ср. 6} I}. \quad (5.28)$$

В формулах (5.27) и (5.28) индексы р, п и б введены соответственно для русла, поймы и границы бровки.

2. Для расчета расхода по формуле (5.27) определяются коэффициенты C_p , C_n и C_6 по известным значениям n_p , n_n , h_6 и $h_{ср}$ (по приложению 2 $C_p = 45,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, $C_n = 10 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, $C_6 = 35,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$). Значения $F_p = 20 \text{ м}^2$, $F_n = 10 \text{ м}^2$, $F_6 = 13 \text{ м}^2$. Для определения k_p вычисляется $\eta_p = 2,0 : 1,3 = 1,54$ и по рис. 5.8 с кривой снимается значение $k_p = 0,45$. Для данного упражнения принимаем $k_n = 0$. По формуле (5.28) $Q_6 = 1,08 \cdot 35,5 \cdot 13 \sqrt{1,3 \cdot 0,0009} = 17 \text{ м}^3/\text{с}$. Подставляя известные значения в формулу (5.27), получаем

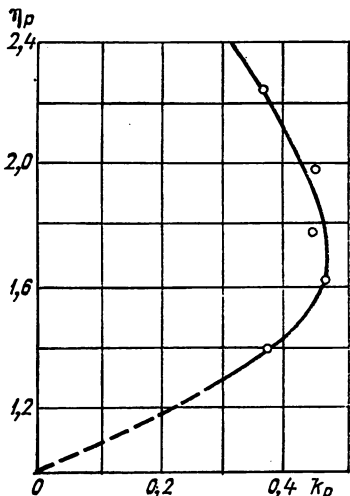


Рис. 5.8. Пример зависимости k_p от η_p

$$Q = 1,08 \cdot 45,1 \cdot 20 \sqrt{2,0 \cdot 0,0009} +$$

$$+ 1,00 \cdot 10 \cdot 10 \sqrt{1,0 \cdot 0,0009} -$$

$$- 0,45 \cdot 17 = 38,9 + 3,0 - 7,65 = 34,2 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следовательно, расход воды $40,9 \text{ м}^3/\text{с}$ в русле сложной формы, вычисленный без учета взаимодействия водотоков (кинематического эффекта потока), завышен в данных условиях на 18 %.

5.3. Вычисление ежедневных расходов в период ледовых образований и зарастания русла

Упражнение 5.6. Вычисление ежедневных расходов воды при стесненном русле.

Д а н о: 1. Измеренные расходы (см. табл. 5.1).

2. Расчетная таблица $Q = f(H)$ (табл. 5.5).

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть указания к вычислению стока.

2. Вычислить переходные коэффициенты $K_{\text{зим}}$ и $K_{\text{зар}}$ и проанализировать графики $K_{\text{зим}} = f(T)$ и $K_{\text{зар}} = f(T)$.

3. Вычислить ежедневные расходы за период ледовых образований с учетом заторов и зажоров и за период зарастания русла.

Решение: 1. Вычисление ежедневных расходов, а следовательно, и стока за периоды неустойчивого ледостава, устойчивого ледостава, с шугой и без шуги и ледохода производится следующими способами: а) интерполяцией между непосредственно измеренными расходами, б) методом зимних коэффициентов, в) построением зимних кривых.

Интерполяция между расходами применяется для тех рек, для которых отсутствуют устойчивые зависимости $Q = f(H)$. Способ применим также для зашугованных русел. Число измеренных расходов в этом случае должно быть достаточно большим, интерполяция производится графически на комплексном графике с учетом хода температуры воздуха, уровня воды и осадков.

Метод зимних коэффициентов основан на связи зимних расходов с уровнем воды. Переходный зимний коэффициент вычисляется по формуле

$$K_{\text{зим}} = Q_{\text{зим}}/Q_{\text{лет}}, \quad (5.29)$$

где $Q_{\text{зим}}$ — расход воды, измеренный при ледовых образованиях; $Q_{\text{лет}}$ — расход воды, соответствующий уровню при $Q_{\text{зим}}$ по кривой $Q = f(H)$ свободного, летнего периода. $K_{\text{зим}}$ является характеристикой пропускной способности русла и изменяется во времени $K_{\text{зим}} = f(T)$. Для незашугованных русел можно использовать связь зимнего коэффициента и коэффициента стеснения потока α_1 [вычисленного по формуле (2.29)]. Следует помнить, что α_1 не учитывает условий распределения скорости, поэтому зависимость $K_{\text{зим}} = f(\alpha_1)$ не всегда надежна.

Кривые $Q = f(H)$ за зимний период можно проводить при условии, если разброс точек по оси абсцисс не превышает 5—6 %. Методика построения зимних кривых та же, что и для свободного русла (см. упражнение 5.1). Но как показал опыт, построение кривых $Q = f(H)$ не всегда дает хорошие результаты. Погрешность вычисления стока по кривым за зимний период значительно выше, чем при использовании способа зимних коэффициентов, и колеблется для зашугованных русел и при неустойчивом ледоставе соответственно от 21 до 10 %, в то время как при применении коэффициентов $K_{\text{зим}}$ сток подсчитывается с погрешностью от 6 до 8 %.

2. Вычисление ежедневных расходов за период зарастания русла производится способом введения переходных коэффициентов

$$K_{\text{зар}} = Q_{\text{зар}}/Q_{\text{лет}}, \quad (5.30)$$

где $Q_{\text{зар}}$ — расход, измеренный при зарастании; $Q_{\text{лет}}$ — расход воды, соответствующий уровню при $Q_{\text{зар}}$ по кривой $Q = f(H)$ свободного летнего периода.

Таблица 5.13

Вычисления расходов с применением коэффициентов $K_{зар}$ и $K_{зйм}$

р. Истра — с. Павловская Слобода, 1970 г.

Дата	IV				VII				XI				XII			
	H	$Q_{кр}$	K	Q	H	$Q_{кр}$	K	Q	H	$Q_{кр}$	K	Q	H	$Q_{кр}$	K	Q
1	130	25,0	0,32	8,00					62	8,78	0,88	7,73	95)	15,8	0,76	12,0
6	231	57,5	0,48	27,6					86)	13,7	0,82	11,2	108)	19,0	0,75	14,2
7	267	72,2	0,56	40,6					92)	15,0	0,81	12,2	108)	19,0	0,75	14,2
8	278*	77,1	0,64	49,3					90):	14,5	0,80	11,6	108)	19,0	0,75	14,2
9	289*	82,3	0,74	60,9					89)	14,3	0,80	11,4	109)	19,2	0,75	14,4
10	294*	84,6	0,89	70,3					90)	14,5	0,80	11,6	109)	19,2	0,75	14,4
11	392*	139	0,90	125					91)	14,8	0,80	11,8	100)	17,0	0,76	12,9
12	459	192	1,00	192					90)	14,5	0,80	11,6	98)	17,5	0,76	12,5
25	.....	.....	.....	.....	63	8,97	1,00	8,97	106):	18,5	0,78	14,4	137)	27,1	0,65	17,6
26	.....	.....	.....	.....	60	8,40	0,97	8,15	114):	20,5	0,77	15,8	142)	28,6	0,60	17,2
31	.....	.....	.....	.....	54	7,32	0,88	6,44	.....	.....	.....	.....	167)	36,2	0,50	18,1
Средн.				83,0				9,26				10,4				14,9
Наиб.				215				12,2				16,2				18,2
Наим.				8,0				6,28				6,14				11,8

Примечание. Уровни за 8/IV, 6/XI, 3 — 6/XII, 8/XII, 20 — 27/XII приведены со срезкой, 6/XI — ажор.

$K_{зар}$ является функцией времени, т. е. можно получить зависимость $K_{зар} = f(T)$.

На рис. 5.2 в нижней части кривой $Q = f(H)$ нанесены значения измеренных $Q_{зим}$ и $Q_{зар}$, которые закономерно отклоняются влево от кривой. Вычисленные по формулам (5.29) и (5.30) коэффициенты наносятся на комплексный график (см. рис. 1.17). Комплексный график р. Истра — с. Павловская Слобода не приводится. На рис. 1.17 построены $K_{зим} = f(T)$ и $K_{зар} = f(T)$ р. Паша — с. Часовенское. Ход $K_{зим}$ связан с температурой воздуха (первая декада апреля и вторая декада ноября). Изменение $K_{зар}$ согласуется с $K_{зим}$ периода первых ледовых образований (ноябрь и декабрь).

3. В данном упражнении приведен пример вычисления ежедневных расходов за периоды 1—30/IV, 1—3/VII и 1/XI—31/XII. В эти периоды входят дни с ледовыми образованиями и зарастанием русла.

В табл. 5.13, приведенной с сокращением (обычно она составляется для всего года), выписываются значения уровня, соответствующие им расходы по расчетной таблице и снятые с комплексного

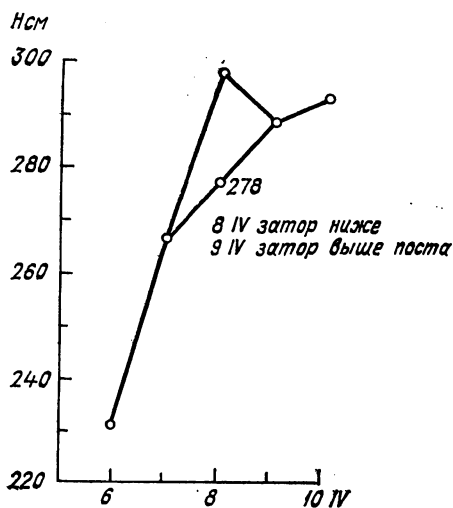


Рис. 5.9. Введение срезки уровня при заторе льда

графика по датам значения $K_{зим}$ и $K_{зар}$. Расходы воды вычисляются в зависимости от дат по соотношениям $Q_{зим} = K_{зим}Q_{лет}$ и $Q_{зар} = K_{зар}Q_{лет}$. Рассмотрим порядок вычислений в табл. 5.13. 8 и 9/IV наблюдался затор льда выше и ниже поста, следовательно, надо произвести срезку уровня и по нему определить $Q_{лет}$.

На рис. 5.9 в крупном масштабе приведены уровни за 6—10/IV, в которые введена срезка, и уровень за 8/IV получен равным 278 см (вместо заторного $H = 298$ см). По этому уровню из расчетной таблицы выписан в табл. 5.5 расход $Q = 77,1$ м³/с и с введением $K = 0,64$ расход получен $Q = 49,3$ м³/с.

12/IV река освободилась ото льда ($K_{зим} = 1,0$). Далее с 12/IV по 25/VII на реке не было ледовых явлений, растительность отсутствовала; расходы за каждый день определялись по табл. 5.5 и годовой таблице уровней за 1970 г.

Влияние растительности отмечено с 26/VII, и начиная с этой даты значения $K_{зар}$ снимаются с зависимости $K_{зар} = f(T)$, которая проводится на комплексном графике, и расходы вычисляются по соотношению $Q_{зар} = K_{зар}Q_{лет}$.

Осенью с появлением зажорных явлений (6/XI; 3—6/XII и 18—27/XII) наблюдается подъем уровня. При вычислении ежедневных расходов надо ввести срезку на эти пики уровней аналогично введению срезки за 8/IV.

После вычисления ежедневных расходов описанным способом за каждый день на комплексный график наносится ход зависимости $Q = f(T)$ и производится общий анализ изменения расходов, уровней, температуры, осадков, ледовых фаз.

Для обеспечения точности вычисления стока в зимний период необходимо оценить количество измеренных расходов. Вероятная погрешность объема зимнего стока вычисляется по формуле

$$\eta_{0w} = 144C_{vQ}/n, \quad (5.31)$$

где C_{vQ} — коэффициент вариации расходов воды за период с ледовыми явлениями.

Методика расчета коэффициента вариации для любого ряда изложена в главе 8. В данном случае ряд расходов для вычисления коэффициента вариации составляется по материалам наблюдений предыдущих лет из расходов за 5, 10, 20, 25-е число каждого месяца всего периода с ледовыми явлениями; n — число измеренных расходов за зимний сезон.

Для данного примера приближенное значение $G_{vQ} = 0,8$, число расходов в период ледовых явлений за 1970 г. $n = 16$, тогда погрешность вычисления зимнего стока равна $r_{0w} = 144 \cdot 0,8 : 16 = = 7,2 \%$.

5.4. Вычисление ежедневных расходов при размываемом русле

Упражнение 5.7. Вычислить ежедневные расходы воды при неустойчивом размываемом русле способом введения поправок к кривой $Q = f(H)$.

Дано: 1. По данным наблюдений за 1933 г. построена кривая $Q = f(H)$ (рис. 5.10). Расходы воды 1934 г. вследствие неустойчивости русла располагаются разбросанно по отношению к кривой $Q = f(H)$.

2. График колебаний уровня воды за период 10/IV — 31/VI 1934 г. (рис. 5.11).

3. Расчетная таблица к кривой $Q = f(H)$ за 1933 г. (табл. 5.14).

Требуется: 1. Определить для каждого измеренного расхода 1934 г. поправку ΔH .

2. Построить хронологический график поправок $\Delta H = f(T)$; определить поправки за каждый день и вычислить ежедневные расходы с введением поправок.

Решение: 1. Из расположения точек на рис. 5.10 видно, что для 1933 г. можно построить однозначную связь $Q = f(H)$. Точки расходов 1934 г. располагаются ниже и выше этой кривой,

что объясняется размывом русла. Для каждого измеренного расхода 1934 г. вычисляется поправка ΔH

$$\pm \Delta H = H_1 - H,$$

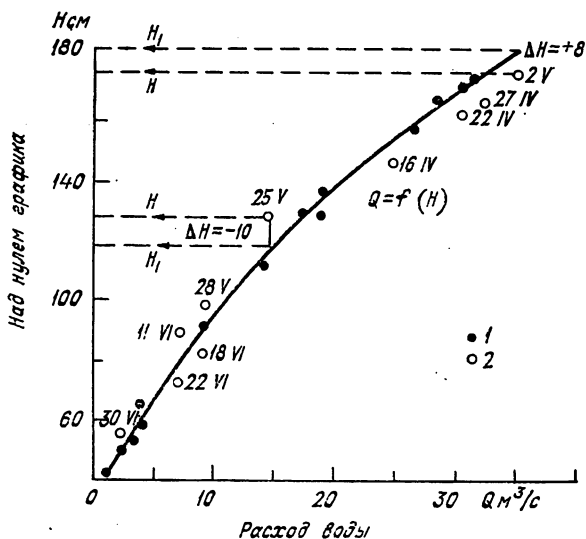


Рис. 5.10. Кривая $Q = f(H)$
 р. Черная — с. Иваново, 1933 г. 1 — расходы 1933, 2 —
 расходы 1934

где H_1 — уровень по кривой $Q = f(H)$ для измеренного расхода, см; H — уровень в день измерения расхода, см.

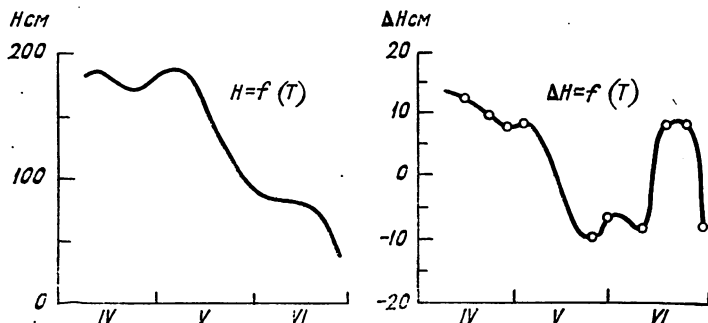


Рис. 5.11. Ход уровня $H = f(T)$ и график поправок $\Delta H = f(T)$
 р. Черная — с. Иваново, 1934 г.

Например, на рис. 5.10 расход за 2/V, измеренный при $H = 176$ см, проектируется на кривую $Q = f(H)$ и определяется уровень $H_1 = 184$ см; поправка равна $\Delta H = 8$ см. Расход за 25/V, измеренный при $H = 128$ см, сносится вниз на кривую при уровне

Таблица 5.14

Расчетная таблица расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) к кривой $Q = f(H)$
р. Черная — с. Иваново, 1933 г.

H см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	0,60	0,76	0,92	1,08	1,24	1,40	1,56	1,72	1,88	2,04
180	33,0	33,5	34,3	34,8	35,2	35,9	36,4	3,68	37,1	37,3
190	37,8	38,3	—	—	—	—	—	—	—	—

$H = 118$ см; поправка со знаком минус $\Delta H = 118 - 128 = -10$ см.

Уровень H_1 можно точнее определить по расчетной таблице и кривой $Q = f(H)$, подбирая его по расходу, близкому к измеренному. Расход от $2/\sqrt{V} Q = 35,0 \text{ м}^3/\text{с}$; по расчетной таблице он близок к измеренному расходу $Q = 35,2 \text{ м}^3/\text{с}$, и соответствующий ему уровень $H_1 = 184$ см. Аналогично вычисляются все поправки к измеренным расходам периода размыва и записываются в таблицу в хронологическом порядке.

График поправок $\Delta H = f(T)$ строится под графиком колебания уровня $H = f(T)$ (рис. 5.11). Ход зависимости $\Delta H = f(T)$ в общем следует ходу уровня с отдельными отклонениями. Для вычисления расхода воды за какой-либо день снимается значение ΔH с зависимости $\Delta H = f(T)$; эта поправка вводится в наблюдаемый за этот же день уровень H . По исправленному уровню $H \pm \Delta H$ определяется расход по расчетной таблице к стандартной кривой. Подсчет ежедневных расходов следует вести по форме, указанной в табл. 5.15.

Таблица 5.15

Подсчет ежедневных расходов воды с применением поправки
р. Черная — с. Иваново, 12—15/V 1934 г.

Дата	Наблюдаемый средний суточный уровень H см	Поправка с графика ΔH см	Исправленный уровень $H_1 = H \pm \Delta H$	Расход по расчетной таблице по исправленному уровню Q $\text{м}^3/\text{с}$
12/V	145	+1	146	22,2
13/V	142	0	142	21,2
14/V	137	-1	136	19,6
15/V	132	-2	134	19,2

5.5. Годовая таблица расхода воды и вычисление характеристик стока

Упражнение 5.8. Составление таблицы ежедневных расходов воды и вычисление характеристик стока за год.

Д а н о: 1. Годовая таблица расходов воды р. Истра — с. Павловская Слобода за 1970 г. (табл. 5.16), средний многолетний рас-

ход воды $Q_0 = 11,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (1935—1970 гг.), коэффициент вариации годового стока $C_v = 0,30$.

2. Осадки в бассейне за год $X = 648 \text{ мм}$, площадь бассейна 1950 км^2 .

Требуется: 1. Дать пояснение к составлению таблицы расхода воды.

2. Вычислить основные характеристики стока.

Решение: 1. В упражнении 5.4 приведены указания к составлению годовой таблицы расходов воды за период ледовых образований и зарастания русла (июнь, июль, ноябрь, декабрь). При устойчивом незарастающем русле в летний период расходы за каждый день выписываются из расчетной таблицы по среднесуточному уровню (табл. 5.16).

За период устойчивого ледостава с I/I по 31/III расходы вычисляются с применением $K_{зим}$.

По данным табл. 5.16 на комплексный график наносятся значения расходов за каждый день, ход которых анализируется с учетом всех гидрометеорологических явлений.

2. Основными характеристиками годового стока являются:

а. Средний годовой расход

$$Q_{cp} = \sum_{i=1}^n Q_i/n, \quad (5.32)$$

где Q_i — расход каждого дня; n — число дней в году.

$$Q_{cp} = 5384:365 = 14,75 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Средний расход можно определить за пентаду, декаду или сезон года.

Если необходимо получить значение среднего многолетнего расхода за период N лет, то формула (5.32) имеет вид

$$Q_0 = \sum_{i=1}^N Q_{cp}/N, \quad (5.33)$$

где Q_{cp} — средний годовой расход; N — число лет наблюдений.

Таблица 5.16
Ежедневные расходы воды
р. Истра — с. Павловская Слобода, 1970 г.

Число	I	II	III	IV	V	VI
1	10,8 |	7,74 |	8,36 |	8,00	77,6	6,46
2	10,7 |	8,19 |	8,28 |	8,29	45,5	6,18
30	7,83 |	· · ·	8,10 |	75,8	6,46	10,7
31	7,74 |		8,10 |		6,60	
Средн.	8,74	7,85	8,15	8,30	12,9	6,69
Наиб.	10,9	8,61	8,36	215	83,7	11,4
Наим.	7,74	7,20	7,85	8,00	6,46	6,04

Продолжение

Число	VII	VIII	IX	X	XI	XI I
1	11,1	6,44	6,22	5,42	7,73	12,0 |:
2	11,8	6,28	6,30	5,57	7,65	13,7):
30	6,28	6,37	5,71	8,63	13,1	18,2 |
31	6,44	6,37		8,06	18,1	18,1 |
Средн.	9,26	9,11	5,83	6,61	10,4	14,9
Наиб.	12,2	16,2	6,45	9,32	16,2	18,2
Наим.	6,28	6,28	4,87	5,21	6,14	11,8

Средний годовой 15,3. Наибольший 215 15/IV. Наименьший летний 4, 87 21, 22/X. Наименьший зимний 7,20 14/II

Индекс нуль означает, что характеристика стока относится к многолетнему периоду.

При расчете среднего многолетнего значения производится оценка степени точности и вычисляется средняя квадратическая погрешность многолетней величины по формуле

$$E_{Q_0} = \pm C_v \cdot 100 / \sqrt{N}, \quad (5.34)$$

где C_v — коэффициент вариации (изменчивости) годового стока.

Методика определения коэффициента вариации C_v изложена в упражнении 8.3. Для данного примера $E_{Q_0} = \pm 0,30 \times 100 : \sqrt{36} = 5 \%$.

В абсолютном измерении погрешность равна $E_{Q_0} Q_0 / 100 = 5 \cdot 11,3 : 100 = 0,56 \text{ м}^3/\text{с}$. Значение погрешности можно определить по табл. 5.17.

Таблица 5.17

Значение средней квадратической погрешности E_{Q_0} в процентах в зависимости от числа членов ряда N и коэффициента изменчивости C_v

C_v	N							
	2	5	10	20	40	60	80	100
0,10	7,1	4,5	3,2	2,2	1,6	1,3	1,1	1,0
0,15	10,6	6,7	4,7	3,4	2,4	1,3	1,7	1,5
0,20	14,2	8,9	6,4	4,5	3,2	2,6	2,2	2,0
0,25	17,8	11,1	7,8	5,6	4,0	3,2	2,8	2,5
0,30	21,2	13,4	9,5	6,7	4,8	3,9	3,4	3,0
0,40	28,3	17,8	12,6	8,9	6,3	5,3	4,5	4,0
0,50	35,4	22,2	15,8	11,2	7,9	6,4	5,6	5,0

Длина ряда считается достаточной для определения Q_0 , если $E_{Q_0} = 5 \div 10 \%$. Значение среднего многолетнего расхода при

этом условии называется нормой стока. Нормой гидрологических величин называется среднее арифметическое значение характеристик гидрологического режима за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которой полученное среднее значение существенно не меняется. В качестве возможного критерия продолжительности указанного многолетнего периода принимается условие включения в этот период четного числа многолетних циклов изменения рассматриваемой величины.

Изменение средней квадратической погрешности годового стока в зависимости от географических зон по Д. Л. Соколовскому [48] представлено в табл. 5.18.

Таблица 5.18

Приближенные значения средней квадратической погрешности годового стока E_{Q_0} по зонам в процентах

Географическая зона	Среднее значение C_v	Число лет наблюдений				
		10	20	30	50	100
Лесная	0,25	7,8	5,6	4,6	3,5	2,5
Лесостепная	0,35	11,1	7,9	6,4	4,9	3,5
Степная	0,60	19,0	13,2	10,9	8,5	6,0
Полупустынная	1,0	31,6	22,5	18,1	14,0	10,0

Бассейн р. Истра — с. Павловская Слобода можно отнести к лесной зоне и при $C_v = 0,30$ подсчитанное $E_{Q_0} = 5\%$ для 36 лет находится в допустимых пределах.

б. Модуль стока M л/(с·км²) или q м³/(с·км²) — количество воды, стекающее с единицы площади водосбора в единицу времени, — определяется по формулам:

$$M = Q_{\text{ср}} \cdot 10^3 / F, \quad (5.35)$$

$$q = Q_{\text{ср}} / F, \quad (5.36)$$

где F — площадь водосбора, км².

Из формулы (5.35) можно получить

$$Q_{\text{ср}} = MF / 10^3. \quad (5.37)$$

Для данного примера $M = 15,3 \cdot 10^3 : 1950 = 7,85$ л/(с·км²), $q = 15,3 : 1950 = 0,77$ м³/(с·км²).

в. Объем стока за год W (м³/год или км³/год) — количество воды, стекающее с водосбора за год (можно определить объем за сутки, декаду, месяц), вычисляется по формулам:

$$W = Q_{\text{ср}} T,$$

$$W = MFT / 10^3, \quad (5.38)$$

где T — число секунд в году; $T = 86\,400 \cdot 365 = 31,5 \cdot 10^6$ с. Откуда модуль стока можно вычислить по формуле

$$M = W \cdot 10^3 / (F \cdot 31,5 \cdot 10^6) = W / (F \cdot 31,5 \cdot 10^3). \quad (5.39)$$

Для данного примера по формулам (5.38) равно $W = 15,3 \times 31,5 \cdot 10^3 = 481 \cdot 10^3$ м³/год, или 0,48 км³/год;

$$W = \frac{7,8 \cdot 1950}{10^3} 31,5 \cdot 10^6 = 481 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}.$$

г. Слой стока y за год — количество воды, стекающее с водосбора за год, равное толщине слоя, равномерно распределенного по всей площади водосбора. Слой стока за любой период времени y (мм) можно вычислить по формуле

$$y = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot 86,4 / F, \quad (5.40)$$

где 86,4 — переводной коэффициент; n — число суток в периоде.

Слой стока за любой период T в секундах вычисляется по формуле

$$y = Q_{\text{ср}} T / (F \cdot 10^3), \quad (5.41)$$

$$y = W \cdot 10^3 / (F \cdot 10^6) = W / (F \cdot 10^3). \quad (5.42)$$

Между y , M и W существует зависимость

$$y = W / (F \cdot 10^3) = MF \cdot 31,5 \cdot 10^3 / (F \cdot 10^3) = 31,5M \text{ мм/год},$$

откуда

$$M = \frac{1}{31,5} y = 0,0317y \text{ л/(с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Объем стока в м³/год, выраженный через слой стока, может быть вычислен по формуле

$$W = yF \cdot 10^3. \quad (5.43)$$

Для данного примера $y = 31,5 \cdot 7,8 = 247$ см, $W = 247 \cdot 1950 \times 10^3 = 0,48$ км³/год.

д. Коэффициент стока η определяется как отношение высоты слоя стока y к количеству осадков X за тот же период, обусловивших возникновение стока:

$$\eta = y / X. \quad (5.44)$$

Значения коэффициента η колеблются от 0 до 1,0, причем на его значение большое влияние оказывают испарение, характер водопроницаемости пород водосбора и ряд физико-географических и геоморфологических факторов.

Коэффициент стока для значительного по размерам водосбора следует вычислять для большого периода времени, так как только при этом будет учтена трансформация осадков на водосборе.

е. Модульный коэффициент — отвлеченное число, полученное из соотношений:

$$K_i = Q_i/Q_0; M_i/M_0; W_i/W_0; \\ y_i/y_0; x_i/x_0, \quad (5.45)$$

где $Q_i, M_i, W_i; y_i; x_i$ — сток и осадки за какой-либо период; Q_0, M_0, W_0, y_0, x_0 — сток и осадки за многолетний период.

Значение K в многоводный год больше единицы, в маловодный меньше единицы. Среднее значение модульного коэффициента за ряд лет равно единице. Это видно из следующих соотношений: $K_i = Q_i/Q_0, Q_0 = \sum Q_i/n$, следовательно, среднее значение $K_{i\text{ ср}} = \sum K_i/n = \sum Q_{in}/\sum Q_{in} = 1,0$.

Модульный коэффициент стока р. Истра — с. Павловская Слобода за 1970 г. равен $K = Q_{1970}/Q_0 = 15,3 : 11,3 = 1,35$. Следовательно, 1970 г. является многоводным.

Глава 6.

Расход наносов и растворенных веществ. Охрана водных ресурсов

6

6.1. Гигроскопическая влага и плотность наносов

Упражнение 6.1. Определение содержания гигроскопической влаги и массы наносов в абсолютно сухом состоянии.

Д а н о: образец пробы наносов.

Т р е б у е т с я: 1. Подготовить оборудование для производства анализа.

2. Подготовить и взвесить навеску 1,0—1,5 г в воздушно-сухом состоянии, высушить ее в термостате и вторично взвесить.

3. Рассчитать процентное содержание гигроскопической влаги.

4. Определить массу наносов в абсолютно сухом состоянии.

Р е ш е н и е: 1. Подготавливается сито отверстием 1 мм, 2 бюксы, аналитические весы, термостат, эксикатор.

2. Гигроскопическая влага определяется для донных наносов, в которых присутствует значительное количество илистых и глинистых частиц.

Гигроскопическая влага в % рассчитывается по формуле

$$e = (m_1 - m_2) \cdot 100/m_1, \quad (6.1)$$

где m_1 и m_2 — масса наносов до и после просушки, г.

Содержание гигроскопической влаги e учитывается при: пересчете массы навески в воздушно-сухом состоянии на массу ее в абсолютно сухом состоянии. выполнении анализа пипеточным методом, вычислении содержания органических веществ, определении плотности наносов, а также при определении водно-растворимых солей в глинистых зонных наносах поймы.

Образец наносов в воздушно-сухом состоянии пропускается через сито отверстием 1 мм, и отбирается навеска. В данном примере (табл. 6.1) $m_0 = 10,068$ г (взвешивание производится на аналитических весах с точностью до 0,0001 г).

Таблица 6.1

Определение гигроскопической влаги и массы наносов в абсолютно сухом состоянии
р. Воря — с. Голыгино, 18/VI 1980 г.

Общие сведения	Порядок записи	Навеска в воздушно-сухом состоянии m_0 , г	Определение гигроскопической влаги			Масса наносов в абсолютно сухом состоянии m , г
			навеска в воздушно-сухом состоянии m_1 , г	навеска после просушки в термостате m_2 , г	расчет гигроскопической влаги e %	
Анализ №	№ бюксы	43	20	20	Разность массы после просушки — 1,3875 — 1,3843 — 0,0032	10,0452
Проба №	Масса: бюксы с пробой	41,6630	25,3785	25,3753		
	бюксы пробы	31,5936 10,0684	23,9910 1,3875	1,3843	0,23	

Из этого же образца для определения гигроскопической влаги отбирается навеска весом от 1,0 до 1,5 г (в табл. 6.1 $m_1 = 1,3875$ г). Бюкс с навеской m_1 с открытой крышечкой ставится на 5 ч в термостат и высушивается при температуре 105—110 °С. По окончании сушки бюкс закрывается крышечкой и охлаждается в эксикаторе в течение 45 мин; после охлаждения бюкс с наносами вновь взвешивается. В нашем примере эта масса $m_2 = 1,3843$ г.

3. Процентное содержание гигроскопической влаги определяется по формуле (6.1) $e = 0,0032 \cdot 100 : 1,3875 = 0,23$ %.

4. Масса наносов в абсолютно сухом состоянии вычисляется по формуле

$$m = 100m_0 / (100 + e), \quad (6.2)$$

где m_0 — масса наносов в воздушно-сухом состоянии.

Упражнение 6.2. Определение плотности частиц наносов.

Д а н о: 1. Образец пробы наносов.

2. Содержание гигроскопической влаги 1,32 %.

Т р е б у е т с я: 1. Подготовить оборудование для производства анализа.

2. Произвести определение и расчет плотности.

Р е ш е н и е: 1. Для анализа необходимо приготовить: бюксы, пикнометр с крышкой, крышку со стеклянной трубкой, электроплитку, асбестовый лист, держатель, промывалку, дистиллированную воду, технические весы.

2. Плотность частиц наносов представляет собой отношение массы частиц наносов к их объему в твердом теле без пор и вычисляется по формуле

$$\rho_n = m\rho_0 / (m + m_1 - m_2), \quad (6.3)$$

где m — масса наносов в воздушно-сухом состоянии, перечисленная на массу в абсолютно сухом состоянии по формуле (6.2); m_1 — масса пикнометра с водой, г; m_2 — масса пикнометра с водой и наносами; ρ_0 — плотность воды 1,0 г/см³.

Определение плотности частиц наносов производится в следующем порядке (табл. 6.2):

Таблица 6.2

Журнал определения плотности частиц наносовРека
Станция

Анализ		Проба		№ пикнометра	Масса, г			Содержание гигроскопической влаги ϵ , %
дата	№	дата взятия	№		наноса + бюкса n	бюкса a	воздушно-сухого наноса m_0	
5/VII 1980 г.	3	4/VII 1980 г.	15	20	42,74	32,23	10,57	1,32

Продолжение

Анализ		Проба		№ пикнометра	Масса, г			Плотность частиц наносов ρ_n г/см ³
дата	№	дата взятия	№		наносы в абсолютно сухом состоянии m	пикнометр + вода m_1	пикнометр + вода + наносы m_2	
5/VII 1980 г.	3	4/VII 1980 г.	15	20	10,43	133,88	139,89	1,95

а) на технических весах взвешивается навеска пробы наносов в воздушно-сухом состоянии с точностью до 0,01 г $m_0 = 10,57$ г. С учетом гигроскопической влаги масса наносов в воздушно-сухом

состоянии перечисляется на массу в абсолютно сухом состоянии по формуле (6.2) $m = 100 \cdot 10,57 : (100 + 1,32) = 10,43$ г;

б) чистый пикнометр наполняется дистиллированной водой до метки, закрывается крышкой, вытирается до сухого состояния и взвешивается с точностью до 0,01 г;

в) в пикнометр с водой через воронку переводится навеска, взвешенная в воздушно-сухом состоянии (и масса которой перечислена на массу в абсолютно сухом состоянии). Стенки чашки (или бюкса), в которой была навеска, и воронку осторожно обмывают водой из промывалки, чтобы на стенках их не осталось частиц. Пикнометр с наносами ставят на электроплитку с асбестовым листом и кипятят в течение 30 мин (для удаления воздуха из пор). В пикнометр вставляется пробка со стеклянной трубочкой, в которую по мере кипения можно доливать воду. При сильном кипении пикнометр следует несколько поднять над плиткой, поддерживая его держателем.

После кипячения пикнометр охлаждается при комнатной температуре, в него до метки доливают дистиллированную воду, пикнометр закрывается пробкой и опять взвешивается с точностью 0,01 г. В табл. 6.2 $m_2 = 139,89$ г. Плотность частиц наносов по формуле (6.3) равна $\rho_{\text{ч}} = 10,43 \cdot 1 : (10,43 + 133,88 - 139,89) = 1,95$ г/см³.

Упражнение 6.3. Определение плотности смеси частиц донных наносов в естественном состоянии.

Д а н о : образец пробы наносов.

Т р е б у е т с я : 1. Приготовить оборудование для производства анализа.

2. Определить плотность методом уплотнения.

Р е ш е н и е : 1. Для анализа приготавливаются: чашка фарфоровая, градуированный цилиндр емкостью 100 см³ для мелких и средних наносов и 500 см³ для более крупных наносов, резиновый молоточек диаметром, равным диаметру цилиндра, резиновый пестик, промывалка.

2. Плотность смеси наносов представляет собой отношение массы наносов к их объему вместе с порами и вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{с}} = m/W, \quad (6.4)$$

где m — масса наносов в воздушно-сухом, а для илистых и глинистых наносов в абсолютно сухом состоянии, г; W — уплотненный объем наносов, см³.

Определение плотности смеси производится в следующем порядке:

а) на технических весах взвешивается навеска пробы наносов в воздушно-сухом состоянии с точностью до 0,01 г в количестве: для мелких наносов (с преобладанием частиц мельче 0,1 мм), 25—30 г, для средних наносов (с преобладанием частиц от 0,1 до 2,00 мм) 30 г, для средних наносов (с преобладанием частиц от 0,1 до

2,00 мм) — 50—70 г, для наносов с наличием частиц крупнее 2,0 мм — 150—300 г.

В данном примере образец пробы наносов относится к средним частицам и для анализа взята навеска $m = 64,85$ г;

б) навеска растирается с водой в фарфоровой чашке резиновым пестиком. Для илистых и глинистых наносов навеска размачивается в чашке в течение 1—2 суток. После растирания навеска переводится в градуированный цилиндр, причем чашка слегка обмывается водой из промывалки;

в) в цилиндр, установленный на строго горизонтальной поверхности, доливается вода до уровня на 3—4 см выше поверхности отстоявшейся в ней пробы. Перед установкой на длительный отстой наносы взбалтываются. Наносы в цилиндре уплотняются равномерным постукиванием резиновым молоточком по стенкам цилиндра по всей высоте осадка. Постукивание производится ежедневно в начале и конце рабочего дня. Перед каждым уплотнением отсчитывается объем наносов W см³. Длительность уплотнения зависит от крупности наносов и составляет для илистых и глинистых 10—12 сут, для песчано-гравелистых 5—7 сут. Запись производится в журнале (табл. 6.3). После прекращения уплотнения и установления постоянного объема плотность вычисляется по формуле (6.4).

Таблица 6.3
Журнал определения плотности смеси наносов

№ п/п	Дата анализа	Место взятия пробы (створ, вертикаль)	№ пробы	Масса, г			Объем наносов, см ³	Принятый уплотненный объем, W см ³	Плотность смеси ρ , г/см ³
				наносы + чашки	чашки	наносов			
1	25/V 1980	ств. № 1, в. з.	10	119,01	54,16	64,85	49,2 48,3	47,7	1,31

Упражнение 6.4. Определить содержание органических веществ в донных наносах.

Д а н о : образец пробы.

т р е б у е т с я : 1. Подготовить оборудование.

2. Произвести опыт и расчет.

Р е ш е н и е : 1. Для проведения опыта необходимы: а) фарфоровый тигель, б) муфельная печь, в) эксикатор, г) аналитические весы.

2. Содержание органических веществ вычисляется в процентах от массы абсолютно сухой навески по формуле

$$z = (m - m_1) \cdot 100/m, \quad (6.5)$$

где m — масса абсолютно сухой навески, вычисленной по формуле (6.2); m_1 — масса золы после прокаливания.

Из образца отбирается навеска около 1 г и помещается в заранее прокаленный и взвешенный на аналитических весах тигель, взвешивается на аналитических весах, а затем сжигается и прокаливается в муфельной печи в течение 1,0—1,5 ч. После прокаливания тигель с золой остужается в эксикаторе 45 мин и взвешивается с точностью до 0,0001 г. Запись ведется в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Определение содержания органических веществ донных наносов
р. Воря — с. Голыгино, 27/VI 1980 г.

Общие сведения	Навеска в воздушно-сухом состоянии m_0 , г	Масса наносов в абсолютно сухом состоянии до прокаливания m , г	Порядок записи	Масса наносов после прокаливания m_1 , г	Содержание органических веществ, %
Анализ № Проба №	0,9850	0,9173	№ тигля Масса: тигля+пробы до прокаливания тигля тигля+пробы после прокаливания зола	16 30,3551 29,4378 30,1114 0,2437	73,4

6.2. Гранулометрический анализ проб наносов

Упражнение 6.5. Общие пояснения к гранулометрическому анализу пробы наносов.

Гранулометрическим составом наносов называется состав пробы наносов по крупности частиц. Гранулометрический анализ проб наносов заключается в определении процентного содержания частиц различных фракций и геометрических размеров самой крупной частицы в пробе. Для анализа речных донных наносов применяется классификация частиц по их размерам, приведенная в табл. 6.5.

Анализы выполняются в зависимости от крупности следующими методами: пипеточным, фракциометра, ситовым и простым обмером частиц и фотографическим.

Таблица 6.5

Классификация частиц наносов по размерам

Подфракция	Диаметр частиц, мм						
	Валуны	Галька	Гравий	Песок	Пыль	Ил	Глина
Крупные	1000—500	100—50	10—5	1—0,5	0,1—0,05	0,01—0,005	0,001
Средние	500—200	50—20	5—2	0,5—0,2	—	—	—
Мелкие	200—100	20—10	2—1	0,2—0,1	0,05—0,02	0,005—0,001	—

Для разнородных по крупности образцов перечисленные методы применяются в комбинации друг с другом (например пипетка—фракциометр, сита—фракциометр, обмер—сита—фракциометр, фотографирование — обмер).

Для анализа берется определенное количество наносов (табл. 6.6)

Таблица 6.6
Количество наносов для анализов

Метод	Крупность, мм	Масса наносов, г
Пипеточный и пипетка — фракциометр	0,001—0,5	0,5—5,0
Фракциометр	0,1—1,0	0,5—2,0
Ситовой, сита — фракциометр	Однородные пески	100—200
	Гравелистые пески	300—500
	Галечно-гравелистые пески	500—700
Определение плотности и гигроскопической влаги	Мелкие	70
	Средние	100
	Крупные	200
	Очень крупные	300

Упражнение 6.6. Гранулометрический анализ пробы наносов пипеточным методом.

Д а н о: 1. Образец пробы наносов.

2. Температура воды 21 °С.

Т р е б у е т с я: 1. Подготовить оборудование.

2. Подготовить пробу.

3. Разделить пробу наносов на фракции 0,05—0,01; 0,01—0,005; 0,005—0,001 и <0,001 мм.

4. Произвести расчет.

Р е ш е н и е: 1. Пипеточная установка состоит из основания, штатива, аспиратора, смывного сосуда объемом 25 мм, пипетки цилиндра, бюксов и мешалки.

Дополнительно следует подготовить: фарфоровую чашку, резиновый пестик, литровую коническую колбу, пробку со стеклянной трубкой, плитку для кипячения с асбестовым листом, держатель, промывалку, емкость с дистиллированной водой, секундомер.

2. Илистые и глинистые донные наносы подвергаются тщательной подготовке. Как указывалось выше, пипеточным методом выделяются частицы более 0,05 мм и менее 0,001 мм.

Навеска мелких частиц взвешивается на аналитических весах и записывается в табл. 6.7.

Навеска размачивается в фарфоровой чашке в течение двух суток, залитая 10—20 мл дистиллированной воды.

Таблица 6.7

Журнал КГ-54 для записи анализа на пипеточной установке ПИ-22

№ п/п	Порядок записи	Навеска в воздушно-сухом состоянии	Пробы				Примечание
			Диаметр фракции, мм				
			$\begin{array}{|c} >0,05 \\ \hline 0,05-0,01 \end{array}$	$\begin{array}{|c} 0,01 \\ \hline 0,01-0,005 \end{array}$	$\begin{array}{|c} 0,005 \\ \hline 0,005-0,001 \end{array}$	$\begin{array}{|c} <0,001 \end{array}$	
1	№ бюкса	63	9	10	13	18	
2	Масса бюкса с наносами, г	24,8952	22,7315	17,8828	20,8733	19,8166	
3	Масса бюкса, г	21,5418	22,6481	17,8487	20,8532	19,8132	
4	Масса наносов в пипетке, г		0,0834	0,0341	0,0201	0,0034	
5	Объем пробы в пипетке, мл		25,0	25,2	25,1	25,4	Сумма масс фракций после анализа
6	Масса наносов в суспензии, г		3,3360	1,9532	0,8001	0,1287	
7	Масса наносов фракции, г	3,3534	1,3828	1,1531	0,6714	0,1287	3,3360 г погрешность анализа
8	Относительное содержание, %	100	41,24	34,38	20,02	3,84	—0,0174, или —0,52 %

После размачивания навеска растирается резиновым пестиком с добавлением нескольких капель 25 %-ного раствора аммиака (NH_4OH). Полученная густая суспензия из чашки выливается в коническую литровую колбу и доливается водой до объема, 300—500 мл, затем добавляется 0,5—1,0 мл 25 %-ного раствора аммиака. Колба закрывается пробкой со стеклянной трубкой и ставится на кипячение в течение 1 ч (без аммиака кипячение продолжается 3 ч). После кипячения колба охлаждается при комнатной температуре и взмученная суспензия переводится в пустой цилиндр пипеточной установки ПИ-22. Стенки колбы промываются дистиллированной водой, которая доливается в цилиндр до метки 1 л. Содержимое взмешивается мешалкой и оставляется на 15—20 мин. В пипеточной установке имеется шесть цилиндров, что позволяет производить одновременно шесть анализов.

3. Анализ на пипеточной установке производится в следующем порядке:

а) измеряется температура чистой воды в контрольном цилиндре с точностью $0,10^\circ$, и по табл. 6.8 (для данного примера при $t = 21^\circ\text{C}$) определяются сроки отбора проб пипеткой. Суспензию в цилиндре взбалтывают мешалкой движением вверх и вниз без разбрызгивания;

б) по окончании взбалтывания мешалка вынимается из цилиндра и включается секундомер. Первая проба отбирается через 46 с с глубины 10 см. Глубины отбора последующих проб определяются от понижающегося уровня суспензии.

Пробы берутся пипеткой путем засасывания суспензии вакуумом. Пипетка предварительно калибруется и объем отсчитывается с точностью до 0,1 мл. Взятый пипеткой объем записывается в табл. 6.7 и переносится в пронумерованный взвешенный бюкс;

в) пробы выпариваются в баке и в термостате в течение 2—3 ч при температуре $105\text{—}110^\circ\text{C}$ и охлаждаются в эксикаторе 45 мин, а затем взвешиваются, и данные записываются в табл. 6.7. Оставшаяся суспензия в цилиндре содержит частицы крупнее 0,05 мм, которые можно далее обработать методом фракциометра.

4. После проведенных операций приступают к расчету данных анализа (в табл. 6.7, 6.9) в следующем порядке:

Таблица 6.8

Сроки отбора проб пипеткой в зависимости от температуры суспензии в цилиндре ПИ-22

№ пробы	Наибольший диаметр частиц в пробе, мм	Глубина взятия пробы, мм	Температура воды, $^\circ\text{C}$		
			2,5—7,5	7,6—12,5	12,6—17,5
1	0,05	10	63 с	57 с	51 с
2	0,01	10	28 мин 00 с	24 мин 30 с	21 мин 20 с
3	0,05	10	1 ч 50 мин	1 ч 36 мин	1 ч 23 мин
4	0,001	5	23 ч 47 мин	20 ч 27 мин	17 ч 47 мин

Продолжение

№ пробы	Наибольший диаметр частиц в пробе, мм	Глубина взятия пробы, см	Температура воды, $^\circ\text{C}$		
			17,6—22,5	22,6—27,5	27,6—32,5
1	0,05	10	46 с	40 с	36 с
2	0,01	10	18 мин 40 с	16 мин 40 с	15 мин 09 с
3	0,05	10	1 ч 12 мин	1 ч 07 мин	1 ч 00 мин
4	0,001	5	15 ч 35 мин	13 ч 53 мин	12 ч 38 мин

а) масса наносов в пипетке (строка 4) умножается на переходный коэффициент k (по табл. 6.9) от объема пипетки к объему всей суспензии в цилиндре; полученный результат — масса наносов

Таблица 6.9

Переходные коэффициенты k от объема пробы в пипетке к объему всей суспензии в цилиндре

c мл	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$b = 1000$ мл						
24	41,6667	41,4938	41,3223	41,1523	40,9836	40,8163
25	40,0000	39,8406	39,6825	39,5257	39,3701	39,2157
26	38,3142	38,3142	38,1679	38,0228	37,8788	37,7358

в суспензии — записывается в строку 6. Переходный коэффициент $k = b/c$, где b — объем суспензии в цилиндре (в данном примере $b = 1000$ мл), c — объем пробы в пипетке. Для частиц диаметром 0,05—0,01 мм $k = 40,0000$, следовательно, масса наносов в суспензии равна $0,0834 \cdot 40,0000 = 3,3360$. Для частиц диаметром 0,01—0,005 мм $k = 39,6825$ и масса равна $0,0341 \times 39,6825 = 1,9532$ г. Масса наносов каждой фракции получается последовательным вычитанием из массы в суспензии частиц мельче 0,05 массы частиц мельче 0,01 мм $3,3360 - 1,9532 = 1,3828$ г; для частиц 0,01 мм $1,9532 - 0,8001 = 1,1531$ г и т. д.

По полученным данным вычисляется содержание фракций по отношению к общей навеске в %. Погрешность гранулометрического анализа пипеточным методом для данного примера составляет 0,52 %.

Упражнение 6.7. Гранулометрический анализ пробы наносов методом фракциометра ГР-82.

Д а н о: 1. Образец пробы наносов.

2. Температура воды во фракциометре 20 °С.

Т р е б у е т с я: 1. Привести общие пояснения.

2. Подготовить оборудование к анализу.

3. Подготовить пробу.

4. Разделить пробу наносов на фракции: 1—0,5; 0,5—0,2; 0,2—0,1 и 0,1—0,05 мм.

Р е ш е н и е: 1. Метод фракциометра применяется для частиц диаметром мельче 1 мм и основан на разделении частиц по их гидравлической крупности. Гидравлической крупностью частиц наносов ω называется скорость равномерного падения твердых частиц в неподвижной воде, причем скорость пропорциональна массе каждой частицы. Между диаметром частиц и гидравлической крупностью существует соотношение, приведенное в табл. 6.10.

В лабораторных условиях температура суспензии в цилиндрах пипеточной установки и во фракциометре часто отличается от 15 °С; переход от фактической к нормальной гидравлической крупности частиц в зависимости от температуры суспензии осуществляется введением поправочного коэффициента k_t (табл. 6.11).

Т а б л и ц а 6.10

Соотношение между диаметром и гидравлической крупностью частиц наносов

Диаметр, мм	Гидравлическая крупность, м/с	Диаметр, мм	Гидравлическая крупность, м/с
0,001	0,000 000 8	1,2	0,128
0,005	0,000 02	1,5	0,154
0,01	0,000 08	1,8	0,177
0,05	0,001 95	2,0	0,192
0,1	0,006 1	2,2	0,204
0,2	0,017 4	2,5	0,221
0,5	0,055 5	9,0	0,242
1,0	0,110		

Таблица 6.11

Поправочные коэффициенты k_i к гидравлической крупности в зависимости от температуры суспензии

d мм	Температура, °С					
	2,5—7,5	7,6—12,5	2,6—17,5	17,6—22,5	22,6—27,5	27,6—32,5
2,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,5	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,50
1,0	1,15	1,07	1,00	0,93	0,88	0,82
0,5	1,24	1,11	1,00	0,90	0,83	0,76
0,2	1,30	1,14	1,00	0,88	0,80	0,73
0,1	1,32	1,15	1,00	0,88	0,79	0,72
0,05	1,34	1,15	1,00	0,88	0,79	0,71

После проведения анализа методом фракциометра получается масса пробы в граммах для заданных диаметров, которую следует перевести в проценты по отношению к общей массе.

2. Фракциометр состоит из стеклянной трубки, сужающейся к низу и переходящей в систему разборных стеклянных и резиновых трубок, закрывающихся зажимами. На трубке верхняя метка в 50 мм от верха воронки, нижняя на 1400 мм ниже верхней метки. Фракциометр крепится на деревянной доске строго вертикально в стороне от очагов нагрева. Перед анализом фракциометр наполняется водой до верхней метки, выше которой остается место для введения анализируемой пробы. Зажимы оставляются открытыми, а внизу резиновая трубка оканчивается пробиркой диаметром 1,0—1,5 см, высотой 5 см. Анализ начинается через 15—20 мин, когда вода примет температуру окружающего воздуха.

3. Из пробы, поступающей на анализ, берется навеска 0,5—2,0 г (в данном примере 1,3578 г) в фарфоровую чашку, затем она смачивается водой и осторожно растирается резиновым пестиком в течение 3—5 мин до состояния жидкой кашицы. Растертую в чашке

пробу переводят в маленькую коническую колбочку. Колбочку с наносами встряхивают и, быстро перевернув, выливают содержимое во фракциометр.

4. Разделение пробы на фракции производится в следующем порядке.

Таблица 6.12

Сроки закрывания зажимов фракциометра ГР-82

Фракция, мм	Расстояние до зажима, см	Температура воды, °С			№ зажима
		2,5—7,5	7,6—12,5	12,6—17,5	
1,0—0,5	188	42 с	38 с	34 с	1
0,5—0,2	172	2 мин 08 с	1 мин 52 с	1 мин 39 с	2
0,2—0,1	162	5 мин 52 с	5 мин 06 с	4 мин 26 с	3
0,1—0,05	153	17 мин 28 с	15 мин 00 с	13 мин 05 с	4

Продолжение

Фракция, мм	Расстояние до зажима, см	Температура воды, °С			№ зажима
		17,6—22,5	22,6—27,5	27,6—32,5	
1,0—0,5	188	31 с	29 с	26 с	1
0,5—0,2	172	1 мин 27 с	1 мин 19 с	1 мин 12 с	2
0,2—0,1	162	3 мин 52 с	3 мин 31 с	3 мин 11 с	3
0,1—0,05	153	11 мин 30 с	10 мин 16 с	9 мин 16 с	4

В момент прохода самой крупной частицы через верхнюю метку включается секундомер, который не останавливается до момента прохода этой частицы через нижнюю метку. Разделив длину между метками на продолжительность падения, определяю максимальную гидравлическую крупность в см/с.

Сроки закрывания зажимов для выделения установленных фракций определяются в зависимости от температуры воды во фракциометре по табл. 6.12.

Как видно из табл. 6.12, при средней температуре 15 °С (12,6—17,5 °С) анализ заканчивается через 13 мин 05 с, под фракциометр подставляется бюкс и отделяется нижняя пробирка, содержимое которой сливается в бюкс. Затем под фракциометр подставляется второй бюкс, открывается зажим 1 и отделяется часть трубок, заключенных между зажимами 1 и 2. Частицы, осевшие на стенках отделенной трубки, сливаются в подставленный бюкс. Так же извлекаются частицы, осевшие в трубках между зажимами 2 и 3 и 3 и 4.

Бюксы с наносами разных фракций ставятся на водяную или песчаную баню для выпаривания воды, а затем взвешиваются с точностью до 0,0001 г при воздушно-сухом состоянии наносов и запи-

сываются в табл. 6.13. Массы фракций перечисляются в проценты от массы пробы.

Таблица 6.13

Журнал КГ-54 для записи методом фракциометра ГР-82

№ п/п	Порядок записи	Навеска в воздушно-сухом состоянии, г	Диаметр фракции, мм				Примечание
			1—0,5	0,5—0,2	0,2—0,1	0,1—0,05	
1	№ бюкса	75	6	4	8	11	Сумма масс фракций после анализа 1,3092 г Погрешность анализа —0,0130 г, или 1,01 %
2	Масса: бюксы с наносами	23,5364	21,9430	18,2419	13,5575	15,9977	
3	бюксы наносов	24,8942	21,8753	18,1431	13,0683	15,3442	
4	фракции	1,3578	0,0677	0,0988	0,4892	0,6535	
		1,3222					
5	Относительное содержание, %	100	5,12	7,47	37,00	49,40	

В табл. 6.13 вычисляется погрешность анализа, которая в данном примере получена равной 1,01 %.

По данным табл. 6.13 в табл. 6.14 выписываются диаметр частиц и их гидравлическая крупность (из табл. 6.10). Гидравлическая крупность исправляется на коэффициент k_t при температуре 20 °С.

Таблица 6.14

Определение гидравлической крупности частиц

Диаметр, мм		Гидравлическая крупность	Гидравлическая крупность, исправленная на k_t при $t=20$ °С
фракции	отсекаемых частиц		
1,0—0,5	0,5	0,055 5	0,050 0
0,5—0,2	0,2	0,017 4	0,015 3
0,2—0,1	0,1	0,006 1	0,005 4
0,1—0,05	0,05	0,001 95	0,001 8

Упражнение 6.8. Гранулометрический анализ проб донных наносов ситовым методом и методом обмера.

Д а н о: пробы донных наносов от 17/VI 1977 г. р. Ока — г. Муром, створ № 1, вертикаль № 1.

Т р е б у е т с я: 1. Подготовить оборудование.

2. Подготовить пробу к анализу.

3. Просеять пробу через сито.

4. Определить массу отдельных фракций, заполнить и обработать журнал анализа.

5. Произвести анализ методом обмера.

Р е ш е н и е: 1. Ситовой метод применяется для наносов диаметром от 10 до 1 мм. Ситовой метод может применяться как самостоятельный для этих частиц и как дополнительный в тех случаях, когда основными методами являются пипеточный и фракциометра.

Подготовка оборудования производится в следующем порядке:

а) подбирается набор сит с отверстиями 10, 5, 2, 1 и 0,5 мм.

При подготовке набора следует проверить исправность принятых сит, причем сита устанавливаются в колонку в порядке убывания диаметра сверху вниз. Все сита должны плотно входить друг в друга. Сверху набор должен иметь крышку, а внизу — глухое (без отверстий) сито (чашку);

б) подготовить занумерованные фарфоровые чашки, масса которых должна быть определена и записана в журнал взвешивания лабораторной посуды. Число чашек должно быть больше (на одну) числа сит с отверстиями;

в) подготовить лоток, совок, ступку с пестиком, линейку с миллиметровыми делениями, промывалку с водой;

г) проверить установку технических весов и приготовить разновес и бланк для записи анализа.

2. Проба, присланная на анализ, из банок и пергамента высыпается в чашку и просушивается до воздушно-сухого состояния; обработка ее производится в следующем порядке:

а) если для анализа берется часть образца, то применяется правило средней пробы, заключающееся в следующем: всю пробу высыпают в лоток, где она перемешивается совком и равномерно рассыпается на 6—8 участков; из каждого участка берется небольшое количество наносов в одну чашку;

б) если образец имеет сцементированные комочки, то их следует растереть в фарфоровой чашке резиновым пестиком осторожно, не раздробляя частицы.

Навеска может быть различна — от 100 до 200 г; чем разнороднее грунт, тем навеска должна быть больше. Определение массы навески производится в фарфоровой чашке на технических весах с точностью до 0,01 г.

Из подготовленной пробы выбирают самую крупную частицу и измеряют линейкой ее наибольший размер, который указывает, с какого диаметра сита следует начинать анализ. В данном случае $d_{\text{макс}} = 8 \text{ мм}$.

3. Подготовленную к анализу пробу высыпают в колонку сит, закрывают крышкой и осторожно просеивают. Колонку сит сле-

дует двигать при просеивании в горизонтальной плоскости, не поднимая ее вверх и вниз, во избежание потери мелких частиц. Продолжительность просеивания устанавливается не более 20 мин. Выделенные частицы на ситах, а также застрявшие в отверстиях этого сита относятся к частицам, большим данного диаметра сита. Например, если частица задержалась на сите диаметром 2 мм, то ее следует отнести к фракции 5—2 мм. Если на ситах или на крупных частицах имеется налет приставших мелких частиц, то сита и частицы следует обмыть над тазом, воду собрать, профильтровать, просушить, взвешиванием определить массу осадка, которую в дальнейшем придать к наиболее мелкой фракции, в данном случае менее 0,5 мм.

4. Определяется масса грунта по отдельным фракциям, для чего чашки с грунтом взвешиваются с точностью до 0,01 г и записываются в журнал. Масса фракции определяется по разности массы чашки с грунтом и массы чашки. Содержимое чашек оставляется до полного окончания анализа в целях контроля. Относительное содержание каждой фракции в пробе вычисляется в процентах по отношению к массе всей навески.

Сумма всех масс выделенных фракций может отличаться от взятой навески не более чем на 0,5 %.

Результаты анализа можно представить в виде графика, построение которого пояснено в упражнении 6.10.

5. Анализ образца, в котором имеются частицы крупнее 10 мм, производится методом обмера, при котором каждую частицу измеряют по длине, ширине, высоте или на грохотах с применением самодельных калибров.

Перед обмером вся проба взвешивается на технических весах, а затем просеивается через сито с отверстиями 10 мм. При наличии в пробе более 10 % частиц крупнее 10 мм необходимо подразделить их на фракции 12—20 и 20—50 мм методом обмера.

При обмере применяется приспособление из оргстекла (рис. 6.1), состоящее из трех взаимно перпендикулярных плоскостей с градуировкой, нанесенной через 10 мм (первые десять миллиметров градуируются через 1 мм). Группировка частиц по фракциям производится по двум меньшим размерам (ширине и высоте).

Масса каждой фракции определяется на технических весах, вычисляется процентное содержание частиц и общий процент наносов менее 10 мм, которые дальше анализируются ситовым методом. Невязка анализа не должна превышать 1 %.

Упражнение 6.9. Гранулометрический анализ донных наносов методом фотографирования.

Д а н о: фотоснимок одного участка донных наносов горной реки.

Т р е б у е т с я: 1. Привести пояснение к методу фотографирования.

2. Пояснить обработку фотоснимка и вычисления процентного содержания фракций по фотоснимку.

Решение: 1. Для определения гранулометрического состава донных наносов горных рек с валунно-галечным руслом применяется фотографический метод. Сущность метода заключается в фотографировании отложившихся наносов, характерных для данного участка. Метод позволяет определять крупность поверхностного слоя русловых наносов без нарушения их естественного состояния. При низких уровнях в межень, когда хорошо просматривается дно, выбираются площадки $1 \times 1 \text{ м}^2$ в тех местах, где отложившиеся наносы характерны для данного участка.

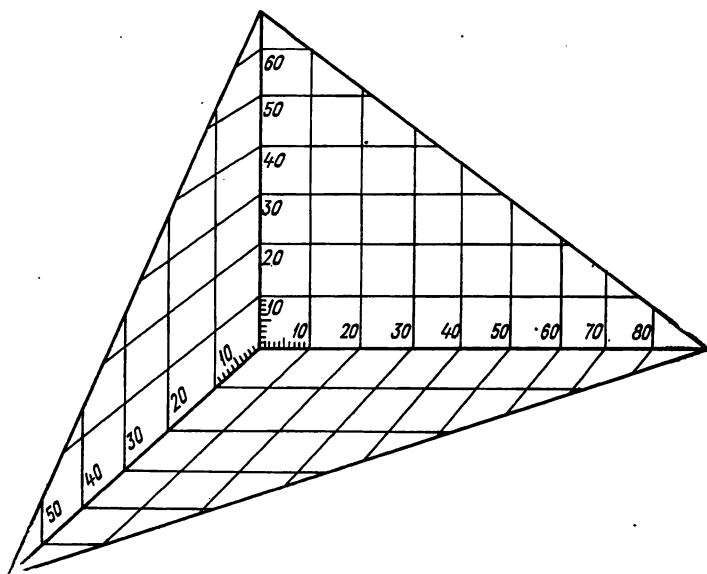


Рис. 6.1. Приспособление для обмера частиц наносов

Заготавливается рама-сетка размером $1 \times 1 \text{ м}$, разделенная шнуром или проволокой на квадраты $10 \times 10 \text{ см}$ (рис. 6.2), которая накладывается на выбранную площадку. Перед фотографированием под сетку кладется трафарет с указанием реки, пункта и № кадра. Фотографирование производится с высоты 2 м с соблюдением параллельности плоскостей пленки и наносов. Первичная обработка фотопленки (проявление, фиксирование) производится на станции. При печати снимков в лабораториях следует следить, чтобы все снимки были в одном масштабе и масштабная рамка получалась квадратной.

2. Для разделения на фотографии частиц на фракции заготавливаются трафареты из оргстекла или на кальке по образцу рис. 6.3. Большой кружок соответствует верхнему, а меньший нижнему размеру фракции.

Трафареты прикладываются к снимкам, и частицы сортируются на фракции. К определенной градации относятся такие частицы, площадь которых на фотографии больше площади внутреннего кружка, но меньше или равна площади внешнего кружка. Определяющим размером при обмере является ширина частицы. Вычисляется процентное содержание фракций (табл. 6.15).

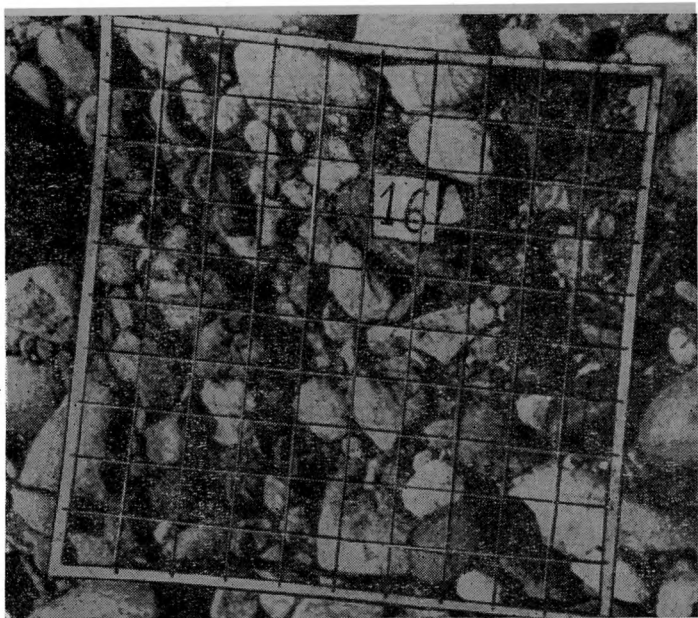


Рис. 6.2. Фотография крупных донных наносов горной реки

В графе 3 приводятся граничные размеры фракций. В графе 4 средний диаметр фракции вычисляется как среднее арифметическое значение из крайних размеров фракций. Средняя площадь одной частицы вычисляется по формуле

$$\varphi = \pi d_i^2 / 4 = 0,78d_i^2, \quad (6.6)$$

где d_i — средний диаметр фракции; $\pi \approx 3,14$.

Величина n_i — количество частиц каждой фракции — подсчитывается для фракций крупнее 100 мм с точностью до 0,1 штуки, для остальных фракций — до 1 шт. Количество самых мелких частиц определяется через площадь, занятую этими частицами. Площадь, занятая i -й фракцией, вычисляется по формуле

$$f_i' = n_i \varphi. \quad (6.7)$$

Таблица 6.15

Пример вычисления процентного содер

№ п/п	Река-пункт, номер кадра, тип донных наносов	Диаметр фракции, мм	Средний диаметр фракции d см	Средняя площадь одной частицы, ϕ см ²	Количество частиц n_i шт.
1	2	3	4	5	6
1	р. Утулик — с. Рыбачье, № 2 отмостка	140—100	12,0	113	13,2
		100—50	7,5	44,2	61
		50—20	3,5	9,6	199
		20—10	1,5	1,8	160
		<10	0,5	0,2	13 550

Площадь $f'_{<10}$, занятая частицами диаметром менее 10 мм, получается как разность всей площади рамки и суммы площадей более крупных фракций

$$f'_{<10} = F - \sum_{i=1}^{m-1} f'_i, \quad (6.8)$$

где m — число фракций.

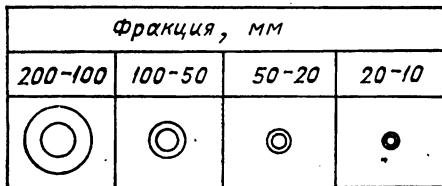


Рис. 6.3. Графетные кружки для сортировки по фракциям на фотографии

В данном примере $f'_{<10} = 10\,000 - (1492 + 2696 + 1910 + 288) = 3614$ см².

Площадь $f'_{<10}$ включает и поровое пространство; соответственно вводится коэффициент на объем пор. Для единицы площади этот коэффициент равен 0,75, тогда $f_{<10}$ равно

$$f_{<10} = 0,75 f'_{<10}. \quad (6.9)$$

В данном примере $f_{<10} = 3614 \cdot 0,75 = 2710$ см².

При равномерном распределении крупности наносов по глубине в табл. 6.15 графы 8 и 9 не заполняются, а процентное содержание

жания фракции по фотографии [37]

Площадь, занятая на фотографии f'_i см ²	Уточненная площадь f см ²	d_i^3 см ³	$n_i d_i^3$ см ³	Процентное содержание фракций
7	8	9	10	11
1 492	1492	1728	22 810	38,4
2 696	2696	422	25 742	43,5
1 910	1910	42,9	8 537	14,4
288	288	3,38	540	0,9
3 614	2710	0,125	1 694	2,8
10 000			59 323	100

фракций a_i вычисляется по формуле

$$a_i = \left(f_i / \sum_1^m f_i \right) 100. \quad (6.10)$$

Если верхний слой сформирован отмошкой, то при вычислении процентного содержания фракций следует переходить от процентного содержания к объемному, т. е. от d^2 к d^3 .

Процентное содержание фракций a_i при наличии отмошки определяется по формуле

$$a_i = \left(n_i d_i^3 / \sum_1^m n_i d_i^3 \right) \cdot 100. \quad (6.11)$$

Для фракций 140—100 мм по формуле (6.11):

$$a_i = 13,2 \cdot 1728 : 57\,629 = 22\,809,6 \cdot 100 : 57\,629 = 38,4 \%, \\ 57\,629 = 59\,323 - 1694.$$

Процентное содержание фракции менее 10 мм вычисляется по разности.

Упражнение 6.10. Способы выражения результатов гранулометрического анализа наносов.

Д а н о: в табл. 6.16 приведены результаты анализа одной пробы речных наносов, полученных несколькими методами.

Т р е б у е т с я: 1. Произвести графические построения.

2. Построить интегральную кривую и определить гранулометрические параметры.

Таблица 6.16

Результаты гранулометрического анализа речных наносов

Диаметр фракции, мм	10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,1	0,1—0,005	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	0,001
Масса фракции, %	1,2	3,0	1,3	3,3	17,6	11,3	13,6	9,4	21,3	9,7	2,3

Решение: данные гранулометрических анализов представляются в виде графических построений, которые можно разделить на две группы: а) иллюстративные изображения, б) количественные.

а. Иллюстративные изображения — гистограммы, циклограммы и треугольные диаграммы.

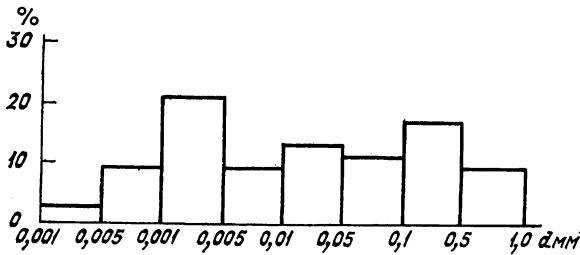


Рис. 6.4. Гистограмма

Гистограммы — наиболее простая форма изображения анализа (рис. 6.4). По ней наглядно видно, что в пробе наносы различных фракций распределены равномерно.

Циклограмма — процентное содержание фракций изображается в виде секторов круга, причем сектор с углом $3,6^\circ$ соответствует одному проценту. По гистограммам и циклограммам можно наглядно выделить преобладание фракций и сопоставить различные по составу наносы.

Треугольная диаграмма (рис. 6.5) применяется главным образом в гидрогеологических исследованиях при определении генетической классификации пород. По диаграмме для данного примера видно, что все градации фракций не превышают 17—21 %.

б. Количественные построения представляются в виде интегральных кривых гранулометрического состава в полулогарифмическом, натуральном и искаженном масштабе. Перед построением составляется вспомогательная табл. 6.17, в которой выписываются диаметры фракций в возрастающем порядке и соответствующее им содержание фракций в процентах. Затем производится последова-

тельное суммирование содержания фракций в пробе (интегральное содержание).

На рис. 6.6 представлена интегральная кривая в искаженном масштабе. Для ее построения по вертикальной оси откладывается в обычном масштабе суммарное количество фракций (например 1 см — 20 %). Для горизонтальной оси предложены масштабы, представленные в табл. 6.18. На миллиметровой бумаге откладываются равные отрезки (например, через 7 мм), у которых надписываются значения d по табл. 6.18.

Границы фракций откладываются через равные интервалы от более мелких к более крупным; по оси ординат — суммарное количество фракций меньше верхнего предела фракции. Кривая проводится плавно и над нею можно выписать наименование фракций.

Полученная кривая распределения может быть использована

для определения статистических показателей, характеризующих состав наносов: медиану, моду, эксцесс, коэффициент сортированности. В последнее время рекомендуется определить грануломет-

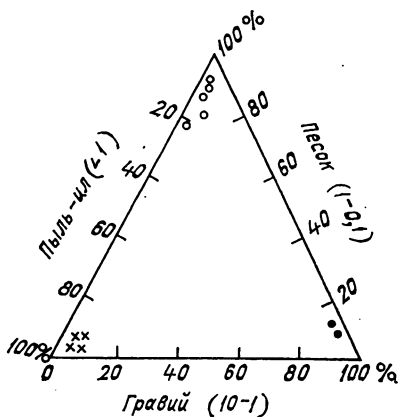


Рис. 6.5. Треугольная диаграмма

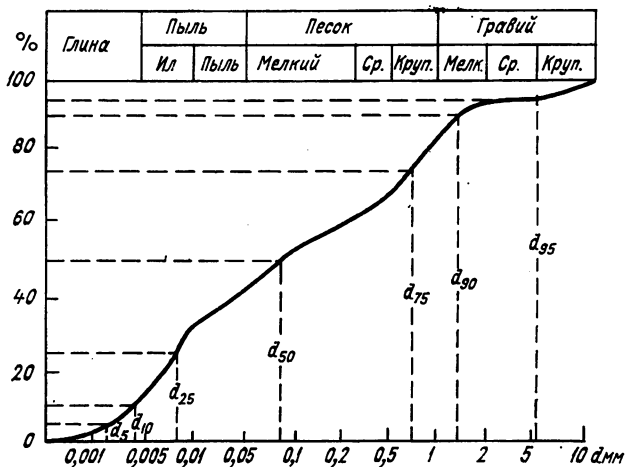


Рис. 6.6. Интегральная кривая гранулометрического состава

рические параметры в виде размера частицы заданной обеспеченности, а именно d_5 , d_{10} , d_{25} , d_{50} , d_{75} , d_{90} , d_{95} . Индекс при d показы-

вает, какой процент частиц меньше данного размера содержится в составе рассматриваемой пробы. Диаметр 50 % обеспеченности для речных условий принимается как эффективный диаметр $d_{эф}$. Указанные параметры определяются графически с кривой, как это показано на рис. 6.8, и записываются в табл. 6.19.

Таблица 6.17
Данные к построению интегральной кривой

№ п/п	Диаметр фракции, мм	Содержание фракции в пробе, %	Последовательное суммирование, %
1	0,001	2,3	2,3
2	0,005	9,7	12,0
3	0,01	21,3	33,3
4	0,05	9,4	42,7
5	0,1	13,6	56,3
6	0,5	11,3	67,6
7	1,0	17,6	85,2
8	2	9,3	94,5
9	5	1,3	95,8
10	10	3,0	98,8
11	10	1,2	100,0

Таблица 6.18
Масштаб фракций для интегральной гранулометрической кривой

Диаметр фракции, мм	Масштаб (в 1 мм графика), мм	Диаметр фракции, мм	Масштаб (в 1 мм графика), мм
0,001	0,0001	0,5—1,0	0,05
0,001—0,005	0,0004	1—2	0,1
0,005—0,01	0,0005	2—5	0,3
0,01—0,05	0,004	5—10	0,5
0,05—0,1	0,005	10—20	1,0
0,1—0,2	0,01	20—50	3,0
0,2—0,5	0,03	50—100	5,0

Таблица 6.19
Гранулометрические параметры наносов

Гранулометрические параметры, мм							Диаметр наиболее крупной частицы, мм	Метод анализа
d_5	d_{10}	d_{25}	d_{50}	d_{75}	d_{90}	d_{95}		
0,001	0,004	0,007	0,08	0,75	1,3	5	10,1	с. п. ф. ¹

¹ с — ситовой, п — пипеточный, ф — фракциометром.

6.3. Расход взвешенных и влекомых наносов

Упражнение 6.11. Обработка книжки записи единичных проб взвешенных наносов и вычисление мутности единичной пробы.

Д а н о : выписка из книжки для записи единичных проб взвешенных наносов (табл. 6.20).

Таблица 6.20

Выписка из книжки записи единичных проб взвешенных наносов

Дата	Время, ч	Уровень над нулем графика, см	Вертикаль		Глубина в точке, м	№ пробы	№ бутылки
			расстояние от пост. начала, м	глубина, м			
1	2	3	4	5	6	7	8
11/VIII	8	134	240	4,65	4,18	25	14

Продолжение

Дата	Время, ч	Уровень над нулем графика, см	Объем пробы А, мл	№ фильтра	№ журнала взвешивания	Масса наносов, г	Мутность в точке, г/м ³
1	2	3	9	10	11	12	13
11/VIII	8	134	2800	1450	1	0,1196	42,7

Т р е б у е т с я : 1. Выписать массу наносов в пробах по записям в журнале взвешивания.

2. Вычислить значение мутности.

Р е ш е н и е : 1. Для определения мутности воды в реках в периоды между измерениями расходов взвешенных наносов на гидрологических станциях берутся ежедневные и контрольные единичные пробы воды на мутность.

Первичная обработка проб заключается в выделении наносов из воды, которая производится в полевой лаборатории фильтрованием.

Фильтры с наносами и полевая книжка высылаются в стационарную лабораторию (табл. 6.21): графы 1—10 книжки заполняются в полевой лаборатории. В стационарной лаборатории в графы 11—13 записывается номер журнала взвешивания наносов, масса наносов и мутность.

2. Мутность единичной пробы вычисляется по формуле

$$s_{ед} = 10^6 m / A, \quad (6.12)$$

где m — масса наносов в пробе с точностью до 0,0001 г; A — объем пробы, мл; 10^6 — переводной коэффициент от мл к м³.

Так же определяется значение мутности в г/м³ для проб воды, взятых при определении расхода взвешенных наносов.

Таблица 6.21

Выписка из книжки для записи измерения расхода воды
и взвешенных наносов

р. Чаткал — пос. Терс, 19/VI 1979 г.

№ вертикали	Глубина, м	Глубина погружения вертушки		Скорость в точке, м/с	Средняя скорость на вертикали, м/с	Взвешенные наносы					
		точка	м			№ пробы/бутылки	№ фильтра	масса г	объем пробы л	мутность	единич. расход наносов г/(с·м ²)
I	2,28	Пов.	0,15	3,22	2,98	32/22	60	0,4195	1000	420	1352
		0,2	0,46	3,26		33/23	61	0,4413	1000	440	1434
		0,6	1,37	3,12		34/24	62	0,4412	1000	440	1373
		0,8	1,82	2,70		35/25	63	0,4455	1000	450	1215
		Дно	2,08	2,40		36/26	64	0,6005	1000	600	1400
III	3,06	Дно	2,86	2,30	3,11	46/36	74	0,6024	1000	600	1380

Примечание. Уровень воды при измерении расхода 434 см над нулем графика. Пробы наносов отбирались батометром-бутылкой объемом 1000 л

Упражнение 6.12. Вычисление расхода взвешенных наносов аналитическим и графическим методами.

Дано: выписка из книжки для записи измерения расхода воды и взвешенных наносов р. Чаткал — пос. Терс (табл. 6.21).

Требуется: 1. Привести общие указания по методам вычисления расходов наносов.

2. А. Рассчитать аналитически расходы наносов, измеренные следующими способами: основным (двухточечным) и однотоочечным; суммарным и интеграционным. Б. Вычислить расход взвешенных наносов графическим методом в следующей последовательности: а) построить на листе миллиметровой бумаги профиль водного сечения и эпюры распределения по ширине реки скоростей течения и элементарных расходов воды; б) на том же листе построить эпюры распределения по вертикали скоростей, мутности и единичных расходов наносов и вычислить средний единичный расход наносов на вертикали; в) построить над профилем эпюру единичных расходов наносов по ширине реки и определить для каждой промерной вертикали значение $\alpha_{ср}$; г) вычислить значение элементарных расходов наносов ρ_s и построить эпюру ρ_s по ширине реки; д) определить площадь эпюры элементарного расхода наносов планиметрированием; е) построить эпюру мутности по ширине реки; ж) вычислить среднюю мутность реки.

3. Сопоставить значения расхода, полученные различными методами.

Решение: 1. Наносы — это твердые частицы, образованные в результате эрозии водосборов и русел, приносимые поверх-

ностным и подземным стоком и формирующие ложи русел. Речные наносы подразделяются на взвешенные, влекомые и донные. Взвешенные наносы переносятся водным потоком во взвешенном состоянии. Влекомые наносы перемещаются водным потоком в придонном слое и движутся путем скольжения, перекачивания или сальтации (перемещение влекомых наносов, выражающееся в перебрасывании вихревыми образованиями частиц грунта, отбрасываемых от дна на короткое расстояние). Донные наносы формируют русло или пойму и взаимодействуют с водными массами потока.

Расходом взвешенных наносов называется количество наносов (твердых частиц), проносимых потоком во взвешенном состоянии через поперечное сечение в единицу времени (кг/с, г/с). Методика измерения расхода взвешенных наносов основана на отборе проб воды.

В зависимости от способов отбора проб вычисление расхода взвешенных наносов производится следующими методами: аналитическим — при основном (двухточечном), одноточечном, суммарном и интеграционном способах; графическим — при многоточечном способе.

Отобранные пробы подвергаются первичной обработке, которая заключается в выделении наносов из воды (см. упражнение 6.11). Одновременно с отборами проб определяется скорость течения воды v , глубина h , ширина потока B . После окончательной лабораторной обработки определяется мутность $s_{ед}$.

Для каждой точки отбора пробы вычисляется единичный расход наносов α в г/(с·м²).

$$\alpha = s_{ед}v. \quad (6.13)$$

Дальнейшая методика вычисления взвешенных наносов основана на тех же теоретических положениях, что и вычисление расхода воды. Аналогично расходу воды на вертикали при расчете расхода наносов используется понятие расхода наносов на вертикали ρ_s г/(с·м), т. е. расход взвешенных наносов на единицу ширины потока или расход наносов через вертикаль

$$\rho_s = \alpha_{ср}h. \quad (6.14)$$

При большом количестве расходов наносов на вертикалях по ширине реки B расход взвешенных наносов может быть выражен формулой

$$P_s = \int_0^B \rho_s db. \quad (6.15)$$

Аналогично рассмотренному в упражнении 4.2 объему водного тела, называемого моделью расхода воды, при движении взвешенных наносов рассматривается такой же объем водного тела, только насыщенного наносами с различной концентрацией. Приближенные решения определения объема модели водного тела, насыщенного

наносами, основаны также на разделении модели плоскостями в различных направлениях.

Рассмотрим методы вычисления расходов взвешенных наносов.

2.А. Аналитический метод вычисления расхода взвешенных наносов

Основное (двухточечное) и одноточечное определение мутности.

а. В табл. 6.22 приведены (с сокращением) сведения о расходе воды и взвешенных наносов. Вычисляется мутность по формуле (6.12) для точки у поверхности $s_{ед} = 10^6 \cdot 0,4195 : 1000 = 420 \text{ г/м}^3$. Единичный расход взвешенных наносов по формуле (6.13) равен $\alpha = 420 \cdot 3,22 = 1352 \text{ г/(с} \cdot \text{м}^2)$. В табл. 6.21 приведены сведения о мутности и единичных расходах наносов, измеренные детальным способом, которые будут использованы в графическом методе.

Таблица 6.22

Вычисление расхода воды и расхода взвешенных наносов аналитическим методом

р. Чаткал — пос. Терс, 19/VI 1979 г.

№ вертикали	Площадь водного сечения между скорост. вертикалями $f \text{ м}^2$	Расход воды			Расход взвешенных наносов			
		средняя скорость на вертикали $v \text{ м/с}$	средняя скорость между вертикалями, м/с	расход воды между вертикалями, $\text{м}^3/\text{с}$	средняя мутность на вертикали, г/м^3	средний единичный расход $\text{г/(с} \cdot \text{м}^2)$		расход между вертикалями, кг/с
			на вертикали	между вертикалями				
Ур. л. б. 1 2	19,4		2,09	40,5			927	18,0
I/3		2,98			443	1324		
.....
III/9		3,11			610	1819		
10	15,5		2,18	23,8			1273	20,0
Ур. пр. б.	$F = 101$			$Q = 274$				$P_s = 149$

б. В табл. 6.22 приведен пример вычисления расхода воды и расхода взвешенных наносов аналитическим методом.

Для каждой скоростной вертикали вычисляются средние единичные расходы взвешенных наносов по формулам:

$$\alpha_{\text{ср}} = 0,5(\alpha_{0,2} + \alpha_{0,8}), \quad (6.16)$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{0,6}, \quad (6.17)$$

где $\alpha_{0,2}$, $\alpha_{0,6}$ и $\alpha_{0,8}$ — единичные расходы на соответствующих точках по глубине.

При заросшем водной растительностью русле применяются формулы:

$$\alpha_{\text{ср}} = (\alpha_{0,15} + \alpha_{0,5} + \alpha_{0,85})/3, \quad (6.18)$$

$$\alpha_{\text{ср}} = \alpha_{0,5}. \quad (6.19)$$

Средний единичный расход наносов на вертикали № 1 при расчете по формуле (6.16) равен $\alpha_{\text{тр}} = (1434 + 1215) : 2 = 1324 \text{ г(с} \cdot \text{м}^2)$. Аналогичные расчеты записываются в табл. 6.22.

в. Вычисление расхода взвешенных наносов (табл. 6.22) производится по формуле

$$P_s = 0,001 [k\alpha_1 f_0 + (\alpha_1 + \alpha_2) f_1/2 + \dots + (\alpha_{n-1} + \alpha_n) f_{n-1}/2 + k\alpha_n f_n], \quad (6.20)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — средние единичные расходы взвешенных наносов на скоростных вертикалях, вычисленные по формулам (6.16) — (6.19), f_0, f_1, \dots, f_n — площади водного сечения между скоростными вертикалями и береговыми участками, м^2 ; k — коэффициент, зависящий от характера распределения скоростей в прибрежной зоне потока (по табл. 4.5); 0,001 — коэффициент перехода от граммов к килограммам.

Расчет расхода по формуле (6.20) приведен в табл. 6.22. Общий расход $P_s = 148 \text{ кг/с}$.

Вычисление расхода взвешенных наносов произведено по формуле (6.20), в которой $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ получены по формуле (6.17). Не приводя подробного хода вычислений, запишем полученное значение $P_s = 145 \text{ кг/с}$. Преуменьшенное значение легко объяснить тем обстоятельством, что наибольшая мутность в точке 0,8 h на вертикали № 3 не вошла в расчет.

Суммарный способ определения мутности на вертикали

а. По массе наносов и объему проб в точках 0,2 h и 0,8 h (табл. 6.21) вычисляется суммарная проба для каждой вертикали. Например, для вертикали № 1 расчет производится следующим образом: $m = m_{0,2} + m_{0,8} = 0,4413 + 0,4455 = 0,8868 \text{ г}$.

Соответственно вычисляется сумма объемов воды $\sum A = A_{0,2} + A_{0,8} = 2000 \text{ мл}$.

Средняя мутность на вертикали в г/м^3 определяется по формуле

$$S_{\text{ср}} = m \cdot 10^6 / \sum A. \quad (6.21)$$

Для вертикали № 1 $S_{cp} = 0,8868 \cdot 10^6 : 2000 = 443 \text{ г/м}^3$. Полученные значения средних мутностей выписаны в табл. 6.23.

б. Расход взвешенных наносов в кг/с при суммарном способе определения мутности на вертикали вычисляется по формуле

$$P_s = 0,001 [s_1 Q_0 + (s_1 + s_2) Q_1/2 + \dots + (s_{n-1} + s_n) Q_{n-1}/2 + s_n Q_n], \quad (6.22)$$

где s_1, s_2, \dots, s_n — средние мутности воды, определенные суммарным способом соответственно на вертикалях 1, 2, ..., n ; Q_0, Q_1, \dots, Q_n — частичные расходы воды между вертикалями и береговыми участками. Расчет произведен в табл. 6.23. Для участка урез левого берега — вертикаль I расход взвешенных наносов $p_s = 443 \cdot 40,5 = 17941 \text{ г} = 17,9 \text{ кг/с}$. Общий расход наносов равен $P_s = 146 \text{ кг/с}$.

Таблица 6.23

Расчет расхода взвешенных наносов, измеренного суммарным способом

р. Чаткал — пос. Терс, 19/VI 1979 г.

№ скоростной вертикали	Расход воды между вертикалями, м ³ /с	Средняя мутность s_{cp} г/м ³		Расход взвешенных наносов между вертикалями, кг/с
		на вертикали	между вертикалями	
Ур. л. б.	40,5	0,00	443	17,9
I		443		
.....	.....	610	.....	.....
III	23,8		610	18,5
Ур. пр. б.		0,00		$P_s = 146$

Суммарный и интеграционный способ определения мутности для всего сечения

а. Для данной задачи сумма массы наносов на всех трех вертикалях в точках 0,2 h и 0,8 h равна 3,1500 г, объем воды отобранных проб равен 6000 мл. Средняя мутность потока $S_{cp} = 10^6 \cdot 3,1500 : 6000 = 525 \text{ г/м}^3$.

б. Расход взвешенных наносов при суммарном способе определения мутности вычисляется по формуле

$$P_s = 0,001 S_{cp} Q. \quad (6.23)$$

Расход наносов по этой формуле $P_s = 0,001 \cdot 525 \cdot 274 = 143 \text{ кг/с}$.

Если учитывать все пробы, отобранные многоточечным способом, то $S_{cp} = 7,596 \cdot 10^6 : 15000 = 506 \text{ г/м}^3$. Расход наносов в этом случае составит $P_s = 0,001 \cdot 506 \cdot 274 = 139 \text{ кг/с}$.

При интеграционном способе проба берется при плавном перемещении прибора по глубине вертикали от поверхности до дна потока и обратно. Дальнейшая обработка аналогична рассмотренному выше.

По расходу взвешенных наносов P_s кг/с и расходу воды Q м³/с вычисляется средняя мутность для всего потока по формуле

$$S_{cp} = 1000P_s/Q. \quad (6.24)$$

Для данного примера получим $S_{cp} = 1000 \cdot 148 : 274 = 540$ г/м³.

На больших и средних реках применяется сокращенный способ измерения взвешенных наносов по единичной средней мутности на репрезентативной вертикали.

Репрезентативная вертикаль назначается в стречневой зоне потока из числа тех, что дает наиболее устойчивую многолетнюю связь измеренной мутности со средней мутностью потока. Расход взвешенных наносов вычисляется путем умножения средней мутности, определенной на репрезентативной вертикали, с учетом переходного коэффициента k_p на расход воды. По аналогии с формулой (6.23) можно записать так:

$$P_s = k_p S_p Q,$$

где S_p — средняя мутность на репрезентативной вертикали; Q — расход воды (может быть определен любым способом, в том числе и сокращенным способом по репрезентативной вертикали); k_p — переходной коэффициент, равный

$$k_p = P_{s_{осн}}/P_{sp}. \quad (6.25)$$

Здесь $R_{s_{осн}}$ — расход взвешенных наносов, вычисленный основным способом; P_{sp} — расход взвешенных наносов на репрезентативной вертикали; k_p изменяется от 0,9 до 1,1.

Б. Графический метод вычисления расхода взвешенных наносов

При многоточечном определении мутности порядок вычисления расхода следующий:

а. По данным табл. 6.21, 6.22 и указаниям упражнения 4.2 строится профиль водного сечения и эпюра средней скорости (рис. 6.7).

б. При построении на вертикалях эпюр скоростей v , мутности S и единичного расхода α (рис. 6.7) масштаб выбирается с таким расчетом, чтобы отношение ширины к высоте у эпюр центральных вертикалей было в пределах 0,7—1,3. Эпюры мутностей на вертикалях строятся для контроля хода эпюры единичных расходов наносов, так как очертание последней повторяет очертания эпюры мутности.

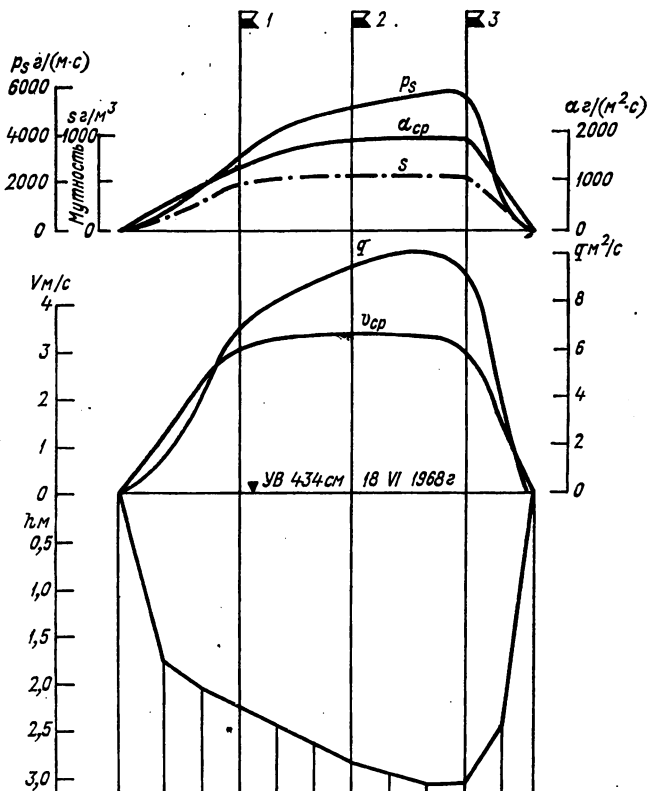
Для определения среднего единичного расхода наносов на вертикали планиметрируются площади эпюр единичных расходов. Цена деления планиметра для эпюры среднего единичного расхода наносов на вертикали $K = 53,42$ г/(с·м·ед), для эпюры расходов по ширине реки $K = 1,068$ кг/(с·ед).

Для вертикали № 1 при средней разности отсчетов планиметра 56 площадь равна $56 \cdot 53,42 = 2991,5$ г/(с·м). При глубине $h = 2,28$ м среднее значение единичного расхода наносов на вертикали равно $\alpha_{ср} = 2991,5 : 2,28 = 1303$ г/(с·м²).

Площади эпюр можно определить способом палетки.

в. Значения средних единичных расходов наносов для каждой скоростной вертикали выписываются в таблицу под профилем

Принятые данные	
Нсм	434
Qм ³ /с	274
Fм ²	101
Vсрм/с	2,72
Vмм/с	3,56
Вм	44,5
γсрм	2,49
γсмм	3,06
I %о	2,2
P кг/с	14,7
S г/м ³	536



№ вертикали	Ур. м.б.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ур. м.б.
Расстояние от пост. начала, м	9	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	53,5
Рабочая глубина гм	0	1,78	2,06	2,28	2,46	2,62	2,84	2,96	3,06	3,06	2,5	0
Средняя скорость в м/с	0	1,1	2,09	3,02	3,23	3,29	3,3	3,3	3,28	3,11	1,65	0
Расход воды на вертикали q=υм ³ /с	0	1,96	4,3	6,88	7,94	8,62	9,37	9,77	10,3	9,51	4,12	0
Единичный расход наносов α=sv г/м ² ·с	0	500	910	1593	1500	1650	1711	1800	1825	1833	700	0
Расход наносов на вертикали p _с =svγ г/м·с	0	880	1874	2871	3690	4323	4799	5128	5584	5508	1750	0
Мутность s г/м ³	0	403	1874	1303	1303	1303	1303	1303	1303	1303	536	0

(рис. 6.7) и откладываются над профилем в том же масштабе, что и при построении эпюр на вертикали. Проводится плавная эпюра единичных расходов наносов, с которой снимаются значения для каждой промерной вертикали и записываются под профилем.

г. Расход наносов для каждой промерной вертикали вычисляется по формуле (6.14) $p_s = \alpha h = svh$. Все значения выписываются в таблицу под профилем. По наибольшему значению выбирается масштаб с таким расчетом, чтобы наибольший расход наносов был высотой около 10 см (в данном примере условие не выдержано). В принятом масштабе на рис. 6.9 строится эпюра распределения расходов наносов по ширине реки.

д. Площадь эпюры расхода наносов, определяемая планиметром, численно равна расходу взвешенных наносов. Расход взвешенных наносов, вычисленный графическим способом, равен $P_s = 147$ кг/с. Одновременно с вычислением расхода взвешенных наносов вычисляется расход воды графическим методом. Эти расчеты здесь не приводятся, поэтому принимается расход воды, вычисленный аналитическим методом, $Q = 274$ м³/с.

е. Средняя мутность в г/м³ вычисляется по формуле (6.24). Для данного примера

$$S_{cp} = 1000 \cdot 147 : 274 = 536 \text{ г/м}^3.$$

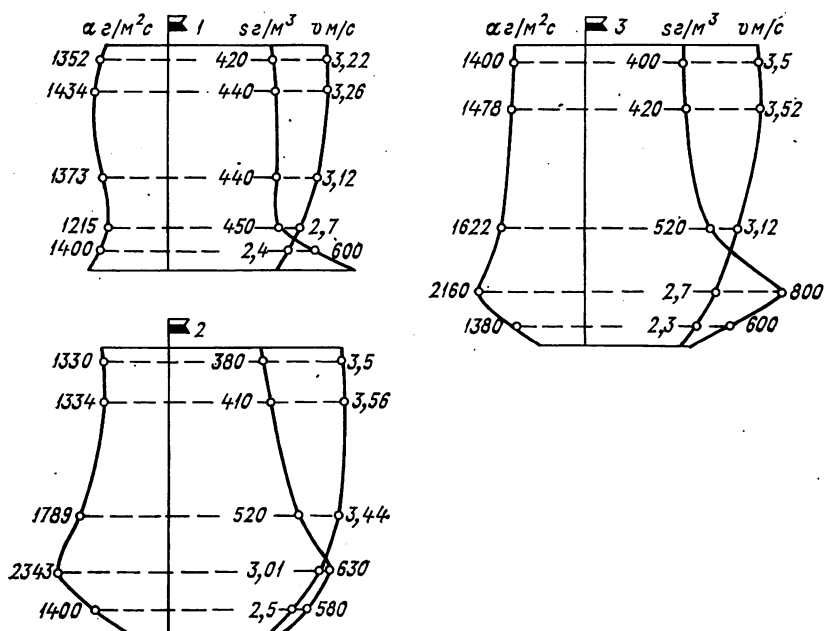


Рис. 6.7. Вычисление расхода взвешенных наносов графическим способом
р. Чаткал — с. Терс, 18/VI 1968 г.

ж. Над профилем на рис. 6.7 для анализа распределения мутности по ширине реки построена эпюра мутности по скоростным вертикалям. Мутность в данном случае вычисляется по формуле

$$s = p_s/q, \quad (6.26)$$

где p_s — расход наносов на вертикали, г/(м·с); q — расход воды на вертикали, м²/с.

3. Сопоставление полученных расходов произведено в табл. 6.24.

Таблица 6.24
Значения расходов взвешенных наносов P_s кг/с,
вычисленных различными методами

р. Чаткал — пос. Терс, 19/VI 1979 г.

Аналитические методы					Графический метод
двухточечный способ	одноточечный способ	суммарный способ			
		на вертикали в двух точках	по двум точкам со всех вертикалей	по пяти точкам	
148	145	146	143	139	147

Как видно из табл. 6.24, значения расходов наносов, вычисленных различными методами, очень близки между собой. Аналитические способы при использовании данных о мутности на глубинах 0,2 *h* и 0,8 *h* дают результаты, близкие к детальному графическому методу, который принимается как эталон.

Из изложенного видно, что в общем виде применяется метод «мутность — скорость — площадь». По многолетним данным установлено, что при соблюдении всех методических указаний при выполнении полевых и камеральных работ учет стока наносов производится с погрешностью $\pm (15-20 \%)$.

Наблюдениями установлено, что в межень период, в течение которого мутность не превышает 50 г/м³, сток взвешенных наносов составляет 5 % годового. Если на станции выяснилось, что при низких уровнях воды в реке наблюдается устойчивое снижение стока наносов, то можно отменить регулярные наблюдения за мутностью и возобновить при достижении уровнем определенной отметки.

Упражнение 6.13. Расчет расхода наносов на вертикали при грядовом и гладком дне.

Дано: 1. Средняя скорость на вертикали $v_{cp} = 55,8$ см/с, глубина $h = 33,5$ см, уклон водной поверхности $I = 0,76 \text{ ‰}$, расход воды $Q = 63,5$ м³/с.

2. Гидравлическая крупность $\omega = 0,59$ см/с, диаметр донных наносов $d = 0,023$ см и $d_{50} = 0,023$ см, плотность наносов $\rho_n = 2,20$ г/см³, $\rho_3 = 1$ г/см³.

Т р е б у е т с я: 1. Определить режим движения наносов по критерию перехода грядовой формы дна в гладкую.

2. Вычислить коэффициент сопротивления подвижного дна при различных его формах.

3. Определить критерий подвижности.

4. Вычислить расход наносов на вертикали.

Р е ш е н и е. 1. Г. В. Железняковым и В. К. Дебольским [13] предложена методика расчета расхода наносов на вертикалях в сечении.

Критерий перехода от грядовой формы к гладкой можно определить из условия

$$(v_{ср}^2/\omega) \sqrt{d/h} \cong 100 \text{ см/с.}$$

Если критерий больше 100 см/с, то движение происходит при грядовой форме дна, если меньше 100 см/с, то при гладком дне. В данном примере $(55,8^2 : 0,59) \cdot \sqrt{0,023} : 33,5 = 137 \text{ см/с.}$

Полученное значение 137 см/с больше 100, следовательно, движение происходит при грядовой форме дна.

2. Коэффициент сопротивления подвижного дна при грядовой форме может быть вычислен по формуле

$$f_* = k_1 [gd^2/(\rho'\omega^2h)]^{-4/3}, \quad (6.27)$$

где k_1 — безразмерный коэффициент, равный $19,5 \cdot 10^{-4}$,

$$\rho' = (\rho_n - \rho_b)/\rho_b. \quad (6.28)$$

При гладкой форме f_* вычисляется по формуле

$$f_* = k_2 [(gd_{50}/\omega^2)^{3/4}d/(\rho'h)]^{-4/3}, \quad (6.29)$$

где $k_2 = 4,2 \cdot 10^{-5}$.

Для данного примера при грядовой форме дна $\rho' = 1,20$

$$f_* = 19,5 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{1,20} \cdot \frac{981 \cdot 0,023}{0,59^2} \cdot \frac{0,023}{33,5} \right)^{-4/3} = 3,10.$$

3. Критерий подвижности вычисляется по формуле

$$E_{Г*} = hI/(\rho'f_*d_{50}), \quad (6.30)$$

где d_{50} — диаметр фракции, соответствующий 50 % частиц, слагающих дно.

Подставив известные данные, получим $E_{Г*} = 33,5 \cdot 0,0076 : (1,20 \cdot 3,10 \cdot 0,023) = 0,32$.

4. Расход наносов на вертикалях:

при грядовой форме

$$G_{н.в} = k_{гр} E_{Г*} / (\rho Q), \quad k_{гр} = 1; \quad (6.31)$$

при гладкой форме

$$G_{н.в} = k_{гг} E_{Г*}^{4/3} / (\rho Q), \quad k_{гг} = 0,16. \quad (6.32)$$

Для данного примера в условиях грядовой формы расход на вертикали по формуле (6.31) равен $G_{н.в} = 1,0 \cdot 0,32 : (1 \cdot 63,5) = = 19 \text{ г/с}$.

Упражнение 6.14. Расчет транспортирующей способности водотока.

Дано: 1. Средняя скорость течения $v_{ср} = 0,45 \text{ м/с}$, средняя глубина $h_{ср} = 5,00 \text{ м}$, $C = 25 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

2. Средний диаметр частиц наносов $d_{ср} = 0,1 \text{ мм}$.

3. Температура воды $t_{в} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Требуется: определить транспортирующую и предельную способность водотока.

Решение: транспортирующей способностью называется способность водотока при заданных гидравлических условиях переносить без потерь и насыщения за счет взмыва со дна определенное количество наносов данного гранулометрического состава. Вычисление транспортирующей способности $S_{тр}$ г/м^3 производится по формуле

$$S_{тр} = \Gamma S_{взм}, \quad (6.33)$$

где Γ — гидромеханический параметр наносов; $S_{взм}$ — мутность взмыва, г/м^3 .

Мутность взмыва определяется по формуле

$$S_{взм} = c E v_{ср}^2 / h_{ср}, \quad (6.34)$$

где E — параметр зависящий от коэффициента Шези; c — множитель, вычисленный по соотношению $S/S_{выч}$, где S и $S_{выч}$ — соответственно фактическая мутность и вычисленная; при отсутствии наблюдений можно принять $c = 1$. Для данного примера при $C = = 25 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, $E = 3,1 \cdot 10^3$.

$$S_{взм} = 1 \cdot 3,1 \cdot 10^3 \cdot 0,45^2 : 5,0 = 0,12 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3.$$

Гидромеханический параметр взвешенных наносов Γ рассматривается как функция коэффициента Шези C и параметра G , вычисленного по формуле

$$G = \omega / v_{ср}. \quad (6.35)$$

По табл. 6.25 при $d = 0,1 \text{ мм}$ получаем $\omega = 0,008 \text{ м/с}$, тогда $G = 0,008 : 0,45 = 0,017$.

Из табл. 6.26 при $C = 25 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ и $G = 0,017$ гидромеханический параметр $\Gamma = 0,431$.

По формуле (6.33) $S_{тр} = 0,431 \cdot 0,12 \cdot 10^3 = 0,052 \cdot 10^3 = = 52,0 \text{ г/м}^3$.

Для расчета предельной транспортирующей способности потока предложена формула

$$S_{пр.тр} = 24 v_{ср}^3 / (\omega h_{ср}). \quad (6.36)$$

Для данного примера $S_{пр.тр} = 24 \cdot 0,45^3 : (0,008 \cdot 5,0) = = 54,0 \text{ г/м}^3$.

Таблица 6.25
Значения гидравлической крупности частиц
при $t = 15^\circ\text{C}$

d , мм	ω , м/с	d , мм	ω , м/с
1,0	0,100	0,05	0,002
0,5	0,060	0,01	0,000 88
0,2	0,021	0,005	0,000 02
0,1	0,008	0,001	0,000 000 8

Таблица 6.26
Значения параметра $\Gamma = f(GC)$

G	C				
	20	30	40	50	60
0,000 1	0,998	0,995	0,960	0,986	0,980
0,001 0	0,960	0,934	0,900	0,860	0,816
0,002 0	0,927	0,874	0,812	0,742	0,669
0,005 0	0,827	0,716	0,601	0,486	0,387
0,010 0	0,687	0,520	0,373	0,259	0,177
0,020 0	0,479	0,290	0,169	0,099	0,066
0,030 0	0,337	0,168	0,084	0,044	0,026
0,040 0	0,254	0,110	0,052	0,026	0,015
0,060 0	0,141	0,049	0,018 8	0,008 9	0,004 5
0,080 0	0,079	0,023 1	0,008 4	0,003 3	0,001 5
0,10	0,044	0,012 3	0,003 8	0,001 43	0,000 56

Как видно, результаты расчетов по формулам (6.33) и (6.36) сопоставимы.

Упражнение 6.15. Вычисление расхода влекомых наносов.

Д а н о: выписка из книжки для записи измерения расходов влекомых наносов (табл. 6.27).

Т р е б у е т с я: 1. Определить общую продолжительность наблюдений на вертикали.

2. Вычислить расходы влекомых наносов на 1 м длины.

3. Вычислить расход влекомых наносов.

Р е ш е н и е: 1. Отбор проб производится батометром-сеткой, барометром ПИ-23 и другими приборами. Измерения на каждой вертикали повторяются не менее трех раз. Продолжительность наблюдений за прием не более 10 мин. Общая продолжительность наблюдений для вертикали № 1 (табл. 6.27) равна 1800 с. По данным лабораторных работ, масса наносов $m = 15,69$ г.

2. Расход влекомых наносов на каждой вертикали $\rho_{вл}$ кг/(с·м) вычисляется по формуле

$$\rho_{вл} = m/(lt), \quad (6.37)$$

где m — средняя масса наносов на вертикали, кг; t — продолжи-

№ вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Глубина, м	Продолжительность наблюдений за прием, с	Объем пробы,			
				1	2	3	4
Ур. пр. б. 1	11,0 28,5	0,00 1,70	600	12,4	13,0	14,7	—
4	55,0	2,18	120	18,4	20,5	21,8	23,0
Ур. л. б.	61,0	0,00					

тельность выдержки батометра на дне реки, с; l — ширина входного отверстия прибора, равная 0,25 м.

Для вертикали № 1 $p_{вл} = 0,01569 : 0,25 : 1800 = 0,000$ кг/(с·м), для вертикали № 4 $p_{вл} = 0,0003$ кг/(с·м).

3. Полный расход влекомых наносов $P_{вл}$ кг/с вычисляется по формуле

$$p_{вл} = [p_1 b_0 / 2 + (p_1 + p_2) b_1 / 2 + \dots + (p_{n-1} + p_n) b_{n-1} / 2 + p_n b_n / 2], \quad (6.38)$$

где p_1, p_2, \dots, p_n — расходы влекомых наносов на вертикалях, кг/(с·м); b_0, b_1, \dots, b_n — расстояние между вертикалями и урезами. Вычисление расхода влекомых наносов дано в табл. 6.27.

Упражнение 6.16. Измерение расхода влекомых наносов суммарным способом.

Суммарный способ определения влекомых наносов применяется на горных реках при наличии плотины, создающей водохранилище, в котором происходит отложение наносов. Суммарное определение стока основано на методе баланса наносов в водоеме. Сток влекомых наносов вычисляется по данным о количестве наносов, отложившихся в водохранилище за интервал времени, и о стоке взвешенных наносов в начальном и конечном створах водохранилища за тот же период времени.

Объем отложений вычисляется по данным об изменении отметок дна за период между сериями промеров глубин. Для обеспечения точности промерных работ размеры выбранного водоема должны быть: площадь не более 1 км², ширина не более 200 м. Для перехода от объема к массе наносов учитывается плотность наносов в естественном залегании (см. упражнение 6.3).

измерения влекомых наносов

8/VIII 1980 г.

№ пробы	Масса пробы, г	Общая продолжительность наблюдений, с	Расход наносов, кг/(с·м)		Расстояние между вертикалями, м	Расход наносов между вертикалями, кг/с	Примечание
			на вертикали	между вертикалями			
			0,000	0,000	17,5	—	l — ширина входного отверстия прибора 25 см
24/7	15,69	1800		0,000 0	15,0	0,000	
28/11	32,71	480	0,000 3	0,000 15	6,00	0,000 9	
						$P_{вл} = 0,085$	

Общее количество наносов, перенесенных за время Δt через начальный створ $P_{нач}$, определяется по формуле

$$P_{нач} = P_{отл} + P_{вз. кон}, \quad (6.39)$$

где $P_{отл}$ — масса отложившихся в водоеме влекомых и взвешенных наносов в начальном створе за период Δt , с; $P_{вз. кон}$ — сток взвешенных наносов на выходном, конечном створе за Δt с. Значения P выражаются в килограммах.

Уравнение баланса наносов за период Δt можно представить в виде

$$P_{вл. нач} = P_{отл} - (P_{вз. нач} - P_{вз. кон}). \quad (6.40)$$

Здесь $P_{вл. нач}$ — сток влекомых наносов; $P_{вз. нач}$ — сток взвешенных наносов в начальном створе.

Общий расход наносов P_S кг/с и расход влекомых наносов $P_{вл}$ кг/с в начальном створе за интервал времени Δt вычисляются по формулам:

$$P_S = P_{нач} / \Delta t, \quad (6.41)$$

$$P_{вл} = P_{вл. нач} / \Delta t. \quad (6.42)$$

Упражнение 6.17. Определение расхода влекомых наносов равнинных рек по измерениям параметров гряд.

Дано: 1. Сведения о параметрах гряд (табл. 6.28).

2. Коэффициент формы гряды $\alpha = 0,5$.

3. На участке реки выбрано три продольника, причем предполагается, что от крайних к урезам продольников № 1 и 3 до урезом наблюдается перемещение наносов.

Данные о параметрах гряд являются средними значениями по многократным измерениям.

Т р е б у е т с я: 1. Привести пояснение к проведению полевых работ и обработке данных наблюдений.

2. Рассчитать расход влекомых наносов.

Таблица 6.28

Сведения о параметрах гряд

№ продольника	Плотность наносов в естественном значении ρ_r кг/м ³	Средняя скорость перемещения гряд C_r м/с	Средняя высота гряд h_r м	Расстояния между продольниками b м	
Ур. л. б.	0,00	0,000	0,00	b_1	20
1	3,65	0,000 01	1,53	b_2	20
2	2,65	0,000 03	2,12	b_3	20
3	2,65	0,000 02	1,84	b_4	20
Ур. пр. б.	0,00	0,000	0,00		

Р е ш е н и е: 1. На равнинных реках с грядовой формой рельефа расход влекомых наносов можно определить по результатам измерений размеров донных гряд (рис. 6.8) и скорости их перемещения.

В районе поста назначается участок, длина которого зависит от форм и размеров гряд. Размер гряды определяется соотношением $l_r = 5 \div 6 H$, где l_r — длина гряды, H — средняя глубина на гидростворе.

Для надежного определения параметров на участке должно быть 20—30 гряд, причем измерение следует проводить после их полной стабилизации. На выбранном участке закрепляется три—пять продольных профиля, по которым производятся периодически промеры (съемки). Число съемок зависит от скорости перемещения гряд. Наблюдения производятся в стрежневой и прибрежной зоне с учетом зоны активного перемещения наносов. Участок измерений ограничивается поперечниками. На продольниках в начале и в конце располагаются вертикали, на которых определяется скорость и мутность. На этих же вертикалях отбираются пробы донных наносов, по которым определяется плотность смеси наносов в естественном состоянии и гранулометрический состав. Глубины измеряются эхолотом с точностью ± 10 см при равномерном передвижении катера.

Высота гряд h_r и скорость их перемещения c_r определяются из сопоставления двух серий промеров по заданным продольникам. Высота гряд h_r получается как разность глубин в подвалье и на гребне гряды. Скорость перемещения c_r определяется по данным повторного эхолотирования на каждом продольнике. Можно определить изменение рельефа дна Δx за интервал времени Δt и установить $c_r = \Delta x / \Delta t$.

Обработка эхограмм выполняется следующим образом. По эхограммам строятся профили дна для каждого продольника и в характерных местах его перелома снимаются глубины с точностью до 0,05 м. Расстояния между точками определяются по данным о скорости или времени передвижения плавсредства.

Расход влекомых наносов по осредненным для каждого продольника значениям высот и скоростей смещения гряд вычисляется по формуле

$$p_{\Gamma} = a p_{\Gamma} h_{\Gamma} c_{\Gamma}, \quad (6.43)$$

где p_{Γ} — расход влекомых наносов, кг/(с·м); a — коэффициент формы гряды, определяемый из соотношения между ее средней и

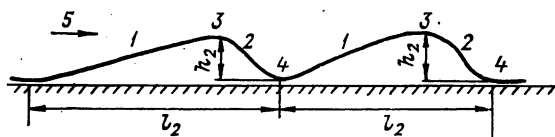


Рис. 6.8. Основные элементы донных гряд

максимальной высотой, который приближенно принимается равным 0,5—0,6; ρ_{Γ} — плотность смеси наносов в естественном залегании, кг/м³; h_{Γ} — средняя высота гряд на продольнике, м; c_{Γ} — средняя на промерном продольнике скорость перемещения донных гряд, м/с [может быть рассчитана по формулам, приведенным в Руководстве по изучению селевых потоков (Л., Гидрометеоздат, 1976)].

Вычисление расхода влекомых наносов в пределах всей зоны активного перемещения производится по формуле

$$P_{\Gamma} = p_{\Gamma 1} b_1 / 2 + (p_{\Gamma 1} + p_{\Gamma 2}) b_2 / 2 + \dots + (p_{\Gamma n-1} + p_{\Gamma n}) b_{n-1} / 2 + p_{\Gamma n} b_n / 2, \quad (6.44)$$

Таблица 6.29

Вычисление расхода влекомых наносов по данным измерения параметров гряд

№ продольника	Расход влекомых наносов p_{Γ} кг/(с·м)	Расстояние между продольниками b м	$(p_{\Gamma n-1} + p_{\Gamma n}) / 2$ кг/(с·м)	$(p_{\Gamma n-1} + p_{\Gamma n}) \times b_{n-1} / 2$ кг/с
Ур. л. б.	0,000 0			
1	0,000 010	20,0	0,000 050	0,000 100
2	0,000 168	20,0	0,000 079	0,001 580
3	0,000 098	20,0	0,000 133	0,002 600
		20,0	0,000 049	0,000 980
Ур. пр. б.	0,000 0			$P_{\Gamma} = 0,0052$ кг/с

где $p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rn}$ — расходы влекомых наносов на промерных продольниках, кг/с; b_1 и b_n — расстояние между крайними продольниками и границами зоны активного перемещения наносов у правого и левого берега, м; b_2, \dots, b_{n-1} — расстояние между промерными продольниками, м.

В табл. 6.29 приведен расчет расхода влекомых наносов по формуле (6.44) и исходным данным упражнения.

6.4. Расчет стока растворенных веществ

Упражнение 6.18. Обработка данных химического анализа воды.

Д а н о: 1. Данные химического анализа воды (табл. 6.30).

2. Средние месячные расходы воды Q за 1969 г. (табл. 6.31).

3. Химический состав воды за 1969 г. (табл. 6.32).

4. Масса сухого остатка $P_c = 0,4316$ г получена после выпаривания пробы объемом 2 л.

5. Площадь бассейна $F = 1980$ км².

Т р е б у е т с я: 1. Перевести элементы анализа из ионной формы (в мг/л) в эквивалентную (в мг-экв), и в процент-эквивалентную (% экв.); вычислить погрешность анализа.

2. Вычислить все виды жесткости.

3. Произвести оценку химического состава воды.

Р е ш е н и е: 1. После отбора пробы воды на химический анализ в лаборатории производится обработка, в результате которой заполняется табл. 6.30. В данном упражнении рассматриваются только некоторые элементы аналитической обработки.

Таблица 6.30

Данные химического анализа воды

р. Ирбе — хут. Вичака, 17/VIII 1969 г.

а)

Место взятия пробы, глубина, м	Расход воды ср. суточный Q м ³ /с	Температура воды t °С	Прозрачность	O_2 мг/л % насыщ.	CO_2^- мг/л	pH
Верт. 2, 2,5	3,21	13,4	15	$\frac{6,89}{68}$	9,2	7,48

б)

Форма выражения анализа	Содержание ионов				
	катионы К			анионы А	
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{++} K^{+}$	HCO_3^-	SO_4^{2-}
мг/л	41,7	6,9	3,9	149,2	8,7
мг-экв.	2,081	0,574	0,183	2,524	0,179
% экв	37,4	10,0	2,7	44,1	3,2

Форма выражения анализа	Содержание ионов			Сумма ионов, мг/л		
	анионы А			ΣR	ΣА	ΣU = = ΣK + ΣА
	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻			
мг/л	5,1	—	—	52,2	163,6	215,8
мг-экв,	0,143	—	—	2,850	2,846	5,696
% экв,	2,7	—	—			

в)

Фосфаты P мг/л	Крем- ний Si мг/л	Железо Fe мг/л	Жесткость, мг-экв.			Цвет- ность по шкале	Окисляемость O мг/л	
			общая	устра- няемая	постоян- ная		перман- ганатная	бикро- матная
0,083	7,8	0,98	2,67	2,52	0,15	164	29,4	—

Таблица 6.31

Средние месячные расходы воды Q м³/с

р. Ирбе — Хут. Вичаки, 1969 г.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Максим., м ³ /с	Дата
3,18	3,15	3,28	23,7	20,8	5,61	3,28	2,94	3,46	3,59	7,81	6,23	48,0	14/IV

Таблица 6.32

Химический состав воды

р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

Дата	Расходы воды Q м ³ /с	Содержание ионов, мг/л						Минера- лизация (сумма ионов) Σа мг/л
		Катионы			Анионы			
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
23/IV	24,0	18,0	3,4	3,5	65,9	6,5	3,4	101,3
18/V	15,0	27,3	2,5	3,4	85,0	10,3	2,3	125,8
3/VI	5,12	27,6	5,9	28,7	100,1	10,3	3,8	150,7
17/VIII	3,21	41,7	6,7	3,8	149,5	8,9	5,2	215,8
3/IX	3,10	47,0	10,7	6,0	188,5	10,1	5,3	268,6

В природной воде все молекулы солей почти полностью диссоциированы на ионы, поэтому лучшая форма анализа — ионная. В результате обработки проб воды катионы Ca²⁺, Mg²⁺ и Na⁺ + K⁺

и анионы HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^- , Cl^- рассчитываются с точностью до 0,1 мг/л; анионы NO_3^- — до 0,001 мг/л, NO_2^- — до 0,001 мг/л.

Ионы взаимодействуют между собой в строго эквивалентных массовых соотношениях, результаты анализа выражаются в миллиграмм-эквивалентной (мг-эquiv) и в процент-эквивалентной форме (% экв.). Эквивалентная масса связана с атомной массой и валентностью следующим соотношением: эквивалентная масса =
$$\frac{\text{атомная масса}}{\text{валентность}}$$
.

Для пересчета данных анализа из ионной формы в эквивалентную (мг-эquiv) количество ионов в мг/л следует разделить на эквивалентную массу. Например, в анализе содержание ионов Ca^{2+} получено 41,7 мг/л. Эквивалентная масса Ca^{2+} составляет 20,04, следовательно, содержание Ca^{2+} равно $41,7 : 20,04 = 2,081$ мг-эquiv.

Деление на эквивалентную массу можно заменить умножением на величину, обратную эквивалентной массе. Например, для Ca^{2+} это значение $1 : 20,04 = 0,04990$ и $41,7 \cdot 0,04990 = 2,081$ мг-эquiv.

Если в анализе приводится значение $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ суммарно, то расчет в мг-эquiv. следует производить по Na^+ . Расчет ионов в мг-эquiv. производится для катионов и анионов и записывается в соответствующую графу табл. 6.30.

При сопоставлении природных вод различной минерализации бывает необходимо знать соотношение между ионами, выраженное в процент-эквиваленте от общей суммы ионов в данной воде. Перед вычислением ионов в процент-эквивалентной форме определяется погрешность анализа X по формуле

$$X = (\sum K - \sum A) \cdot 100 / (\sum K + \sum A), \quad (6.45)$$

где $\sum K$ и $\sum A$ — суммы катионов и анионов в мг-эquiv.

Для данного примера из табл. 6.30 $\sum K = 2,850$, $\sum A = 2,846$; погрешность анализа равна $X = (2,850 - 2,846) \cdot 100 : 5,696 = 0,07\%$.

Погрешность 2—3 % считается допустимой (при незначительной минерализации). При $X > 5\%$ анализ считается недостаточно точным.

При пересчете данных анализа из миллиграмм-эквивалентной формы в процент-эквивалентную следует пользоваться формулой

$$\% \text{ экв.} = a' \cdot 100 / (\sum K + \sum A), \quad (6.46)$$

где a' — содержание каждого из ионов в мг-эquiv; $\sum K$ и $\sum A$ — суммы катионов и анионов. Например, для Mg^{2+} $0,574 \cdot 100 : 5,696 = 10,0\%$ экв.

При обработке химических анализов подземных вод при пересчете в % экв. расчет производится отдельно по суммам катионов и анионов по соотношениям: $\% \text{ экв.} = (a' / \sum K) \cdot 100\%$ и $(a' / \sum A) \times 100\%$.

Сумма ионов в табл. 6.30 выражается в мг/л, а если она больше 1000 мг/л — то в г/м³.

2. Жесткостью называется свойство воды, обусловленное наличием в ней растворимых соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} . Рассматривают три типа жесткости:

а) общая жесткость, обусловленная наличием Ca^{2+} и Mg^{2+} ; она равна сумме $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ мг-экв. В данном примере: $2,081 + 0,574 = 2,655$, или, округленно, общая жесткость равна 2,66 мг-экв;

б) устранимая жесткость, которая учитывает соотношение между количеством Ca^{2+} и Mg^{2+} мг-экв. и количеством HCO_3^- мг-экв. (карбонатная жесткость). При расчете устранимой жесткости рассматриваются два случая: 1) если $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] \leq [\text{HCO}_3^-]$, то устранимая жесткость равна общей, 2) если $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] > [\text{HCO}_3^-]$, то устранимая жесткость эквивалентна содержанию иона $[\text{HCO}_3^-]$ мг-экв.

В данном примере $[2,081 + 0,574] > 2,524$, следовательно, устранимая жесткость равна 2,52 мг-экв;

в) постоянная жесткость, определяемая разностью между общей и устранимой жесткостью $2,66 - 2,52 = 0,14$ мг-экв.

По классификации О. А. Алекина [1], природные воды по жесткости делятся на виды, представленные в табл. 6.33.

Таблица 6.33

Классификация природных вод по О. А. Алекину

Вид воды	Общая жесткость, мг-экв.
Очень мягкая	до 1—5
Мягкая	1,5—3,0
Умеренно жесткая	3,0—6,0
Жесткая	6,0—9,0
Очень жесткая	9,0

Таблица 6.34

Характеристика речных вод по минерализации

Градация	Характеристика вод	Минерализация, мг/л
1	Очень малой минерализации	до 100
3	Малой минерализации	100—200
3	Средней минерализации	200—500
4	Повышенной минерализации	500—1000
5	Высокой минерализации	1000

Речные воды обладают небольшой жесткостью; вода р. Ирбе относится к мягкому виду.

3. При оценке химического состава воды в реке рассматривается соотношения ионов, минерализация, содержание отдельных элементов, а также производится анализ графических построений. Рассмотрим оценку состава воды в следующем порядке.

а. Сопоставление соотношений элементов состава воды, имеющих генетическую связь, и установление типа воды.

1) количество Ca^{2+} в пресных водах всегда больше содержания Mg^{2+} . В данном примере $\text{Ca}^{2+} = 2,081$ мг-экв., а $\text{Mg}^{2+} =$

= 0,574 мг-экв. В природной воде ионы NO₂ не присутствуют без NO₃⁻. Следует отметить, что обратное явление возможно;

2) в большинстве маломинерализованных вод выдерживается следующее соотношение ионов в мг-экв.: $[HCO_3^-] < [Ca^{2+} + Mg^{2+}] < [HCO_3^- + SO_4^{2-}]$. Для данного примера эти соотношения соблюдаются: $[2,524] < [2,081 + 0,574] < [2,524 + 0,179]$. Если эти соотношения нарушаются, то следует проверить результаты анализа.

Выделяются четыре типа воды в зависимости от соотношения ионов:

первый тип: $HCO_3^- + CO_3^{2-} \% экв < Ca^{2+} + Mg^{2+} \% экв.$,

второй тип $HCO_3^- + CO_3^{2-} \% экв. > Ca^{2+} + Mg^{2+} \% экв.$,

третий тип $HCO_3^- + CO_3^{2-} > Na^+ + K^+ \% экв.$ или, что то же самое, $Ca^{2+} + Mg^{2+} \% экв. > HCO_3^- + SO_4^{2-} \% экв.$,

четвертый тип $HCO_3^- + CO_3^{2-} \% экв. = 0$.

Если данные о содержании CO₃²⁻ отсутствуют, то вместо суммы HCO₃²⁻ + CO₃²⁻ берется содержание HCO₃⁻. При определении типа воды по изложенным соотношениям записывается индекс относительного состава воды I — G_I^{Ca}, II — G_{II}^{Ca}, III — G_{III}^{Ca}, IV — G_{IV}^{Ca}.

По данным табл. 6.30 получено соотношение ионов HCO₃⁻ < Ca²⁺ + Mg²⁺, т. е. 44,1 < 37,4 + 10,0 % экв. Следовательно, вода р. Ирбе — хут. Вичаки относится ко второму типу и обозначается индексом G_{II}^{Ca}.

б. Определение минерализации воды. **М и н е р а л и з а ц и е й** воды называется степень концентрации химически растворенных веществ (массы сухого остатка после выпаривания) в единице объема; вычисляется по формуле

$$a = P_c \cdot 10^6 / V, \quad (6.47)$$

где a — минерализация, мг/л или г/м³; P_c — масса сухого остатка, г; V — объем взятой пробы, мл.

Для анализа за 17/VIII 1969 г. получим $a = 10^6 \cdot 0,4316 : 2 \times 10^3 = 215,8$ мг/л. В табл. 6.30 сумма содержания ионов $\sum \mu = 215,8$ мг/л, численно минерализация равна сумме ионов.

По минерализации, т. е. по общему содержанию ионов, речные воды можно разделить по градациям, приведенным в табл. 6.34, из которой видно, что вода р. Ирбе относится к водам средней минерализации.

в. Определение содержания фосфора, железа, кремния и окисляемости.

Таблица 6.35

Предельное содержание P, Fe и Si в речных водах

Элемент	P	Fe	Si
Количество, мг/л	0,05—0,1	1,0	2—6

Для данного примера значения Р и Fe ниже предельных (табл. 6.35). Повышенное содержание кремния Si объясняется малой минерализацией речной воды р. Ирбе.

По данным анализа воды р. Ирбе имеют высокую окисляемость (табл. 6.36).

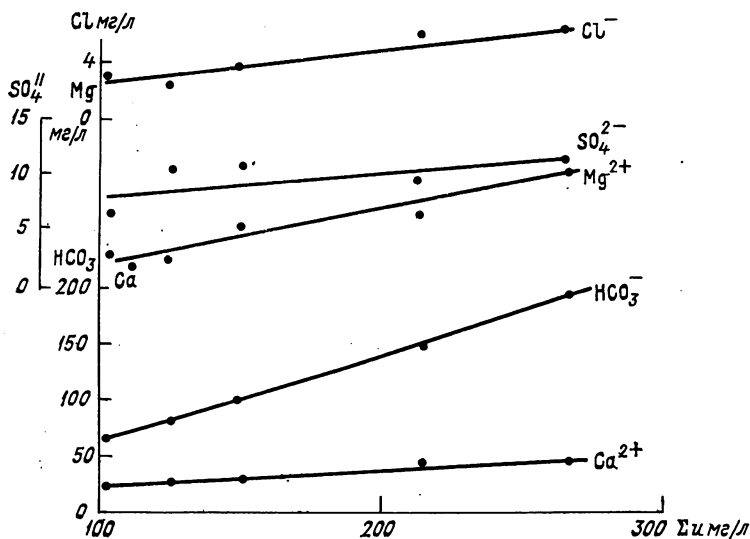


Рис. 6.9. Зависимость содержания главных ионов от суммы ионов. р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

г. Анализ химических свойств воды путем графических построений. Для правильной оценки определенных в результате анализа химических свойств речных вод следует построить и проанализировать следующие графики: 1) зависимость содержания главных ионов от суммы ионов; 2) изменение минерализации воды и расхода воды в течение года; 3) зависимость между суммой ионов и расходами воды.

Таблица 6.36

Характеристика речных вод по окисляемости

Градация	Характеристика вод по окисляемости	Окисляемость, мгО/л
1	Очень малая	до 2
2	Малая	2—5
3	Средняя	5—10
4	Повышенная	10—20
5	Высокая	20—30
6	Очень высокая	>30

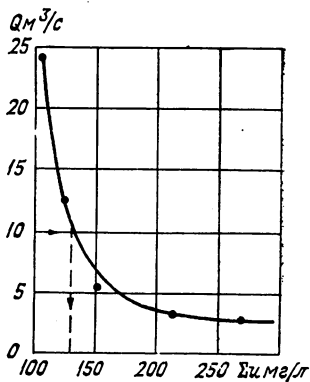
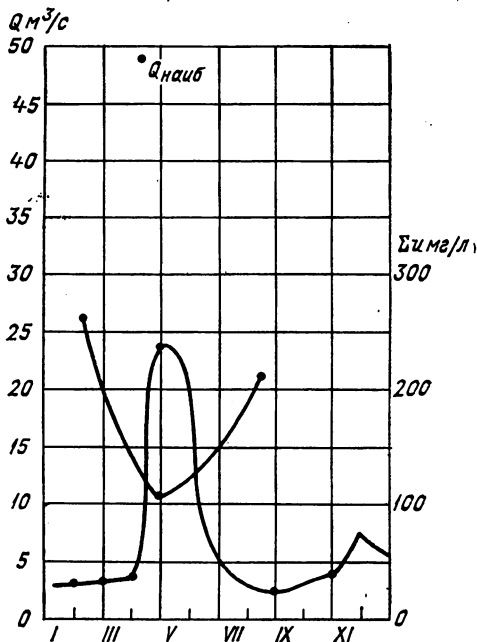


Рис. 6.11. Кривая зависимости между минерализацией и расходом воды

р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

Рис. 6.10. Изменение минерализации и средних месячных расходов воды

р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

1) На рис. 6.9 по данным табл. 6.38 представлена зависимость основных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , и Cl^-) от степени минерализации воды. Для ионов Cl^- и SO_4^{2-} вследствие их малого содержания нули ординат смещены. При большом количестве анализов рекомендуется условными обозначениями выделять гидрологические сезоны (ледостав, половодье, межень).

На рис. 6.9 точки располагаются достаточно тесно и дают возможность привести зависимости в виде прямых.

2. На рис. 6.10 по данным табл. 6.30 и 6.31 представлено изменение минерализации и средних месячных расходов воды р. Ирбе за 1969 г. На взаимосвязь минерализации и водности большое влияние оказывает смена характера питания в течение года. Снеговое, дождевое, ледниковое питание обуславливают малую минерализацию воды, в то время как подземное питание грунтовыми и глубинными водами значительно повышает минерализацию речных вод. В течение года влияние различных видов питания неодинаково, что вызывает изменение во времени минерализации воды. В период паводков минерализация заметно уменьшается; для р. Ирбе в 1969 г. минимум минерализации совпадает с повышением средних месячных расходов. Максимальный расход воды на рис. 6.10 по датам почти совпадает с минимальным значением минерализации. Повышение минерализации, вызванное влиянием подземного питания, наблюдается в феврале и в августе.

3) Анализом рис. 6.10 установлено, что минерализация вод обратно пропорциональна расходу воды. Это обстоятельство указывает на возможность определения по графической зависимости между Q и $\sum\mu$, какому расходу реки соответствует заданная минерализация.

На рис. 6.11 представлена зависимость, в которой независимой переменной является расход, а зависимой от него величиной — минерализация воды. О. А. Алекин [1] указывает, что для небольших рек, водосборы которых находятся в однородных условиях, такая зависимость имеет гиперболический характер с асимптотами, параллельными осям координат. Возникновение такой формы кривой Алекин объясняет разбавлением зимних вод маломинерализованными талыми водами. При нескольких паводках кривые будут более сложными.

Полученные графики можно использовать для подсчета расхода и стока растворенных веществ.

Упражнение 6.19. Вычисление средних суточных расходов и стока растворенных веществ.

Дано: исходные данные приведены в упражнении 6.17 (табл. 6.30 и 6.31).

Т р е б у е т с я: вычислить расход растворенных веществ за 17/VIII 1969 г.

2. Подсчитать сток за период 1/VII — 11/VII 1969 г.

Р е ш е н и е: 1. Расход растворенных веществ S в кг/с вычисляется по формуле

$$S = \sum \mu Q / 10^3, \quad (6.48)$$

где $\sum\mu$ — минерализация, мг/л или г/м³; Q — расход воды в день взятия пробы, м³/с.

При известных данных расход растворенных веществ равен $S = 215,8 \cdot 3,21 : 10^3 = 0,693$ кг/с.

Рассчитанные значения расходов растворенных веществ для всех измерений 1969 г. приведены в табл. 6.37.

Таблица 6.37

Расходы растворенных веществ
р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

Дата	23/IV	18/V	3/VI	17/VIII	3/IX
S кг/с	2,647	1,887	0,772	0,693	0,833

На рис. 6.12 нанесены измеренные значения S и $\sum\mu$. Соединяя точки плавными кривыми, получаем хронологический график расходов и минерализации. Зависимости $S = f(T)$ и $\sum\mu = f(T)$ при небольшом количестве точек измерения получились достаточно плавными.

2. Стоком растворенных веществ называется выносимое рекой с данной территории за какой-либо период количество неорганических и органических веществ, находящихся в

ионно-молекулярном и коллоидном состоянии, т. е. веществ, размер частиц которых не превышает 10^{-5} см. Наиболее изучено ионно-молекулярное состояние веществ, поэтому сток растворенных веществ часто называется ионным стоком.

Для подсчета стока растворенных веществ, переносимых за какой-либо заданный период, необходимо определить их ежедневные расходы. Рассмотрим три способа, которыми можно пользоваться для их определения.

а. При достаточно большом количестве отобранных проб за год и произведенной оценке анализов для определения ежедневной

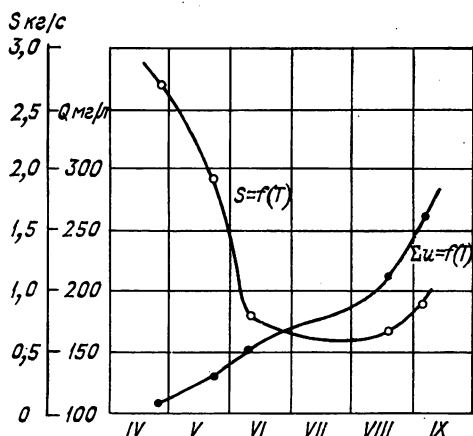


Рис. 6.12. Изменение минерализации и расхода растворенных веществ
р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

минерализации a или расходов растворенных веществ S используются хронологические графики.

С графиков, построенных в масштабе, отвечающем требуемой точности, можно по интерполяции за каждый день определить значения a в мг/л с последующим пересчетом в значения S кг/с или по интерполяции зависимости $S = f(T)$ получить сразу значение в кг/с. Сток за период 1/VII—11/VIII по р. Ирбе — хут. Вичаки определен по интерполяции с кривой $S = f(T)$ (рис. 6.12) и приведен в табл. 6.38.

Таблица 6.38
Сток растворенных веществ
р. Ирбе — хут. Вичаки

Дата	1/VII	2/VII	. . . . .	11/VII	Средн.
Сток, кг/с	0,64	0,63	. . . . .	0,60	0,61

Средний расход за декаду $S_{\text{ср. дек}} = 0,61$ кг/с. При аналогичной обработке за год вычисляются средние месячные, средние годовые значения S_0 и выбираются экстремальные значения в году.

б. Второй способ расчета заключается в использовании зависимости $\Sigma_i = f(Q)$. По полученной зависимости можно, зная рас-

ход воды за каждый день, снять с графика значение минерализации, а затем вычислить ежедневные расходы растворенных веществ по формуле (6.48).

в. Можно использовать кривую зависимости $S = f(Q)$, представленную на рис. 6.13, по которой по известному значению расхода воды за каждый день можно получить расход растворенных веществ.

При выборе метода подсчета расхода при большом количестве и равномерно по датам распределенных данных о минерализации следует использовать первый метод интерполяции $\sum u = f(T)$ и

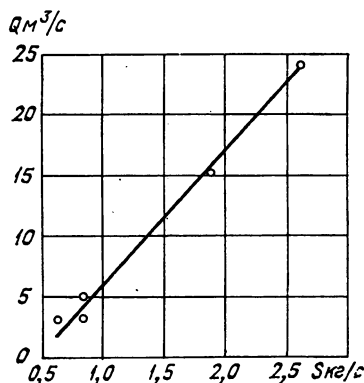


Рис. 6.13. Зависимость $S = f(Q)$
р. Ирбе — хут. Вичаки, 1969 г.

$S = f(T)$. При хорошо освещенной амплитуде данными о минерализации можно воспользоваться вторым и третьим способами. Сток растворенных веществ за любой период времени, например, за год, может быть вычислен по формуле

$$V_{p.v} = 0,001 \cdot 31,54 \cdot 10^6 \cdot S_0, \quad (6.49)$$

где 0,001 — переводный множитель из килограммов в тонны; $31,54 \cdot 10^6$ — число секунд в году; $V_{p.v}$ в т/год.

Аналогично понятию модуля поверхностного стока вводится показатель стока растворенных веществ (или показатель ионного стока) с 1 км² площади поверхности бассейна $P_{p.v}$ в т/км² в год, который можно выразить следующей формулой:

$$P_{p.v} = V_{p.v} / F, \quad (6.50)$$

где $V_{p.v}$ — средний годовой объем стока растворенных веществ, т; F — площадь бассейна, км².

Можно вычислить сток отдельных ингредиентов ионного стока, например Cl^- и SO_4^{2-} .

Для р. Ирбе — хут. Вичаки за декаду (с 1/VII по 11/VIII 1969 г.) получим $V_{p.v} = 0,001 \cdot 86\,400 \cdot 10 \cdot 0,61 = 527$ т за декаду.

Показатель стока растворенных веществ (показатель ионного стока) за декаду при $F = 1920$ км² равен $P_{p.v} = 527 : 1920 = 0,274$ т/км².

6.5. Охрана водных ресурсов. Расчеты качества вод и уровня их загрязнения

Водные ресурсы относятся к возобновляемым ресурсам, но, несмотря на это, охрана их от загрязнения, засорения и истощения является делом государственной важности. Загрязнение окружающей среды происходит за счет промышленных и бытовых стоков, выбросов ядохимикатов и токсичных веществ. Загрязнение наносит ущерб природе и ее ресурсам и оказывает отрицательное влияние на здоровье людей, растительный и животный мир, нарушает ход естественных процессов и создает неблагоприятные воздействия на климат. Заборы воды с нарушением плана водонасыщения ведут к истощению запасов.

10 декабря 1970 г. в СССР утверждены «Основы водного законодательства Союза ССР и союзных республик». В них содержатся обязательные для всех министерств, ведомств, государственных органов, предприятий, учреждений, организаций и граждан наиболее общие принципиальные положения о порядке использования и охраны рек, озер, морей, водохранилищ и других поверхностных и подземных водных объектов, находящихся на территории СССР.

В сентябре 1972 г. Верховным Советом СССР принято постановление «О мерах по дальнейшему улучшению охраны природы и рациональному использованию природных ресурсов», в декабре того же года вышло постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «Об усилении охраны природы и улучшению использования природных ресурсов». В соответствии с этими постановлениями определены конкретные меры по усилению охраны природы и улучшению использования природных ресурсов, предусмотрено проведение мероприятий по предотвращению загрязнения почвы промышленными, коммунальными и другими выбросами. Разрабатываются специальные меры по охране особо ценных природных объектов.

Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (Госкомгидрометом) создана общегосударственная служба наблюдений и контроля за загрязнением объектов окружающей среды (ОГСНК), которая ведет наблюдения за физическими, химическими и гидробиологическими показателями и организует экстренную информацию о резких изменениях уровня загрязнения вод. Сеть пунктов ОГСНК организована на базе наблюдательных, оперативных и научных подразделений Госкомгидромета, а также подразделений Министерства мелиорации и водного хозяйства (ММ и ВХ), Минздрава СССР и Министерства геологии СССР. Рассмотрим несколько основных определений, связанных с вопросами загрязнения природных вод.

Качество природных вод, т. е. совокупность физических, химических и биологических показателей, определяющих пригодность использования воды для заданных целей, характеризуется составом и количеством растворенных и взвешенных веществ, биомассы и микроорганизмов.

Норма качества — это показатели, характеризующие физическое состояние и состав примесей в воде водных объектов и регламентируемые по условиям водопользования и требованиям к водам как объектам окружающей среды. В формировании качества большое значение имеет самоочищение.

Самоочищением называют всю совокупность гидродинамических, биохимических и физических процессов, происходящих в природных водах и приводящих к снижению загрязнения.

Гидродинамический процесс разбавления является частью самоочищения, в основе которого лежит турбулентная диффузия. Под разбавлением понимают процесс снижения концентрации загрязняющих элементов, вносимых сточными водами, за счет смешения с природными водами.

Интенсивность процесса разбавления влияет на скорость протекания физико-химических и биологических процессов и приводит к снижению концентрации загрязняющих веществ.

В зависимости от характера и интенсивности воздействия сточных вод выделяются зоны загрязнения и влияния.

Зоной загрязнения называется та часть водотока или водоема, где в связи с поступлением загрязняющих веществ нарушаются естественные биохимические процессы и концентрация загрязняющих веществ превышает установленные нормы. Грунты в зоне загрязнения подвергаются действию веществ, выпавших на дно. Зоны загрязнения в зависимости от ряда факторов могут быть формирующиеся, стабилизировавшиеся, устойчивые и неустойчивые. Устойчивые зоны загрязнения на реках образуются на участках ниже выпуска сточных вод. В озерах и водохранилищах эти зоны наблюдаются в бухтах, заливах и неглубоких участках.

Зоной влияния называют область водотока или водоема, в которую попадает вода из зоны загрязнения или непосредственно из сброса, но ввиду небольшой концентрации, не превышающей норму, или кратковременности загрязнения сохраняется естественный характер биохимических процессов. В зоне влияния могут перемещаться пятна загрязнения.

Для определения качества вод, изучения самоочищения, определения зон загрязнения и влияния на сети ОГСНК проводятся систематические наблюдения, главными задачами которых являются:

1) наблюдения и контроль за уровнем загрязнения по физико-химическим и гидробиологическим показателям с целью определения и оценки уровня загрязнения, а также эффективности мероприятий по защите вод от загрязнения; 2) обеспечение заинтересованных предприятий информацией об уровне загрязнения, возможности его изменения, а также экстренной информацией об особо опасных явлениях. На сети ОГСНК проводятся наблюдения, в задачи которых входит: установление закономерностей процессов самоочищения, изучение процессов накопления загрязняющих ве-

ществ в донных наносах, изучение выноса загрязняющих веществ, определение предельных выбросов.

Результаты наблюдений будут использованы для: прогнозирования состава и свойств воды с учетом влияния хозяйственной деятельности человека, разработки мероприятий по усилению охраны водных источников, оценки эффективности водоохраных мероприятий и разработки разделов по охране природных вод в планах развития народного хозяйства страны.

Наблюдательные пункты ОГСНК за загрязненностью поверхностных вод организуются в районах: расположения городов и крупных поселков, сточные и ливневые воды которых сбрасываются в реки, озера, водохранилища; заводов, рудников, шахт; сброса подогретых вод от ТЭЦ, ГРЭС, АЭС; поступления сельскохозяйственных сточных вод; приплотинных участков рек, являющихся важными для рыбного хозяйства; крупных нерестилищ и зимовий ценных пород рыб; пограничных рек, вытекающих за пределы СССР или втекающих в СССР, и др.

В табл. 6.39 приведены сведения о наблюдательной сети ОГСНК.

На пунктах ПН-1 ежедневно производится отбор проб для хранения (в течение 10 сут) на случай аварийной ситуации.

Программа А предусматривает визуальные наблюдения, определение расхода, температуры воды, рН, электрической проводимости, ХПК, БПК₅, взвешенных веществ, растворенного кислорода и проб загрязняющих веществ.

Программа Б предусматривает определение расхода воды, температуры воды, рН, кислорода, БПК₅, ХПК, взвешенных и загрязненных веществ.

Программа ОП (общая обязательная) предусматривает визуальные наблюдения, определение двуокси углерода, взвешенных веществ, рН, содержания главных ионов, биогенных веществ, нефтепродуктов и др. элементов.

Ниже приведен ряд упражнений по расчетам разбавления сточных вод и загрязнения водоемов.

Упражнение 6.20. Вычисление основных гидрологических величин и гидравлических элементов, необходимых при расчете разбавления в реке и озере.

Д а н о: 1. Речной поток — расчетный расход $Q_{95\%} = 2,87 \text{ м}^3/\text{с}$, $v_{\text{ср}} = 0,35 \text{ м/с}$, $h_{\text{ср}} = 0,60 \text{ м}$, среднее значение максимальных глубин на участке $h_{\text{макс. ср}} = 0,95 \text{ м}$; $I = 0,0002 \text{ ‰}$; радиус кривизны русла $r = 150 \text{ м}$.

2. Озеро или водохранилище (в состоянии волнения) — $h_{\text{ср}} = 1,15 \text{ м}$; эффективный диаметр донных отложений $d_s = 0,27 \text{ мм}$; скорость ветра на высоте 10 м от водной поверхности 1 %-ной обеспеченности $w_{10} = 15 \text{ м/с}$; плотность воды $\rho = 1 \text{ т/м}^3$; высота волны $h = 0,42 \text{ м}$; скорость волны $c = 0,12 \text{ м/с}$; длина разгона $L = 2 \text{ км}$, $C = 41,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

Т р е б у е т с я: 1. Для речного потока рассчитать: а) коэффи-

Таблица 6.39

**Программа и сроки проведения гидрохимических работ
на пунктах ОГСНК**

Сроки проведения наблюдений	Пункты категории 1 ПН-1	Пункты категории 2 ПН-2	Пункты категории 3 ПН-3	Пункты категории 4 ПН-4
Ежедневно ¹	Визуальные ² наблюдения, инструментальные определения кислорода, рН, электропроводимости Отбор проб воды	Визуальные наблюдения ²	—	—
Ежедекадно Ежемесячно В основные гидрологические фазы	Программа А Программа Б Программа ОП	— Программа Б Программа ОП	— Программа Б Программа ОП	— — Программа ОП

¹ Ежедневные наблюдения только в главном створе.

² При визуальных наблюдениях отмечаются явления необычные (пленка на поверхности воды, плавающие примеси, повышенная мутность, посторонняя окраска, запах пены, увядания, гибель рыбы, лягушек; пузырьки газов).

циент Шези; б) коэффициент турбулентного обмена A и коэффициент турбулентной диффузии; в) среднее значение поперечной составляющей скорости $v_{z \text{ ср}}$.

2. Для озера или водохранилища рассчитать: а) среднюю скорость течения; б) коэффициент турбулентного обмена.

Решение: 1. Речные потоки.

а. Основной формулой равномерного движения воды является формула Шези $v = C\sqrt{h_{\text{ср}}I}$.

По данным измерений из формулы (3.28) $C = 0,35/\sqrt{0,60 \cdot 0,0002} = 32,1 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

б. Коэффициент турбулентного обмена является параметром при расчете перемешивания в потоках и вычисляется по формуле

$$A = \rho h_{\text{ср}} v_{\text{ср}} / (MC), \quad (6.51)$$

где ρ — плотность воды, равная $1 \text{ т}/\text{м}^3$; M — функция коэффициента Шези, имеющая размерность $\text{м}^{0,5}/\text{с}$; $Ab \text{ м} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

При $10 \leq C \leq 60$

$$M = 0,7C + 6, \quad (6.52)$$

при $C > 60$

$$M = \text{const} = 48. \quad (6.52')$$

В табл. 6.40 приведена зависимость M и N от C .

Таблица 6.40

Значения M и N

C м ^{0,5} /с	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
M м ^{0,5} /с	13,0	16,5	20,0	23,5	27	30,5	34	37,5	41	44,5	48
N	13,3	25,2	40,8	53,3	82,6	108	139	172	209	249	294

Ниже в расчетах рассматривается безразмерное число N , которое также зависит от C

$$N = MC/g, \quad (6.53)$$

где M — функция коэффициента Шези по формуле (6.52).

Для данного примера по формуле (6.52) $M = 0,7 \cdot 32,1 + 6 = 28,5$ м^{0,5}/с.

Подставим известные значения в формулу (6.51) $A = 1 \cdot 0,60 \times \times 0,35 : (28,5 \cdot 32,1) = 0,00022$ т·с/м².

При расчетах разбавления необходимо вводить поправку на неравномерность распределения глубин, так как отклонение глубин от среднего значения приводит к увеличению кинематической неоднородности потока и ускорению процесса перемешивания. Этот фактор учитывается введением поправочного коэффициента K_A к коэффициенту турбулентного обмена A и тогда

$$A_{\text{испр}} = \rho h_{\text{ср}} v_{\text{ср}} K_A / MC. \quad (6.54)$$

Поправка K_A определяется по табл. 6.41 в зависимости от неравномерности распределения глубины Θ , вычисленной по формуле

$$\Theta = (h_{\text{макс. ср}} - h_{\text{ср}}) / h_{\text{ср}}, \quad (6.55)$$

где $h_{\text{макс}}$ и $h_{\text{ср}}$ — соответственно максимальная и средняя глубина на участке.

Таблица 6.41

Значения K_A для малых рек

Θ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
K_A	1,0	1,05	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2

При определении K_A для больших и средних рек рекомендуется использовать табл. 6.41 при значениях Θ от 0 до 0,6, а при больших значениях Θ принимать $K_A = 2$. Для данного примера при $\Theta = (0,95 - 0,60) : 0,60 = 0,58$ по табл. 6.41 интерполированием получено $K_A = 2,14$.

Значение коэффициента турбулентного обмена по формуле (6.54) равно $A_{\text{испр}} = 0,00022 \cdot 2,14 = 0,00047$ т·с/м².

Коэффициент турбулентной диффузии используется при рассмотрении дифференциальных уравнений, описывающих процесс турбулентной диффузии, и выражается отношением

$$A_{\text{диф}} = gA/\rho, \quad (6.56)$$

где $g = 9,81$ м/с²; ρ — плотность, т/м³.

При полученных значениях коэффициента турбулентного обмена для различных условий A и $A_{испр}$ коэффициенты турбулентной диффузии будут соответственно равны: $A_{диф} = 9,81 \cdot 0,000 22 : 1 = 0,002 15 \text{ м}^2/\text{с}$, $A'_{диф} = 9,81 \cdot 0,000 47 : 1 = 0,004 61 \text{ м}^2/\text{с}$.

в. В процессе разбавления сточных вод в реках важное значение имеет поперечное течение. Среднее значение поперечной составляющей скорости по вертикали вычисляется по формуле

$$v_{z\text{cp}} = 0,13 N h_{\text{cp}} v_{\text{cp}} / r, \quad (6.57)$$

где N — безразмерное число, определенное по формуле (6.53) или табл. 6.40; h_{cp} — средняя глубина на участке, м; v_{cp} — средняя скорость на вертикали, м/с; r — радиус кривизны русла — средняя величина на участке реки, расположенном непосредственно ниже места спуска сточных вод и включающем одно-два закругления.

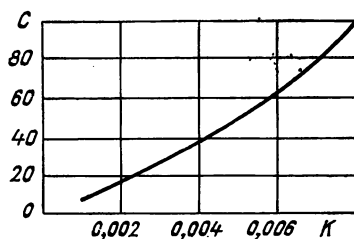


Рис. 6.14. Кривая зависимости $K = f(C)$

Для данного примера по табл. 6.40 и формуле (6.53): $N = 28,5 \cdot 32,1 : 9,81 = 93,0$, $v_{z\text{cp}} = 0,13 \cdot 93,0 \cdot 0,60 \cdot 0,35 : 150 = 0,02 \text{ м/с}$.

Оз е р а и в о д о х р а н и л и щ а

На поверхности озер и водохранилищ течения развиваются под действием ветра, поэтому при оценке перемешивания сточных вод необходимо учитывать скорость ветра.

А. В. Караушевым предложена формула для вычисления средней скорости

$$v_{\text{cp}} = K w_{10} \sqrt{3 + 10h}, \quad (6.58)$$

где K — коэффициент, зависящий от коэффициента Шези C ; определяется по рис. 6.14, $K = 0,0043$; w_{10} — скорость ветра на высоте 10 м заданной расчетной обеспеченности; h — высота волны (м) при известной длине разгона L км.

Подставляя известные значения в формулу (6.58), получаем $v_{\text{cp}} = 0,0043 \cdot 15 \sqrt{3 + 10 \cdot 0,42} = 0,17 \text{ м/с}$.

Коэффициент турбулентного обмена при слабом ветровом волнении для водоемов вычисляется по формуле

$$A = \rho h_{\text{cp}} v_{\text{cp}} / (2mC), \quad (6.59)$$

где m — параметр, определяемый в зависимости от C :
при $C \leq 60$

$$m = M/2, \quad (6.60)$$

при $C > 60$

$$m = \text{const} = 24. \quad (6.60')$$

Значение M находится по табл. 6.40. Для данного примера при $C = 41,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ по табл. 6.40 $M = 35,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$, по формуле (6.60) $m = 35,0 : 2 = 17,5$.

Подставим все известные величины в формулу (6.59) $A = (1 \cdot 1,15 \cdot 0,17) : (2 \cdot 17,5 \cdot 41,2) = 0,00014 \text{ т} \cdot \text{с}/\text{м}^2$.

При наличии волнения влияние турбулентного перемешивания повышается и формула (6.59) преобразуется так:

$$A = \frac{\rho h_{\text{ср}}^{2/3} d_3^{1/3}}{f_0 g} \sqrt{\left(\frac{ch}{\pi h_{\text{ср}}}\right)^2 + v_{\text{ср}}^2}, \quad (6.61)$$

где ρ — плотность воды, $\text{т}/\text{м}^3$; $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина на участке, м ; d_3 — эффективный диаметр, мм ; f_0 — эмпирический коэффициент, принимаемый приближенно равным единице; c — скорость волны, $\text{м}/\text{с}$; h — высота волны, м ; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость течения.

По известным значениям по формуле (6.61)

$$A = \frac{1 \cdot 1,15^{2/3} \cdot 0,27^{1/3}}{1 \cdot 9,81} \sqrt{\left(\frac{0,12 \cdot 0,42}{3,14 \cdot 1,15}\right)^2 + 0,17^2} = 0,014.$$

Упражнение 6.21. Вычислить гидрологические показатели средней загрязненности и общей нагрузки потока.

- Д а н о: 1. Постоянный сброс сточных вод $Q_{\text{ст}} = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$.
2. Естественная концентрация загрязняющего вещества $S_e = 0$.
3. Концентрация загрязняющего вещества перед выпуском в реку $S_{\text{ст}} = 100 \text{ мг}/\text{л}$.
4. Предельно допустимая концентрация $S_{\text{ПДК}} = 3 \text{ мг}/\text{л}$.
5. Расходы воды в реке различной обеспеченности:

Обеспеченность P_Q %	10	20	50	75	90	95
$Q \text{ м}^3/\text{с}$	109	31,1	10,1	6,23	4,39	4,20

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить значение концентрации вещества в створе достаточного перемешивания при расходах заданной обеспеченности.

2. Определить обеспеченность средней концентрации.
3. Вычислить показатели превышения и непревышения загрязненности над нормой.
4. Рассчитать показатель относительной нагрузки потока загрязнителей при $Q_{95\%}$.

Р е ш е н и е: 1. Процесс перемешивания загрязняющего вещества в речном потоке в случае длительного его поступления при установившемся процессе оценивается уравнением баланса в следующем виде:

$$S_e Q + S_{\text{ст}} Q_{\text{ст}} = S_n (Q + Q_{\text{ст}}), \quad (6.62)$$

где Q — расход реки, $\text{м}^3/\text{с}$; причем за расчетный расход прини-

мается меженный расход, так как в период межени соотношение расходов воды рек и сточных вод наиболее неблагоприятно для разбавления. Преимущественно используются расходы 95 %-ной обеспеченности; $Q_{ст}$ — расход загрязненных вод, м³/с; $S_{ст}$ — концентрация загрязняющего вещества в сточных водах перед выпуском в реку, мг/л, мг/м³, г/м³, % (приведенная размерность относится ко всем нижеизложенным видам концентраций); S_e — естественная, или фоновая, концентрация этого же вещества в речной воде; S_n — концентрация вещества в водотоке ниже места выпуска сточных вод в створе достаточного перемешивания, т. е. там, где благодаря перемешиванию распределение вещества в сечении оказывается практически равномерным.

Из формулы (6.62)

$$S_n = (S_e Q + S_{ст} Q_{ст}) / (Q + Q_{ст}). \quad (6.63)$$

В случае если $S_e = 0$, формула (6.63) переписывается в виде

$$S_n = (S_{ст} Q_{ст}) / (Q + Q_{ст}). \quad (6.64)$$

Значения S_n , полученные по формуле (6.64) по известным данным, записываются в табл. 6.42.

Таблица 6.42
Вычисление величин S_n и P_{S_n}

Обеспеченность P_Q %	Q_p м ³ /с	S_n мг/л	P_{S_n} %
10	109	0,183	90
20	31,1	0,64	80
50	10,1	1,94	50
75	6,29	3,08	25
90	4,39	4,37	10
95	4,20	4,55	5

2. Обеспеченность концентрации P_{S_n} % вычисляется по формуле

$$P_{S_n} = 100 - P_Q. \quad (6.65)$$

Для всех расходов по формуле (6.65) значения P_{S_n} выписаны в табл. 6.43.

3. Для определения показателя превышения загрязненности над нормой на рис. 6.15 строится кривая обеспеченности S_n по данным табл. 6.42. На кривой проводится прямая, соответствующая ПДК = 3 мг/л. Из точки пересечения этой прямой и кривой обеспеченности S_n опускается перпендикуляр и определяется $P_{заг} = 27$ %, что составляет $P_{заг} = 27 \cdot 365 : 100 = 99$ дней. Это означает, что при постоянном сбросе сточных вод в количестве $Q_{ст} = 0,2$ м³/с вода в реке в течение 99 дней в году будет загрязненной.

Показатель непревышения загрязненности над нормой P_r определяется по формуле

$$P_r = 100 - P_{\text{заг}} \quad (6.66)$$

и будет равно $P_r = 100 - 27 = 73 \%$, что составит $P_r = 73 \cdot 365 : 100 = 266$ дней. Это означает, что при данных условиях сброса вода в реке чистой будет в течение года 266 дней.

3. Показатель относительной нагрузки потока загрязнителем определяется по формуле

$$\varphi_3 = [(S_{\text{ст}} - \text{ПДК}) Q_{\text{ст}}] / [(\text{ПДК} - S_e) Q_p], \quad (6.67)$$

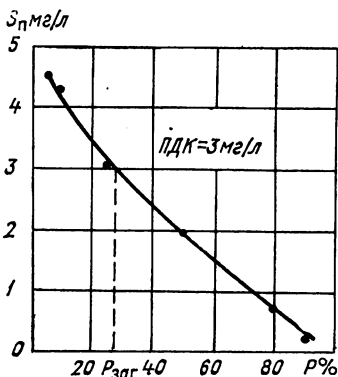


Рис. 6.15. Кривая обеспеченности средней концентрации загрязняющего вещества в реке

если $S_e = 0$, то формула (6.67) имеет вид

$$\varphi_3 = (S_{\text{ст}} / \text{ПДК} - 1) Q_{\text{ст}} / Q_p. \quad (6.68)$$

Обозначения в формулах (6.67) и (6.68) известны.

Уровень загрязненности оценивается по соотношению

$$\varphi_3 \leq 1. \quad (6.69)$$

Если $\varphi_3 > 1$, то вода считается загрязненной, если $\varphi \leq 1$, то вода чистая.

Для данного примера $\varphi_3 = (100 : 3 - 1) \cdot 0,20 : 4,20 = 1,56$.

Как видно из полученных данных, при сбросе сточных вод с расходом, равным $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, в период прохождения расхода воды $Q_{95\%} = 4,20 \text{ м}^3/\text{с}$ речная вода оказывается загрязненной.

Аналогичные расчеты показателя φ_3 можно провести для расходов различной обеспеченности.

Предельно допустимая нагрузка может быть принятой при $\varphi_3 = 1,0$.

Упражнение 6.22. Рассчитать гидрологические показатели для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов.

Д а н о: 1. Предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества ПДК = $2,5 \text{ г}/\text{м}^3$.

2. Средние месячные расходы воды Q и содержание загрязняющего вещества S_n по месяцам в створе реки:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Q м ³ /с	5,0	5,7	5,0	20,0	121	37,5	15,0	12,5	10,0	12,5	10,0	7,5
S_n г/м ³	7,4	6,8	7,0	1,4	0,2	1,6	3,2	4,8	2,6	2,4	3,4	5,8

3. График обеспеченности средней концентрации загрязняющего вещества в реке (рис. 6.16).

4. Обеспеченность расхода воды $P_Q = 95\%$.

5. Концентрация в створе достаточного перемешивания $S_n = 5$ г/м³.

6. Естественная или фоновая концентрация в речной воде $S_e = 0$.

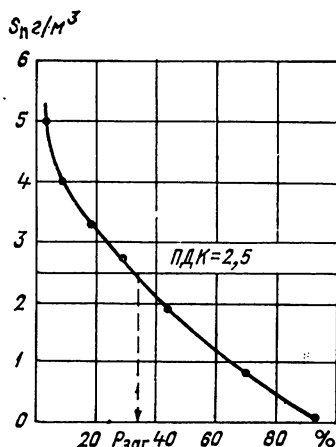


Рис. 6.16. Кривая обеспеченности средней концентрации загрязняющего вещества в реке.

7. В момент выпуска расход сточных вод $Q_{ст} = 15$ м³/с, а расход воды в этот момент $Q = 65$ м³/с.

8. Плотность загрязняющего вещества $\rho = 1,03$ г/см³.

9. $L_{заг} = 850$ м (расстояние от места выпуска сточных вод до створа, где концентрация вещества равна ПДК).

10. Средняя глубина водотока $H_{ср} = 3,5$ м и средняя ширина $B_{ср} = 84$ м.

Требуется: 1. Рассчитать гидрологические показатели общей нагрузки потока загрязняющими веществами.

2. Определить показатели пространственного распределения загрязнения в реках и водоемах.

Решение: 1. За последние годы в связи с развитием наблюдений на сети ОГСНК в ГГИ разработана система расчета показателей загрязнения.

Система интегральных показателей качества и загрязнения содержит три группы: 1) показатели общей нагрузки потока, оценивающие ее по средней концентрации веществ в сточных водах; 2) показатели пространственного распределения загрязняющих веществ в реках и водоемах, оценивающие долю загрязненных вод

или относительную площадь зоны загрязнения; 3) показатели, учитывающие внешний обмен водоемов (здесь не рассматриваются). Для первой и второй группы показателей может быть оценена порожность и обеспеченность состояния загрязнения.

1. Гидрологические показатели общей нагрузки потока загрязняющими веществами

а. Абсолютный показатель общей нагрузки S_n .

В упражнении 6.20 приведен пример расчета по формуле (6.64) S_n — концентрации веществ в створе достаточного перемешивания. Величина S_n получила название абсолютного показателя общей нагрузки загрязняющими веществами, который может быть вычислен для любого промежутка времени. Если $S_{ст} = \text{const}$, $Q_{ст} = \text{const}$ и $S_e = 0$, то S_n , как видно из формулы зависит только от расхода воды в реке. Обеспеченность показателя общей нагрузки по формуле (6.65) равна $P_{S_n} = 100 - 95 = 5\%$.

Оценка санитарного состояния водного объекта устанавливается в зависимости от ПДК (предельно допустимой концентрации) данного вещества или группы веществ, рассчитанной по нормам. Соотношение между S_n и ПДК может быть следующим:

$$S_n \leq \text{ПДК}. \quad (6.70)$$

Вода будет удовлетворять требованиям водопользования (чистая вода), если $S_n < \text{ПДК}$, и не удовлетворяет (грязная), если $S_n > \text{ПДК}$.

В данном примере $5 > 2,5 \text{ г/м}^3$, т. е. $S_n > \text{ПДК}$, следовательно, вода не удовлетворяет требованиям водопользования (вода грязная).

б. Показатель относительной нагрузки потока загрязнителем по формуле (6.67) $\varphi_3 = [(5,0 - 2,5) \cdot 43] : [(2,5 - 0) \cdot 65] = 0,63$.

в. Показатели относительной продолжительности стока загрязненной $\tau_{заг}$ и чистой воды $\tau_{чист}$ и показатели относительных объемов загрязненного $\alpha_{заг}$ и чистого стока $\alpha_{чист}$.

Перечисленные показатели вычисляются по формулам:

$$\tau_{заг} = T_{заг} / T_{оцщ}, \quad (6.71)$$

$$\tau_{чист} = T_{чист} / T_{оцщ} = (T_{оцщ} - T_{заг}) / T_{оцщ} = 1 - \tau_{заг}, \quad (6.72)$$

$$\alpha_{заг} = V_{заг} / V_{оцщ}, \quad (6.73)$$

$$\alpha_{чист} = (V_{оцщ} - V_{заг}) / V_{оцщ} = 1 - \alpha_{заг}. \quad (6.74)$$

Для определения этих показателей строятся хронологические графики $S_n = f(t)$ и $Q = f(t)$ (рис. 6.17). На графике проводится линия, соответствующая ПДК загрязняющего вещества. Как видно из рис. 6.17, за январь—март и июль—декабрь количество загрязняющего вещества превышает ПДК, а за апрель—июнь, в период паводочных вод, концентрация загрязняющего вещества ниже ПДК. Таким образом, на графике определяется за годовой период время

загрязнения $T_{\text{заг}} = 9 \text{ мес} = 274 \text{ дня}$ и период, когда вода чистая, $T_{\text{чист}} = 3 \text{ мес} = 91 \text{ дню}$; общий годовоей период $T_{\text{общ}} = 365 \text{ дней}$. Показатели относительной продолжительности стока загрязненной и чистой воды по формулам (6.71) и (6.72) $\tau_{\text{заг}} = 274 : 365 = 0,75$ и $\tau_{\text{чист}} = 1,0 - 0,75 = 0,25$.

Для вычисления показателей относительных объемов загрязненного и чистого стока определяется общий годовоей сток $V_{\text{общ}} = Q_{\text{ср}} \cdot 31,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$. Средний расход за год $Q = 21,8 \text{ м}^3/\text{с}$, а следовательно, $V_{\text{общ}} = 21,8 \cdot 31,5 \cdot 10^6 = 716,7 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. За апрель—июнь с учетом средних расходов по месяцам $V_{\text{чист}} = 476 \cdot 10^6 \text{ м}^3$,

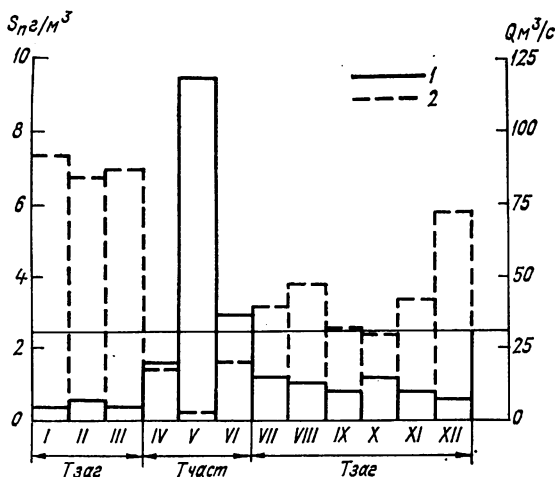


Рис. 6.17. Хронологический график $Q = f(t)$ и $S_{\text{п}} = f(t)$

1 — расход воды, 2 — концентрация загрязняющих веществ

а следовательно $V_{\text{заг}} = 716,7 \cdot 10^6 - 476 \cdot 10^6 = 240,7 \cdot 10^6$. Подставляя полученные значения в формулы (6.73) и (6.74), получаем: $\alpha_{\text{заг}} = 240,7 \cdot 10^6 : (716,7 \cdot 10^6) = 0,34$; $\alpha_{\text{чист}} = 1 - 0,34 = 0,66$.

2. Показатели пространственного распределения загрязнения в реках и водоемах

а. Относительные линейные показатели можно определить по формулам:

$$\alpha_{H_{\text{заг}}} = L_{\text{заг}}/H_{\text{ср}}, \quad (6.75)$$

$$\alpha_{B_{\text{заг}}} = L_{\text{заг}}/B_{\text{ср}}, \quad (6.76)$$

где $L_{\text{заг}}$ — расстояние от места выпуска сточных вод до створа, где концентрация вещества будет равна ПДК; $H_{\text{ср}}$ и $B_{\text{ср}}$ — средняя глубина и ширина водотока при данном режиме на участке;

для водоема $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина водоема. Показатель α_B для водоема не вычисляется.

Для данного примера $\alpha_{H_{\text{заг}}} = 850 : 3,5 = 242$ и $\alpha_{B_{\text{заг}}} = 850 : 84 = 10,1$.

6. Показатели относительной площади $\eta_{\text{заг}}$ и объема $\mu_{\text{заг}}$ зоны загрязнения вычисляются по формулам:

$$\eta_{\text{заг}} = \Omega_{\text{заг}} / \Omega_{\text{общ}}, \quad (6.77)$$

$$\mu_{\text{заг}} = W_{\text{заг}} / W_{\text{общ}}, \quad (6.78)$$

где $\Omega_{\text{заг}}$ и $W_{\text{заг}}$ — загрязненная площадь и объем для данных условий; $\Omega_{\text{общ}}$ и $W_{\text{общ}}$ — общая площадь и объем при тех же условиях. Эти показатели рассчитываются с учетом планов участка реки и поперечных профилей.

В методических указаниях по организации и проведению наблюдений в системе ОГСНК даются рекомендации по расчету степени очищения (СО), выраженной в процентах убыли концентрации загрязняющего вещества относительно первоначального значения:

$$\text{СО} = (C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) \cdot 100 / C_{\text{н}}, \quad (6.79)$$

где $C_{\text{н}}$ и $C_{\text{к}}$ — концентрация вещества в верхнем и нижнем створах участка.

Вычисление перерабатывающей способности (ПС), выраженной в килограммах переработанного на участке неконсервативного вещества из водотока, проходящего через водоток в течение t ч:

$$\text{ПС} = (P_{\text{н}} - P_{\text{к}}) / t, \quad (6.80)$$

где $P_{\text{н}}$ и $P_{\text{к}}$ — часовая нагрузка в верхнем и нижнем створах участка, кг; t — время протекания между створами, ч.

Упражнение 6.23. Определить, на каком расстоянии от места выпуска загрязняющего вещества в реку его концентрация равна заданной концентрации загрязнения.

Дано: 1. Расход воды в реке $Q_{95\%} = 90 \text{ м}^3/\text{с}$, средняя на участке ширина реки $B_{\text{ср}} = 18 \text{ м}$, средняя глубина на участке $h_{\text{ср}} = 2,6 \text{ м}$, коэффициент Шези $C = 30 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$. Коэффициент извилистости $\varphi = 1,2$.

2. Расход сбросных сточных вод $Q_{\text{ст}} = 8,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. Естественная концентрация загрязняющего вещества в речной воде $S_e = 0$; концентрация загрязняющего вещества в сточных водах перед выпуском в реку $S_{\text{ст}} = 100\%$; максимальная концентрация при заданном значении разбавления $S_{\text{макс}} = 10\%$.

Требуется: 1. Вычислить показатель разбавления.

2. Определить расстояние от места выпуска, на котором будет наблюдаться заданное значение разбавления $S_{\text{макс}} = 10\%$.

Решение: 1. Метод расчета разбавления сточных вод в реках называется экспресс-методом.

За показатель разбавления принимается

$$\eta = S_{\text{макс}}/S_{\text{ст}} - S_{\text{п}}/S_{\text{ст}}. \quad (6.81)$$

Для данного примера по формуле (6.64) $S_{\text{п}} = 100 \cdot 80 : (90 + 8) = 8,2 \%$.

Показатель загрязнения $\eta = 10 : 100 - 8,2 : 100 = 0,02$.

2. Показатель разбавления используется в случае, если расход воды неизменен по длине реки.

На основании анализа фактических данных установлено снижение показателя разбавления в зависимости от гидравлических характеристик водотока, что позволило определить расстояние L , на котором наблюдается заданное разбавление:

$$L = \frac{0,14 Q_{\text{ст}} \sqrt{N/\bar{h}}}{\eta(Q + Q_{\text{ст}}) \Phi} B_{\text{ср}}, \quad (6.82)$$

где η — коэффициент разбавления по формуле (6.81); N — коэффициент по формуле (6.53) или табл. 6.40; величина \bar{h} вычисляется по формуле

$$\bar{h} = h_{\text{ср}}/B_{\text{ср}}. \quad (6.83)$$

Для данного примера $\bar{h} = 2,6 : 18 = 0,14$; $N = 82,6$. Подставляя известные значения, определяем расстояние, на котором $S_{\text{макс}} = 10 \%$ от начальной концентрации

$$L = \frac{0,14 \cdot 8,0 \sqrt{82,6 \cdot 0,14}}{0,02(90 + 8,0) 1,2} \cdot 18 = \frac{27,1 \cdot 18}{2,35} = 207 \text{ м.}$$

Упражнение 6.24. Приближенный метод расчета распластывающего облака загрязнения в речном потоке.

Д а н о: 1. $B_{\text{ср}} = 27$ м, $h_{\text{ср}} = 2,42$ м, $v_{\text{ср}} = 1,12$ м/с, $C = 35,0$ м^{0,5}/с.

2. Начальная концентрация [загрязнения] $S_{\text{ст}} = 100 \%$, начальная длина облака загрязнения $l_0 = 200$ м.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть методику расчета.

2. Рассчитать среднюю концентрацию загрязнения на различных расстояниях от выпуска.

Р е ш е н и е: 1. В поток одновременно выпускается загрязняющее вещество повышенной концентрации. Происходит загрязнение речных вод по всей ширине на участке длиной l_0 , которая является начальной зоной загрязнения. По пути движения наблюдается растекание облака загрязнения и уменьшение его концентрации в водотоке вследствие турбулентного перемешивания и влияния различных скоростей в поперечном сечении водотока.

Предполагается, что загрязнением охватывается вся ширина реки; тогда начальный объем загрязненных масс V_0 можно вычислить по формуле

$$V_0 = h_{\text{ср}} B_{\text{ср}} l_0. \quad (6.84)$$

За какое-либо время t от момента выпуска загрязняющего вещества объем загрязненной части водотока увеличится и определится по формуле

$$V = h_{\text{ср}} B_{\text{ср}} (l_0 + j v_{\text{ср}} t), \quad (6.85)$$

где j — параметр, зависящий от коэффициента Шези C (табл. 6.43).

Длина области загрязнения за время t находится по формуле

$$l = l_0 + j v_{\text{ср}} t. \quad (6.86)$$

Длина пути, пройденного центром облака загрязнения от момента $t = 0$ до момента t :

$$L = v_{\text{ср}} t. \quad (6.87)$$

Таблица 6.43

Значение параметра j

C	j	C	j
15	0,838	50	0,419
20	0,688	60	0,380
25	0,598	70	0,358
30	0,540	80	0,313
40	0,468	90	0,270

Формула (6.86) будет иметь вид

$$l = l_0 + jL. \quad (6.88)$$

2. Средняя концентрация загрязняющего вещества $S_{\text{ср}}$ для всего объема загрязненной части потока V определяется из условия неразрывности

$$VS_{\text{ср}} = V_0 S_{\text{ст}}, \quad (6.89)$$

откуда

$$S_{\text{ср}} = V_0 S_{\text{ст}} / V = h_{\text{ср}} B_{\text{ср}} l_0 S_{\text{ст}} / [h_{\text{ср}} B_{\text{ср}} (l_0 + jL)] = l_0 S_{\text{ст}} / l. \quad (6.90)$$

Максимальная концентрация $S_{\text{макс}}$ в облаке загрязнения может быть получена при учете распределения концентрации по длине l , а приближенно рекомендуется принять $S_{\text{макс}} = 3S_{\text{ср}}$.

Задача состоит в том, чтобы рассчитать среднюю концентрацию на определенных заданных расстояниях от места пуска, где начальная концентрация была S_0 . Задаемся расстоянием $L_1 = 2000$ м; $L_2 = 5000$ м и $L_3 = 10\,000$ м. Расчет следует провести по приведенным выше формулам в табл. 6.44.

Как видно из табл. 6.44, средняя концентрация загрязняющего вещества заметно уменьшается по длине водотока. Следует отметить, что рассмотренный расчет распластывания облака загрязнения является приближенным, так как средняя скорость, коэффициент C и характеристики сечений необходимо уточнять по длине участка.

Таблица 6.44

Вычисление средней концентрации загрязняющего вещества S_{cp}

Длина пути облака загрязнения L , м	Начальная		$S_{м0,5}$, с	l	l/L	l	l_0/l	S_{cp} %	Средняя скорость v_{cp} м/с	Время $t = L/v_{cp}$
	концентрация $S_{ст}$ %	длина облака загрязнения l_0 , м								
2 000	100	200	35,0	0,504	1008	1208	0,17	17,0	1,12	30 мин.
5 000	100	200	35,0	0,504	2520	2720	0,074	7,4	1,12	1 ч 15 мин
10 000	100	200	35,0	0,504	5040	5240	0,038	3,8	1,12	2 ч 30 мин

Упражнение 6.25. Расчет загрязнения водоема взвешенными частицами.

Д а н о: 1. Средняя скорость течения $v_{cp} = 0,35$ м/с; $C = 26,5$ м^{0,5}/с; $h_{cp} = 3,5$ м.

2. Гидравлическая крупность частиц $\omega = 0,02$ м/с, плотность наносов $\rho_n = 1,47$ г/см³ или т/м³.

3. Расстояние от места выпуска сточных вод $L = 100$ м, концентрация взвешенных веществ перед выпуском в реку $S_{ст} = 100$ г/м³.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить транспортирующую способность потока $S_{тр}$.

2. Рассчитать концентрацию взвешенного вещества S вдоль осевой линии загрязнения.

3. Определить аккумуляцию взвешенных веществ на участке за сутки.

Р е ш е н и е: 1. Рассматриваются условия, при которых в период штиля в водоеме наблюдается слабое устойчивое течение, переносящее загрязненные воды в одном направлении. В сточных водах имеются растворенные вещества и взвешенные частицы. Предварительно производится расчет разбавления растворенных загрязнителей и по плану определяется осевая линия загрязнения от места выпуска сточных вод. Дальнейшие расчеты осаждения взвешенных веществ производятся в направлении этой оси L . Прежде чем рассчитать концентрацию взвешенного вещества S вдоль оси L , следует рассчитать транспортирующую способность потока по отношению к загрязняющим веществам $S_{тр}$ по формуле

$$S_{тр} = 150\eta^2 N v_{cp}^2 \Gamma / h_{cp}, \quad (6.91)$$

где η — параметр, определяемый по формуле

$$\eta = (3C - M) / 3C, \quad (6.92)$$

где M — параметр по формуле (6.52); N — параметр по формуле (6.53) или табл. 6.40.

Для данного примера по формуле (6.52) $M = 0,7 \cdot 26,5 + 6 = 24,6 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; по формуле (6.92) $\eta = \frac{3 \cdot 26,5 - 24,6}{3 \cdot 26,5} = 0,56$, по формуле (6.53) $N = 24,6 \cdot 26,5 : 9,81 = 66,4$; по формуле (6.35) $G = 0,02 : 0,35 = 0,057$.

По значениям $C = 26,5 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$ и $G = 0,057$ по табл. 6.26 интерполяцией получен гидромеханический параметр $\Gamma = 0,093$. По формуле (6.91) $S_{\text{тр}} = 150 \cdot 0,56^2 \cdot 66,4 \cdot 0,35^2 \cdot 0,093 : 3,5 = 6,61 \text{ г/м}^3$.

2. Концентрация взвешенных веществ S на расстоянии L от места выпуска вычисляется по формуле

$$S = S_{\text{тр}} + (S_{\text{ст}} - S_{\text{тр}}) \exp [-(\omega + K)L/(h_{\text{ср}}v_{\text{ср}})], \quad (6.93)$$

где $S_{\text{ст}}$ — концентрация взвешенных веществ перед выпуском в реку, г/м^3 ; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость течения, м/с ; $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина по оси L на рассматриваемом участке зоны загрязнения, м ; ω — гидравлическая крупность частиц, м/с ; L — расстояние от места выпуска, м ; $S_{\text{тр}}$ — концентрация, отвечающая транспортирующей способности потока по отношению к загрязняющим взвешенным веществам, по формуле (6.91), г/м^3 ; K — параметр, вычисляемый по формуле

$$K = \omega\Gamma/(1 - \Gamma). \quad (6.94)$$

Для данного примера $K = 0,02 \cdot 0,093 : (1 - 0,093) = 0,24$.

Концентрация S на заданном расстоянии $L = 100 \text{ м}$ по формуле (6.93) равна

$$S = 6,61 + (100 - 6,61) \cdot 2,72 \frac{-(0,02 + 0,24) \cdot 100}{0,35 \cdot 3,5} \approx 0.$$

Расчет целесообразно выполнять до того расстояния L , на котором концентрация веществ снижается до 0,10 от начальной, т. е. где $S/S_{\text{ст}} \approx 0,10$. При очень значительной концентрации $S_{\text{ст}}$ это отношение может быть снижено до 0,05; 0,01 и т. д.

В данном примере $L = 100 \text{ м}$ удовлетворяет указанному условию.

3. Расход наносов на начальной вертикали

$$r_{\text{нач}} = h_{\text{ср}}v_{\text{ср}}S_{\text{ст}}, \quad (6.95)$$

где r в $\text{г}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Расход наносов на конечной вертикали, где концентрация веществ снизится до значения S , вычисляется по формуле

$$r_{\text{кон}} = h_{\text{ср}}v_{\text{ср}}S. \quad (6.96)$$

Количество взвешенных веществ, которое осаждается внутри зоны на метровую ширину полосы в 1 с, равно

$$r_{\text{акк}} = r_{\text{нач}} - r_{\text{кон}}. \quad (6.97)$$

Для данного примера $r_{\text{акк}} = 3,5 \cdot 0,35 \cdot 100 - 3,5 \cdot 0,35 \cdot 0 = 122,5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Среднее количество осаждающихся частиц на всем рассматриваемом участке L за одни сутки равно

$$\alpha_{\text{ср}}^* = 86\,400 r_{\text{акк}}/L, \quad (6.98)$$

где 86 400 — число секунд в сутках.

$$\alpha_{\text{ср}}^* = 86\,400 \cdot 122,5 : 100 = 105\,640 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}).$$

Для перевода количества осажденных веществ в высоту слоя следует полученное $\alpha_{\text{ср}}^*$ разделить на плотность наносов ρ_n . Для данного примера с учетом размерности получим $h_{\text{сл}} = 0,105640 : 1,47 = 0,06$ м.

Упражнение 6.26. Определение местоположения створа достаточного перемешивания.

Д а н о: 1. Расход воды в реке $Q_{90\%} = 0,84 \text{ м}^3/\text{с}$, $v_{\text{ср}} = 0,29 \text{ м}/\text{с}$, $h_{\text{ср}} = 0,73$ м, $h_{\text{макс ср}} = 0,89$ м, $\varphi = 0,67$, $C = 16,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$.

2. Расход сбросных сточных вод $Q_{\text{ст}} = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$, $v_{\text{ст}} = 0,09 \text{ м}/\text{с}$.

3. Концентрация загрязняющего вещества перед выпуском в реку $S_{\text{ст}} = 100$ единиц, естественная концентрация этого же вещества в речной воде $S_c = 0$; $S_{\text{макс}} = 10$; выпуск сточных вод производится у берега.

Т р е б у е т с я определить: 1) коэффициент, учитывающий гидравлические условия в потоке, 2) степень перемешивания, 3) местоположение створа достаточного перемешивания.

Р е ш е н и е: 1. Рассматриваемая ниже методика расчета расстояния до створа достаточного перемешивания изложена в работе [41]. Коэффициент, учитывающий гидравлические условия, имеет вид

$$\alpha = \varphi \xi \sqrt{(\psi g A / \rho) / Q_{\text{ст}}}, \quad (6.99)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод; при выпуске в середине потока $\xi = 1,5$, у берега $\xi = 1,0$; Ψ — коэффициент, зависящий от соотношения скоростей

$$\Psi = v_{\text{ст}}/v_{\text{ср}}. \quad (6.100)$$

ρ — плотность воды; A — коэффициент турбулентного обмена по формуле (6.51).

Для вычисления α предварительно вычисляются значения Ψ и A . По формуле (6.100) $\Psi = 0,09 : 0,29 = 0,31$. Согласно упражнению 6.20, для определения значения A по формуле (6.54) находим $M = 0,7 \cdot 16,3 + 6 = 17,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$; затем вычисляется неравномерность распределения глубин по формуле (6.55) $\Theta = (0,89 - 0,73) : 0,73 = 0,22$ и по табл. 6.41 $K_A = 1,24$. Коэффициент турбулентного обмена

$$A = 1 \cdot 0,73 \cdot 0,29 : (17,4 \cdot 16,3) \cdot 1,24 = 0,0009 \text{ г} \cdot \text{с}/\text{м}^2.$$

По формуле (6.99)

$$\alpha = 0,67 \cdot 1,0 \sqrt{\frac{0,31 \cdot 9,81 \cdot 0,0099 \cdot 1}{0,17}} = 0,08.$$

2. Степень перемешивания P определяется по формуле

$$P = S_{\pi} / S_{\text{макс}}. \quad (6.101)$$

Значение S_{π} вычисляется по формуле (6.63) $S_{\pi} = (0 \cdot 0,84 + 100 \cdot 0,07) : (0,84 + 0,07) = 7,69$, следовательно, $P = (7,69 : 10) \cdot 100 \% = 77 \%$.

3. Расстояние от створа достаточного перемешивания определяется по формуле

$$L_P = \left[\frac{2,3}{\alpha} \lg \frac{Q}{(100/P - 1) Q_{\text{ст}}} \right]^3. \quad (6.102)$$

Для данного примера расчет производится для расхода в реке обеспеченностью 90 %, следовательно, и расстояние $L_P = L_{90\%}$. Подставим известные значения

$$L_{90\%} = \left[\frac{2,3}{0,08} \lg \frac{0,84}{(100 : 77 - 1) 0,07} \right]^3 = 973 \text{ м.}$$

Рассмотренный метод расчета дает несколько завышенное значение расстояния.

Глава 7.

7 Температура воды и ледовые явления

7.1. Обработка данных наблюдений за температурой воды на реках

Упражнение 7.1. Расчет средней температуры воды по сечению реки и теплового расхода в предледоставный период.

Д а н о: сведения о температуре, скоростях, расходе, глубинах и расстояниях по створу за 18/XII (табл. 7.1).

Т р е б у е т с я: 1. Определить среднюю температуру воды по сечению.

2. Вычислить тепловой расход и среднюю температуру воды по тепловому расходу.

3. Вычислить тепловой сток за сутки.

Р е ш е н и е: 1. Обмен массы воды при турбулентном перемешивании сопровождается обменом тепла по всему сечению. Чтобы уловить изменения температуры по глубине и по ширине реки в

Таблица 7.1

№ вертикали	Глубина, м	Средняя температура, °С	Средняя скорость течения	Расход воды между вертикалями, м³/с	Расстояние между вертикалями, м	Вычисление теплового расхода		
						расход на вертикали m_n	между вертикалями $\frac{m_{n-1} + m_n}{2}$	расход между вертикалями, М Дж/с
Ур. л. б.	0,0			0,91	2,3		99,6	22,9
1	1,8	0,040	0,66	14,5	5,7	19,9		
2	5,3	0,022	0,78	15,7	5,5	381	200	1143
3	3,1	0,030	0,57	1,94	3,3	394	388	2132
Ур. пр. б.	0,0			Q=33,0			191	650
								3,94 · 10 ⁶ Дж/с

предлежавший период, применяется микротермометр ГР-2. Микротермометр применяется при значениях температуры от $\pm 1,2$ до $-0,8$ °С (с погрешностью отсчета 0,01°).

Для определения средней температуры по сечению при малой ширине реки назначается не менее трех вертикалей. Измерения проводятся в различном числе точек: пов., 0,2 h; 0,6 h; 0,8 h; дно или пов.; 0,6 h и у дна.

Среднее значение температуры воды на вертикали определяется в зависимости от числа точек ее измерения аналогично вычислению средней скорости течения воды.

Средняя температура по всему сечению вычисляется по формуле

$$T_{\text{в}} = \sum t_{\text{ср}} / n, \quad (7.1)$$

где $t_{\text{ср}}$ — среднее значение температуры на вертикалях; n — число вертикалей.

В данном примере получим $T_{\text{в}} = (0,040 + 0,022 + 0,030) : 3 = 0,031$ °С.

2. Вводится понятие теплового расхода, который в общем виде вычисляется по формуле

$$M = QcT_{\text{в}}, \quad (7.2)$$

где Q — расход воды, м³/с; c — удельная теплоемкость воды, Дж/(м³ · °С); $T_{\text{в}}$ — средняя температура воды в момент измерения расхода. При $c = 4,19 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · °С)

$$M = 4,19 \cdot 10^6 Q T_{\text{в}}. \quad (7.3)$$

Средняя температура воды по сечению

$$T_{\text{в}} = M / Qc. \quad (7.4)$$

В данном примере

$$M = 4,19 \cdot 10^3 \cdot 33,0 \cdot 0,031 = 4,28 \cdot 10^6 \text{ Дж/с.}$$

Тепловой расход, подсчитанный по формуле (7.2), дает приближенное его значение. Для получения более точного значения можно применить следующие два приема подсчета: а) расчет по тепловому расходу на вертикалях, б) расчет по количеству тепла в 1 м³ воды, переносимого потоком между вертикалями.

а. Расчет теплового расхода производится по формуле

$$M = \frac{1}{2} m_1 b_1 + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) b_2 + \frac{1}{2} (m_2 + m_3) b_3 + \dots \\ \dots + \frac{1}{2} (m_{n-1} + m_n) b_{n-1} + \frac{1}{2} m_n b_n, \quad (7.5)$$

где m_1, m_2, \dots, m_n — тепловой расход на вертикали, вычисляемый по формуле

$$m = t_{cp} c v h, \quad (7.6)$$

t_{cp} — средняя температура воды на вертикали; c — удельная теплоемкость воды; v — средняя скорость течения воды на вертикали; h — глубина вертикали; b_1, b_2, \dots, b_n — расстояние между вертикалями.

По формуле (7.5) $M = 3,94 \cdot 10^6$ Дж/с.

б. Расчет теплового расхода по количеству тепла в 1 м³ воды, переносимого потоком, производится по формуле

$$M = \frac{1}{2} t_1 Q_1 + \frac{1}{2} (t_1 + t_2) Q_2 + \frac{1}{2} (t_2 + t_3) Q_3 + \dots \\ \dots + \frac{1}{2} (t_{n-1} + t_n) Q_{n-1} + \frac{1}{2} t_n Q_n, \quad (7.7)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n — количество тепла в 1 м³ воды на вертикали, вычисляемое по формуле

$$t_n = t_{cp} c, \quad (7.8)$$

Q_1, Q_2, \dots, Q_n — расходы воды между вертикалями.

Тепловой расход по формуле (7.7) $M = 3,86 \cdot 10^6$ Дж/с.

Указанными способами определения средней температуры воды по сечению и по тепловым расходам можно пользоваться не только в предледоставные периоды, но и в периоды, свободные ото льда, когда измерения температуры воды производятся обычными термометрами с точностью до 0,1 °С.

3. Тепловой сток за какой-либо период вычисляется по формуле

$$M_0 = T \cdot M, \quad (7.9)$$

где T — число секунд в заданном периоде.

За сутки для данного примера получим $M_0 = 342 \cdot 10^9$ Дж/сут.

7.2. Расход льда и шуги

Упражнение 7.2. Вычисление расхода льда на участке реки при инструментальном методе определения коэффициента ледохода и скорости движения льдины.

Д а н о: на участке реки 10/IV производились инструментальные наблюдения за движущимися льдинами, при которых получено:

а) ширина реки $B = 240$ м, б) высота визирования $h = 10$ м, в) расстояние от теодолита до уреза $b_0 = 25$ м, г) средняя толщина льда $h_{\text{л}} = 0,45$ м. Дополнительные сведения (согласно рис. 7.1 и 7.2) приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Подсчет расхода льда

Элемент расчета	Расстояние от уреза до точки визирования в долях от ширины реки по створу		
	1/3	1/2	2/3
Вычисление коэффициента ледохода			
Угол по вертикальному $\beta_{\text{верт}}$ кругу	8°50	4°00	2°30
$\text{tg } \beta_{\text{верт}}$	0,15540	0,06993	0,04366
Расстояние от теодолита до точки визирования l м	64	143	229
Густота ледохода $\alpha_{\text{л}}$	0,30	0,92	0,61
Ширина полосы $b_{\text{л}}$ в долях от единицы	0,33	0,33	0,33
Коэффициент ледохода $R_{\text{л}}$	0,10	0,30	0,20
Вычисление скорости движения льдин			
Угол по горизонтальному кругу $\beta_{\text{гор}}$	36°30	26°20	14°50
$\text{tg } \beta_{\text{гор}}$	0,73996	0,49495	0,26483
Путь, пройденный льдиной, L м	48	72	60
Время движения льдины T с	60	60	60
Скорость движения льдины $v_{\text{л}}$ м/с	0,80	1,20	1,00
Подсчет расхода льда			
Ширина полосы, м	79,3	79,3	79,3
Средняя толщина льда $h_{\text{л}}$ м	0,45	0,45	0,45
Расход льда в полосе $Q_{\text{л}}$ м ³ /с	2,86	12,8	7,14
Общий расход льда	$Q_{\text{л}} = 22,8 \text{ м}^3/\text{с}$		

Т р е б у е т с я: вычислить коэффициент ледохода, скорость движения льдин и общий расход льда.

Р е ш е н и е: при инструментальном определении коэффициента ледохода и скорости движения льдин река разбивается на участки от уреза воды в долях от ширины реки, например 1/3, 1/2 и 2/3. На каждом участке теодолитом определяются углы визирования на движущиеся льдины и время перемещения льдин. На основании этих данных вычисляются коэффициенты ледохода и скорости движения льдин.

На рис. 7.1 представлена схема определения углов визирования на плавущие льдины β_{b_1} , β_{b_2} , β_{b_3} . Расстояние между теодолитом и точкой визирования по створу вычисляется по формуле

$$l = h / \operatorname{tg} \beta_{\text{верт}}, \quad (7.10)$$

где h — высота теодолита над уровнем воды; $\beta_{\text{верт}}$ — угол по вертикальному кругу теодолита.

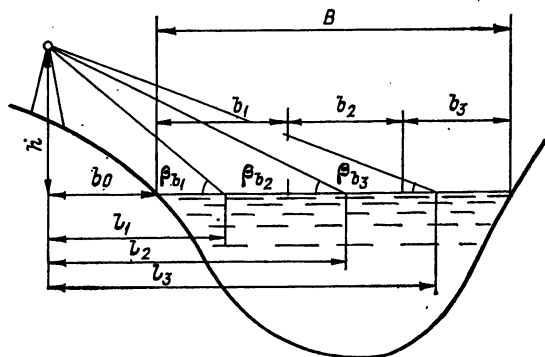


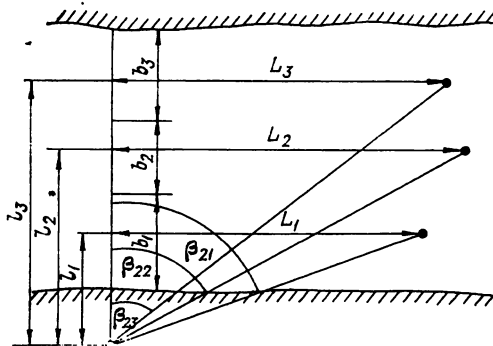
Рис. 7.1. Схема вертикального визирования на плавущие льдины b_1, b_2, b_3 — ширина полос; l_1, l_2, \dots, l_3 — границы полос с различной плотностью

Начало и конец прохождения каждой движущейся льдины в поле зрения теодолита фиксируется секундомером. Общее время τ , в течение которого в трубе теодолита наблюдалось прохождение льдин, деленное на общую продолжительность наблюдений, определяет плотность ледохода

$$\alpha_n = \Sigma \tau / T. \quad (7.11)$$

Рис. 7.2. Схема горизонтального визирования на плавущие льдины.

L_1, L_2, L_3 — путь, пройденный льдиной; l_1, l_2, l_3 — границы полос с различной плотностью; b_1, b_2, b_3 — ширина полос.



В табл. 7.2 приведено значение α_n , вычисленное по формуле (7.13) для каждой полосы участка; величины $\Sigma \tau$ и T в таблице не приведены.

Коэффициент ледохода для каждой полосы вычисляется по формуле

$$k_n = \alpha_n b_n, \quad (7.12)$$

где α_n — плотность ледохода; b_n — ширина выделенной полосы в долях от единицы.

Угол по горизонтальному кругу $\beta_{\text{гор}}$ получен как разность начального отсчета при положении трубы в направлении створа, перпендикулярном к траектории льдин, и конечного при визировании на ту же льдину, которая через заданное время (в данном случае $T = 60$ с) переместится на расстояние L . На рис. 7.2 приведена схема горизонтального визирования на плывущие льдины. Расстояние L может быть определено по формуле

$$L = l \operatorname{tg} \beta_{\text{гор}}. \quad (7.13)$$

Значения скорости движения льдин, приведенные в табл. 7.1, получены по известной формуле $v = L/T$.

Подсчет расхода льда в $\text{м}^3/\text{с}$ для полосы производится по формуле

$$Q_{\text{л}} = k_{\text{л}} v_{\text{л}} h_{\text{л}} b, \quad (7.14)$$

где b — ширина полосы, выраженная в метрах ($b = b_{\text{л}} B = 0,33 \times 240 = 79,3$ м); $k_{\text{л}}$, $v_{\text{л}}$ — значения коэффициентов ледохода и скорости движения льдин в полосе.

Суммируя расход трех полос, получим общий расход на участке $Q = 22,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Упражнение 7.3. Вычисление расхода и объема льда на участке реки при визуальном методе определения ширины ледовой полосы и густоты ледохода.

Д а н о: 1. По шести хорошо заметным льдинам 18/IV в 10 ч. на участке реки определена средняя скорость движения льдин $v_{\text{ср}} = 0,77 \text{ м/с}$.

2. Средняя толщина льда по наиболее крупным льдинам $h_{\text{л}} = 0,85$ м, густота ледохода $\alpha_{\text{л}} = 0,7$.

3. Ширина реки по урезам $B = 147$ м.

4. Ширина заберегов суммарная с правого и левого берегов $b_{\text{з}} = 12$ м, ширина ледовой полосы $l_{\text{л}} = 65$ м.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить расход льда $Q_{\text{л}}$ $\text{м}^3/\text{с}$.

2. Рассчитать объем льда, проносимого рекой за сутки.

Р е ш е н и е: 1. В период ледохода плывущие льдины покрывают водную поверхность с различной степенью густоты $\alpha_{\text{л}}$, которая оценивается в долях ширины реки.

Интенсивность шугохода и ледохода можно определить визуально, пользуясь глазомерной оценкой площади поверхности реки, покрытой льдинами или шугой по всей водной поверхности на створе, за исключением заберегов. Оценка приведена в табл. 7.3.

За нуль густоты принимается совершенно чистая поверхность, а за единицу — поверхность, сплошь покрытая движущимся льдом. Густота ледохода, например, 0,7 означает, что на данном участке все льдины, собранные в одну полосу, заняли бы 7/10 ширины реки.

Расход льда в $\text{м}^3/\text{с}$ для срока наблюдения вычисляется по формуле

$$Q = k_{\text{л}} h_{\text{л}} v_{\text{л}} B_{\text{з}}, \quad (7.15)$$

где $k_{\text{л}}$ — коэффициент ледохода; $h_{\text{л}}$ — средняя толщина льда, м;

Таблица 7.3

Шкала интенсивности шугохода и ледохода

Балл	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Соотношение между площадью, покрытой плывущим льдом и шугой, и общей площадью воды	Свободно	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	Покр-то полностью 1,0

v_l — скорость движения льдин, м/с; B_3 — ширина реки между берегами или навалами, м.

Для определения коэффициента ледохода k_l необходимо знать степень покрытия реки льдом β , которая вычисляется по формуле

$$\beta = b_l/B_3. \quad (7.16)$$

Коэффициент ледохода k_l вычисляется по формуле

$$k_l = \alpha_l \beta. \quad (7.17)$$

Вычисление расхода льда можно производить по форме, указанной в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Расчет расхода льда

Дата, время наблюдений	Ширина, м				Степень покрытия реки льдом β	Густота ледохода α_l	Коэффициент ледохода k_l	Средняя толщина льда h_l , м	Средняя скорость движения льда v м/с	Расход льда Q_l м ³ /с
	по урезам B	берегов b_3	между берегами $B_3 = B - b_3$, м	ледовой полойсы l_l , м						
18/IV 10 ч	147	12	135	65	0,5	0,7	0,4	0,85	0,77	35,1

Более точно можно определить расход льда по формуле

$$Q_l = h_l (k_{l1} v_{l1} b_1 + k_{l2} v_{l2} b_2 + \dots + k_{ln} v_{ln} b_n), \quad (7.18)$$

где h_l — средняя толщина льда, м; $k_{l1}, k_{l2}, \dots, k_{ln}$ — коэффициенты ледохода на участках по ширине реки; $v_{l1}, v_{l2}, \dots, v_{ln}$ — скорость движения льдин на участках, м/с; b_1, b_2, \dots, b_n — ширина участков реки, м.

2. Объем льда S_l (м³/с), проносимого рекой за сутки, рассчитывается по формуле,

$$S_l = Q_l \cdot 86400, \quad (7.19)$$

где Q_l — средний расход льда за сутки, вычисленный из измерений

по нескольким срокам, м³/с; 86 400 — число секунд в сутках.
 $S_{л} = 35,1 \cdot 86\,400 = 3\,032\,640 \text{ м}^3/\text{сут} = 3,03 \cdot 10^8 \text{ т}/\text{сут}$.

Для определения объема льда, проносимого рекой за период ледохода, следует иметь данные о средних суточных расходах льда по нескольким измерениям в сутки.

Упражнение 7.4. Вычислить средний расход и объем шуги за сутки по данным срочных наблюдений при движении шуги во всплывшем состоянии.

Д а н о: 1. Сведения о ледовой обстановке и скорости движения шуги (табл. 7.5).

Таблица 7.5
Скорость движения шуги

Время наблю- дения	№ наблюдения	Густота шуго- хода $\alpha_{ш}$	Ширина шуго- вой полосы $b_{ш}$, м	Ширина забаре- гов b_3 , м	Определение скорости движения шуги				
					расстояние от уреза ле- вого берега	расстояние между створами	время t , с	скорость v , м/с	средняя скорость $v_{ш}$, м/с
8 ч	1	0,7	100	22	50	100	152	0,66	0,65
	2				80	100	143	0,70	
	3				120	100	163	0,61	
	4				150	100	157	0,64	
14 ч	—	0,8	160	24	—	—	—	0,73	
20 ч	—	0,6	100	20	—	—	—	0,60	

П р и м е ч а н и е. Ширина реки по урезам $B = 200$ м.

2. Результаты определения количества шуги по шугоботометру (табл. 7.6).

3. Данные метеорологических наблюдений.

4. Данные наблюдений за температурой воды.

Таблица 7.6
Определение количества шуги по шугоботометру

Время наблюде- ния, ч	№ верти- кали № пробы	Толщина слоя шуги, см	Масса пробы шуги $m_{ш}$, г	Масса шуги на единицу площади шугобото- метра, г/см ²	Средняя масса шуги на верти- кали, г/см ²	Масса шуги, сред- няя для створа	
						г/см ²	т·м ²
1	2	3	4	5	6	7	8
8	1/1	—	380	7,6	7,5	7,7	0,077
	1/2	—	370	7,4			
	2/3	—	400	8,0			
	2/4	—	400	8,0	8,0		
	3/5	—	380	7,6			
	3/6	—	380	7,6			
14	—	—	—	—	—	9,8	0,098
20	—	—	—	—	—	8,5	0,085

5. Сведения о ледовой обстановке за 30/III: ширина реки по урезам $B = 195$ м; ширина заберегов $b_s = 18$ м; ширина шуговой полосы $b_{ш} = 140$ м; густота шугохода $\alpha_{ш} = 0,9$.

Т р е б у е т с я: 1. Определить для каждого срока наблюдений средние значения скорости движения шуги и количество шуги, проносимое потоком.

2. Проанализировать данные и вычислить средний расход и объем шуги за сутки.

3. Установить зависимость $N_{ш} = f(k_{ш})$ и привести пример ее использования.

Р е ш е н и е: 1. Наблюдения за скоростью движения шуги, приведенные в табл. 7.5 (с сокращением), производились в три срока: в 8, 14 и 20 ч. Определялось время прохождения отдельными комьями шуги расстояния между створами и вычислялась скорость движения на различных расстояниях от уреза.

Среднее значение скорости движения шуги для каждого срока определялось по четырем наблюдениям. Производились определения густоты шугохода, ширины шуговой полосы и ширины заберегов.

Ширина заберегов указывается суммарно для левого и правого берега.

Для определения количества шуги применялся шугобатометр. На трех вертикалях створа по ширине шуговой полосы пробы отбирались дважды за каждый срок наблюдений; данные взвешивания приводятся в табл. 7.6. В случае необходимости определения плотности шуги до взвешивания измеряется толщина слоя шуги в сантиметрах.

Масса шуги на единицу площади шугобатометра в $г/см^2$ определяется по формуле

$$a = m_{ш}/50, \quad (7.20)$$

где $m_{ш}$ — масса пробы, г; 50 см^2 — площадь основания шугобатометра.

Для каждой вертикали вычисляется среднее значение массы из двух проб. Если масса шуги на единицу площади выражается в $т/м^2$, то формула (7.22) будет иметь вид

$$a = m_{ш}/50 \cdot 100. \quad (7.21)$$

В графах 7 и 8 табл. 7.6 указывается средняя масса шуги для каждого срока наблюдений, полученная как среднее арифметическое значений массы шуги на каждой вертикали.

Масса шуги в $т/м^2$, приходящейся на единицу площади ее скопления, может быть выражена формулой

$$a = h_{ш}\gamma_{ш}, \quad (7.22)$$

где $h_{ш}$ — высота слоя шуги, м; $\gamma_{ш}$ — плотность шуги, $т/м^3$, которая колеблется в пределах $0,23—0,55 \text{ т/м}^3$.

2. Перед вычислением расхода шуги необходимо произвести некоторое сопоставление материалов о шугоходе с данными метеорологических наблюдений и сведениями о температуре воды.

По данным наблюдений за одни сутки можно сделать только несколько сопоставлений, поясняющих связь метеорологического режима с процессом шугообразования.

Таблица 7.7
Данные метеорологических наблюдений

Элемент	Сроки наблюдений, ч			
	1	7	10	19
Температура воздуха °С	-2,0	-1,6	0,7	0,1
Абсолютная влажность воздуха, мбар	5,1	5,2	5,7	5,5
Относительная влажность, %	96	97	88	90
Скорость ветра, м/с	3,3	5,0	6,3	0,8
Направление ветра	ЗСЗ	ЗЮЗ	ЮЗ	ЮЗ
Облачность: общая/нижняя	10/10	10/10	8/6	4,3
Осадки, мм		0,2		1,3

Таблица 7.8
Данные наблюдений за температурой воды

8 ч		14 ч		20 ч	
у берега	на стрежне	у берега	на стрежне	у берега	на стрежне
0,28	0,68	0,59	1,08	0,43	0,30

Таблица 7.9
Подсчет расхода шуги

Время наблюдений, ч	Ширина, м				Степень покрытия реки шугой $\beta_{ш}$	Густота шугохода $\alpha_{ш}$	Коэффициент шугохода $k_{ш}$	Масса шуги, средняя для створа a т.м ²	Средняя скорость движения шуги $v_{ш}$ м/с	Расход шуги $N_{ш}$ т/с
	реки по урезам B	заберегов b_3	реки между берегами $B_3 = B - b_3$	шуговой полосы $b_{ш}$						
8	200	22	178	100	0,56	0,7	0,39	0,077	0,65	3,47
14	200	24	176	160	0,91	0,8	0,73	0,098	0,73	9,19
20	200	20	180	100	0,55	0,6	0,33	0,085	0,60	3,03
									$N_{ш} = 15,69$	

Например, из табл. 7.7 и 7.8 видно, что температура воздуха к 13 ч дня увеличилась, соответственно изменилась и температура воды. Скорость движения шуги при наблюдении в 14 ч составляла 0,73 м/с, в то время, как в 8 ч утра она была 0,65 м/с. Это изменение связано с увеличением скорости ветра от 5,0 м/с в 7 ч утра до 6,3 м/с в 13 ч дня. К 14 ч густота шугохода увеличилась до 0,8 и ширина шуговой полосы до 160 м.

Вычисление расхода шуги в т/с, перемещающейся по поверхности реки, производится по формуле

$$N_{ш} = k_{ш} a v_{ш} B_3, \quad (7.23)$$

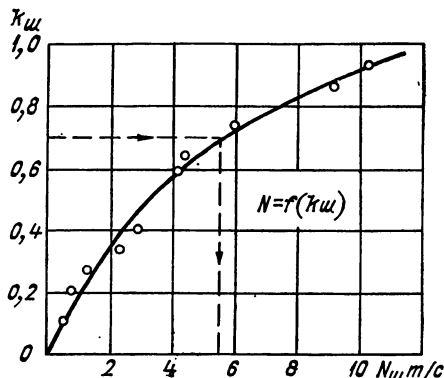


Рис. 7.3. Зависимость расхода шуги от коэффициента шугохода.

где $k_{ш}$ — коэффициент шугохода; a — средняя для створа масса шуги, т/м²; $v_{ш}$ — средняя скорость движения шуги, м/с; B_3 — ширина реки между берегами, м.

Коэффициент шугохода $k_{ш}$ вычисляется аналогично коэффициенту ледохода по формуле

$$k_{ш} = \alpha_{ш} \beta_{ш}, \quad (7.24)$$

где $\alpha_{ш}$ — густота шугохода при движении шуги во всплывшем состоянии определяется аналогично густоте ледохода $\alpha_{л}$; $\beta_{ш}$ — степень покрытия реки шугой, которая вычисляется по формуле

$$\beta_{ш} = b_{ш} / B_3, \quad (7.25)$$

где $b_{ш}$ — ширина шуговой полосы, м.

Подсчет расхода по формуле (7.23) произведен по форме, указанной в табл. 7.9 для каждого срока наблюдений, и дополнительных пояснений не требует.

Средний расход шуги за сутки по трем срокам наблюдений равен $N_{ш} = 15,69 : 3 = 5,23$ т/с.

Объем шуги, проносимой рекой за сутки, вычисляется по формуле

$$W_{ш} = N_{ш} \cdot 86400, \quad (7.26)$$

тогда $W_{ш} = 5,23 \cdot 86\,400 = 0,45 \cdot 10^6$ т/сут.

3. На рис. 7.3 представлена зависимость $N_{ш} = f(k_{ш})$, построенная по измерениям расходов шуги для данного участка, изменяющихся в больших пределах (от 0,50 до 10,2 т/с). Используя полученную зависимость и имея сведения о ледовой обстановке за, 30/III, можно определить расход шуги. По известным данным получим: а) ширина реки между берегами: $B_3 = B - b_3 = 195 - 18 = 177$ м, б) степень покрытия реки шугой $\beta_{ш} = b_{ш}/B_3 = 140 : 177 = 0,79$; в) коэффициент шугохода $k_{ш} = \alpha_{ш} \beta_{ш} = 0,9 \times 0,79 = 0,71$; г) по кривой $N_{ш} = f(k_{ш})$ на рис. 7.3 для значения $k_{ш} = 0,71$ получим расход шуги $N_{ш} = 5,6$ т/с.

Глава 8.

Статистические методы обработки данных наблюдений **8**

8.1. Общие указания

Гидрологические явления обусловлены многофакторными зональными условиями, и применение статистических методов дает возможность установить количественную оценку влияния различных факторов.

В работе А. Рождественского и А. И. Чеботарева [45] подробно изложены статистические методы, используемые в гидрологии. Отмечены три особенности применения методов, обусловленные специфичностью гидрологических явлений.

Первая особенность заключается в том, что исследуемый ряд наблюдений бывает ограничен и в связи с этим особую важность имеет приведение коротких рядов к длительному периоду.

Вторая особенность заключается в том, что ряды наблюдений могут оказаться неоднородными во времени и пространстве, в связи с этим необходимо сочетать использование статистических критериев однородности с физическим анализом исследуемого ряда наблюдений.

Третья особенность связана с наличием внутрирядной связанности, которая нарушает принцип случайности отбора, в результате чего объем независимой информации уменьшается и неустойчивость выборочных оценок возрастает. Следует иметь в виду, что характер группировок маловодных и многоводных лет во многом определяется наличием внутрирядной связи.

Прежде чем приступить к применению статистических методов и получить количественную оценку связи между явлением в виде уравнений или определения статистических параметров исследуемого ряда, необходимо провести анализ исходных табличных данных.

Взаимосвязанные исследуемые значения могут быть сопоставлены за декады, месяцы, сезоны и годы. Необходимо собрать в таблицы достаточно продолжительные ряды наблюдений, однородные по физико-географическим условиям. Следует проанализировать составленные исходные таблицы — включены ли в исследуемый ряд периоды с маловодными и многоводными явлениями. Большое значение имеет проведение графического анализа исследуемого ряда.

Графики колебания уровня и расхода воды в реке в зависимости от времени, графическое сопоставление хода осадков и температура за год с гидрографом, анализ комплексного графика и др. дают наглядное представление о ходе взаимосвязанных явлений. При применении статистических методов обработки производится построение графиков связи исследуемых явлений, предварительный анализ которых наглядно выявляет степень линейной или криволинейной зависимости между явлениями, а также дает возможность установить резко отклоняющиеся значения от общего хода связи. В [23] приведены примеры установления графических и аналитических методов связи.

В данном пособии приведены только некоторые примеры применения статистических методов, а именно: корреляционные зависимости двух переменных, построение кривых повторяемости и продолжительности уровней, расчет расходов и уровней заданной обеспеченности и оценка репрезентативности ряда наблюдений.

8.2. Корреляционные зависимости двух переменных

Упражнение 8.1. Установление корреляционной связи между модулями грунтового и поверхностного стока.

Д а н о: средние годовые модули стока р. Сож — г. Гомель (табл. 8.1).

Т р е б у е т с я: 1. Нанести значения модулей стока y и x на график связи.

2. Произвести графическую медианную проверку связи.

3. Оценить тесноту связи между модулями грунтового и поверхностного стока для чего: а) определить коэффициент корреляции и его предельную погрешность E_r , б) составить уравнения регрессии x по y и y по x и вычислить средние квадратические погрешности уравнений.

4. Провести прямые регрессии по полученным уравнениям.

Р е ш е н и е: корреляция — способ выявления статистических связей между несколькими переменными величинами. Под статистическими связями подразумеваются такие, в которых каждому значению одной величины соответствует несколько значений другой. К таким связям относятся связи между природными (гидрологическими, метеорологическими и гидрогеологическими) величинами, обусловленными одними климатическими и физико-географическими факторами, учитывающиеся за один период наблюдений.

Таблица 8.1

Годовые модули стока

р. Сож — г. Гомель, 1922—1940, 1946—1949 гг.

Год	Модуль стока л/(с·км ²)		Год	Модуль стока, л/(с·км ²)	
	грунтовый <i>y</i>	поверхностный <i>x</i>		грунтовый <i>y</i>	поверхностный <i>x</i>
1922	1,3	3,8	1934	2,6	5,7
1923	1,5	4,1	1935	2,6	6,0
1924	1,6	3,3	1936	3,1	5,7
1925	1,7	4,1	1937	3,3	5,9
1926	2,0	4,3	1938	3,1	6,7
1927	2,1	4,2	1939	2,7	6,7
1928	2,4	4,5	1940	2,8	7,7
1929	2,3	5,2	1946	3,4	7,7
1930	2,4	5,2	1947	3,5	7,9
1931	1,7	5,4	1948	3,7	8,1
1932	1,4	5,5	1949	3,7	9,2
1933	1,6	5,7			
			Сумма	56,5	132,6
			<i>n</i>	23	23
			Среднее	2,46	5,76

Например, максимальные уровни в реках в период весеннего половодья зависят одновременно от запасов воды в снеге к моменту снеготаяния, температуры воздуха в период таяния, грунтов поверхности водосбора и т. д.

Для оценки тесноты связи между исследуемыми значениями используется коэффициент корреляции r , который изменяется от 0 до $\pm 1,0$. Чем больше абсолютное значение коэффициента корреляции, тем теснее связь между рассматриваемыми величинами. Значения коэффициента корреляции, равные или близкие к нулю, свидетельствуют об отсутствии связи между величинами, значения, равные или близкие к $\pm 1,0$, — о наличии очень тесной связи, а при значении $r = \pm 1,0$ — о функциональной связи. Положительные значения коэффициента корреляции указывают на наличие прямой связи между явлениями, при которой с увеличением одной величины увеличивается и вторая (например, чем больше запасы воды в снеге к моменту таяния, тем выше уровень весеннего половодья). Отрицательные значения коэффициента корреляции соответствуют обратной связи, при которой с увеличением одного значения второе уменьшается (например, с ростом испарения в бассейне сток уменьшается).

Принято считать, что достаточная для практических целей теснота связи определяется значениями коэффициента корреляции не менее $r = \pm 0,75$. При более низких значениях коэффициента корреляции использовать связи для расчетов не рекомендуется.

Надежность полученного значения коэффициента корреляции зависит от его погрешности. Одновременно с вычислением определяется и его вероятная погрешность E_r , причем чем меньше погрешность, тем надежнее полученное значение r . Из формулы (8.8) видно, что чем больше число членов ряда n и чем больше r , тем меньше значение E_r , и наоборот. Приведенные ниже формулы расчета r будут иметь достаточно точные результаты, если число наблюдений $n \geq 25$.

1. На рис. 8.1 нанесены значения модулей по данным табл. 8.1. По рассеянию точек на графике видим, что связь между точками

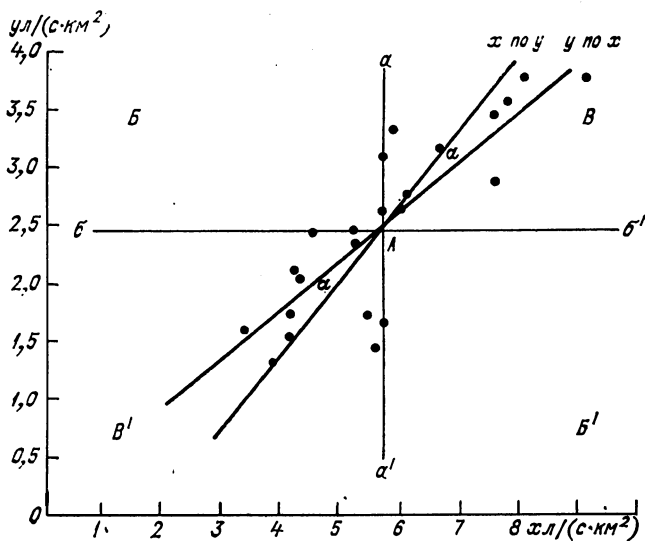


Рис. 8.1. График корреляционной связи модулей грунтового и поверхностного стока
 $y = 0,42 x + 0,08$; $x = 1,07 y + 1,80$; $r = 0,81 \pm 0,05$

имеет линейный корреляционный характер; с увеличением x увеличивается y ; сильно отклоняющихся точек нет, так что можно приступить к корреляционным расчетам.

2. Графическая медианная проверка производится следующим образом. Вычисляется среднее значение модулей стока за исследуемый ряд лет: $y_{ср} = 2,46$ л/(с·км²), $x_{ср} = 5,76$ л/(с·км²) (табл. 8.1). По этим значениям на рис. 8.1 определяется точка А, через которую проводятся две взаимно перпендикулярные медианные линии. Если связь между явлениями прямая, то точки будут располагаться в квадрантах В и В'. Если связь обратная, то точки будут располагаться в квадрантах Б и Б' (рис. 8.2).

По рис. 8.1 подсчитывается число точек в одном из квадрантов, содержащих их наибольшее количество. В данном примере наибольшее число точек оказалось в квадранте В', равное 10. Точки,

которые попадают на линию aa' и bb' , не учитываются. Можно задать вероятность связи, например 5 и 1 %. Вывод о существовании корреляционной связи можно сделать, если наибольшее число точек в квадранте больше, чем предел при заданной вероятности, приведенный в табл. 8.2.

В данном примере подтверждается наличие корреляционной связи, так как полученное наибольшее число точек в квадранте,

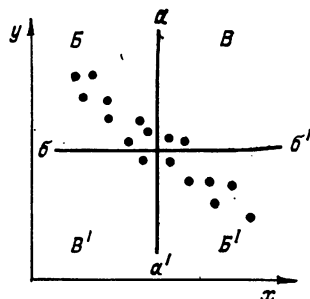


Рис. 8.2. Пример расположения точек при обратной связи

равное 10, больше, чем предел при заданной вероятности, приведенный для общего числа точек (23), равный 9.

Таблица 8.2

Пределы числа точек n , попадающих в любой квадрант

Общее число точек	Квадранты			
	нижний предел		верхний предел	
	5 %	1 %	5 %	1 %
8—9	0	—	4	—
10—11	0	0	5	5
12—13	0	0	6	6
14—15	1	0	6	7
16—17	1	0	7	8
18—19	1	1	8	8
20—21	2	1	8	9
22—23	2	2	9	9
.....

Проверка наличия корреляционной связи производится по коэффициенту срединной корреляции r_{mc} , который определяется по формуле

$$r_{mc} = \frac{4 (\text{общее число точек в любом квадранте})}{N} - 1, \quad (8.1)$$

где N — общее число точек.

Для данного случая в квадранте B число точек $n = 8$, $N = 23$ и по формуле (8.1) получим $r_{mc} = 4 \cdot 8 : 23 - 1 = 1,39 - 1,0 = 0,39$.

Значимость коэффициента срединной корреляции проверяется по абсолютному значению r_{mc} и табл. 8.3. В данном случае крити-

ческие пределы значимости равны при обеспеченности 5 % 0,508 и при 1 % 0,640. Следовательно, значимость $r_{mc} = 0,39$, меньшая 0,508 и 0,640, удовлетворяет заданным условиям.

Таблица 8.3

Пределы значимости для коэффициента срединной корреляции

<i>N</i>	5 %	1 %	<i>N</i>	5 %	1 %
8—9	0,943	—	18—19	0,573	0,718
10—11	0,820	1,000	20—21	0,538	0,676
12—13	0,732	0,910	22—23	0,508	0,640
14—15	0,667	0,831	24—25	0,483	0,608
16—17	0,615	0,759	.....	.....	.....

За. Для оценки тесноты связи между модулями следует провести ряд расчетов в табл. 8.4.

При вычислении $\sum \Delta y$ и $\sum \Delta x$ должны стремиться к нулю. В данном случае получены небольшие отклонения — 0,02 и — 0,01. По мере вычисления следует производить построчный контроль по формуле

$$(\Delta y + \Delta x)^2 = \Delta y^2 + 2\Delta y\Delta x + \Delta x^2. \quad (8.2)$$

Для первой строчки построчный контроль равен $1,34 + 2 \cdot 2,17 + 3,49 = 9,17$.

Общий контроль таблицы производится по итоговым данным (графа «Сумма»)

$$\sum \Delta y^2 + 2 \sum \Delta y\Delta x + \sum \Delta x^2 = \sum (\Delta y + \Delta x)^2. \quad (8.3)$$

Общий контроль получен $13,17 + 2 \cdot 21,50 + 49,59 = 105,76$.

Таблица 8.4

Определение корреляционной связи между

р. Сож — г. Гомель, 1922—

№ п/п	Год	Модуль, л/(с·км ²)		$\Delta y = (y - y_0)$	$\Delta x = (x - x_0)$
		<i>y</i>	<i>x</i>		
1	2	3	4	5	6
1	1922	1,3	3,8	—1,16	—1,87
2	1923	1,5	4,1	—0,96	—1,57
.....
23	1949	3,2	9,2	1,24	3,53
Сумма		56,5	132,6	—0,02	—0,01
<i>n</i>		23	23		
Среднее		2,46	5,76		

Совпадение результатов свидетельствует о том, что вычисления были выполнены правильно.

Коэффициент корреляции вычисляется по формулам:

$$r_{xy} = \frac{\sum \Delta y \Delta x}{\sqrt{\sum \Delta y^2 \sum \Delta x^2}}, \quad (8.4)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum \Delta y \Delta x}{n \sigma_y \sigma_x}, \quad (8.5)$$

где Δy и Δx — отклонения отдельных значений модулей стока y и x от их средних многолетних значений y_0 и x_0 ; n — число лет наблюдений; σ_y и σ_x — средние квадратические отклонения, вычисленные по формулам:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum \Delta y^2 / (n-1)}, \quad (8.6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum \Delta x^2 / (n-1)}. \quad (8.7)$$

Подставим полученные из табл. 8.4 значения в эти формулы: $\sigma_x = \sqrt{49,59 : 22} = \sqrt{2,25} = 1,5$ л/(с·км²), $\sigma_y = \sqrt{13,17 : 22} = \sqrt{0,5986} = 0,77$ л/(с·км²).

Коэффициент корреляции по формуле (8.4). $r_{xy} = 21,50 : \sqrt{13,17 \cdot 49,59} = 0,81$.

Проверим по формуле (8.5) $r_{xy} = 21,50 : (22 \cdot 1,5 \cdot 0,77) = 21,50 : 26,6 = 0,81$. Значения r_{xy} получились равными.

Для оценки достоверности полученного значения коэффициента корреляции вероятная погрешность вычисляется по формуле:

$$E_r = \pm 0,674 (1 - r^2) / \sqrt{n}. \quad (8.8)$$

$$E_r = \pm 0,674 (1 - 0,81^2) : \sqrt{23} = \pm 0,05.$$

Таким образом, значение коэффициента корреляции $r_{xy} = 0,81 \pm 0,05$, что свидетельствует о достаточно тесной связи между модулем грунтового и поверхностного стока.

модулями грунтового и поверхностного стока

1940, 1946—1949 гг.

Δy^2	Δx^2	$\frac{\Delta y \cdot \Delta x}{= \frac{(y - y_0) \times (x - x_0)}{}}$	$\frac{\Delta y + \Delta x}{= \frac{(y - y_0) + (x - x_0)}{}}$	$\frac{(\Delta y + \Delta x)^2}{= \Delta y^2 + 2\Delta y \Delta x + \Delta x^2}$
7	8	9	10	11
1,34	3,49	2,17	-3,03	9,17
0,92	2,45	1,51	-2,53	6,39
...
1,54	12,4	4,38	4,77	22,7
13,17	49,59	21,50	—	105,76

6. Уравнения регрессии имеют вид:

$$y - y_0 = R_{y/x}(x - x_0), \quad (8.9)$$

$$x - x_0 = R_{x/y}(y - y_0), \quad (8.10)$$

где $R_{x/y}$ и $R_{y/x}$ — коэффициенты регрессии, определенные по формулам:

$$R_{x/y} = r_{xy} \sigma_x / \sigma_y, \quad (8.11)$$

$$R_{y/x} = r_{xy} \sigma_y / \sigma_x. \quad (8.12)$$

В данном случае $R_{x/y} = 0,81 \cdot 1,5 : 0,77 = 1,57$ и $R_{y/x} = 0,81 \cdot 0,77 : 1,5 = 0,42$. Подставив полученные значения x_0 , y_0 и $R_{x/y}$ и $R_{y/x}$ в формулы (8.9) и (8.10), получим:

$$y - 2,46 = 0,42(x - 5,67),$$

$$x - 5,67 = 1,57(y - 2,46).$$

Решая эти уравнения относительно x и y , имеем

$$y = 0,42x + 0,08,$$

$$x = 1,57y + 1,80.$$

Средние квадратические погрешности уравнений регрессии вычисляются по формулам:

$$\sigma_{x,y} = \pm \sigma_x \sqrt{1 - r_{xy}^2}, \quad (8.13)$$

$$\sigma_{y,x} = \pm \sigma_y \sqrt{1 - r_{xy}^2}. \quad (8.14)$$

Подставим известные значения: $\sigma_{x/y} = \pm 1,5 \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,84$ и $\sigma_{y/x} = \pm 0,77 \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,46$.

4. Прямые регрессии проводятся по полученным уравнениям обычным способом. Уравнение прямой регрессии y по x имеет вид $y = 0,42x + 0,08$. Задаемся двумя произвольными значениями $x_1 = 2,0$ л/(с·км²), $x_2 = 8,0$ л/(с·км²), подставляя их в уравнения получим $y_1 = 0,42 \cdot 2,0 + 0,08 = 0,92$ л/(с·км²) и $y_2 = 0,42 \cdot 8,0 + 0,08 = 3,44$ л/(с·км²). На рис. 8.1 по полученным точкам проводим прямую y по x .

Уравнение прямой регрессии x по y имеет вид $x = 1,57y + 1,80$. Задаемся произвольными значениями $y_1 = 1,5$ л/(с·км²); $y_2 = 3,3$ л/(с·км²); подставляя в уравнения, получим $x_1 = 1,57 \cdot 1,5 + 1,80 = 4,16$ л/(с·км²), $x_2 = 1,57 \cdot 3,3 + 1,80 = 6,98$ л/(с·км²). На рис. 8.1 по полученным точкам проведена прямая x по y .

Линиями регрессии являются две пересекающиеся под некоторым углом линии. Угол α между линиями регрессии будет больше, если точки связи располагаются более широкой полосой, и уменьшается с увеличением тесноты связи. Две линии регрессии сольются

в случае функциональной связи. Чем меньше угол между линиями регрессии, тем выше коэффициент корреляции.

Рассмотренный в данном упражнении метод установления корреляционной связи может быть использован для восстановления пропусков наблюдений, удлинения ряда наблюдений по одному из известных элементов. Например, наблюдения за грунтовым стоком с 1944 по 1945 г. не производились. Значения поверхностного стока за эти годы восстановлены методом аналогии с учетом уравнений водного баланса: 1944 г.— $5,4 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ и 1945 г.— $4,9 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$.

Подставляя значения в уравнение $y = 0,42x + 0,08$, получим $y_{1944} = 0,42 \cdot 5,4 + 0,08 = 2,35 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, $y_{1945} = 0,42 \cdot 4,9 + 0,08 = 2,14 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Учитываем погрешность уравнения $\sigma_{x/y} = 0,46$. Следовательно, $y_{1944} = 2,35 \pm 0,46 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, $y_{1945} = 2,14 \pm 0,46 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$.

8.3. Построение кривых повторяемости и продолжительности уровней

Упражнение 8.2. Статистическая обработка уровней воды.

Дано: годовая таблица уровней воды (табл. 8.5, с сокращением).

Требуется: 1. а) составить ведомость для построения кривых повторяемости (частоты) и продолжительности (обеспеченности) уровней; б) построить эти кривые.

2. Рассчитать характерные уровни.

Решение. 1. По данным наблюдений за уровнем воды, кроме построения годовых графиков колебания, комплексных графиков и связи соответственных уровней, производится статистическая обработка, основанная на методах математической статистики. К этому виду обработки относятся следующие методы: построение кривых повторяемости и продолжительности; расчеты характерных уровней.

а. Кривые повторяемости (частоты) и продолжительности (обеспеченности) за выбранный период могут быть построены для любой изучаемой величины: уровней, расходов воды и взвешенных наносов, инфильтрационного питания, осадков и пр.

Повторяемостью уровня (в данном случае) называется число случаев (дней или лет) появления уровня в пределах какого-либо заданного интервала. Повторяемость, выраженная в процентах от общей длительности рассматриваемого периода, называется **частотой**.

Продолжительностью стояния уровня называется число дней (или лет) в расчетном периоде, когда наблюдались уровни выше или равные данному уровню. Продолжительность, выраженная в процентах от всего расчетного периода, называется **обеспеченностью** уровня.

Для составления ведомости повторяемости и продолжительности стояния уровней вся амплитуда колебания в пределах рассматриваемого периода разбивается на некоторые интервалы (или градации), например 10, 20, 40, 50 см, а затем производится выборка числа дней появления уровня в каждом интервале.

Амплитуда колебания уровня р. Клязьмы у г. Орехово-Зуево (по табл. 8.5) 327 см. Всю амплитуду разбиваем на интервалы по 20 см, начиная со значения уровня 560 см и кончая 120 см. Число интервалов n приближенно можно рассчитать по соотношению $n \leq 5 \lg N$, где N — число дней (или лет) наблюдений.

Таблица 8.5
Ежедневные уровни воды
р. Клязьма — г. Орехово-Зуево, 1979 г.
Отметка нуля графика 112,39 м абс.

Число	I	II	.....	XI	XII
1	183	181		155	174
30	178	—		177	
31	186	—		—	179
Средн.	177	182		156	175
Выш.	187	187		179	181
Низш.	172	176		129	165

Таблица 8.6
Ведомость повторяемости (частоты) и продолжительности (обеспеченности) уровней
р. Клязьма — г. Орехово-Зуево, 1979 г.

Интервалы уровней над нулем графика, см	I	II	III	IV	..	XII	Повторяемость (частота)		Продолжительность (обеспеченность)	
							дни	%	дни	%
1	2	3	4	5	..	13	14	15	16	17
560—540	—	—	—	1	..	—	1	0,27	1	0,27
539—520	—	—	—	—	..	—	—	—	1	0,27
519—500	—	—	—	1	..	—	1	0,27	2	0,54
199—180	5	24	27	—	..	—	68	18,63	109	29,86
179—160	26	4	—	..	..	31	114	31,24	223	61,10
159—140	—	—	—	..	..	..	141	38,63	364	99,73
139—120	—	—	—	..	..	..	1	0,27	365	100
Итого	31	28	31	30		31				

В табл. 8.6 выбирается ежемесячно число дней стояния уровня в пределах каждого интервала. Проще выборку числа дней производить за каждый месяц для всех интервалов (а не по отдельным интервалам за год в целом). Следует проверить строку «Итого», в которой при вертикальном суммировании должно получиться число дней в месяце.

Повторяемость уровней за год для каждого интервала определяется суммированием числа случаев для каждого интервала за все месяцы.

Например, для интервала 179—160 см повторяемость равна 114 дням. Частота уровня (или относительная повторяемость) вычисляются в процентах по отношению к 365 дням.

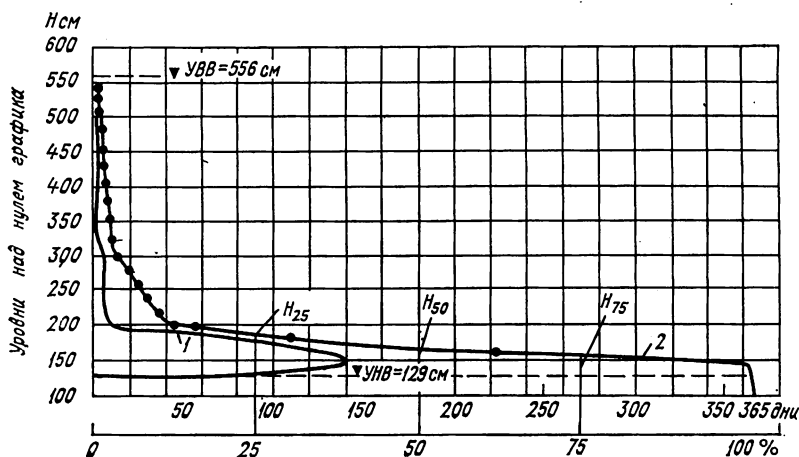


Рис. 8.3. Кривые повторяемости (частоты) (1) и продолжительности (обеспеченности) (2) уровня воды
р. Клязьма — р. Орехово-Зуево, 1979 г.

Продолжительность стояния уровня в днях вычисляется как сумма повторяемости. Для интервала 560—540 повторяемость и обеспеченность равны одному дню, или 0,27 %, для интервала 519—500 повторяемость 1 день, а продолжительность уровней выше 519 см равна двум дням, или 0,54 %. Для последнего интервала 139—120 см продолжительность стояния уровней равна 365 дням, что соответствует обеспеченности 100 %.

6. Построение кривых повторяемости и продолжительности уровней на рис. 8.3 производится в днях по данным граф 1 и 14 и 1 и 16 табл. 8.6 и по данным граф 15 и 17. Повторяемость откладывается в середине интервала, продолжительность относится к концу интервала. Как видно из табл. 8.6 и рис. 8.3, кривая обеспеченности является интегральной по отношению к кривой частоты.

Рассмотрим практическое значение полученных кривых на двух примерах. Можно определить значение уровня обеспеченностью

50 %, т. е. уровень, ниже которого в течение 183 дней (50 % от 365 дней) вода в р. Клязьме не опускалась. Значения такого уровня определяются по кривой, как это показано на рис. 8.3; уровень равен 168 см. Аналогично изложенному можно определить уровни продолжительностью в днях: 30; 90; 180; 270; 365.

Можно определить, сколько дней в году был обеспечен уровень, равный 250 см.

Как показано на рис. 8.3 уровень воды р. Клязьмы у г. Орехово-Зуево не опускался ниже 250 см в течение 25 дней в году (или 7 %), т. е. высота уровня, равная 250 см и выше, наблюдалась в 7 % всех случаев. Если нужно определить обеспеченность уровня, 250 см и меньше, то $100 - 7 = 93$ %. Рассмотренный пример можно пояснить и следующим образом. Если при обеспеченности 7 % значение уровня $H = 250$ см, то в семи случаях из 100 взятая высота уровня будет не меньше 250 см, а в 93 случаях меньше. Следовательно, значение уровня 250 см как бы обеспечено на 7 %, отсюда и понятно название кривой обеспеченности.

2. Расчет характерных уровней можно произвести по кривой обеспеченности, а также следует использовать ряд наблюдений, расположенный в убывающем порядке (одинаковые значения уровней в ряду повторяются столько раз, сколько они наблюдаются). В данном примере такая таблица не приводится. Обозначим n — число членов ряда; m — порядковый номер ряда, расположенного в убывающем порядке. Характерные уровни, определяемые по статистическому ряду, расположенному в убывающем порядке, следующие: медианный, верхний и нижний квартильные.

По нижеприведенным формулам определяются порядковые номера членов ряда:

медианный — средний

$$m_{50} = 1 + 50(n + 1)/100, \quad (8.15)$$

верхний квартильный

$$m_{25} = 1 + 25(n - 1)/100, \quad (8.16)$$

нижний квартильный

$$m_{75} = 1 + 75(n - 1)/100, \quad (8.17)$$

Место уровня в убывающем ряду заданной обеспеченности вычисляется по формуле

$$m_p = 1 + P(n - 1)/100. \quad (8.18)$$

В табл. 8.7 приведены порядковые номера медианных и квартильных чисел по формулам (8.15) — (8.17).

Таблица 8.7
Порядковые номера членов ряда уровней в убывающем ряду за год

Уровень, см	28	29	30	31	365	366
Верхний квартильный	7,75	8	8,25	8,50	92	92,25
Медианный	14,50	15	15,25	16	183	183,50
Нижний квартильный	21,25	22	22,75	23,50	274	274,75

Для данного примера порядковый номер медианного уровня 183; верхнего квартильного 92 и нижнего квартильного 274; уровни по таблице, расположенной в убывающем порядке, соответственно равны $H_{50} = 168$ см; $H_{25} = 130$ см и $H_{75} = 157$ см.

8.4. Расчет расходов воды и уровней заданной обеспеченности

Упражнение 8.3. Определение годового стока при достаточно продолжительном ряде наблюдений вероятностью превышения 0,1 и 99,9 % с определением параметров кривой обеспеченности методом моментов.

Дано: 1. $F = 54\,930$ км².

2. Средние годовые расходы воды (табл. 8.8).

Таблица 8.8

Вычисление методом моментов параметров кривой обеспеченности годового стока

р. Ока — г. Калуга, 1936—1970 гг.

m	Год	Средний годовой расход, м ³ /с		Вероятность превышения $p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \times 100\%$	$K = Q_i/Q_0$	$(K - 1)$	$(K - 1)^2$	$(K - 1)^3$
		$Q_{i\text{ ср}}$	в убывающем порядке					
1	1936	281	450	1,9	1,65	0,65	0,4225	0,2746
2	1937	304	376	4,7	1,38	0,38	0,1444	0,0549
35	1970	450	177	98,1	0,65	-0,35	0,1225	0,0439
Сумма		9531			35,08	-0,01	2,0056	4,2472
		$n = 35$						
		$Q_0 = 272$						

Т р е б у е т с я: 1. Построить эмпирическую кривую на клетчатке вероятности.

2. Вычислить параметры аналитической кривой обеспеченности средних годовых расходов с оценкой точности их определения: а) средний многолетний расход Q_0 , б) коэффициент изменчивости C_v , в) коэффициент асимметрии C_s .

3. Вычислить ординаты аналитической кривой.

4. Построить аналитическую кривую и определить средние годовые расходы вероятностью ежегодного превышения 0,1 и 99,9 %.

Р е ш е н и е: 1. Колебания годового стока во времени обусловлены влиянием большого числа факторов, что вызывает необходимость при изучении этих колебаний применять методы математической статистики. При достаточно продолжительных и репрезентативных рядах наблюдений расчеты годового стока рекомендуется производить по кривым обеспеченности.

Обеспеченностью гидрологической величины называется вероятность того, что рассматриваемое значение этой величины может быть превышено среди совокупности всех возможных ее значений.

Различают вероятность ежегодного превышения для явлений, наблюдаемых только один раз в году; вероятность превышения среди совокупности всех возможных значений для явлений, которые могут наблюдаться несколько раз в году; вероятность превышения в рассматриваемом фиксированном пункте; вероятность превышения на рассматриваемой территории в любом пункте.

Обеспеченностью годового стока p может быть названо среднее число лет, выраженное в процентах или долях от общего числа лет, в котором годовой сток будет равен или больше данного.

Кривая обеспеченности, или кривая вероятности превышения, — это интегральная кривая, показывающая обеспеченность, или вероятность превышения, в процентах или долях от единицы данной величины среди общей совокупности ряда. При расчетах параметров кривых обеспеченности значения гидрологической величины рассматриваются в виде статистического ряда, т. е. ряда, расположенного в убывающем порядке.

Гидрологической величиной, обеспеченность которой определяется в этом разделе, является годовой сток.

Кривые обеспеченности, или кривые вероятности превышения, могут быть построены в виде эмпирических (наблюденных) и аналитических (теоретических) кривых.

Эмпирические кривые обеспеченности годового стока строятся по вероятности превышения P % эмпирических точек, вычисленных для каждого члена ряда значений годового стока по формулам:

$$P = m \cdot 100 / (n + 1), \quad (8.19)$$

$$P = (m - 3) \cdot 100 / (n + 0,4), \quad (8.20)$$

где m — порядковый номер члена ряда значений стока, расположенных в убывающем порядке; n — общее число членов ряда.

По рекомендации [71] формула (8.19) используется при расчетах максимальных расходов и уровней, а формула (8.20) — при расчетах годовых и минимальных значений.

В табл. 8.8 средние годовые расходы Q_i располагаются в убывающем порядке, причем если за период наблюдений было два или более одинаковых расхода, то они повторяются так, что число n останется одинаковым для хронологического ряда и ряда, расположенного в убывающем порядке.

В табл. 8.8 вероятность превышения первого расхода в убывающем ряду $Q = 450 \text{ м}^3/\text{с}$ равна $P = \frac{1 - 0,3}{35 + 0,4} 100 = 1,9 \%$. Для упрощения расчетов рекомендуется значения P определять по [37, приложение 4].

Кривые обеспеченности эмпирическая и аналитическая в целях повышения точности строятся на специальных клетчатках вероятности. Если значения эмпирических точек, а в дальнейшем и аналитические величины наносить в простых координатах, то верхний и нижний участки кривых получаются изогнутыми, что затрудняет их экстраполяцию.

При коэффициенте изменчивости $C_v \leq 0,5$ наиболее целесообразно использовать клетчатку вероятности с умеренной асимметричностью, при $C_v > 0,5$ — со значительной асимметричностью.

На клетчатке с умеренной асимметричностью (рис. 8.4) выбирается вертикальный масштаб для значений Q_i , причем максималь-

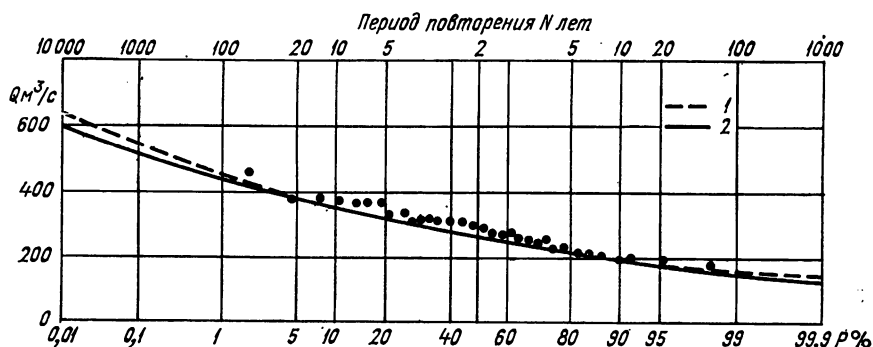


Рис. 8.4. Эмпирическая (1) и теоретическая (2) кривые обеспеченности годовых расходов воды

р. Ока — г. Калуга, 1936—1970 гг.

$$Q_0 = 272 \text{ м}^3/\text{с}, C_v = 0,24, C_s = 2 C_v$$

ное значение Q принимается большим, чем значение расхода для первого члена ряда, в данном примере более чем $Q = 450 \text{ м}^3/\text{с}$. По вертикальной оси можно откладывать модульные коэффициенты $K = Q_i/Q_0$. По горизонтальной нижней оси откладывается обеспеченность в процентах, а по верхней оси — период повторения лет N .

По значениям Q_i и P из табл. 8.8 на рис. 8.4 наносятся эмпирические точки. Как видно, точки вероятности имеют некоторый разброс при обеспеченности менее 20 % и более 90 % и ограничены пределами 1,9 и 98,1 %.

2. Аналитические кривые обеспеченности применяются для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности. Теоретические обоснования методов построения аналитических кривых изложены в работе А. В. Рождественского и А. И. Чеботарева [45]. В данном учебном пособии приведены лишь практические указания к построению эмпирических и аналитических кривых обеспеченности.

Параметрами аналитических кривых обеспеченности являются: средний многолетний годовой сток Q_0 , коэффициент изменчивости (вариации) C_v и коэффициент асимметрии C_s . Методы вычисления

C_v и C_s зависят от коэффициента изменчивости C_v : а) при $C_v < 0,5$ применяется метод моментов, б) при $C_v > 0,5$ используется метод наибольшего правдоподобия, в) графо-аналитический метод применяется в случае использования биномиальной кривой обеспеченности при любом значении C_v (см. [37, 63]).

В данном упражнении для определения C_v и C_s применяется метод моментов.

а. По данным табл. 8.8, где средние годовые расходы расположены в убывающем порядке, вычисляется первый параметр по формуле

$$Q_0 = \sum_1^n Q_i/n = 9531 : 35 = 272 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Погрешность среднего многолетнего значения ряда расходов по формуле

$$\sigma_{Q_0} = \pm C_v \cdot 100/\sqrt{n} = 0,24 \cdot 100 : \sqrt{35} = 4,06\%.$$

Коэффициент $C_v = 0,24$ для данного ряда получен по формуле (8.23).

Следует отметить, что для р. Оки у г. Калуги при $n = 89$ лет среднее многолетнее значение $Q_0 = 296 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_v = 0,26$ и погрешность $\sigma_{Q_0} = 2,75\%$. С уменьшением ряда лет до 35 (с исключением из ряда наивысшего расхода 1968 г. $Q = 540 \text{ м}^3/\text{с}$) уменьшилось среднее многолетнее значение и соответственно увеличилась погрешность его определения.

б. Коэффициент изменчивости (вариации) C_v — безразмерный статистический параметр, характеризующий изменчивость случайной величины во времени. Коэффициент изменчивости вычисляется по формуле

$$C_v = \sigma/x_0, \quad (8.21)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение по формуле (1.19)

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2/n},$$

(x_i — значение отдельного члена ряда, x_0 — среднее значение ряда, n — число членов ряда).

Преобразовывая формулы (8.21) и (1.19), получаем

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2/n}, \quad (8.22)$$

где K_i — модульный коэффициент, в данном случае годового стока.

При числе членов ряда $n \leq 35$ формула (8.22) имеет вид

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2/(n-1)}. \quad (8.23)$$

Для вычисления C_v в табл. 8.8 производится определение $K = Q_t/Q_0$, (K_t-1) , $(K_t-1)^2$ и $(K_t-1)^3$ (последний член ряда будет использован при расчете C_s). Для контроля следует найти величину $\sum K_t$, которая должна быть равной или близкой числу членов ряда. В данном случае $\sum K = 35,08$, а $n = 35$. Расхождение в 0,08 можно считать допустимым. Это расхождение может быть еще меньше, если определять с точностью до 0,001 или 0,0001, но такая точность значительно усложнила бы вычисления и практически нецелесообразна. Величины $K-1$ дают отклонения модульного коэффициента данного года от среднего модульного коэффициента $K = 1$. Контроль вычисления $K-1$ состоит в том, что $\sum (K-1)$ должна быть равной или близкой к нулю. В данном примере $\sum (K-1) = -0,01$, что можно считать допустимым. Выполняя дальнейшие вычисления $(K-1)$ и $\sum (K-1)^2$, получаем значение C_v по формуле (8.23) $C_v = \sqrt{2,0056 : 34} = 0,24$.

При определении коэффициента изменчивости C_v методом моментов относительная средняя квадратическая погрешность вычисляется по формуле

$$E_{C_v} = \sqrt{(1 + C_v^2)/2n} \cdot 100\%. \quad (8.24)$$

Значение $E_{C_v} = \sqrt{(1 + 0,24^2) : (2 \cdot 35)} \cdot 100 = 12,3\%$. Если погрешность $E_{C_v} \leq 10 \div 15\%$, то длина ряда считается достаточной; в данном примере E_{C_v} удовлетворяет этому условию.

в. Коэффициент асимметрии C_s — безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности ряда рассматриваемой случайной величины относительно его среднего значения.

Коэффициент асимметрии C_s определяется подбором, исходя из условия наилучшего соответствия аналитической и эмпирической кривых обеспеченности, с последующей проверкой полученного для данной реки соотношения C_s/C_v по рекам-аналогам. Как показали гидрологические расчеты речного стока, соотношения C_s и C_v колеблются от 1 до 4.

Существует приближенная формула определения C_s , используемая при большом числе значений:

$$C_s = \sum_1^n (K-1)^3 / [(n-1)C_v^3]. \quad (8.25)$$

Для данного ряда $C_s = 4,2472 : (34 \cdot 0,0143) = 0,86$.

Относительная средняя квадратическая погрешность коэффициента асимметрии при асимметричном расположении ряда вычисляется по формуле

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n}} \cdot \sqrt{1 + 6C_v^2 + 5C_v^4} / C_s. \quad (8.26)$$

Для данного примера

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{35}} \sqrt{1 + 6 \cdot 0,24^3 + 5 \cdot 0,24^4} \cdot 100 : 0,86 = 55,7\%$$

Погрешность вычисления коэффициента C_s получена большой, и для выбора расчетной аналитической кривой обеспеченности применяем метод подбора. Для данного примера примем соотношение

$$C_s = 2C_v; \quad Q_0 = 272 \text{ м}^3/\text{с}; \quad C_v = 0,24.$$

3. Вычисление ординат аналитической кривой обеспеченности методом моментов производится при $C_s = 2C_v$ в табл. 8.9 следующим образом. По приложению 3 определяются ординаты K_p для 0,01—99,9 % по интерполяции для $C_v = 0,24$.

Таблица 8.9

Ординаты аналитической кривой обеспеченности годовых расходов

р. Ока — г. Калуга, $Q_0 = 272 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_v = 0,24$, $C_s = 2C_v$
1936—1970 гг.

C_s	Величины	0.01	0.1	1	3	5	...	99	99.9 %
$2C_v$	K_p	2,16	1,91	1,64	1,50	1,43	...	0,53	0,42
	$Q_p = K_p Q_0$	588	520	446	408	390	...	144	114

Расходы воды различной обеспеченности вычисляются по формуле

$$Q_p = K_p Q_0. \quad (8.27)$$

4. На рис. 8.4 строится аналитическая кривая обеспеченности годовых расходов по данным табл. 8.9. Необходимо проверить соотношение нанесенных ранее точек эмпирической кривой с точками аналитической кривой. Если общее направление эмпирических точек не совпадает с аналитической кривой, то необходимо проверить соотношение $C_s = 2C_v$, изменить параметр C_s и построить новую кривую.

В данном случае эмпирические точки хорошо совпадают с направлением теоретической кривой. Следовательно, можно принять расходы заданной обеспеченности $Q_{0,1\%} = 520 \text{ м}^3/\text{с}$, и $Q_{99,9\%} = 114 \text{ м}^3/\text{с}$.

Повторяемостью гидрологической величины, например годового стока, называется число лет N , в течение которых годовой сток повторяется в среднем один раз. На клетчатке вероятности, приведенной на рис. 8.4, верхняя горизонтальная шкала имеет надпись «Период повторения N лет», и шкала имеет разграфку: в центре клетчатки 2, а затем влево и вправо до

10 000. Как видно, верхняя и нижняя шкалы связаны между собой следующими соотношениями:

а) при обеспеченности $P \leq 50 \%$

$$N = 100/P, \quad (8.28)$$

б) при обеспеченности $P > 50 \%$

$$N = 100/(100 - P). \quad (8.29)$$

Повторяемость при обеспеченности: $P = 75 \%$, $N = 100 : (100 - 75) = 4$, т. е. 1 раз в 4 года; $P = 90 \%$, $N = 100 : (100 - 90) = 10$, т. е. 1 раз в 10 лет; при $P = 99,9 \%$, $N = 100 : (100 - 99,9) = 1000$, т. е. 1 раз в 1000 лет.

Для определения повторяемости, а также характеристики года можно воспользоваться данными табл. 8.10, вычисленными по формулам (8.28) и (8.29).

Таблица 8.10

Связь обеспеченности, повторяемости и характеристики года

Обеспеченность, %	Характеристика года	Повторяемость		Характеристика года	Повторяемость в N лет
		1 раз	в N лет		
0,01	Катастрофически многоводный	10 000	75	Средний маловодный	4
0,1	То же	1 000	90	То же	10
1	Очень многоводный	100	95	Маловодный	20
3	Многоводный	33	97	»	33
5	»	20	99	Очень маловодный	100
10	Средний многоводный	10	99,9	Катастрофически маловодный	1 000
25	То же	4	99,99	То же	10 000
50	Средний (медианный)	2			

Как видно из табл. 8.10 при высоких и низких значениях обеспеченности, например 0,1 и 99,9 %, повторяемость получена одинаковой и равна 1000, только в первом случае она характеризует катастрофически многоводный год, во втором случае — катастрофически маловодный. Объясняется это тем, что вероятность появления лет с большими и малыми расходами одинакова.

Упражнение 8.4. Расчет наивысшего уровня заданной вероятности превышения по данным о высших мгновенных уровнях за многолетний период.

Дано: 1. Наивысшие мгновенные наблюдаемые уровни р. Москва — г. Звенигород (табл. 8.11).

2. Отметка нуля графика поста 132,89 м абс.

3. Наивысший исторический уровень 840 см наблюдался в

Табл
Вычисление параметров кривой обеспе
р. Москва — г. Звенигород,

№ п/п	Год	Наивысший ур- вень H см	Наивысший уровень в убывающем порядке H см	Вероятность превышения $P = m \cdot 100 (n+1) \%$
1	1924	668	786	2,1
47	1970	590	277	97,9
		Сумма n H_{cp}	27 526 47 586	

1908 г. (вероятность его превышения установлена приближенно $P = 0,2 \%$).

Т р е б у е т с я: рассчитать наивысший максимальный уровень вероятностью превышения $P = 0,1 \%$ двумя способами: а) по эмпирической кривой обеспеченности, б) по аналитической кривой обеспеченности.

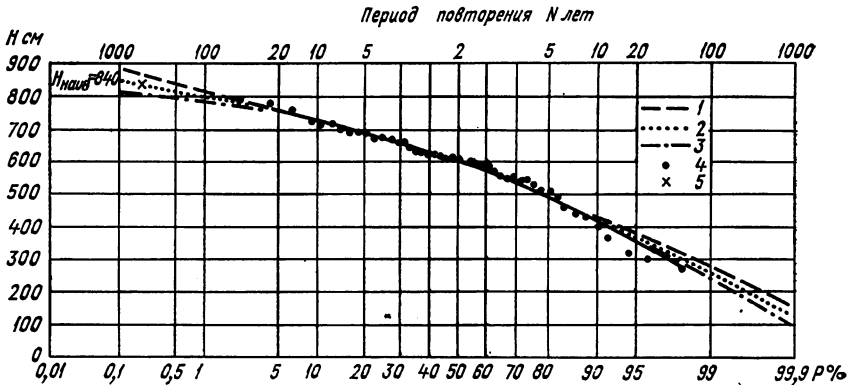


Рис. 8.5. Кривые обеспеченности наивысших уровней
р. Москва — г. Звенигород, 1924—1970 гг. $C_{\sigma} = 0,20$, $H_{cp} = 586$ см
1) $C_s = -2 C_{\sigma}$; 2) $C_s = -3 C_{\sigma}$; 3) $C_s = -4 C_{\sigma}$; 4) эмпирическая кривая; 5) исторический уровень 1908 г.

Р е ш е н и е: а. Расчетные наивысшие уровни определяются по кривым обеспеченности ежегодных высших уровней. Если наивысшие уровни наблюдаются в разные фазы водного режима, вычисления производятся для талых и дождевых вод отдельно.

Для построения эмпирической кривой обеспеченности максимальные уровни располагаются в убывающем порядке (табл. 8.11).

ца 8.11

ченности наивысших уровней

1924—1970 гг.

$H - H_{cp}$	$(H - H_{cp})^2$	$K = H/H_{cp}$	$K - 1$	$(K - 1)^2$	$(K - 1)^3$
200	400 000	1,34	0,34	0,1156	0,0393
—309	98 481	0,17	—0,53	0,2809	—0,1489
	497 848	45,98	—0,02	1,889	—0,296

Для каждого уровня вычисляется вероятность превышения по формуле (8.19).

Ряд наивысших уровней имеет достаточную продолжительность (47 лет) при амплитуде колебания, равной $786 - 277 = 509$ см.

Для оценки ряда вычисляется среднее квадратическое отклонение и погрешность по формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{\sum(H - H_{cp})^2 / (n - 1)}, \quad (8.30)$$

$$\sigma = \pm 0,674\sigma_x, \quad (8.31)$$

где H — уровень каждого члена ряда; H_{cp} — средний уровень за n лет наблюдений.

В табл. 8.11 вычисляется $H_{cp} = \sum_1^n H_i / n = 27\,526 : 47 = 586$ см и проводится расчет $\sum (H - H_{cp})^2$.

По формуле (8.30) $\sigma_x = \sqrt{497\,848 : 46} = 105$ см.

Погрешность среднего значения ряда получена равной $\sigma = \pm 0,674 \cdot 105 = \pm 71$ см, что составит 11 %.

На клетчатку (рис. 8.5) наносится исторический уровень $H = 840$ см при $P = 0,2$ %. В данном примере при тесном расположении точек проведение на глаз плавной осредненной кривой не представляет затруднений (кривая проведена сплошной линией). Полученную эмпирическую кривую можно проэкстраполировать до заданной вероятности превышения (обеспеченности) $P = 0,1$ % при условии, что известен исторический уровень. Участок экстраполяции от $P = 2,1$ % до $P = 0,1$ % обозначен штриховой линией. Экстраполяционный участок совпадает с положением исторического уровня. Значение наивысшего уровня вероятности превышения 0,1 %, полученное графически с кривой, можно принять $H_{0,1\%} = 850$ см.

б. Для построения аналитической кривой обеспеченности наивысших уровней применяется метод моментов, который рекомен-

дуются для расчета при условии отсутствия значительно отклоняющихся точек от осредненной эмпирической кривой в верхней ее части, что наблюдается на рис. 8.5. Вычисление параметров аналитической кривой обеспеченности H_{cp} , C_v и C_s производится по принятым правилам.

По данным табл. 8.11 $H_{cp} = 586$ см. Коэффициент вариации по формуле (3.22) равен $C_v = 1,889 : 47 = 0,20$. Относительная средняя квадратическая погрешность коэффициента изменчивости по формуле (8.24) равна $E_{C_v} = \sqrt{(1 + 0,20^2) : 94} \cdot 100 = 10,5 \%$.

Если погрешность $E_{C_v} = 10 \div 15 \%$, то длина ряда считается достаточной; в данном примере E_{C_v} удовлетворяет этому условию.

Коэффициент асимметрии C_s вычисляется по приближенной формуле (8.25) $C_s = -0,298 : (46 \cdot 0,20^3) = -0,80$.

Таблица 8.12

Вычисление ординат аналитической кривой наивысших уровней

р. Москва — г. Звенигород, $C_v = 0,20$ и $H_{cp} = 586$ см

	P %			
	0,1	1	5	10
	$C_s = -2C_v = -0,40$			
$H_p = K_p H_{cp}$	1,51 885	1,41 812	1,30 749	1,25 720
	$C_s = -3C_v = -0,60$			
$H_p = K_p H_{cp}$	1,45 850	1,38 809	1,29 756	1,24 727
	$C_s = -4C_v = -0,80$			
$H_p = K_p H_{cp}$	1,40 820	1,35 791	1,28 750	1,23 721

Погрешности коэффициента асимметрии C_s при низких значениях C_v очень велики даже при больших рядах наблюдений, поэтому при подсчете C_s лучше использовать метод подбора.

При отрицательном значении коэффициента асимметрии относительные отклонения от середины ординат кривой обеспеченности следует определять по [23, прил. 1].

В табл. 8.12 производится подсчет ординат при различных соотношениях $C_s = 2C_v$, $C_s = 3C_v$ и $C_s = 4C_v$. Ординаты вычисляются от 0,1 до 99,9 %, но в табл. 8.16 приведены значения только до 10 %.

Как видно на рис. 8.5, на участке от 5 до 80 % все четыре кривые совпадают. Наилучшее совпадение в верхней части кривой с эмпирическими точками и экстраполяционным участком эмпирической кривой (пунктир) получено при значении $C_s = -3C_v =$

$= -0,60$. Напомним, что по формуле (8.33) значение $C_s = -0,80$. В нижнем участке к эмпирической кривой ближе подходит кривая при $C_s = -4C_v$. За расчетный наивысший уровень вероятностью превышения $P = 0,1\%$ можно принять $H_{0,1\%} = 850$ см, полученное по эмпирической кривой и подтвержденное аналитическим расчетом при $C_v = 0,20$ и $C_s = -3C_v$; абсолютное значение расчетного уровня равно $H_{0,1\%} = 132,89 + 8,50 = 141,39$ м абс.¹

Упражнение 8.5. Вычисление наивысшего уровня заданной вероятности превышения $p = 1\%$ в условиях ледовых явлений при отсутствии наблюдений.

Дано: 1. Максимальный расход p . Истра — с. Павловская Слобода вероятностью превышения $p = 1\%$, $Q_{1\%} = 250$ м³/с.

2. Переходный коэффициент $K_{зим} = 0,87$.

Требуется: 1. Вычислить расход заданной вероятности превышения $Q_{1\%}$ с учетом ледовых явлений.

2. Определить поправку для уровня $\Delta H_{л}$.

3. Вычислить наивысший уровень $H_{1\%}$.

Решение: 1. При недостаточности или отсутствии наблюдений за наивысшими уровнями и невозможности удлинения ряда для определения уровней заданной вероятности превышения в период свободного состояния русла используются кривые расходов $Q = f(H)$ и значения равнообеспеченных расходов.

Для расчетного створа строится кривая $Q = f(H)$, которая затем экстраполируется в соответствии с морфометрическими и гидравлическими характеристиками русла методами, изложенными в упражнении 5.2. Максимальный расход заданной вероятности $Q_{1\%}$ приведен в исходных данных. Соответствующий этому расходу уровень воды $H_{1\%}$ определяется по кривой $Q = f(H)$ и равен $H_{1\%} = 550$ см.

Если известно, что максимальный уровень на этом участке наступит и период ледовых явлений ($л$) или заторов ($з$), то к рассчитанному уровню вводится поправка $\Delta H_{л}$ или $\Delta H_{з}$.

2. Поправка на ледовые явления вычисляется по формуле

$$\Delta H_{л} = H_{Q'_p} - H_{Q_p}, \quad (8.32)$$

где $H_{Q'_p}$ — уровень воды, соответствующий по кривой $Q = f(H)$ расходу Q'_p :

$$Q'_p = Q_p / K_{зим}, \quad (8.33)$$

Q_p — максимальный расход вероятностью превышения $p\%$; H_{Q_p} — уровень воды, соответствующий расходу по кривой $Q = f(H)$;

¹ Если необходимо рассчитать наинизший минимальный уровень вероятностью превышения $P = 99\%$ или $99,9\%$, то расчеты производятся аналогично, только табл. 8.12 заполняется для нижней части кривой.

$K_{\text{зм}}$ — переходный коэффициент, учитывающий изменение условий водотока во время ледохода.

При отсутствии наблюдений и невозможности расчета $K_{\text{зм}}$ определяется по аналогии со смежными реками или принимается равным 0,8—0,9.

3. Для данных условий $Q'_{1\%} = Q_{1\%} / 0,87 = 250 : 0,87 = 287 \text{ м}^3/\text{с}$.

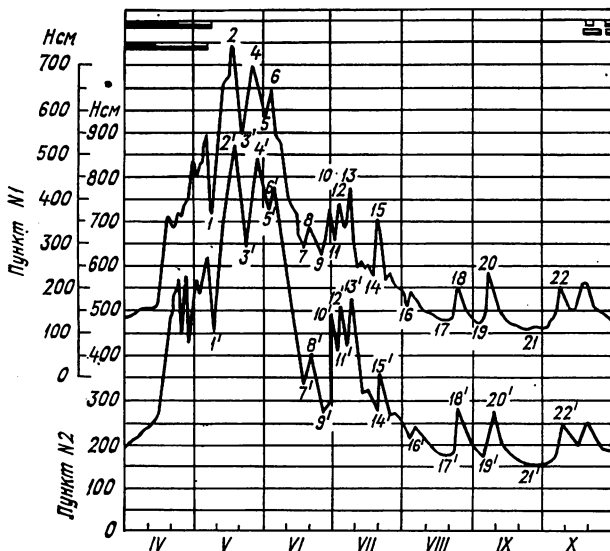


Рис. 8.6. График колебания ежедневных уровней воды

По кривой $Q = f(H)$ по расходу $Q_{1\%}$ определяется соответствующий ему уровень $H_{1\%} = 600 \text{ см}$. Поправка $\Delta H_{\text{л}} = H'_{1\%} - H_{1\%} = 600 - 550 = 50 \text{ см}$.

Упражнение 8.6. Построение графика соответственных уровней.

Дано: график колебания ежедневных уровней по р. А в пунктах № 1 и 2 (рис. 8.6) за 1978 г.

Требуется: 1. Выбрать соответственные уровни.

2. Построить график связи соответственных уровней и пояснить их практическое применение.

Решение: 1. Соответственные уровни — это уровни двух уровнейных гидрологических постов, расположенных на бесприточном участке, относящиеся к одинаковым фазам режима. При установлении соответственных уровней за одинаковые фазы режима принимаются гребни резко выраженных подъемов и низкие точки впадин. Соответственные уровни воды ниже расположенного поста наблюдаются позже, чем на вышележащем, на время, равное сроку

пробега волны, которое называется в р е м е н е м д о б е г а н и я. Соответственные уровни можно определять по хронологическим графикам колебания уровней (рис. 8.6). Если гидрологические посты расположены на приточных участках, то определение соответственных уровней требует дополнительных расчетов по методике, разработанной в курсе «Гидрологические прогнозы».

Графики построены со сдвигом нулей графиков, чтобы избежать пересечения уровней. На линиях уровней намечены 22 характерные точки, причем для нижнего поста № 2 они помечены штрихом. В табл. 8.13 выписаны определенные по графику уровни с датами (которые уточняются по таблицам ЕУВ; в упражнении не приводятся).

Таблица 8.13
Соответственные уровни в период без ледовых явлений

№ точки	Пункт № 1		Пункт № 2	
	дата	H см	дата	H см
1	9/V	366	10/V	447
2	18/V	733	20/V	866
21	26/IX	108	27/IX	155
22	9/X	199	10/X	242

Как видно из табл. 8.13, время добега на участке достаточно устойчиво и колеблется от 1 до 2 сут.

2. На рис. 8.7 по данным табл. 8.13 построен график связи соответственных уровней. Точки располагаются достаточно тесно, и можно графически по полю точек провести прямую связи. Полученная прямая связи может быть использована для восстановления пропусков наблюдений на одном посту по данным другого, для контроля наблюдений и в целях прогноза уровней на нижележащем посту. Например, уровень по верхнему посту 15/VII $H_2 = 250$ см, соответственный ему уровень $H_1 = 320$ см и будет наблюдаться 16/VII; на рис. 8.7 уровень обозначен стрелками.

Связь между соответственными уровнями можно установить методами корреляции.

Упражнение 8.7. Перенесение значений наивысшего уровня вероятностью превышения $H_{1\%}$, рассчитанного по данным многолетних наблюдений, из одного пункта в другой.

Д а н о: 1. График связи соответственных уровней р. Ясной у с. Заречье и с. Крутое за 1958 г. (рис. 8.8).

2. Расход воды р. Ясной — с. Заречье, рассчитанный по данным многолетних наблюдений вероятностью превышения 1%, $Q = 135 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. На участке реки N в пункте A наивысший уровень по многолетним данным $H_{1\%} = 261,73 \text{ м абс}$. Выше по течению на расстоя-

нии $L = 3$ км расположен створ B ; уклон на участке $B - A$ $L = 0,0004$.

Требуется: рассмотреть три метода переноса наивысшего уровня заданной вероятности превышения.

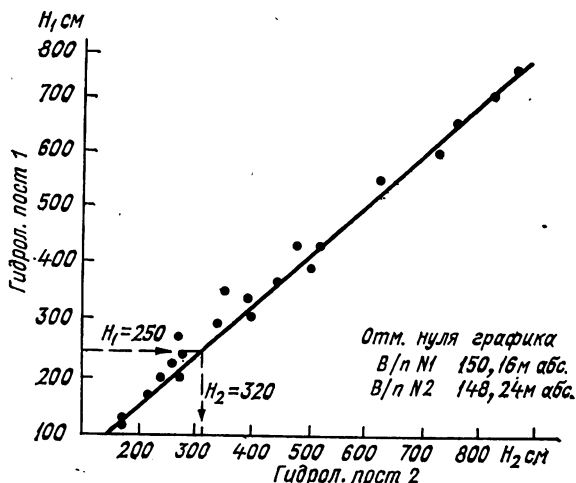


Рис. 8.7. График связи соответственных уровней

Решение: перенесение значения наивысшего уровня расчетной вероятности превышения от створа с длительным рядом наблюдений к другому створу в пределах одного участка произво-

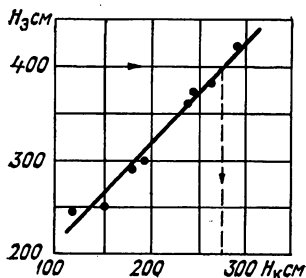


Рис. 8.8. Связь соответственных уровней
р. Ясная — с. Заречье (H_3) и р. Ясная — с. Крутое (H_K)

дится для уровней при свободном состоянии реки в зависимости от протяженности участка, его приточности, уклонов водной поверхности и морфометрии русла тремя методами: а) по кривым расходов воды $Q = f(H)$, б) по кривым связи соответственных уровней воды, в) по уклону водной поверхности.

а. Кривые $Q = f(H)$. Перенос расчетных уровней по кривым $Q = f(H)$ применяется на бесприточных участках при наличии опорного пункта с многолетним рядом наблюдений. На р. Ясной — с. Заречное по данным многолетних наблюдений получен расход воды вероятностью превышения $p = 1\%$, $Q_{1\%} = 135 \text{ м}^3/\text{с}$.

На участке р. Ясной на расстоянии 30 км от опорного пункта с. Заречное открыт временный гидрологический пост. с. Крутое, на котором проводятся параллельные с опорным пунктом наблюдения за уровнем. По данным одновременных наблюдений определены соответственные уровни; на рис. 8.9 представлен их график связи. Используя график, составляется табл. 8.14, в которой выписаны уровни с. Заречье и соответственные им расходы по кривой $Q = f(H)$ (рис. 8.9). Для с. Крутого заносятся уровни, полученные по рис. 8.9, как это указано стрелками.

По данным табл. 8.14 строится кривая $Q_3 = f(H_K)$ (рис. 8.10), которую можно экстраполировать до $Q_{1\%} = 135 \text{ м}^3/\text{с}$ и соответственно определить уровень вероятностью превышения $H_{1\%}$ для поста с. Крутое, который в данном случае равен $H_{1\%} = 294 \text{ см}$.

б. Кривые связи соответственных уровней. Рассматривается

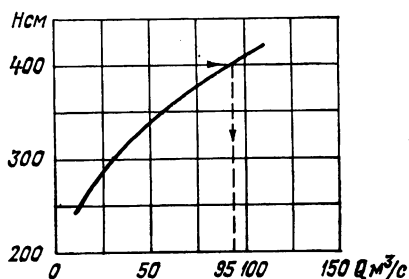


Рис. 8.9. Кривая $Q = f(H)$
р. Ясная — с. Заречье

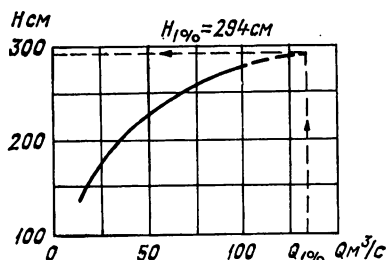


Рис. 8.10. Кривая $Q = f(H_K)$
р. Ясная — с. Заречье

продолжительный период одновременных наблюдений на опорном посту А и посту В; при этом должно быть освещено наблюдениями не менее 80 % многолетней амплитуды в опорном створе. Строится график связи соответственных уровней. Для пункта А определяется

Таблица 8.14

Значение уровней и расходов р. Ясной

с. Заречье		с. Крутое
H_3 см	Q_3 м³/с	H_K см
400	95,0	275
350	60,0	248
300	30,5	180
250	12,8	140

уровень заданной вероятности превышения $H_{1\% А}$ и по графику связи находится соответственный ему уровень $H_{1\% В}$.

в. Уклон водной поверхности. Перенос наивысшего уровня за данной вероятности превышения по уклону водной поверхности производится на участках $L = 1 \div 3$ км по формуле

$$H_{P\%B} = H_{P\%A} \pm IL, \quad (8.34)$$

где $H_{P\%A}$ и $H_{P\%B}$ — расчетные наивысшие уровни вероятностью превышения $P\%$ в опорном пункте A и расчетном пункте B в единой системе отметок; $H_{P\%A}$ — получено по данным многолетних наблюдений; I — уклон водной поверхности между створами A и B ; L — расстояние между пунктами A и B , м.

Если пункт B расположен выше по течению, то второй член формулы (8.34) имеет знак плюс, если ниже — знак минус.

По исходным данным упражнения наивысший уровень в пункте B вероятностью превышения $H_{1\%}$ равен $H_{1\%B} = H_{1\%A} + 0,0004 \cdot 3000 = 262,93$ м абс.

8.5. Оценка репрезентативности ряда наблюдений

Упражнение 8.8. Оценка репрезентативности ряда годового стока.

Дано: 1. Средний многолетний расход р. Ока — г. Калуга за период 1882—1970 гг. при $n = 89$ лет, $Q_0 = 296$ м³/с, $C_0 = 0,26$ и $E_{Q_0} = 2,75\%$.

2. Средние годовые расходы р. Кама — г. Пермь за период 1889—1958 гг. (табл. 8.15).

Таблица 8.15

Отклонения разностной интегральной кривой
модульных коэффициентов
р. Кама — г. Пермь, 1881—1958 гг.

№	Год	Q м ³ /с	$K_t = Q_t/Q_0$	$K_t - 1$	$\sum_{i=1}^t (K_i - 1)$	$\sum_{i=1}^t (K_i - 1)/C_0$
1	2	3	4	5	6	7
0	1880	—	—	—	—	—
1	1881	10,1	1,03	0,03	0,03	0,16
2	1882	11,2	1,15	0,15	0,18	0,35
78	1958	11,5	1,18	0,18	0,00	0,00
Сумма		760,74	78,0			
Среднее		9,76				

Требуется: оценить репрезентативность ряда следующими методами:

1) по относительным средним квадратическим погрешностям:
а) среднего многолетнего расхода E_{Q_0} , б) среднего многолетнего

значения ряда при наличии корреляционной связи стока смежных лет, в) коэффициента изменчивости E_{C_v} ;

2) сопоставления статистических параметров расчетного створа и створа-аналога;

3) применение разностных интегральных кривых стока.

Решение: репрезентативным рядом наблюдений за каким-либо элементом гидрометеорологического режима называется ряд, типично отражающий закономерности изменения этого элемента за рассматриваемый период на данной территории.

Репрезентативность пункта наблюдений изучаемого элемента — это степень представительности пункта с точки зрения отражения условий, характерных для более и менее значительной территории.

После того как на выбранном пункте накоплены данные наблюдений за каким-либо элементом, оценивается репрезентативность этих данных с применением статистических методов.

1а. Продолжительность ряда n для определения среднего значения расходов с заданной точностью рассчитывается по формуле

$$n = C_v^2 \cdot 10^4 / E_{Q_0}^2, \quad (8.35)$$

где C_v — коэффициент изменчивости; E_{Q_0} — заданная точность расчета.

С увеличением коэффициента изменчивости увеличивается число лет наблюдений, необходимое для определения стока с заданной точностью. Предположим, что сток р. Оки у г. Калуги при $C_v = 0,26$ надо рассчитать с заданной точностью $E_{Q_0} = 8\%$, при этом продолжительность ряда наблюдений по формуле (8.35) равна

$$n = 0,26^2 \cdot 10^4 / 8^2 = 11 \text{ лет.}$$

Следует иметь в виду, что ряд для определения более надежного значения среднего многолетнего стока надо увеличивать с учетом влияния многоводных и маловодных периодов.

б. Погрешность средней многолетней величины ряда при наличии корреляционной связи стока смежных лет определится по формуле

$$E_{Q_0} = \frac{100C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}}, \quad (8.36)$$

где r — коэффициент корреляции значений стока смежных лет. Формула (8.36) применяется, если $r > 0,2$.

Вычисление коэффициента корреляции расходов смежных лет р. Оки у г. Калуги производится согласно указаниям упражнения 8.1 с тем только изменением, что в графе 3 табл. 8.4 выписываются значения расходов y в хронологическом порядке начиная с 1882 г., а в графе 4 — значения расходов x со сдвигом на один год, т. е. с 1883 г.

Не приводя расчетной корреляционной таблицы, укажем, что значение коэффициента корреляции расходов смежных лет за пе-

риод 1882—1970 гг. $r = 0,18$. По условию применения формулы (8.36) оценка ряда по ней для данного примера не производится.

в. Относительные погрешности коэффициентов изменчивости E_{C_v} зависят от методов определения коэффициентов C_v . Формула расчета погрешности E_{C_v} , а также оценка их для установления репрезентативности ряда приведены в упражнении 8.4.

2. Метод сопоставления статистических параметров расчетного створа и створа-аналога для оценки репрезентативности ряда заключается в следующем. Устанавливается корреляционная зависимость между расходами расчетного створа и створа-аналога за период одновременных наблюдений. Если коэффициент корреляции $r \geq 0,8$, то можно применять метод сопоставления статистических параметров. Для пункта-аналога по данным за N лет рассчитываются параметры кривых обеспеченности, строится теоретическая кривая с проверкой ее по эмпирическим значениям. Для расчетного створа такие же расчеты и построения производятся за n лет, причем должно быть соблюдено условие $N \gg n$. Если полученные статистические параметры совпадают, период наблюдений n в расчетном створе репрезентативен.

3. Для оценки репрезентативности ряда используются разностные интегральные кривые стока по створу реки-аналога за период 1880—1958 гг. при условии $N > 50$. Рассматриваемый метод используется для выбора из всего имеющегося ряда наблюдений более короткого ряда, репрезентативного как по среднему стоку, так и по коэффициенту изменчивости.

Разностная интегральная кривая характеризует изменения во времени нарастающей суммы (от начала наблюдений в пункте-аналоге) отклонений значений стока Q_{i_a} от его средней многолетней величины Q_{0_a} . При построении разностной интегральной кривой сток удобнее выражать в модульных коэффициентах $K = Q_{i_a}/Q_{0_a}$ или $K = M_{i_a}/M_{0_a}$. Отклонение модульного коэффициента от его среднего значения равно $K - 1$, так как среднее значение за ряд лет равно единице. При построении интегральной

кривой вычисляется нарастающая сумма отклонений $\sum_{i=1}^t (K - 1)$.

За начальный период суммирования можно брать первый год наблюдений (а можно начинать и с другого момента t).

Ординаты интегральных кривых вычисляются по уравнению

$$\sum_{i=1}^t (K_{i_a} - 1) = f(t). \quad (8.37)$$

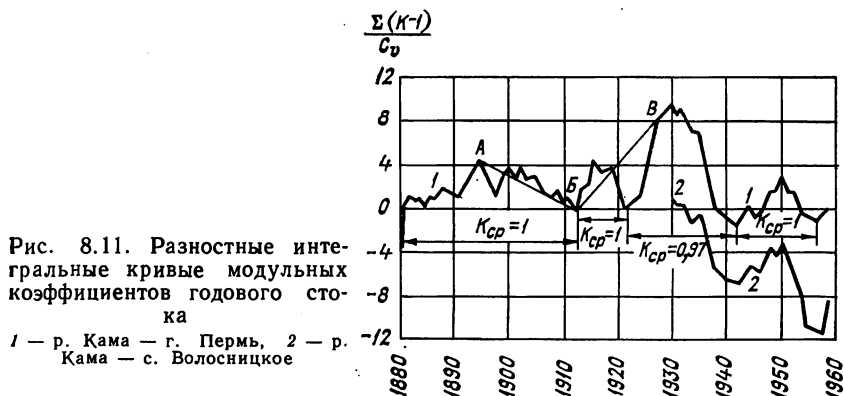
Для исключения влияния на модульные коэффициенты степени изменчивости стока при построении разностных интегральных кривых можно ординаты кривой вычислять по уравнению

$$\sum_{i=1}^t (K_{i_a} - 1)/C_v = f(t). \quad (8.38)$$

Порядок построения разностных интегральных кривых начинается с составления данных по р. Кама у г. Перми табл. 8.15 [12].

Обязательным условием при составлении ряда является его непрерывность, так как в противном случае нарушается представление о циклических колебаниях стока. Если исследуемый ряд стока имеет пропуски, то их обязательно следует восстановить одним из методов, рассмотренных выше.

На рис. 8.11 строится разностная интегральная кривая отклонений от середины модульных коэффициентов $\sum_{i=1}^t (K_i - 1)/C_v = f(t)$. Интегральные кривые имеют следующее свойство: тангенс угла



α , образованного прямой, соединяющей две какие-либо точки интегральной кривой с осью абсцисс, характеризует среднее значение подынтегральной функции за период m лет, заключенный между заданными точками:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sum_{i=1}^{t_2} (K_i - 1) - \sum_{i=1}^{t_1} (K_i - 1)}{m}, \quad (8.39)$$

где t_1 и t_2 — время начальной и конечной ординат интегральной кривой; m — число лет в интервале времени $t_2 - t_1$.

Положение прямой, соединяющей точку кривой с ординатой, соответствующей начальному отсчету t_1 , с точкой конца периода t_2 , характеризует среднюю водность за этот период относительно среднего значения за весь многолетний период. Устанавливается следующая зависимость водности периодов (табл. 8.16) по разностным интегральным кривым в зависимости от разности ординат

$$M = \sum_{i=1}^{t_2} (K_{i_a} - 1)/C_v - \sum_{i=1}^{t_1} (K_{i_a} - 1)/C_v, \quad (8.40)$$

а также наклона прямой, соединяющей точки t_1 и t_2 .

По полученной разностной интегральной кривой производится анализ цикличности колебаний годового стока.

На рис. 8.11 участок разностной интегральной кривой от точки *A* к точке *B* имеет наклон вниз и соответствует маловодной фазе, а участок от точки *B* к точке *B* соответствует многоводной фазе. За весь период водности р. Камы у г. Перми на рис. 8.11 можно выделить четыре полных цикла изменения водности: 1881—1913; 1914—1922; 1942—1956, для которых $K_{ср} = 1,0$, и период 1923—1941 гг. $K_{ср} = 0,97$. Водность каждого из этих периодов близка к водности за весь период наблюдений $N = 78$ лет. Получив такие данные по разностной интегральной кривой, можно сделать вывод о том, что подсчитанные за эти периоды средние расходы близки к норме этого короткого периода.

Таблица 8.16

Характеристика водности периодов, устанавливаемая по разностной интегральной кривой

Характеристика водности периода	M	$K_{ср}$
Маловодный	< 0	< 1
Близкий к среднему	0	1
Многоводный	> 0	> 1

На рис. 8.11 приведена разностная кривая для р. Камы у с. Волосницкого за период 1930—1958 гг. Как видно, период одновременных наблюдений совпадает с циклом по р. Каме у г. Перми с 1942 по 1956 г., за который $K_{ср} = 1,0$.

Глава 9.

9

Использование аэрометодов в гидрометрии.

Сведения о спутниковой информации.

Высокая фотосъемка с берега

Упражнение 9.1. Обработка планшета аэрогидрометрической съемки и определение поверхностных скоростей течения.

Дано: 1. Вспомогательный планшет аэросъемки на участке р. Волхов — д. Буриги (рис. 9.1).

Таблица 9.1

**Бланк вычисления поверхностных скоростей течения
по данным аэрогидрометрических наблюдений**

Река: Волхов
Пункт: д. Буриги

Авиаизмерение № 34
Дата: 27/VIII 1966 г.

1. Интервал времени между рабочими снимками $\Delta t = 97$ с
2. Масштаб аэронегатива 1 : 1000.
Масштаб рабочего планшета 1 : 1000
3. Скорость ветра $w = 3,6$ м/с
Угол между направлением течения и направлением ветра $\varphi = 30^\circ$.
Ветер по течению
4. Тип поплавков: стандартный, ураниновый, размер 40×110 см

№ по- плавка	Проекция вектора поплавка на план- шете мм	Проекция пути поплавка в натуре L_0 м	Поверх- стная скорость течения без учета ветра $v = L_0/\Delta t$ м/с	Расстояние от репера до вертикали		Поправ- ка на ветер $\Delta v =$ $= \Delta v \cos \varphi$ м.с	Поверхно- стная скорость течения с учетом поправки на ветер $v + \Delta v$ м/с
				на планшете, мм	на створе, м		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	19,2	19,2	0,19	14,0	14,0	-0,04	0,15
11	48,0	48,0	0,50	228,2	228,2	-0,04	0,46

2. Бланк вычисления поверхностных скоростей течения (табл. 9.1).

Т р е б у е т с я: 1. Привести пояснения к аэрогидрометрическим работам.

2. Определить проекции пути поплавков и положение искомых поверхностных скоростей течения на створе.

3. Обработать бланк и вычислить: а) поверхностные скорости без учета ветра, б) поправку на ветер, в) поверхностные скорости с учетом поправки на ветер.

Р е ш е н и е: 1. Аэрометоды — совокупность методов исследования гидрологических явлений с фиксацией их в процессе полета (самолета, вертолета, и др.) специальными приборами с последующим анализом и наземной проверкой. Наиболее распространенным методом фиксации является аэрофотосъемка и аэровоздушная разведка.

В последнее время разработаны и внедряются в практику аэрогидрометрических работ методы исследования водосборов и определения их морфометрических характеристик; исследования ветрового влияния на крупных реках, озерах и водохранилищах; определения скорости течения, глубин водотока и расхода воды в реках, запасов воды в снежном покрове, скорости и направления ветра над водной поверхностью, температуры воды на озерах и крупных реках, получения качественных картин распределения мутностей и загрязненности водотоков.

В данном упражнении рассматривается способ измерения поверхностных скоростей течений с самолета, который осуществляется двукратным фотографированием специальных ураниновых поплавков, сбрасываемых с самолета.

Речной ураниновый поплавок представляет собой деревянный цилиндр размером 4×11 см с металлической шайбой на одном из оснований для балансировки, в результате чего он займет в воде вертикальное положение. Над поверхностью воды выступает $1,0-1,5$ см. Боковая поверхность поплавка покрыта уранино-клеевой пастой. На небольших реках на одном снимке можно получить изображение двух берегов реки. Через интервал времени Δt между двумя рабочими снимками можно, пользуясь неподвижными ориентирами, нанести на один из аэроснимков второе положение поплавков и, зная масштаб снимка, измерить путь L_0 . Скорость v_n определится по формуле

$$v_n = L_0 / \Delta t. \quad (9.1)$$

На рис. 9.1 показано положение поплавков после соответствующей обработки аэроснимков (1 и 1', 2 и 2', 3 и 3' и т. д.) и линия створа. Обработка планшета производится в следующей последовательности: а) проводятся векторы движения поплавков 1-1', 2-2' и т. д. и намечаются средние точки векторов $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ и т. д.; б) векторы поплавков проектируются на линии,

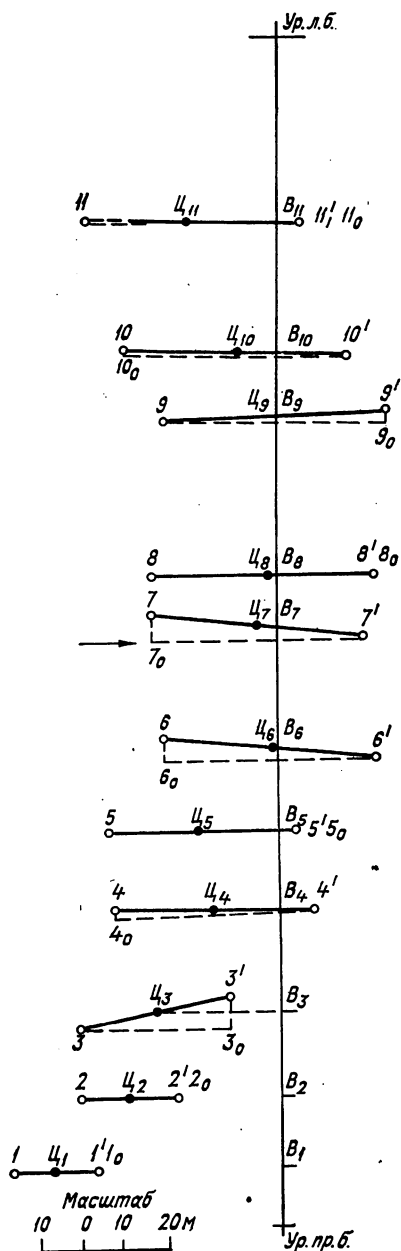


Рис. 9.1. Вспомогательный планшет для определения поверхностных скоростей течения по данным аэрогидрометрических наблюдений р. Волхов — с. Бурига, 27/VIII 1966 г.

пендикулярные створу в точках $3_0, 4_0, 6_0, 7_0, 9_0, 10_0$. Для векторов $1-1', 2-2', 5-5', 8-8'$ и $11-11'$ их проекции совпадают с направлением векторов, так как путь поплавка зафиксирован аэросъемкой в виде перпендикуляра к створу; в) определяются проекции средних точек векторов $Ц_1, Ц_2, Ц_3, \dots$ и т. д. (см. пример для поплавка 3) на линию створа, которые фиксируются в точках B_1, B_2, B_3 и т. д. Эти точки определяют положение вертикалей искомым поверхностных скоростей течения. С рис. 9.1 в графы 2 и 5 табл. 9.1 выписываются значения проекций поплавок $1-1_0, 2-2_0, \dots, 11-11_0$ в миллиметрах и расстояния от репера до вертикали B_1, B_2, \dots, B_{11} ; в графах 3 и 6 эти значения L_0 с учетом масштаба (1 : 1000) приведены в метрах. Измерение проекций и расстояний необходимо производить очень тщательно с точностью до 0,1 м (штангенциркулем или использовать измеритель и поперечный нормальный масштаб с основанием 20 мм).

3. Обработка бланка начинается с контроля записи основных сведений (пункты 1—4 над табл. 9.1). Выписывается время фотографирования, масштаб рабочего планшета, скорость и направление ветра в период аэрогидрометрических работ.

а. Поверхностные скорости без учета ветра вычисляются делением проекции пути L_0 (графа 3 табл. 9.1) на интервал времени между рабочими снимками.

В данном примере для поплавка № 1 $v_1 = 19,2 : 97 = 0,19$ м/с.

б. Поправка на ветер вычисляется по формуле

$$\Delta v = \Delta v_b \cos \varphi, \quad (9.2)$$

где Δv_b — ветровая составляющая скорости перемещения поплавка в воде; φ — угол между направлением течения и направлением ветра.

Поправка Δv вводится при соблюдении следующих правил: 1) если скорость течения $v_{cp} < 0,5$ м/с, 2) при v_{cp} от 0,5 до 1 м/с, если угол $\varphi \leq 60^\circ$, а скорость ветра $w > 2$ м/с, 3) при v_{cp} от 1 до 2,0 м/с, если $\varphi \leq 30^\circ$, а скорость ветра $w > 3$ м/с. Если ветер против течения, поправка имеет знак плюс, если ветер по течению, то поправка имеет знак минус. При $v_{cp} > 2,0$ м/с поправка не вводится.

Ветровая составляющая скорости перемещения Δv_b определяется по графику (рис. 9.2).

Поверхностные скорости течения до 1,0 м/с определены с помощью ураниновых поплавок. При $w = 3,6$ м/с ветровая составляющая скорости перемещения Δv_b по рис. 9.2 составляет 4,4 см/с.

При $\cos 30^\circ = 0,87$ поправка $\Delta v_b = 4,4 \cdot 0,87 = 3,83$ см/с. Округляя и переводя в метры, получаем $\Delta v_b = -0,04$ м/с.

в. Поправка вводится со знаком минус, так как направление ветра по течению. Поверхностная скорость течения с учетом поправки на ветер записывается в графу 8 табл. 9.1.

При расчете расхода воды по поверхностным скоростям следует вводить переходные коэффициенты по указаниям упражнения 3.8.

Если нет возможности определить скорость ветра по анемометру с лодки, можно выбрать ровный свободный от растительности участок берега и установить анемометр на высоте 1 м и вести наблюдения. Если на участке работ имеется широкая пойма и наблюдается трансформация воздушного потока, то определение скорости и направления ветра осуществляется с самолета по специальным ветровым поплавкам.

Ветровой поплавок отличается от поплавков для измерения скорости течения. Поплавок — цилиндр из пенопласта диаметром 150 мм, высотой 70 мм; сверху он покрыт ураниновой пастой.

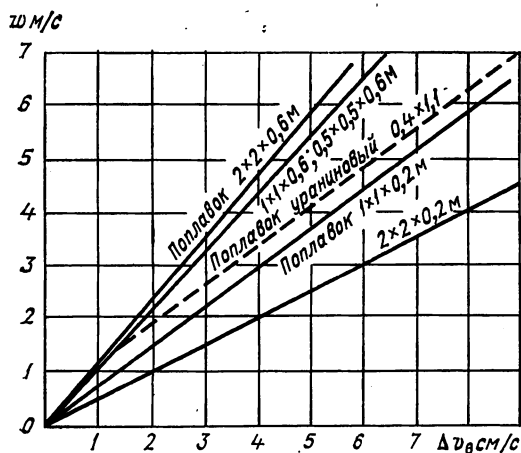


Рис. 9.2. График зависимости $\Delta v_{\text{в}}$ от w и типа поплавков

Сброс ветровых поплавков предшествует сбросу измерительных скоростных поплавков. Линия сброса ветровых поплавков располагается выше сбросочного расстояния. В отличие от измерительных поплавков, равномерно сбрасываемых по ширине реки, ветровые сбрасываются группами по 3—5 штук в зонах, защищенных кустарниками или значительным повышением рельефа.

Лабораторными, а затем поисковыми наблюдениями установлена разность скорости перемещения в потоке двух групп поплавков, имеющих резко отличную друг от друга парусность.

Введены коэффициенты ветрового дрейфа для поплавков E_1 и E_2 , значения которых установлены заранее.

Теоретически обоснована зависимость следующего вида:

$$w = (1 + E_2) v_2 - (1 + E_1) v_1 / (E_2 - E_1), \quad (9.3)$$

где w — вектор скорости ветра; E_1 и E_2 — коэффициенты ветрового дрейфа ($E_1 \ll E_2$); v_1 и v_2 — векторы скорости перемещения поплавков.

Таким образом сущность рассматриваемого способа заключается в определении аэрофотосъемкой скоростей v_1 и v_2 для двух групп поплавков, имеющих резко отличную парусность. Значения ко-

эфициента ветрового дрейфа определены для различных типов поплавков: речной поплавок 0,013; парусный поплавок 0,048.

Для получения параметров ветра должны быть определены характеристики движения пары поплавков, один из которых озерный или речной, а другой — парусный. В лабораторных условиях получено: для озерного поплавок $E = 0,005$, речного $E = 0,013$ и парусного $E = 0,048$.

Формула (9.3) в случае использования речного и парусного поплавков имеет вид

$$\omega = (1,048v_n - 1,013v_p)/0,035. \quad (9.4)$$

Для озерного и парусного поплавков

$$\omega = (1,048v_n - 1,005v_0)/0,043. \quad (9.5)$$

Упражнение 9.2. Определение расхода воды по авиаизмерениям способом двойного интегрирования.

Д а н о: 1. Ширина реки $B = 245$ м, высота съемки $H = 100$ м.

2. Скорость погружения гидробомбы в воду $u_1 = 1,67$ м/с, скорость всплывания масла $u_2 = 0,13$ м/с.

3. Длина наземного базиса 50 м (необходима для вычисления масштаба съемки); скорость падения гидробомбы в воздухе $u_3 = 18$ м/с, масштабы: первой съемки 1 : 2,08; второй съемки 1 : 2,15. Дополнительные данные обработки аэрофотоснимков приведены в табл. 9.2.

Т р е б у е т с я: 1. Изложить сущность способа.

2. Обработать данные аэросъемки и рассчитать расход воды.

Р е ш е н и е: 1. При интеграционном способе измерения расхода воды элементарные расходы определяются непосредственно по измерениям на аэроснимке. Метод применим для открытых русел крупных рек. Точность определения расхода 5—10 %. Интеграционный способ не требует наземного комплекса работ (измерения профиля, установления гидрологического поста).

Желательно заранее разбить на местности базисы и произвести их маркировку для определения масштаба съемок. Сброс гидробомб производится с самолета вручную через определенный интервал времени. Для выполнения аэросъемочных работ интеграционным способом требуется: аэрофотоаппарат, запас гидробомб, сбрасыватель гидробомб и базисные системы для определения масштаба. После сброса бомб самолет на обратном курсе выполняет первую фотосъемку поверхностных поплавков и появившихся на поверхности воды шлейфов всплывающего со дна масла. Затем, пройдя маршрут, разворачивается и производит вторую съемку. С самолета по линии гидроствора сбрасывается гидробомба, которая используется в качестве интегратора скорости от поверхности до дна. После достижения дна из самоустройства (гидробомбы) выходит жидкое соляное масло, которое всплывает на поверхность и яв-

ляется интегратором скорости от дна к поверхности. Исходные данные приведены из работы [25].

На рис. 9.3 точка A — место приведения на поверхности воды устройства, сброшенного с самолета. От этой точки оно погружается

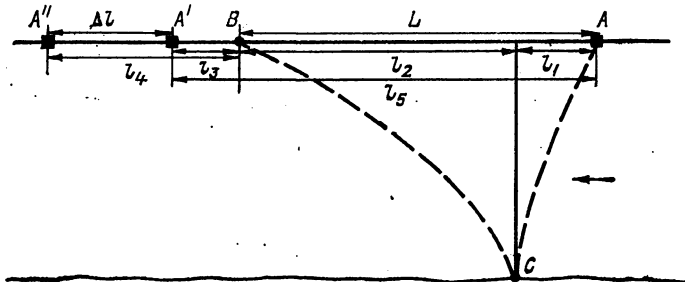


Рис. 9.3. Схема, поясняющая определение расхода воды способом двойного интегрирования

Таблица 9.2
Порядок записи и вычислений к расходу воды,
р. Свирь —

Дата	№ фильма	№ рабочих кадров	№ гидро-бомбы	Момент сброса гидробомбы t_1	Момент	
					первой t_2	
24/IV 1971 г.	9	5—10	1	11 ч 26 мин 02,5 с	11 ч 27 мин 55 с	
			2	11 26 03	11 27 55	
			6	11 26 05	11 27 55	

Таблица 9.3
Расчет расхода воды, измеренного спо
р. Свирь — пос. Харев

№ гидро-бомбы	Δt_1 с	Δt с	Δl м	$v_n = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ м/с	t_4	t_5 м
1	112,5	81	31,1	0,38	11 ч 26 мин 08 с	40,7
2	112,0	81	55,4	0,68	11 26 08,5	72,4
• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •

на дно в точку C со скоростью u_1 в течение интервала времени t' . В точке C устройством в течение некоторого времени выпускается жидкое масло, всплывающее со скоростью u_2 и появляющееся на поверхности воды в точке B .

Скорости u_1 , u_2 и u_3 (погружения гидробомбы, всплытия масла и скорости падения гидробомбы в воздухе) определяются эмпирически в лабораторных условиях; l_1-l_5 (рис. 9.3) определяются расчетами по фотоснимкам (пояснения приведены к табл. 9.2). Расстояние между точками A и B можно определить по формуле

$$L = l_1 + l_2 = \frac{h}{u_1} v_{cp} + \frac{h}{u_2} v_{cp} = q \left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} \right). \quad (9.6)$$

Напомним, что расход на вертикали $q = v_{cp} h$. Формулу (9.6) можно преобразовать следующим образом:

$$q = L(u_1 u_2) / (u_1 + u_2). \quad (9.7)$$

2. Обработка данных аэросъемки производится в табл. 9.2 и табл. 9.3.

измеренному способом двойного интегрирования
пос. Харевщина

съемки	Расстояние от выхода масла до поплавка при первой съемке		Расстояние от выхода масла до поплавка при второй съемке	
	по снимку l_3 мм	в масштабе съемки l_3 м	по снимку l_4 мм	в масштабе съемки l_4 м
второй t_3				
11 ч 29 мин 16 с	17,5	36,4	31,4	67,5
11 29 16	24,5	51,0	49,5	106,4
11 29 16	16,8	35,0	31,8	68,0

сособм двойного интегрирования
щина, 24/IV 1971 г.

L м	q м ² /с	Расстояние от пост. начала, м	Вычисление расхода воды		
			q между вертикалями, м ² /с	расстояние между вертикалями, м	расход между вертикалями $(q_{n-1} + q_n) b_{n-1}^{1/2}$ м ³ /с
4,3	0,52	Ур. п. б. 15			
21,4	2,57	60	0,36	45	16,2
		111	1,54	51	78,8
					Q = 387

Всего было сброшено шесть гидробомб. Из табл. 9.2 видно, что гидробомбы сбрасывались через 0,5 с. Рассмотрим записи для гидробомбы № 1. Первая съемка произведена через 1 мин (52,5 с) после сброса гидробомбы, вторая съемка — через 3 мин 13,5 с. Расстояния от точки B (рис. 9.3) до A' (первая съемка), равное l_3 , и от точки B до A'' (вторая съемка), равное l_4 , по снимкам определены в миллиметрах и с учетом масштабов, приведенных в исходных данных, пересчитаны на расстояния $l_3 = 36,4$ м и $l_4 = 67,5$ м.

В табл. 9.3 значение $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ получено равным $\Delta t_1 = 11$ ч 27 мин 55 с — 11 ч 26 мин 02,5 с = 1 мин 52,5 с = 112,5 с. Значение $\Delta t = t_3 - t_2$ (разность времени между первой и второй съемками) было постоянно и равно 81 с, $\Delta l = l_4 - l_3 = 67,5 - 36,4 = 31,1$ м. Скорость поплавок $v_n = \Delta l / \Delta t = (l_4 - l_3) / \Delta t = 31,1 : 81 = 0,38$ м/с. Расстояние между точками A и A' определяется по формуле

$$l_5 = v_n (t_2 - t_4). \quad (9.8)$$

Момент времени t_4 вычисляется по формуле

$$t_4 = t_1 + H/u_3, \quad (9.9)$$

где t_1 — момент сброса гидробомбы с самолета; H — высота расположения самолета (высота съемки) над поверхностью воды; u_3 — скорость падения устройства в воздухе. Подставляя известные значения из исходных данных и t_1 из табл. 9.3, получаем $t_4 = 11$ ч 26 мин 02,5 с + 100 : 18 = 11 ч 26 мин 02,5 с + 5,5 с = 11 ч 26 мин 08 с.

Значение l_5 по формуле (9.8) равно

$$l_5 = 0,38 (11 \text{ ч } 27 \text{ мин } 55 \text{ с} - 11 \text{ ч } 26 \text{ мин } 08 \text{ с}) = 40,7 \text{ м.}$$

Расстояние между точкой сброса гидробомбы A и точкой появления масла B равно: $L = l_5 - l_3$. Для гидробомбы № 1 $L = 40,7 - 36,4 = 4,3$ м. Расход по данным гидробомбы № 1 на расстоянии 45 м от уреза вычисляется по формуле (9.7) $q_{\text{эл}} = 4,3 \cdot (1,67 \times 0,13) : (1,67 + 0,13) = 0,52$ м³/с.

Полный расход воды вычисляется по известной формуле (4.12)

$$Q = kq_1 b_0 + \frac{q_1 + q_2}{2} b_1 + \dots + kq_n b_n.$$

При этом принимается $k = 0,7$; $q_1, q_2 \dots q_n$ — расходы, рассчитанные для каждой гидробомбы, м³/с; $b_0, b_1, \dots b_n$ — расстояния между местом падения гидробомбы и урезом; расход по формуле (4.12) рассчитан в табл. 9.3 и получен равным $Q = 387$ м³/с.

Точность измерения расхода при двойном интегрировании в общем виде рассчитывается по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_n^2 + (\sigma_B^2 + \sigma_q^2)/n}, \quad (9.10)$$

где σ_Q — средняя квадратическая погрешность измерения полного расхода воды способом двойного интегрирования; σ_n — средняя

квадратическая погрешность, определяемая выбором числа вертикалей в створе n (числа сброшенных гидробомб); σ_B — погрешность определения расстояний между вертикалями; σ_q — погрешность измерения расхода для каждой гидробомбы способом двойного интегрирования.

Расчет погрешности при данном методе определения расхода подробно изложен в [25].

Упражнение 9.3. Оценить погрешность определения скорости течения при авиаизмерении.

Дано: 1. Скорость течения $v = 0,5$ м/с, скорость ветра $w = 5$ м/с, направление ветра совпадает с направлением течения $\varphi = 0^\circ$.

2. Фокусное расстояние аппарата $f_k = 10$ см, высота авиасъемки $H = 500$ м, интервал времени между аэрофотосъемками $\Delta t = 10$ мин.

3. Центр траектории скорости течения 5 см от главной точки аэроснимка, масштаб снимка 1 : 25 000, угол наклона аэроснимка равен 3° (0,051 радиан).

Решение: 1. Относительная средняя квадратическая погрешность определения скорости течения σ_{0v} определяется по формуле

$$\sigma_{0v} = \sqrt{\sigma_{0m}^2 + \sigma_{0d}^2 + \sigma_{0w}^2 + \sigma_{0a}^2}, \quad (9.11)$$

где σ_{0m} — погрешность, которая зависит от определения масштаба съемки и может быть принята равной 2 %, σ_{0d} — точность дешифрирования местоположения поплавка на аэроснимке; вычисляется по формуле

$$\sigma_{0d} = 0,0002m/(v\Delta t), \quad (9.12)$$

где m — знаменатель численного масштаба аэроснимка; v — скорость течения; Δt — время между аэрофотоснимками. Подставляя известные значения, получаем: $\sigma_{0d} = 0,0002 \cdot 25\,000 : (0,5 \cdot 10) = 0,01$ (1 %); σ_{0w} — погрешность за счет скорости ветра. Приближенно можно определить по формуле

$$\sigma_{0w} = 0,001w/v, \quad (9.13)$$

где w — скорость ветра; для данного примера $\sigma_{0w} = 0,001 \cdot 5 : 0,5 = 0,01$ (1 %);

σ_{0a} — погрешность, связанная с наклоном планового аэроснимка. Вычисляется по формуле

$$\sigma_{0a} = 1,3\gamma d/f_k, \quad (9.14)$$

где γ — угол наклона аэроснимка; f_k — фокусное расстояние; d — расстояние от главной точки аэроснимка, по отношению к которому выполнено трансформирование, до точки, соответствующей середине траектории смещения поплавка в масштабе снимка. Для данного примера $\sigma_{0a} = 1,3 \cdot 0,051 \cdot 5 : 10 = 0,03$ (3 %).

Подставим полученные значения погрешностей в формулу (9.11)
 $\sigma_{0v} = \sqrt{4 + 1 + 1 + 9} = 4 \%$.

Упражнение 9.4. Определение глубины реки с самолета с применением буйковых систем.

Дано: исходные данные приведены в табл. 9.4 [25].

Требуется: 1. Пояснить сущность метода.

2. Рассчитать глубину по измерениям с самолета с применением буйковых систем.

Решение: 1. Для определения глубины реки с самолета применяется специальное устройство — буйковая система, состоящая из груза (якоря), к которому прикреплены на прочных нитях (нити из лавсана сечением 0,2 мм) два буя. Длины нитей S_1 и S_2

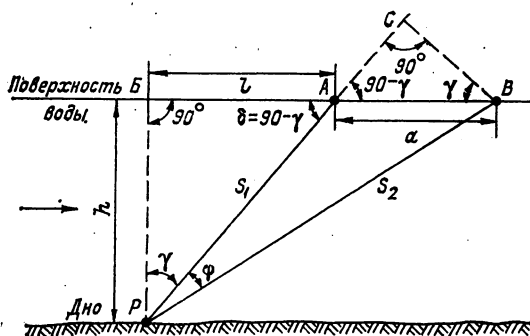


Рис. 9.4. Схема установки буйковой системы в потоке

известны (рис. 9.4). Длина короткой нити S_1 должна превышать глубину h . Буи цилиндрической формы изготавливаются из пенопласта плотностью $\rho = 0,2 \text{ г/см}^3$. Буи снабжаются парашютами и красителем для дешифрирования их на снимках. Буйковая система сбрасывается с самолета на дно и специальное приспособление освобождает оба буя, которые всплывают на поверхность воды и занимают некоторое равновесное положение. В этот момент производится аэрофотосъемка с регистрацией высоты фотографирования.

На рис. 9.4 точки A и B — всплывшие буи; P — местоположение груза. Предполагается, что точки A , B и P находятся в одной вертикальной плоскости. Расстояние a между нитями S_1 и S_2 может быть определено по формуле

$$a = a' f_k / H = a' M, \quad (9.15)$$

где a' — измеренное на аэроснимке расстояние между изображениями поплавков, мм; f_k — фокусное расстояние объектива аэрофотографического аппарата (АФА); H — высота фотографирования; M — знаменатель численного масштаба аэрофотосъемки. По данным S_1 , S_2 и a можно определить глубину h в точке P и расстояние $l = AB$.

Значение l необходимо для нанесения на аэроснимок точки измерения глубин P' , для этого вычисляется отрезок

$$l' = lH/f_k = l/M \quad (9.16)$$

и откладывается на аэроснимке от точки A по линии AB в сторону, обратную направлению течения.

При организации определения глубин с самолета с применением буйковых систем необходимо обеспечить точность измерения, которая зависит от двух параметров $K_S = S_2 : S_1$ и $z = h : S_1$. На основании опыта гидрометрических работ с применением аэро-съемки предлагаются следующие рекомендации: 1) значение K_S должно быть от 2 до 3; 2) значение z должно быть не менее 1 : 2 и не более 1,0 : 1,5; 3) аэрофотосъемку следует проводить в масштабе не мельче 1 : 2000—1 : 2500.

Для определения l и h применяются следующие формулы:

$$h = \frac{1}{2a} \sqrt{4S_1^2 S_2^2 - (S_1^2 + S_2^2 - a^2)^2}, \quad (9.17)$$

$$l = \sqrt{S_1^2 - h^2} = \sqrt{S_2^2 - h^2} - a. \quad (9.18)$$

Пример вычисления h и l по формулам (9.17) и (9.18) приведен в табл. 9.4.

Таблица 9.4
Вычисление h и l с применением буйковых систем

Исходные данные			
f_k	200,3 мм	S_1	9,00 м
H	255 м	S_2	18,00 м
a'	8,95 мм		
Вычисления			
$M = f_k : H$	1 : 1273	$2a$	22,8
$a = a' M$	11,4 м	h	7,51
S_1^2	81	h^2	56
S_2^2	324	$S_1^2 - h^2$	25
a^2	130	$S_2^2 - h^2$	268
$S_1^2 + S_2^2 - a^2$	275	$\sqrt{S_2^2 - h^2}$	16,4 м
$(S_1^2 + S_2^2 - a^2)^2$	75 625	l	5,0 м
$4 S_1^2 S_2^2$	104 976		

Упражнение 9.5. Использование спутниковой информации в гидрологических исследованиях.

Д а н о: 1. Изменение кромки льда Ладожского озера весной 1974 г. (рис. 9.5).

2. Данные к вычислению скорости дрейфа льдов (табл. 9.5).
Требуются: 1. Привести общие сведения о спутниковой информации.

2. Рассчитать скорость дрейфа льдов.

Решение: 1. В настоящее время в учебной гидрометрической литературе еще мало сведений о применении нового метода исследований, связанного с обработкой информации, которую

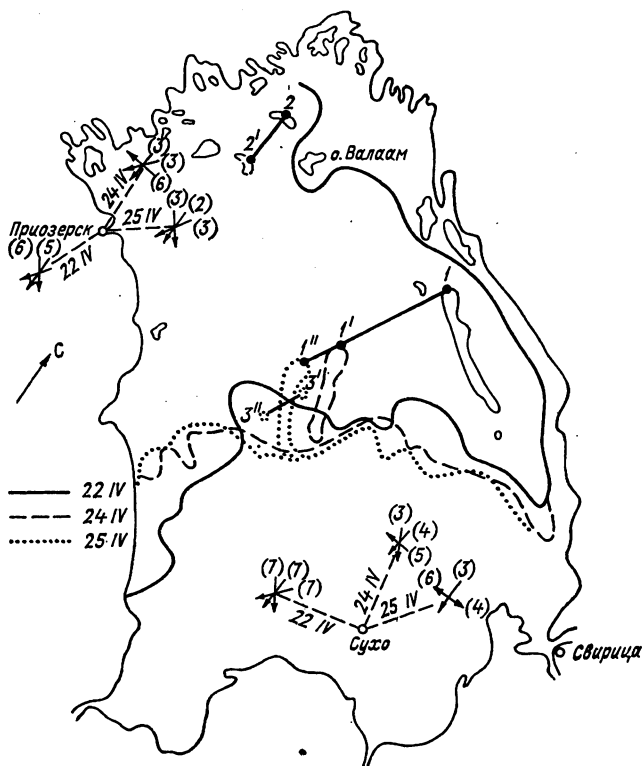


Рис. 9.5. Изменение кромки плавучих льдов и положения ледяных полей на Ладожском озере за три дня весной 1974 г. по данным ТВ съемок и ИСЗ «Метеор»

можно получить на основании дешифрирования телевизионных снимков (ТВ) с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Ниже приводятся некоторые сведения по этому вопросу из работы [7]. Возможность использования спутниковых данных зависит от технических параметров съемочной системы. Экспериментальные спутники системы «Метеор» запускаются с высокоточной съемочной аппаратурой на орбиты высотой 600—900 км. Телевизионная и инфракрасная съемка с ИСЗ выполняется и передается на Землю в режиме непосредственной передачи НП или запоминания и после-

дующей передачи ЗУ (запоминающее устройство). Наибольшую оперативность обеспечивают съемочно-передающие системы НП. При этом съемка и передача производится непрерывно и информация с ИСЗ может быть получена на любом пункте приема в зоне радиовидимости, оборудованном соответствующей аппаратурой приема (МСУ—М — многозональное сканирующее устройство малого разрешения).

Режим ЗУ предназначен для районов, расположенных вне видимости установок МСУ—М. Автоматически съемка выполняется и передается в момент прохождения спутника в зоне радиовидимости приемного пункта.

Телевизионная съемка выполняется в видимом участке спектра. Масштаб передаваемых изображений 1 : 10 000 000 и 1 : 15 000 000. Каждый кадр при покадровой съемке захватывает участок местности около 500 × 500 км. Фотоизображения с МСУ—М получаются в виде черно-белых негативов и фотоотпечатков.

Информативность — т. е. количество отличительных признаков объекта — определяется физико-техническими характеристиками канала передачи информации от объекта к дешифровщику, в который входят следующие элементы: а) источник сообщений или объект, изучающий или отражающий световую энергию; б) составные световых волн в различных интервалах спектра, являющихся переносчиком сигналов; в) система приема и усиления сигналов на спутнике; г) радиопередатчик спутник — Земля; д) атмосфера как источник шумов по пути радиосигналов от спутника к Земле; е) система приема регистрации и воспроизведения видеосигнала.

Таблица 9.5

Результаты вычисления скоростей дрейфа льдов на Ладожском озере в апреле 1974 г.

Дата	Траектория	Длина вектора в натуре L_0 , м	Время съемки ч мин	Интервал времени Δt с	Скорость $v_D = L_0/\Delta t$ м/с
22—24/IV	1—1'	33 000	12 46	172 320	0,19
	2—2'	16 000	12 38	172 320	0,09
	1'—1"	11 000	12 35	86 120	0,13
24—25/IV	3'—3"	13 000		86 120	0,15

Земная поверхность на снимках отображается в черно-темно-серых, светло-серых и близких к белому тонам. Тональность снимков связана с облачностью, «окнами прозрачности атмосферы», наличием водных акваторий и др., что требует специальной разработки и методов дешифрирования.

Для изучения элементов гидрологического режима по спутниковым снимкам нужны многократные съемки района с заданной повторностью. Современная система «Метеор-2» обеспечивает частоту

съемки один-два раза в сутки, что очень важно, особенно в период схода снежного покрова (весеннего половодья) и других гидрологических явлений. Спутниковая информация, как никакой другой метод исследований, дает большую обзорность.

На снимке появляется изображение водосбора реки с границей всего водораздела довольно крупных рек или площадь зеркала моря или озера. В гидрологии разрабатываются новые методы изучения таких объектов, так как ранее изучение водных объектов было основано на точечных методах наблюдений или трудоемких маршрутных исследованиях.

Ниже приведен перечень использования спутниковой информации в СССР и за рубежом для качественных и количественных оценок следующих явлений:

- 1) оценка разливов и затоплений;
- 2) определение ледовой обстановки на озерах;
- 3) картирование снежного покрова и определение его состояния;
- 4) картирование границ снежного покрова с оценкой его точности;
- 5) определение высоты снежного покрова;
- 6) расчеты и моделирование стока;
- 7) определение уровня грунтовых вод, химическое их состояние;
- 8) определение температуры, мутности, химического и термического (связанного со сбросом сточных вод) загрязнения водных объектов;
- 9) в районах прозрачных вод возможность определения рельефа дна и глубины воды.

В настоящее время не все из перечисленных задач нашли точное методическое решение, но постановка их по проводимым отдельным экспериментам дает широкие возможности для развития этих работ в ближайшем будущем.

Одна из главных задач использования спутниковой информации — получение текущих режимных характеристик водных объектов и водосборов для обеспечения народного хозяйства и составления гидрологических прогнозов. В оперативной гидрологии рассматриваются два основных вопроса: а) сбор и передача данных наземных наблюдений, б) получение сведений о текущем состоянии водных объектов и территорий.

а. Для сбора и передачи данных наземных наблюдений в США и Канаде разработана система передатчик ДКП — наземная станция, оборудованная для автоматического измерения гидрометеорологических элементов; система устанавливается на Земле и имеет антенну для передачи результатов на ИСЗ. Гидрологические ДКП устанавливаются в удаленных труднодоступных местах и работают в течение полугода. На ИСЗ передаются результаты измерений: уровня воды, температуры, мутности, рН, содержания кислорода, скорости течения, скорости ветра, влажности, атмосферного давления. Регистратор ДКС — система для сбора данных с ДКП на ИСЗ и последующей их передачи в центр обработки. ДКС может работать в системе НП и ЗУ.

б. Полученные сведения в дальнейшем обрабатываются для оперативного обслуживания в виде карт и схем, отражающих состояние гидрографической сети и водность в различные фазы режима.

Составленные карты дают возможность получить данные об изменении состояния водных объектов, тепловом и водном режиме водосборов, состоянии ледового и снежного покрова, растительности и изменений, связанных с деятельностью человека.

Следует отметить, что высокая оперативность получения сведений по спутниковой информации (два раза в сутки) дает возможность повысить детальность гидрологических исследований.

В СССР в настоящее время наиболее подробно разработана методика использования спутниковой информации при изучении атмосферных явлений и составлении прогнозов погоды, а из гидрологических исследований — оценки ледовых условий озер и водохранилищ, а также картирование снежного покрова, используемого при составлении гидрологических прогнозов фаз и объемов весеннего половодья.

2. Приведем пример использования спутниковой информации из работы [8].

По данным спутника на рис. 9.5 приведены границы (по условным обозначениям) кромки плавучих льдов на Ладожском озере. Для метеостанций Сухо и Приозерск нанесены розы ветров за трое суток с указанием (в скобках) скоростей ветра в м/с. Розы ветров показывают, что южное и юго-западное направление ветра достаточно устойчиво.

Кроме границ плавучих льдов, на озере отмечено скопление ледяных полей на 22, 24 и 25/IV. Как видно, дрейф ледяных полей увязан с направлением ветра по метеостанциям. Происходит уплотнение границы ледяных полей, и деформация ее увязана с преобладающим направлением ветра в южном и юго-западном направлении. По данным плана, полученным с ИСЗ, можно определить скорость дрейфа льдов. В табл. 9.5 приведены, согласно рис. 9.5, траектории дрейфа и соответствующие им длины векторов с учетом масштаба съемки. По записям времени съемок определяется интервал времени Δt . Для периода 22—24/IV $\Delta t = 172\ 800 - 480 = 172\ 320$ с и для периода 24—25/IV $\Delta t = 86\ 400 - 180 = 86\ 120$ с.

Скорость дрейфа льда по трем скоплениям вычисляется по формуле

$$v_{др} = L_0 / \Delta t. \quad (9.19)$$

В табл. 9.5 по полученным значениям L_0 и Δt вычислены скорости дрейфа льда, которые имеют большое практическое значение.

Упражнение 9.6. Пример дешифрирования ледовой обстановки по данным спутниковой информации.

Д а н о: три снимка Ладожского озера по состоянию на 24/IV 1974 г. (рис. 9.6).

Т р е б у е т с я: рассмотреть условия ледовой обстановки.

Р е ш е н и е: на рис. 9.6 представлена ледовая обстановка по трем съемкам в один день (синхронные снимки).

По увеличенным отпечаткам телевизионных снимков больших озер (площадью > 5000 км²) хорошо дешифрируется береговая ли-

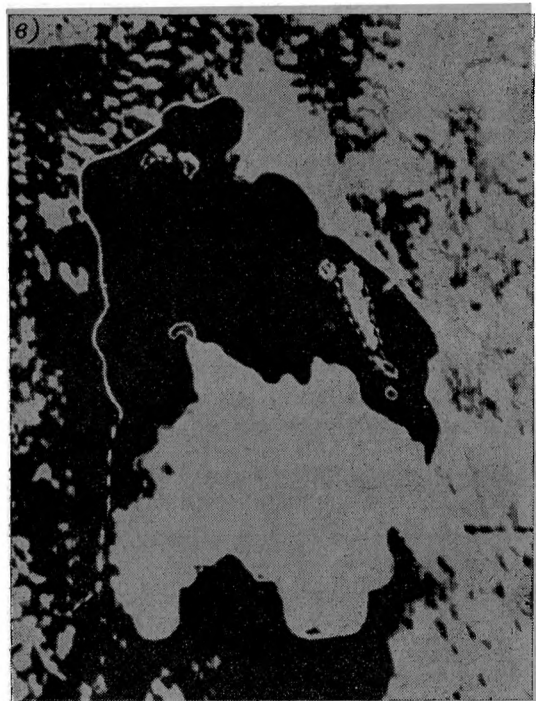
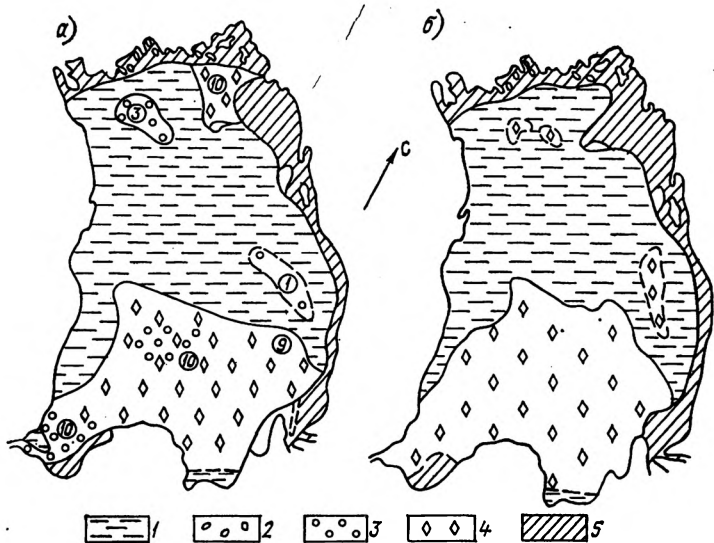


Рис. 9.6. Ледовая обстановка на Ладожском озере 24/IV 1974 г

a — по данным ледовой разведки; *б* — по ТВ изображению; *в* — ТВ снимок с ИСЗ «Метеор»

1 — чисто, 2 — мелкобитый лед, 3 — крупнобитый лед, 4 — малые ледяные поля, 5 — ледяной покров (заснеженный)

ния и неоднородности изображения поверхности. Последние сложнее интерпретировать, выделить в этом изображении те или иные ледовые явления, которые могут иметь одинаковую структуру изображения.

Для точного прочтения таких снимков следует установить дешифровочные признаки ледовых образований, что достигается сопоставлением материалов съемок, выполненных в один день по ледовым авиаразведкам, телевизионным снимкам и снимкам с ИСЗ.

На Ладожском озере по трем снимкам, приведенным на рис. 9.6, такое сопоставление позволяет более точно установить ледовые явления. Береговая линия на рис. 9.6 в достаточно четко выявлена, т. е. дает генерализованный контур. На рис. 9.6 а и б линия берега детализирована. Полоса припая хорошо выявлена, совпадает по снимку и авиаразведка вдоль северного и восточного побережья, в то время как на снимке ИСЗ эта линия смыта. Хорошо на всех трех снимках видна граница чистой воды, достаточно ясно выделяется место ледяных полей в зоне чистой воды. На рис. 9.6 а и б в южной части озера — малые ледяные поля, на рис. 9.6 в эта площадь изображена без детализации размытым светло-серым изображением. По тону изображения снимка с ИСЗ хорошо дешифрируются два вида поверхности: вода и ледяной покров. По данным обработки большого количества синхронных снимков удалось установить дешифровочные признаки [25] для озер различной площади (табл. 9.6 и 9.7).

Изображение Ладожского озера на рис. 9.6 в состоянии «чисто» — по табл. 9.6 и 9.7 расшифровывается четко: текстура — темный тон изображений; ледяные поля, битый лед — однородный светло-серый тон, белесый тон, текстура зернистая с пятнами.

Таблица 9.6

Дешифровочные признаки ледовой обстановки на озерах и водохранилищах по телевизионным изображениям ИСЗ «Метеор»

Ледовая обстановка	Дешифровочные признаки
Озера площадью > 5000 км ²	
Чистая вода	Прямые демаскирующие признаки: тон, структура и рисунок изображения
Ледяные поля	Темный тон изображения
а) разрезанные (менее 7 баллов)	Темно-серый неоднородный тон. Пятнистый рисунок изображения (пятна темно-серого и темного тона)
б) сплоченные (более 7 баллов)	Серый неоднородный тон с размытыми пятнами темно-серого тона
Ледяной покров	Достаточно однородный серый тон
а) малозаснеженный	Однородный светло-серый и белесый тон
б) заснеженный	

Таблица 9.7

Изменение текстурно-структурных характеристик озер на спутниковых телевизионных изображениях в период вскрытия

Размер объектов	Сезон и стадия вскрытия					
	Зима	Весна				Лето
	заснеженный ледяной покров	вода на льду, лед	ледяные поля, битый лед	разнооб- разная ледовая обста- новка	отдельные ледяные поля	чисто
Большие озера площадь более 5000 км ²	Текстура матовая белая	Текстура полуматовая, серая, с переходами к пятнистому рисунку	Текстура зернистая с пятнами	Сложная структура	Текстура матовая, темная, с пятнами	Текстура матовая, черная, или темно-серая

Упражнение 9.7. Определение поверхностной скорости течения по плавущим предметам по материалам высотной фотосъемки с берега.

Д а н о: 1. Перспективный планшет с двух рабочих снимков (рис. 9.7).

2. Бланк вычисления поверхностных скоростей течения, (табл. 9.8 с сокращением).

3. Скорость, измеренная вертушкой на расстоянии 20 м от уреза, 0,16 м/с.

Т р е б у е т с я: 1. Определить прямоугольные фотограмметрические координаты двух положений поплавков и урезов по координатной сетке перспективного планшета.

2. Перевычислить фотограмметрические координаты в плоские прямоугольные координаты (в местной системе координат).

3. Определить проекции пути поплавков и положение вертикалей.

4. Вычислить поверхностные скорости течения с учетом поправок на ветер.

Р е ш е н и е: в периоды паводков, сильных ледоходов, когда измерять расходы воды обычными методами трудно, применяются способы измерения скоростей фотографированием поплавков, сброшенных с самолетов, или плавущих предметов. **В ы с о т н о й с ъ е м к о й** называется фотографирование, которое выполняется с высотных наземных пунктов. Фотографирование плавущих по реке предметов (которыми могут быть льдины, бревна и т. д.) на выбранных створах производится специальной фотоустановкой, расположенной в точке S на высоте от уреза воды $H = SS_0$ (рис. 9.7).

Перед началом фотографирования фиксируется конструктивный угол установки α , который определяет наклон оптической оси объектива фотоаппарата относительно отвесной линии SS_0 .

Таблица 9.8

Бланк вычисления поверхностных скоростей течения по плавущим предметам при высотной фотосъемке с берега

Река: Волхов

Пункт: д. Буриги

Дата: 19/VII 1966 г.

Измерение № 3

Расчетный уровень воды над нулем

графика $H_p = 1751$ см

Высота фотоустановки над урезом

 $H = 9,62$ м

Время съемки: 10 ч 30 мин

Интервал времени $\Delta t = 94,2$ сШирина реки $B = 304,5$ мСредняя скорость ветра $w = 3,3$ м/сНаправление ветра $\varphi = 30^\circ$ Тип поплавок: бревна размером $1 \times$ $\times 1 \times 0,2$ м

Фокусное расстояние фотоаппарата

 $f_k = 210$ ммКонструктивный угол установки $\alpha =$ $= 67^\circ 46'$; $\sin \alpha = 0,9257$; $\cos \alpha =$ $= 0,3783$; $f_k \cos \alpha = 79,14$ мм

№ поплавка	Положение поплавка	Фотограмметрические координаты		$\operatorname{tg} \eta = y/f_k$	η	$\alpha + \eta$	$\operatorname{tg}(\alpha + \eta)$	$y = H \operatorname{tg}(\alpha + \eta)$ м
		x мм	y мм					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ур. л. б.		0,0	78,9	0,3757	20°35	88°21'	33,74	324,579
		0,0	-12,5	-0,0595	-3 24	64 22	2,0841	20,049
Ур. пр. б.	1	-71,1	33,7	0,1605	3 07	76 23	4,2972	41,34
	2	0,9	31,3	0,1519	8 38	76 24	4,1335	39,76
.....
13	1	-60,5	76,5	0,3643	20 01	87 47	26,03	250,41
	2	-14,8	77,0	0,3617	20 08	87 54	27,27	262,39

$y \sin \alpha$ мм	$m_x = \frac{H}{f_k \cos \alpha - y \sin \alpha}$	$x = m_x \cdot x$ мм	Проекция поплавок L_0 м	Поверхностная скорость течения $v = L_0/\Delta t$ м/с	Положение вертикалей, м	Поправки на ветер Δv м/с	Скорость течения с учетом ветра $v + \Delta v$ м/с
10	11	12	13	14	15	16	17
31,30	0,199	-14,15	14,32	0,15	40,6	-0,04	0,11
29,53	0,193	0,17					
70,82	1,116	-67,32	50,07	0,53	251,4	-0,04	0,49
71,28	1,179	-17,45					

Значение угла α рассчитывается с учетом фокусного расстояния аэрофотоаппарата и формата снимка так, чтобы урезы воды A и R на перспективном снимке a и r были не ближе чем в 1 см от контура, ограничивающего снимок. Угол γ является углом визирования на дальнюю точку R по створу AR . Значение $\text{tg} \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right)$ не должно превышать 25,0—30,0, что обеспечивает требуемую точность и больший охват местности. Положение объектива над урезом воды H (с учетом высоты берега) должно быть точно определено с использованием нивелира или теодолита. Чем шире реки, тем больше

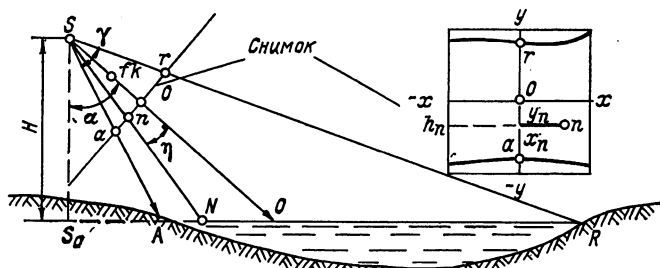


Рис. 9.7. Схема выполнения перспективной высотной фотосъемки с берега

высота H . Предельная высота фотографирования с берега должна быть не более примерно 25 м. При фотографировании необходимо получить два рабочих снимка, которые фиксируют два положения плавущего предмета через интервал времени Δt . Таким образом, получив смещение плавущего поплавка за Δt , можно получить поверхностную скорость.

Следует отметить, что, как показал опыт работы, погрешность определения пути перемещения поплавков при ширине реки до 1000 м не превышает 1 м у дальнего берега. Погрешности определения ширины реки и положения вертикалей у дальнего берега могут быть 3—5 м, а при ширине реки более 1000 м — порядка 10—12 м.

Первичная обработка данных фотографирования производится по негативам и заканчивается получением перспективного планшета, на котором нанесены идентичные точки первого и второго положения поплавков в масштабе фотограмметрических координат (рис. 9.7). В данном упражнении рассмотрен пример обработки данных высотной фотосъемки с берега, начиная с построения перспективного планшета до получения значения поверхностных скоростей.

Приступим к выполнению упражнения.

1. Для двух положений каждого поплавка определяются фотограмметрические координаты x и y по сетке перспективного планшета (рис. 9.7). На перспективном планшете проведены: главная

горизонталь (3—4), которая принимается за ось x , и главная вертикаль (1—2), которая принята за ось y . Главная точка снимка O принимается за начальную точку фотограмметрической прямоугольной координатной сетки планшета. Положительные значения абсцисс берутся вправо от главной точки снимка, а положительные значения ординат — вверх от главной точки снимка. Планшет может быть построен на миллиметровой бумаге со сторонами размером 20 см (планшет приведен с сокращением). Каждая сторона планшета может быть дополнительно разделена промежуточными координатами линиями через 20 мм. Определение фотограмметрических координат x и y в мм производится измерителем по нормаль-

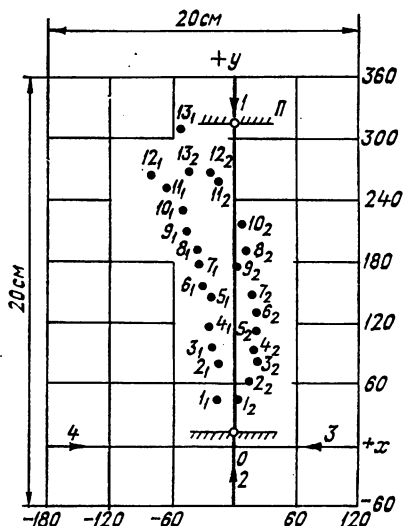


Рис. 9.8. Перспективный планшет с идентичными точками первого и второго положения поплавков по данным береговой высотной фотографии

р. Волхов — д. Буринги, 19/VII 1966 г.

ному поперечному масштабу (с основанием 2 мм) с точностью до 0,1 мм и записывается с учетом знака в графы 3 и 4 табл. 9.9. Для уезов правого и левого берегов фотограмметрические координаты приведены только для оси y .

2. Пересчет фотограмметрических координат в плоские прямоугольные в местной системе координат производится согласно схеме на рис. 9.8. За начальную точку системы плоских прямоугольных координат принимается S_0 — проекция точки съемки на уровенную поверхность, совпадающую с поверхностью воды в реке. Ось y выбирается по линии S_0AOR , ось x — перпендикулярна к оси y . Намечаем на линии створа точку N , на снимке (рис. 9.8) эта точка обозначена n . Для этой точки надо определить ординату y_n и абсциссу x_n в принятой местной системе координат. Ордината точки y_n в метрах определяется по формуле

$$S_0N = y_n = H \operatorname{tg}(\alpha + \eta), \quad (9.20)$$

где H — высота съемки над урезом, м; α — конструктивный угол

установки; η — вспомогательный угол; $(\alpha + \eta)$ — алгебраическая сумма углов.

Вспомогательный угол η может быть вычислен по фотограмметрической ординате данной точки и фокусному расстоянию объектива по формуле

$$\operatorname{tg} \eta = y_n / f_k. \quad (9.21)$$

Знак угла η_n определяется знаком ординаты y_n .

Приведем пример расчета ординаты y для уреза правого берега. Как видно, в графе 4 табл. 9.8 значение фотограмметрической ординаты уреза правого берега со знаком минус равно $-12,5$ мм. Значение $\operatorname{tg} \eta$ по формуле (9.21) равно: $-12,5 : 210 = -0,0595$ и значение угла $\eta = -3^\circ 24'$.

Конструктивный угол α по исходным данным равен $67^\circ 46'$, алгебраическая сумма $\alpha + \eta = 67^\circ 46' + (-3^\circ 24') = 64^\circ 22'$ и $\operatorname{tg} 64^\circ 22' = 2,0841$. Итак, $y = 9,62 \cdot 2,0841 = 20,049$ м.

Аналогично произведены расчеты ординат для всех поплавок в графах 4—9 табл. 9.8.

Для определения абсциссы x_n данной точки n в местной системе координат используется свойство горизонталей перспективного снимка. Значение масштаба m_x вдоль данной горизонтали определяется по формуле

$$1/m_x = (f_k \cos \alpha - y \sin \alpha) / H. \quad (9.22)$$

Из формулы (9.22) получим

$$m_x = H / (f_k \cos \alpha - y \sin \alpha). \quad (9.23)$$

Абсцисса x_n может быть получена по формуле

$$X_n = m_x x, \quad (9.24)$$

где x — фотограмметрическая абсцисса.

В графах 10—12 табл. 9.8 произведен пересчет фотограмметрических координат x мм в абсциссы местной системы координат x по формулам (9.22) и (9.23) по известным значениям H , y , f_k , $\cos \alpha$ и $\sin \alpha$. Вычисления не требуют дополнительных пояснений. Следует иметь в виду, что расчеты необходимо производить с точностью, указанной в табл. 9.8.

3. Проекции пути поплавок L_0 равны алгебраическим разностям абсцисс второго и первого положений каждого поплавка и вычисляются по формуле

$$L_0 = x_2 - x_1, \quad (9.25)$$

где x_2 — абсцисса второго положения поплавка; x_1 — абсцисса первого положения поплавка.

Например: по табл. 9.8 графа 12 для первого поплавка $L_0 = 0,17 - (-14,15) = 14,32$ м.

4. Средние поверхностные скорости течения без учета поправки на ветер приведены в графе 14 табл. 9.9. Для первого поплавок $v_1 = 14,32 : 94,2 = 0,15$ м/с.

Поправка на ветер вычисляется исходя из указаний упражнения 9.1 по следующим данным: $w = 3,3$ м/с; $\varphi = 30^\circ$. При ветре по течению для поплавков размером $1 \times 1 \times 0,2$ м по рис. 9.2 $\Delta v_b = 4,5$ см/с, тогда $\Delta v = \Delta v_b \cos \varphi = 4,5 \cdot 0,87 = 3,9$ см/с = $-0,04$ м/с. Поверхностная скорость, полученная с введением поправки на ветер, указана в графе 17 табл. 9.9.

Значения поверхностных скоростей, полученные по данным фотосъемки с берега и измерениям вертушкой, близки между собой (см. п. 3 исходных данных).

Упражнение 9.8. Определение конструктивного угла фотоустановки α при производстве высотной фотосъемки с берега.

Д а н о: 1. Ширина реки $B = 310$ м, высота фотоустановки над урезом $H = 15,7$ м, фокусное расстояние объектива $f_k = 210$ мм.

2. Фотограмметрические координаты урезом, полученные при обработке нескольких фотоснимков, — правого берега $L_n = +2,5$ мм, левого берега $L_n = +65,3$ мм.

Т р е б у е т с я: 1. Вычислить вспомогательные углы η_n и η_n .

2. Определить конструктивный угол фотоустановки α .

Р е ш е н и е: 1. Вспомогательные углы η_n и η_n вычисляются по формуле (9.21).

Для уреза правого берега $\operatorname{tg} \eta_n = 2,5 : 210 = 0,01190$; соответственно $\eta_n = +0^\circ 4'$. Для уреза левого берега $\operatorname{tg} \eta_n = 65,3 : 210 = 0,31095$; $\eta_n = 17^\circ 16'$.

2. Для определения конструктивного угла α необходимо знать ширину реки, высоту фотоустановки над урезом и значения вспомогательных углов η_n и η_n .

По перечисленным значениям α определяется из формулы

$$\cos [2\alpha + (\eta_n + \eta_n)] = \frac{2H}{B} \sin (\eta_n - \eta_n) - \cos (\eta_n - \eta_n). \quad (9.26)$$

Для данного примера имеем: $\eta_n + \eta_n = 0^\circ 4' + 17^\circ 16' = 17^\circ 57'$; $\eta_n - \eta_n = 17^\circ 16' - 0^\circ 4' = 16^\circ 35'$; $\sin (\eta_n - \eta_n) = \sin 16^\circ 35' = 0,28541$; $\cos (\eta_n - \eta_n) = \cos 16^\circ 35' = 0,95841$.

Подставим все известные значения в формулу (9.26):

$$\cos [2\alpha + 17^\circ 57'] = \frac{2 \cdot 15,7}{310} 0,28541 - 0,95841 = -0,92980,$$

$$180^\circ - [2\alpha + 17^\circ 57'] = 21^\circ 41',$$

$$2\alpha = 180^\circ - 17^\circ 57' - 21^\circ 41' = 140^\circ 22' \quad \text{и} \quad \alpha = 70^\circ 11'.$$

От точности определения конструктивного угла α зависят результаты камеральной обработки перспективных снимков и точность вычисления поверхностных скоростей.

10 Автоматизированная обработка гидрологических данных

10.1. Общие сведения об автоматизированной информационной системе обработки гидрологических данных

Сбор данных о количестве и качестве вод, составляющих единый государственный фонд, и данных об использовании вод для нужд населения и народного хозяйства является задачей государственного учета вод, а их обработка и распределение информации — задачей ведения государственного водного кадастра.

В целях повышения оперативности в обеспечении народного хозяйства необходимыми данными о водных объектах, водных ресурсах, режиме, качестве и использовании вод, а также о водопользователях Госкомгидромет СССР, Министерство геологии СССР и Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР создают для ведения государственного учета вод и государственного водного кадастра автоматизированную информационную систему, оснащенную современными техническими средствами.

Автоматизированная информационная система государственного учета вод и государственного кадастра (сокращенно АИС ГУВ и ГВК) является системой сбора, контроля, обработки, хранения данных государственного учета вод, получения публикуемых материалов государственного водного кадастра и обслуживания по запросам планирующих, проектных, научно-исследовательских и других народнохозяйственных организаций сведениями о водных объектах, водных ресурсах, гидрологическом (в том числе гидрохимическом) режиме рек, озер, каналов, водохранилищ, морей и морских устьев рек, ледников, подземных вод и использовании водных ресурсов.

Разрабатываемая система должна состоять из трех взаимосвязанных автоматизированных информационных систем (подсистем) по разделам «Поверхностные воды», «Подземные воды» и «Использование вод».

Автоматизированная информационная система «Поверхностные воды» является, с одной стороны, подсистемой автоматизированной информационной системы сбора и обработки режимной гидрометеорологической информации по контролю за состоянием природной среды, создаваемой Госкомгидрометом, а с другой — частью автоматизированной информационной системы государственного учета вод и государственного водного кадастра.

По назначению и организационному делению в АИС ГУВ и ГВК выделяются следующие иерархические уровни (рис. 10.1):

- 1 — наблюдений и регистрации использования,
- 2 — подготовки и занесения данных на технические носители,
- 3 — территориальных (региональных) центров обработки данных,
- 4 — специализированных центров данных,
- 5 — головных центров данных,
- 6 — отделений государственного водного кадастра.

В подсистеме АИС ГУВ и ГVK «Поверхностные воды» наблюдения осуществляются сетью гидрологических постов и станций Госкомгидромета, а также пунктами наблюдений Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР и других ведомств.

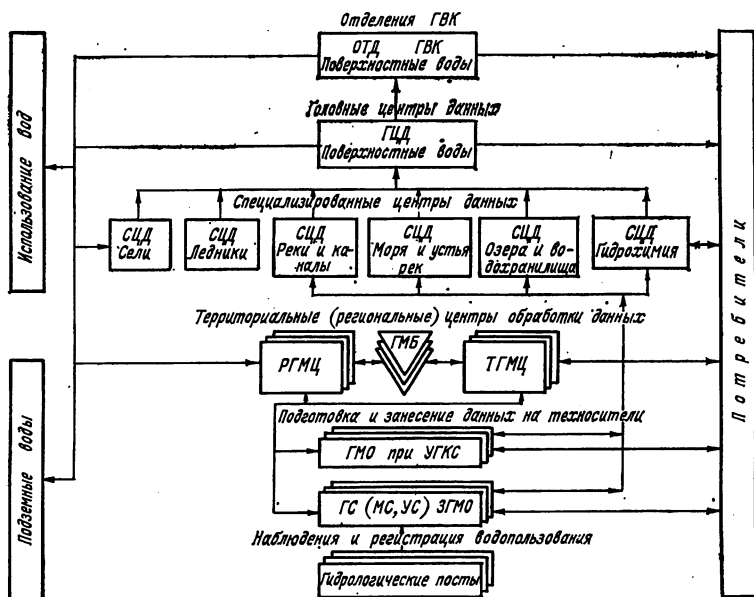


Рис. 10.1. Схема автоматизированной информационной системы водного кадастра по разделу «Поверхностные воды»

Подготовка и занесение данных наблюдений на технические носители осуществляется на гидрологических (устьевых, озерных) станциях.

В территориальных гидрометеорологических центрах (ТГМЦ) производится первичная обработка, контроль, накопление за год текущих гидрологических наблюдений, подготовка на ЭВМ таблиц ежегодно публикуемых материалов ГVK и обслуживание сведениями о текущем режиме водных объектов информационно-прогностических органов Госкомгидромета и других потребителей данных по своей территории.

Региональные гидрометеорологические центры (РГМЦ), кроме функций ТГМЦ, осуществляют накопление и хранение гидрологических данных по региону за многолетние периоды наблюдений, под-

готовку на ЭВМ публикуемых периодически (один раз в 5—10 лет) режимно-справочных материалов ГВК и обслуживание запросов потребителей о многолетнем режиме и изменениях водных ресурсов по региону.

Специализированные центры (банки) данных ГУВ и ГВК создаются при головных научно-исследовательских учреждениях Госкомгидромета по специфике информации.

В информационную базу создаваемых банков гидрологических данных АИС ГУВ и ГВК наряду с данными текущих гидрологических наблюдений включаются сведения о гидрометеорологическом режиме за многолетний период. Головной центр, расположенный во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ—МЦД), организует сбор, накопление, хранение данных государственного учета вод по всей стране и зарубежным территориям, осуществляет методическое руководство созданием и ведением банков гидрологических данных и создает общесоюзный банк данных, предназначенный для обслуживания оперативных органов Госкомгидромета и проектных организаций информацией по их запросам, а также будет вести информационное обслуживание о наличии, составе и местонахождении всех данных государственного учета вод и государственного водного кадастра в стране.

Разработанная и внедренная на всей сети гидрологических (устьевых) станций, постов и в вычислительных центрах Госкомгидромета автоматизированная подсистема АИС ГУВ и ГВК по сбору, первичной обработке, контролю и накоплению данных государственного учета вод по количественным показателям режима рек, каналов, береговых наблюдений на озерах и водохранилищах, в морских устьях рек базируется на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ) серия «Минск-32» и других средствах автоматизации обработки информации. Усовершенствованная автоматизированная система сбора, обработки, контроля, накопления, хранения и распространения гидрологических данных базируется на ЭВМ единой серии (ЕС ЭВМ).

10.2. Технология сбора и автоматизированной обработки гидрометрических данных

Упражнение 10.1. Описание технологии сбора и обработки на ЭВМ данных гидрологических наблюдений на реках.

Д а н о: система первичной обработки и накопления данных гидрологических наблюдений Госкомгидромета СССР на базе ЭВМ и других средств автоматизации сбора и обработки информации [28, 29].

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть общие сведения о технических носителях для первоначального занесения данных гидрологических наблюдений и подготовке их к вводу в ЭВМ.

2. Описать схему первичной обработки данных гидрологических наблюдений в вычислительных центрах на ЭВМ.

Решение: 1. В соответствии с принятой технологией сбора и автоматизированной обработки данные гидрологических наблюдений, занесенные на гидрологических постах в полевые книжки, высылаются на гидрологические станции, где производится их визуальная проверка и кодирование словесных записей, занесение на технический носитель.

В качестве промежуточного технического носителя на станциях используется перфолента (см. п. 10.4).

В вычислительных центрах при внедрении автоматизированной системы обработки гидрологической информации проводится предварительная работа, включающая создание информационно-справочных массивов (паспортных данных) по всем постам подчиненной территории.

2. Весь процесс автоматизированной обработки гидрологической информации в ВЦ разбивается на несколько этапов:

— подготовка информации к вводу в оперативную память ЭВМ, ввод, декодирование (перевод из телеграфного кода в машинный код), контроль, внесение исправлений, вывод на магнитную ленту;

— получение таблиц с результатами обработки за месяц и обеспечение потребителей по запросу необходимой текущей информацией;

— уплотнение и объединение информации, сортировка и формирование данных на магнитной ленте, предназначенной для передачи на хранение в Гидрометфонд СССР;

— получение таблиц ежегодно публикуемых материалов ГВК. Схема подготовки к вводу в ЭВМ, автоматизированной обработки и контроля гидрологических данных в вычислительном центре (ВЦ) приведена на рис. 10.2.

В ВЦ качество информации на перфоленте проверяется с помощью программ автоматизированного контроля. По окончании контроля на станцию высылаются таблицы ошибок, письмо с оценкой качества перфорации, разъяснением ошибок и с уведомлением о необходимости повторной перфорации или исправлений сделанных ошибок (в случае невозможности их исправления в ВЦ). Копия письма высылается в ГМО. Если программа автоматизированного контроля не обнаружила в массиве ошибочных элементов, то производится первичная обработка данных и печать результатов обработки в виде таблиц. Полученные таблицы комплектуются для критического контроля и использования на станции. Если в процессе использования месячных таблиц обнаружены ошибки, не выявленные машиной, работники станции сообщают об этом в ВЦ для последующего их исправления.

Проконтролированные первичные данные накапливаются на магнитных лентах в течении года, затем сортируются по гидрографической схеме и в хронологическом порядке, оформляются в виде

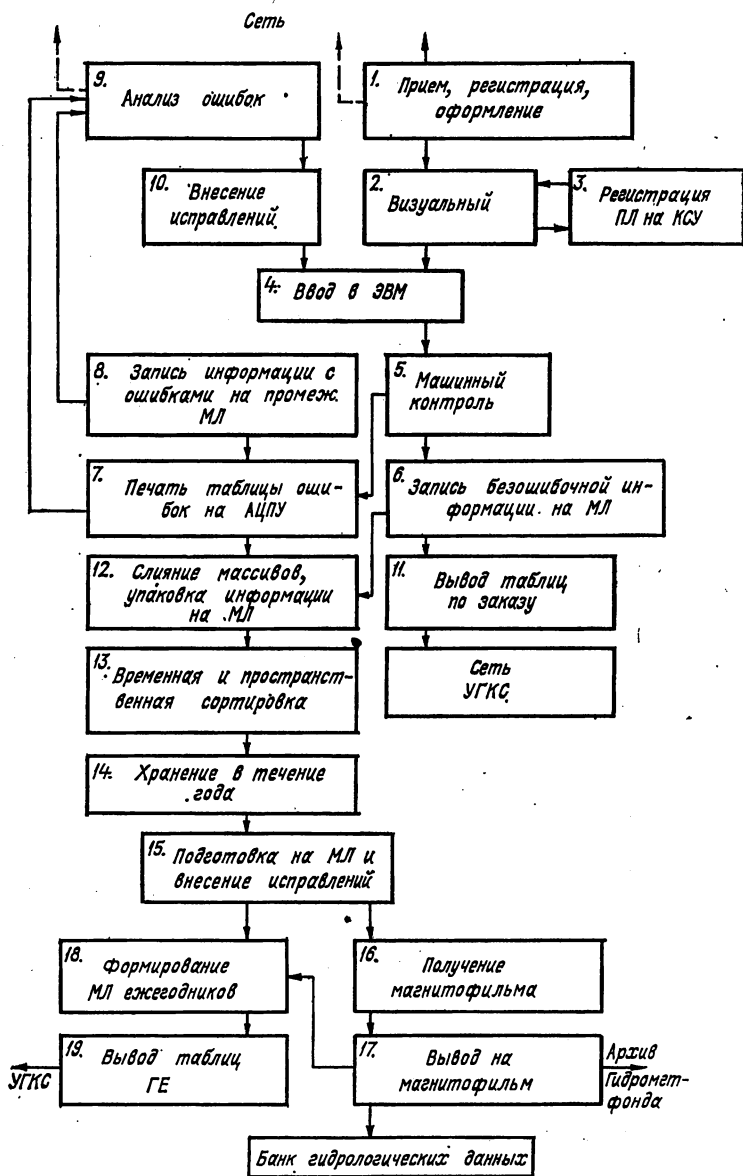


Рис. 10.2. Общая блок-схема первичной обработки гидрологической информации в вычислительном центре.

стандартных массивов определенной структуры, производится защита информации — создается так называемый банк данных, предназначенный для длительного хранения информации.

С годовых массивов данных на магнитных лентах производится получение таблиц ежегодно публикуемых материалов государственного водного кадастра, которые высылаются в гидрометобсерватории для критического просмотра редактора и завершения подготовки к изданию. Магнитные ленты, предназначенные для хранения информации, высылаются во ВНИИГМИ—МЦД и включаются в Гидрометфонд СССР.

Если обработка гидрологических данных производилась на ЭВМ «Минск-32», то во ВНИИГМИ—МЦД производится перезапись полученной информации на магнитные ленты ЕС ЭВМ в соответствии со специально разработанным языком описания гидрометеорологических данных для обеспечения возможности включения ее в информационную базу банка данных ГУВ и ГВК.

10.3. Запись и кодирование данных наблюдений

Упражнение 10.2. Запись результатов гидрологических наблюдений в книжке КГ-1М и вкладыше КГ-1МС.

Д а н о: 1. Выписка из книжки КГ-1М и вкладыша КГ-1МС.

2. Код ледовых явлений и состояния водного объекта (см. приложение 4).

3. Исходные данные по самописцу (приведены в тексте).

Т р е б у е т с я: 1. Привести общие принципы построения макетов исходных гидрологических бланков.

2. Заполнить перфорируемую часть книжки КГ-1М с учетом применяемых кодов и указаний.

3. Заполнить вкладыш КГ-1МС.

Р е ш е н и е. 1. Одним из важнейших этапов при создании автоматизированных систем сбора, контроля и обработки результатов гидрологических наблюдений (АСОГД) является этап подготовки и занесения информации на промежуточный технический носитель (в данном случае перфоленту). В связи с переходом Госкомгидромета СССР на использование более современных ЭВМ серии «Ряд», пришедших на смену ЭВМ «Минск-32», и на основе накопленного опыта эксплуатации АСОГД значительно расширен состав гидрологических данных, подлежащий занесению на технические носители, усовершенствованы методы и правила их подготовки, разработано 15 форм книжек и таблиц, что дает возможность занести на технический носитель результаты наблюдений всех основных элементов гидрологического режима рек (см. табл. 10.1).

В целом, формы книжек и правила их заполнения во многом повторяют прежние книжки, так как несмотря на использование в обработке ЭВМ третьего поколения, технология сбора данных остается прежней, т. е. информация с помощью тех же устройств

подготовки данных (телетайпов) заносится на промежуточные технические носители (перфоленту).

Можно выделить следующие общие принципы построения макетов исходных бланков для всех видов гидрологической информации: использование одних и тех же бланков как при записи результатов измерений в полевых условиях, так и при перфорации (без перезаписи данных для перфорации); естественная форма представления данных; совместная группировка данных, подлежащих занесению на технический носитель, и выделение их утолщенно очер-

Таблица 10.1

Коды видов гидрологической информации

Вид информации (название документа — книжки, таблицы)	Индекс документа	Код вида информации
1. Продольный уклон водной поверхности	ТГ-14М	010
2. Гидрологические наблюдения (уровень воды, состояние водного объекта и др.)	КГ-1М, КГ-1МА КГ-1МС (№ 2, 3)	011
3. Измеренные расходы воды	КГ-3М, КГ-3МА КГ-7М	013
4. Ежедневные расходы воды	ТГ-3М	017
5. Сведения о расчетных периодах гидрологического года	ТГ-4М	018
6. Мутность воды единичная срочная	ТГ-10М, ТГ-10МА	021
7. Параметры перехода от единичной мутности к средней	ТГ-11М	022
8. Измеренные расходы взвешенных и влекомых наносов	КГ-6М	023
9. Гранулометрический состав и плотность наносов	ТГ-55М	026
10. Ежедневные расходы взвешенных наносов	ТГ-15М	028

ченной рамкой; возможность как ручной, так и автоматизированной обработки; разделение призначного и информационного разделов; нумерация строк в бланках.

Рассмотрим общие правила записи данных в книжке КГ-1М, КГ-3М и др. При этом следует пояснить ряд терминов.

В табл. 10.2 приведена выписка из книжки КГ-1М. Каждая отдельная клетка на любой странице книжки является «графой», в которую записывается значение элемента; «колонка» — вертикальный ряд таких граф; «строка» — горизонтальный ряд граф на странице книжки. Все строки, подлежащие перфорации, имеют номера, напечатанные в левом крае строки. Номер представляет собой одно-четырёхзначное десятичное число с отличительным символом «=» перед ним. Нумерация строк позволяет упростить процесс исправления ошибок перфорации.

Первые две строки в книжках, предназначенные для записи признаков данных, не имеют номеров, так как они не могут быть исправлены автоматизированным путем. На правильное заполнение этих строк следует обратить особое внимание, так как любая ошибка в них делает непригодной к обработке на ЭВМ всю последующую информацию книжки.

На страницах книжек не допускается исправление текста или каких-либо обозначений, напечатанных типографским способом. Отрицательные числа записываются со знаком минус (—), положительные без знака. Справа от значения элемента можно записать специальный признак, представляющий дополнительную качественную характеристику элемента:

ю — элемент измерен с пониженной точностью или величина рассчитана приближенно (пример см. в табл. 10.2);

) — (закрывающая скобка) — грубо приближенные данные (пример см. в табл. 10.2);

+ — величина забракована на станции, но подлежит занесению на технические носители;

X — (песочные часы) — величина восстановлена на станции.

Вместо значения элемента могут быть записаны следующие символы:

— в случае пропуска наблюдения (наблюдение невозможно было произвести в связи с неисправностью оборудования, прибора, по вине наблюдателя, в связи со сложной обстановкой на реке, результат наблюдения забракован);

/ — (наклонная черта) используется преимущественно в том случае, когда наблюдение производилось, но элемент (явление) в данный срок или сутки отсутствует (например, отсутствие стока, отсутствие осадков и т. д.).

Если наблюдения за элементом не должны производиться в отдельные сроки или сутки в соответствии с программой наблюдений, то на месте значения элемента ничего не записывается, соответствующая графа в книжке остается пустой.

2. Книжка КГ-1М предназначена для записи результатов наблюдений за уровнем воды, состоянием водного объекта, температурой воды и воздуха, осадками и ледовых измерений. Рассмотрим заполнение книжки КГ-1М по данным табл. 1.8 для р. Ламы у поста Егорье за март 1979 г. В табл. 10.2 приведена выписка отдельных страниц книжки КГ-1М. При этом не приведены страницы, которые не подлежат перфорации, повторяющиеся (одинаковые по форме и содержанию).

а. Страница 1 книжки. В первых двух строках, не имеющих номеров, записываются признаки данные, необходимые для автоматизированного поиска информации.

Код гидрологии является отличительным признаком гидрологической информации среди других видов гидрометеорологической информации (метеорологической, аэрологической и т. д.). Для рек и каналов он принят равным 41, это число и нужно записать в пер-

Таблица 10.2

Выписка из книжки для записи гидрологических наблюдений КГ-1М
за март 1979 г.

Река Лама

Пост Егорье

Стр. 1

Код гидрологии	Код поста	Год, месяц (ГГММ)	
: : 41	75074	7903	
Код информации	Код поста	Год месяц (ГГММ)	Дата перфорации (ГГММДД)
1	2	3	4
((12011	75074	7903	790410

Справочные сведения

Номер строки	Количество книжек (таблиц) за отчетный месяц, подлежащих перфорации					
	1	2	3	4	5	6
	КГ-1М, КГ-1МС	КГ-3М	КГ-6М	ТГ-10М		
=1	1	3	2	1		
	ТГ-3М	ТГ-11М	ТГ-55М	ТГ-15М	ТГ-14М	ТГ-4М
=2						

Продолжение табл. 10.2

Справочные ведения

Стр. 2

Номер строки	Отметка нуля поста			1 — уровень представлен с точностью до 0,1 см	1 — код неоднородности ряда уровней
	Отметка, м	Система высот	Дата (ГГММДД)		
	1	2	3	4	5
=5	126,50	1			
	Высший уровень		Низший уровень		Высшая температура воды
	1		2		3
=6	445		146		
	Признак отсутствия данных за весь месяц (—)				
	Уровень воды		Код состояния	Температура воды	Ледовые измерения
	КГ-1М	КГ-1МС			
	1	2	3	4	5
=7				—	
	Температура воздуха		Осадки	Ветер	
	1		2	3	
=8					

Стр. 3

	Число	Время (ч, мин)		Уровень воды, см	Температура воды, °С
		уровень	температура воды		
=2Г	28	20		146	
=22	1	22		600	

Продолжение табл. 10.2

Стр. 4

Номер строки	Число	Время (ч, мин)	Уровень воды над «О» поста, см	Код состояния водного объекта		Температура (испр.), °С		Осадки, мм	Ветер по коду	Примечание
						воды	воздуха			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
=41	1	8	146	565			-14,0	/	00	
=42	1	20	148	565			-8,0	1	00	
...
=47	4	8	149	565	537		1,0	0,81	00	
=48	4	13 05	151	565	537					5
=49	4	20	152	565	537		1,0	2,71	00	
...
=59	10	8	183	565	537		-2,0	0,02	00	
...
=92	26	8	262 Ю	542	570		0,0	0,42)	23	
=93	26	14	291							2
=94	26	20	290	542	570		1,0	/	21	
=95	27	8	306	53901	565		1,0	/	32	
=96	27	20	313	53901	565		2,0	/	32	
...

Номер строки	Число	Место наблюдения	Общая толщина льда, см	Толщина погруженного льда, см	Толщина погруженной шуги, см	Высота снега на льду, см	Примечание	Плотность снега на льду, г/см ³	Высота слоя наледной воды, см	Толщина наледного льда, см	Номер точки	Характеристика поверхности ледяного покрова (зимой) и водной растительности (летом)
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
											1	
											2	
											3	
= 865	5	1	39	37	/	10	573	0,32			ср.	ровный

вой графе вслед за двумя двоеточиями. Если пост расположен в устье области реки, то в графе записывается код 43.

Код поста записывается пятизначным числом, в котором две первые цифры — номер гидрографического района, а три последние — номер пункта наблюдений в данном районе. В нашем примере в табл. 10.2 записано число 75074 — код поста Егорье на р. Ламе. Коды постов приведены в специальном каталоге. Вновь открываемым постам код присваивается в Управлении по гидрометеорологии и контролю природной среды (УГКС), при этом:

а) гидрографические районы кодируются числами: 1—19 — для районов, расположенных в Азиатской части СССР; 70—85 — для районов Европейской части (ЕТС) и 41—49 — для подрайонов внутри некоторых районов ЕТС. Так, в нашем примере две цифры кода поста 75 — номер Верхне-Волжского района.

б) порядковые номера пунктов наблюдений в районе кодируются числами: 001 — 799 — для рек и каналов; 800—899 — для устьевых областей рек; 900—999 — для озер и водохранилищ. Пункты наблюдений на реках и каналах нумеруются в порядке гидрографической схемы — вначале пункты наблюдений на главной реке.

(от истока к устью), а затем на ее притоках в порядке впадения их от верховья к устью.

Период наблюдения кодируется четырехзначным числом, в котором первые две цифры соответствуют двум последним цифрам года, а две последующие цифры — порядковому номеру месяца. В данном примере для марта 1979 г. запишем 7903.

В следующей строке книжки КГ-1М кодируются призначные данные, необходимые для опознания данного вида информации. В первой графе строки влечатан код книжки КГ-1М — 12011, в котором 1 — условный номер раздела ГВК «Поверхностные воды»; 2 — код серии материалов (текущие сведения), 011 — код вида данных: гидрологические наблюдения, записанные в книжке КГ-1М (см. табл. 10.1).

Во второй и третьей графах строки повторяется запись кода поста и периода наблюдения.

Дата перфорации записывается непосредственно при перфорации шестизначным числом. В нашем примере записан код 790410, что означает: 79 — две последние цифры года, 04 — порядковый номер месяца, 10 — число месяца.

В строках с номерами 1 и 2 кодируются сведения о видах наблюдений, подлежащих перфорации за отчетный месяц, что необходимо для автоматизированного учета полноты присылаемых на обработку данных.

Строка с номером 1 заполняется ежемесячно. В нашем примере данные, записанные в строке 1, означают: за март перфорируются данные КГ-1М—1, 3 измеренных расхода воды, 2 измеренных расхода взвешенных наносов, 1 месячный массив данных по мутности воды.

Строка с номером 2 в нашей книжке за март не заполняется, данные в этой строке записываются только в книжке за декабрь.

6. Страница 2. В первой графе записана с точностью до сотых отметка нуля поста в метрах 126,50. Показатель системы высот (в нашем примере Балтийская система) кодируется цифрой 1 в соответствии с кодом, приведенном в табл. 10.3. Следует пояснить, что графы 1 и 2 заполняются только при изменении прежней отметки нуля поста на новую. Если отметка в данном году и данном месяце не изменилась, то графы не заполняются, так как отметка нуля поста уже ранее занесена на технический носитель в составе паспорта поста (см. упр. 10.6). Третья графа строки остается свободной, так как дата, с которой принимается данная отметка, записывается только в случае переноса поста.

Для контроля, а также для учета выбранных вручную экстремальных значений уровня и температуры воды для неполных (с пропусками наблюдений) месяцев предусмотрена запись их значений. Экстремальные значения уровня воды выбираются из всех значений уровня, записанных в книжке КГ-1М, вкладыше КГ-1МС и записываются в строке 6. В нашем примере в строке 6 запишем 445 и 146.

Таблица 10.3

Коды, используемые при заполнении книжки КГ-1М

Система высот

1 — Балтийская система БС; 2 — условная система усл.; 3 — абсолютная система абс.; 4 — Балтийская система (не уравненная) (БС)

Вид осадков

1 — жидкие; 2 — твердые; 3 — смешанные

Направление ветра

0 — штиль; 1 — по течению; 2 — против течения; 3 — с левого берега; 4 — с правого берега

Сила ветра

0 — штиль; 1 — слабый ветер; 2 — умеренный ветер; 3 — сильный ветер

Примечание

1 — средний суточный уровень восстановленный; 2 — наблюдение по максимальной рейке; 3 — наблюдение по указателю уровня У-52; 4 — уровень определен нивелированием; 5 — уровень при измерении расхода воды; 6 — наблюдение по микротермометру

Место измерения льда

1 — измерения на середине реки; 2 — измерения у берега; 3 — измерения на плесе; 4 — измерения на перекате

Строки с номерами 7 и 8 заполняются в случае отсутствия наблюдений за каким-либо гидрометеорологическим элементом в течение всего месяца. При отсутствии наблюдений в соответствующих графах строк 7 и 8 ставится знак тире. По данным упражнения 1.9 в марте не проводились наблюдения за температурой воды, поэтому в графе 4 строки 7 поставим тире.

в. На стр. 3 в строке 21 записываются данные за последние сутки и последний срок наблюдения предыдущего месяца — в нашем примере за 28 февраля 20 ч в соответствии с названием граф запишем: число 28, время наблюдения 20, уровень воды в сантиметрах 146.

В строке 22 приводятся данные за первые сутки и первый срок наблюдения последующего месяца — в нашем примере в строке записаны данные за 1 апреля 22 ч, уровень воды равен 600 см над нулем поста.

г. На стр. 4 и последующих таких же страницах (с четными номерами) записаны и подлежат перфорации результаты наблюдений на посту. Учитывая преобладание неавтоматизированных способов измерений гидрологических элементов, необходимость ведения оперативного обслуживания потребителей непосредственно из пунктов наблюдений, на технический носитель заносятся преимущественно

не непосредственно результаты измерений, а частично обработанные данные. Таким образом, на перфоленту заносятся не номера свай и отсчеты по ним, а вычисленные уровни воды в срок наблюдения, значения температуры воды и воздуха с внесенными в них инструментальными поправками.

Запись результатов наблюдений начинается всегда в строке 41 и далее последовательно заполняются все строки без пропусков.

В колонке 1 обычным способом записывается число месяца, причем число дается для каждого срока наблюдения.

В колонке 2 записывается время наблюдения с точностью до 1 ч, а при необходимости — с точностью до 1 мин. Так, 4 марта наблюдения проводились в 8 ч, 13 ч 5 мин, 20 ч. Соответственно в строках 47—49 в колонке 2 запишем: 8; 1305; 20.

В колонке 3 записываются вычисленные значения уровня воды над нулем поста в сантиметрах по данным упражнения 1.9. При необходимости (в зависимости от точности измерения) уровень воды может быть записан с точностью до 0,1 см.

В строке 48 за 4 марта в срок 1305 (13 ч 5 мин) записан уровень при измерении расхода воды, при этом в графе 10 в соответствии с кодом, приведенным в табл. 10.3, стоит цифра 5, означающая, что уровень наблюдался при измерении расхода воды. Запись уровня при измерении расхода воды производится всегда между строчек записи за предыдущий и очередной сроки наблюдений (в нашем примере между сроками наблюдений 8 и 20 ч).

В строке 92 рядом со значением уровня 262 записана буква Ю, означающая, что уровень измерен с пониженной точностью.

В строке 93 за 26 число 14 ч записан высший уровень за сутки 291 см, отмеченный по максимальной рейке, при этом в графе 10 в соответствии с кодом, приведенным в табл. 10.3, стоит цифра 2, означающая, что уровень наблюдался по максимальной рейке. Время прохождения высшего уровня записывается приближенно, с точностью до целого часа (14 ч).

За 1 марта в табл. 18 есть сведения, что на реке ледостав. Согласно коду в приложении 4, запишем в графе 4 число 565. 26 марта отмечено: трещины в ледяном покрове и лед подняло. Эти явления кодируются соответственно 570 и 542 и записываются в графах 4 и 5, при этом явление, код которого записан в графе 4, указывает на большее влияние этого явления на режим реки в данном створе. За 27 марта в строке 95 в графе 5 записан код 565 — ледостав, а в графе 4 — число 53901, в котором 539 — код явления «закраины», 01 — степень развития явления в долях от ширины реки. Таким образом, число 53901 означает: на посту наблюдались закраины, занимающие 0,1 ширины реки. В приложении 4 явления, которые кодируются пятизначным числом вышеописанным способом, помечены звездочкой. Все остальные ледовые явления, а также дополнительные сведения о состоянии водного объекта при зарастании, лесосплаве, хозяйственных мероприятиях и т. д. кодируются всегда трехзначным числом.

В колонке 6 ничего не записано, так как наблюдения за температурой воды не производились. Температура воздуха в колонке 7 записана с точностью до десятых долей градуса согласно данным упражнения 1.9.

В колонке 8 записывается количество осадков с точностью до 0,1 мм. После количества осадков в той же графе записывается вид осадков по коду, приведенному в табл. 10.3.

Так, 26 марта на посту Егорье количество осадков после выпадения снега оказалось равным 0,4 мм. В графе колонки 8 запишем 0,42; после цифрового значения записан знак), означающий, что количество осадков приближенное.

Если было отмечено выпадение осадков, но при измерении их количество оказалось равным нулю, то следует записать 0,0 с указанием вида осадков. Например, 10 марта в 8 ч утра на посту отмечался снег, количество осадков при их измерении оказалось равным нулю. В колонке 8 запишем: 0,02.

Если наблюдения за осадками по осадкомеру на посту не производились, то в колонке 8 записываются результаты визуальных наблюдений, т. е. код вида осадков. Например, 1 марта в 20 ч осадки на посту не измерялись, но был зафиксирован их вид — дождь. В колонке 8 запишем код 1.

При отсутствии осадков в соответствующей графе колонки 8 ставится наклонная черта /. Так, 27 марта осадки не выпадали, поэтому в колонке 8 за каждый срок наблюдения записана наклонная черта.

В колонке 9 записываются результаты визуальных наблюдений за силой и направлением ветра двухзначным числом, в котором первая цифра — код направления ветра, вторая — код силы ветра (см. табл. 10.3).

За 1 марта в строке 41 записан код 00, который свидетельствует, что ветра не было (штиль). В строке 92 за 26 марта стоит число 23, означающее, что наблюдался сильный ветер — 3, против течения — код 2.

В колонке 10 записываются по коду, приведенному в табл. 10.3, примечания, необходимые при автоматизированной обработке данных и для оценки качества материала. Примеры записи, приведенные в табл. 10.2, рассматривались ранее в данном пункте;

д. Страница 18 используется для записи измерений толщины льда, снега и других элементов по пентадам или декадам. В строке с номером 865 записываются средние по точкам наблюдений значения элементов. В нашем примере приведены пентадные наблюдения, поэтому в графе 1 запишем число месяца 5. Измерения проводились на середине реки, поэтому согласно коду в табл. 10.3 запишем в графе 2 цифру 1. Следует заметить, что если измерения проводятся одновременно на двух участках реки — на плесе и перекате, то место наблюдения нужно записать двухзначным числом, в котором первая цифра обозначает место измерения относительно берега (на середине или у берега), вторая цифра — участок реки (плес

или пережат). Например, если измерения проводились на плесовом участке на середине реки, то согласно кода в табл. 10.3 нужно записать число 13. В графах 3 и 4 приведена общая толщина льда и толщина погруженного льда в см, соответственно 39 и 37; шуга подо льдом отсутствует, поэтому в графе 5 поставим наклонную черту /. Высота снега и его плотность записываются обычно. В графе 7 записано число 573 — согласно коду в приложении 4 означает: лед ярусный.

3. При оборудовании поста самописцем уровня воды контрольные измерения по сваям или рейкам, записанные в КГ-1М по правилам, изложенным в п. 2, дополняются данными с ленты самописца. Для этого используется вкладыш КГ-1МС. Рассмотрим заполнение вкладыша КГ-1МС за 27 марта для р. Лама — пос. Егорье (табл. 10.4).

Таблица 10.4
Выписка из вкладыша № 2 КГ-1МС

Номер строки	Число	Время, ч мин	Уровень воды, см
0	1	2	3
=890	27	0	306
=891	27	2	302
=892	27	14	308
=893	27	24	312

Так же как и в книжке КГ-1М, все строки вкладыша пронумерованы, причем номера строк в КГ-1МС являются последовательным продолжением номеров строк в КГ-1М. Запись всегда начинается в первой строке, имеющей номер 890. В нашем примере в колонке 1 запишем число 27. За 27 марта обработка ленты самописца производилась методом характерных переломных точек [37], при этом дополнительно к основным срокам 8 и 20 ч, записанным в табл. 10.2, должны быть записаны в КГ-1МС сроки 0; 2; 14 и 24 ч. Эти значения и запишем в колонке 2 (при необходимости время можно записать с точностью до 1 мин). В колонке 3 запишем соответственно срокам вычисленные над нулем поста значения уровней в сантиметрах: 306; 302; 308; 312.

Упражнение 10.3. Запись результатов измерений расхода воды в книжке КГ-ЗМ.

Д а н о: выписка из книжки КГ-ЗМ (табл. 10.5) р. Ока — г. Калуга.

Т р е б у е т с я: заполнить книжку КГ-ЗМ с учетом применяемых кодов и указаний.

Р е ш е н и е: Рассмотрим заполнение книжки КГ-ЗМ по следующему разделам: призначные данные, обстановка работ, промеры, измерения на скоростных вертикалях.

а. Призначные данные. В первой сверху строке впечатан код гидрологии 41. В последующих графах строки записываются код поста по каталогу 75314 и год и месяц измерения расхода воды 7901 (1979 г., январь).

Во второй сверху строке, не имеющей номера, впечатан код данного вида гидрологической информации, т. е. код данных измерения расхода воды, 12013 (см. табл. 10.1). Во второй графе строки повторяется запись кода поста 75314. Дата измерения расхода воды записана шестизначным числом 790105, в котором 79—две последние цифры года, 01—порядковый номер месяца (январь), 05—число месяца. Следует заметить, что если измерение расхода воды продолжалось в течение двух суток и более, то дата измерения записывается восьмизначным числом, в котором первые четыре цифры — год и месяц измерений, а вторые четыре цифры — числа первого и последнего дня измерения. Например, расход воды измерялся два дня, 1 и 2 июня 1979 г. Дату измерения нужно записать: 79060102. Здесь и в последующем при записи составного кода недостающее количество цифр в числе восполняется впереди стоящими нулями. Номер расхода воды записывается обычным путем. В нашем примере он равен 1. В графе «Номер протоки» ничего не записано, так как р. Ока не имеет проток на гидростворе. Дата перфорации записана шестизначным числом 790215 (15 февраля 1979 г.).

В строке с номером 1 графа «Количество книжек» остается пустой, так как расход воды измерен в одном русле и записан в одной книжке.

Время измерения расхода воды (начало и конец) записывается трех-четырёхзначным числом, в котором первые одна-две цифры — часы, вторые две цифры — минуты. В нашем примере записано соответственно: 1000 и 1215. В графе «Гидроствор. Номер» поставим 1. Если расход воды в отдельных случаях измерялся на временных створах, то к номеру временного створа прибавляется число 50 и тогда первый временный створ будет иметь номер 51, второй — 52 и т. д. В графе «Гидроствор. Расстояние от поста» записан нуль, так как в нашем примере местоположение гидроствора и основного поста совпадает. Если гидроствор расположен ниже поста, то перед расстоянием ставится знак минус; если выше, то записывается без указания знака расстояние с точностью до 1 м. Графа «Признак перфорации данных» заполняется в зависимости от того, как будет вычисляться расход воды: на ЭВМ или вручную

на станции. Если расход воды должен быть вычислен на ЭВМ, то в данной графе записывается код 2. Если расход воды уже вычислен на станции (при оперативном обслуживании), то перфорируются как результаты измерений, так и результаты вычислений. На ЭВМ расход воды будет вычисляться только с целью контроля ручной обработки. В этом случае графа 6 в строке 1 не заполняется. В данном примере графу оставим свободной, так как далее будем рассматривать правила записи как результатов измерения, так и принятых (в том числе вычисленных) данных. В графе 7 строки с номером 1 запишем 1, так как расход воды выражен в м³/с. Если расход воды выражен в л/с, то нужно поставить цифру 2.

б. Обстановка работ. На стр. 2 в первой сверху графе записываются сведения об осадках и погоде в соответствии с кодами, приведенными в табл. 10.3, 10.6. При измерении данного расхода воды было пасмурно, поэтому в графе записан код 5. При необходимости в графе можно записать и двухзначное число: первая цифра — код осадков, вторая — код погоды. Например, запись 16 означает: 1 — жидкие осадки, 6 — туман. Во второй графе записывается двухзначное число, в котором первая цифра — код направления ветра, вторая — код силы ветра (см. табл. 10.3). Так, записанное в графе число 21 означает: 1 — слабый ветер, 2 — против течения.

Тип вертушки записывается в соответствии с кодом, приведенным в табл. 10.6. Если необходимо указать номер лопасти, то он записывается вслед за типом вертушки. В данном случае в графе 3 записано 21, что означает: 2 — вертушка ГР-21 М, лопастной винт № 1.

В графе 4 записывается начальная скорость вертушки с точностью до 0,01 м/с : 0,04.

На стр. 3 в первой сверху графе записывается дата тарировки: 15 августа 1978 г. согласно правилам кодирования запишется 780815.

Графы 2—6 заполняются обычным путем и пояснений не требуют.

Графу 7 не заполняем, так как в нашем примере работы проводились с люльки.

На странице 4 в графах 1—4 записываются сведения о способе опускания вертушки, о приборах для определения расстояний и промера глубин в соответствии с кодом, приведенным в табл. 10.6. В нашем примере код 3, записанный в графе 1, означает, что вертушка укреплена на кронштейне гидрометрического груза и опускалась на тросе. Работы проводились с люльки, поэтому в графе 2 записан код 3. Расстояние определялось лентой (1 в графе 3), глубина — лотом (4 в графе 4). В графе 5 записано семизначное число: 1790105, в котором первая цифра — номер расхода 1, при котором производились промеры; шесть последующих цифр — дата измерения расхода, при котором производились промеры. Если номер расхода — двухзначное число, то в графе будет записано восьмизначное число. Графа 6 — не заполнена, так как косина течения

Таблица 10.5

Выписка из книжки для записи измерения расхода воды КГ-3М

Река Ока
Расход № 1Пост Калуга
Дата: 5 января 1979 г.

Стр. 1

Код гидрологии	Код поста	Год, месяц
: : 41	75314	7901

Код информации	Код поста	Год, месяц, число	Номер расхода воды	Номер протоки	Дата перфорации
1	2	3	4	5	6
((12013	75314	790105	1		790215

Номер строки	Количество книжек	Время измерения, ч, мин		Гидроствор		Признак перфорации данных	Единицы измерения расхода воды (м ³ /с, л/с)
		начало	конец	номер	расстояние от поста, м		
0	1	2	3	4	5	6	7
=1		1000	1215	1	0		1

Обстановка работ
Стр. 2

					= 2	
1	2	3	4			
Осадки: жидкие, твердые, смешанные; погода: ясно, 5 6 пасмурно, туман					5	1
0	1	2	3	4		
Ветер: штиль, по теч., против теч., от лев. (прав.) берега; 0 1 2 штиль, слабый, умеренный					21	2
Вертушка типа: ГР-21, ГР-21М, ГР-55, ГР-99, установка 5 ГР-101 № 1852, лопастной винт № 1					21	3
Начальная скорость вертушки, м/с 0,04					0,04	4

Продолжение табл. 10.5

Стр. 3

	= 3	
Тарировка № _____ «15» августа 1978 г.	780815	1
После последней тарировки измеряется <u>15</u> расход	15	2
.....		
Местоположение судна за время работ на вертикали не изменялось, изменялось в пределах		7

Стр. 4

	= 4	
Вертушка опускается: на штанге, тросе (вертлюг), тросе 3 (кронштейн, штырь);	3	1
1 2 3 4 вброд, с моста, с люльки, с плавсредств (лодки, парома, ка- 5 6 7 тера), со льда, с ГР—64, ГР—70	3	2
1 2 3 4 Расстояние определялось лентой, тросом, засечками, размет- кой на сооружении	1	3
1 Глубины при промерах измерялись рейкой (водом., нивелир.), 2 3 4 5 наметкой, штангой, лотом, эхолотом	4	4
Промер производился при измерении расхода № 1 от ян- варя 1979 г.	1790105	5
Косоструйность течения на гидростворе более 10°		6
Величина изменения уровня за время измерения скорости на гидростворе, см	0	7
Величина изменения уровня за время измерения скорости на основном посту, см	0	8

Принятые данные

Стр. 5

Номер строки	Расчетный уровень воды над «О» поста, см		Расход воды, м ³ /с
	основной пост	гидроствор	
0	1	2	3
=5	—100		126

Стр. 6

Номер строки	Номер протоки	Состояние реки	Расчетный уровень воды над «О» поста Н см	Площадь, м ²										
				на основном посту	на гидростворе	на основном посту	на гидростворе	Расход воды, м ³ /с (л/с)	водного сечения F_B	мертвого пространства F_M	льда F_L	шуги $F_{ш}$	мостовых опор $F_{опор}$	общая $F_{общ}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
=10			565	569	—100			126	296		85,8	48,8		431
=12														

Принятые данные

Стр. 7

Номер строки	Скорость, м/с		Ширина, м		Глубина, м		Уклон, ‰	Способ измерения расхода воды	Метод вычисления	Переходный коэффициент	Примечание
	Средняя $v_{ср}$	Наибольшая $v_{наиб}$	По уровню воды B_y	по нижней поверхности льда B_L	средняя $h_{ср}$	наибольшая $h_{наиб}$					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
=11	0,43	0,59	219		1,96	2,65		107014	1		
=13											

Продолжение табл. 10.5
Промеры
 стр. 8

Номер строки	Коды урезов, границ мертвого пространства, № скоростных вертикалей	Расстояние от постоянного начала, м	Глубина рабочая (со срезкой), м			Глубина, м средняя	Глубина погружения льда, м	Глубина погружения шуги, м
			0	1	2				3
0								
№30	666		111	0,00	...	0,00	0,00	
№31	776		111	0,00	...	0,00	0,00	
№32			115	0,21	...	0,33	0,12	
№33	1		125	0,68	...	1,0	0,32	
№34			135	1,62	...	1,98	0,36	
№35	2		145	1,84	...	2,20	0,36	

Продолжение табл. 10.5
 Измерения на скоростных вертикалях
 стр. 12

Номер строки	Номер вертикали	Расстояние от пост. начала, м	Рабочая глубина, м	Глубина погружения вертушки		Скорость, м/с	Средняя скорость, м/с	Отсчет по штанге или счетчику в точке	Число сигналов	Сумма оборотов	Продолжительность измерения в сек	Число оборотов в сек
				в долях глубины	в метрах							
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№150	1	125	0,68	0,2	0,14	0,35			8	160	103	1,55
№151				0,8	0,54	0,29	0,32		8	160	127	1,26
№152	2	145	1,84	0,2	0,37	0,59			14	280	106	2,64
№153				0,8	1,48	0,55	0,57		14	280	114	2,4

Таблица 10.6

Коды, используемые при заполнении КГ-3М
раздела «Обстановка работ»**Погода**

4 — ясно; 5 — пасмурно; 6 — туман

Тип вертушки

1 — ГР-21; 2 — ГР-21М; 3 — ГР-55; 4 — ГР-99; 5 — установка ГР-101

Способ крепления вертушки:

1 — на штанге; 2 — на тросе (вертлюг); 3 — на тросе (кронштейн, штырь)

Способ работы с вертушкой1 — вброд; 2 — с моста; 3 — с люльки; 4 — с плавсредств (лодки, парома, катера); 5 — со льда; 6 — с установки ГР-64 (ГР-64М);
7 — с установки ГР-70**Способы для определения расстояний**

1 — лента; 2 — трос; 3 — засечки; 4 — разметка на сооружении

Приборы для промера глубины1 — рейка (водомерная, нивелировочная); 2 — наметка; 3 — штанга; 4 — лот;
5 — эхолот

Таблица 10.7

Коды, используемые при заполнении КГ-3М раздела «Принятые данные»

Тип прибора и способ измерений

1 — вертушка; 2 — глубинные поплавки; 3 — вертушка и глубинные поплавки (совместное измерение); 4 — поверхностные поплавки; 5 — поверхностные поплавки, пущенные по стрелю; 6 — поплавки-интеграторы; 7 — вертушка и поверхностные поплавки (совместное измерение); 10 — интеграционный способ измерения с помощью вертушки; 8 — объемный способ; 9 — способного паводка; 11 — электролитический способ; 12 — аэрометод (с помощью поверхностных поплавков); 13 — аэрометод (с помощью поплавков-интеграторов); 14 — сокращенный способ измерения с помощью вертушки; 15 — сокращенный способ измерения с помощью вертушки на судоходных реках (способ Буралева)

Метод вычисления

1 — аналитический; 2 — графоаналитический; 3 — графический; 4 — аналитический (при совмещении промерных и скоростных вертикалей)

Примечания

1 — не учтен расход протоки; 2 — не учтен расход поймы; 3 — русло разделено перемычкой из льда и шуги; 4 — не учтен расход канала; 5 — расход измерен между опорами моста; 6 — не учтена площадь погруженного льда у берегов; 7 — не доучтен расход воды под льдом; 8 — не доучтен сток воды поверх льда; 9 — расход измерен на пойме (правый берег); 10 — расход измерен на пойме (левый берег); 11 — расход измерен в трубе; 12 — не учтен расход рукава; 13 — расход измерен по нижней поверхности льда; 14 — расход измерен в потоке у левого берега (при ледоставе); 15 — расход измерен в потоке у правого берега (при ледоставе)

не превышает 10° . В графах 7 и 8 записаны нули, так как уровень воды за время измерения скорости не изменился. Графы 9 и 10, не приведенные в образце книжки, заполняются только при измерении расхода воды в коренном русле и на пойме.

в. Принятые данные. В строке с номером 5 графе 1 записан уровень воды на основном посту: — 100. Графа 2 не заполнена, так как местоположение поста и гидроствора совпадают. В графе 3 записано значение расхода воды в $\text{м}^3/\text{с}$: 126. Если русло разделено на несколько проток, в которых измерены расходы воды, то в строке 5 записываются средневзвешенный уровень и суммарный расход воды.

В строке с номером 10 в первой графе при наличии проток представляется ее номер. В нашем примере графа не заполняется. Состояние реки записывается в соответствии с кодом, приведенным в приложении 4.

При совпадении основного поста и гидроствора код состояния реки на основном посту не записывается, поэтому в нашем примере графы 2 и 3 остаются пустыми. На гидростворе наблюдались два явления: ледостав и шуга подо льдом, поэтому в графах 4 и 5 записаны коды: 565 и 569.

Значения уровня и расхода воды, записанные в графах 6, 7, 8, равны таковым же, записанным в строке 5, так как расход воды измерен в единственном русле. При заполнении граф 9 и 10 следует помнить, что при наличии мертвого пространства его площадь записывается в отдельной графе, а также включается в площадь водного сечения. Если расход воды измерен между опорами моста, то площадь мостовых опор записывается отдельно в графе 13, а также включается в общую площадь сечения. В нашем примере общая площадь сечения равна сумме площадей водного пространства, погружения льда и шуги.

Строка 11 является продолжением строки 10. Заполнение граф 1—7 в этой строке особых пояснений не требует. В графе 8 записано шестизначное число 107014, в котором первая цифра 1 — код типа прибора (в данном случае вертушки), две последующие цифры 07 — число скоростных вертикалей на гидростворе и три последние цифры 014 — число скоростных точек. Коды типов прибора и способов измерений приведены в табл. 10.7.

В графе 9 записывается метод вычисления согласно коду в табл. 10.7. В данном примере расход воды вычислен аналитическим методом, поэтому нужно записать 1. В графе 10 записывается переходный коэффициент в случае измерения расхода воды сокращенным способом с помощью вертушки или поверхностными поплавками. В нашем примере графа остается пустой. В графе 11 из табл. 10.7 можно записать одно или два примечания.

г. Промеры. В колонке 1 обозначаются в соответствии с кодами, приведенными в табл. 10.8, урезы воды, нижней поверхности льда, границы мертвого пространства, а также номера скоростных вертикалей. Урезы воды каждого берега кодируются в зависимости от характера берега. В нашем примере на гидростворе берег поло-

гий, поэтому в колонке 1 в первой и последней графе записаны коды урезов воды левого и правого берегов — соответственно 666 и 555. При измерении зимних расходов воды обозначаются также урезы нижней поверхности льда независимо от того, совпадают они с урезами поверхности воды или нет. Так, в нашем примере урезы нижней поверхности льда и поверхности воды совпадают (их расстояния от постоянного начала в колонке 2 одинаковы), поэтому код уреза нижней поверхности льда левого берега 776 записан в строке, следующей за строкой с записью кода уреза воды.

Таблица 10.8

Коды, используемые при заполнении КГ-3М раздела «Промеры»

Урез воды, нижней поверхности льда, границы мертвого пространства

555 — урез правого берега (при пологом берегу; при естественном обрывистом берегу или неровной стенке — бут, неотесанный камень); 554 — урез правого берега (при гладкой бетонной или сплошь обшитой досками стене); 666 — урез левого берега (при пологом берегу; при естественном обрывистом берегу); 664 — урез левого берега (при гладкой бетонной или сплошь обшитой досками стене); 775 — урез нижней поверхности льда правого берега; 776 — урез нижней поверхности льда левого берега; 885 — граница мертвого пространства, примыкающего к правому берегу; 886 — граница мертвого пространства, примыкающего к левому берегу; 888 — граница мертвого пространства в середине реки (не примыкающего к берегам)

Если есть мертвое пространство, то в зависимости от его местоположения на гидростворе (примыкает к левому или правому берегу или расположено посередине реки) в колонке 1 в строках, соответствующих его границе, записывается один из кодов: 885, 886 или 888.

В нашем примере на гидростворе мертвое пространство отсутствует. В колонке 1 записываются только те номера скоростных вертикалей, на которых измеряется скорость при данном расходе воды.

Номера дополнительных вертикалей записываются со знаком минус. Промерные вертикали не нумеруются, поэтому графы в колонке 1, соответствующие месту их записи, остаются пустыми. В колонке 2 записываются обычным способом расстояния от постоянного начала урезом воды, скоростных и промерных вертикалей и т. д. В колонке 3 записываются рабочие глубины, приведенные к расчетному уровню.

д. Измерения на скоростных вертикалях. При заполнении перфорированной части данного раздела необходимо обратить внимание на то, что номер вертикали, расстояние от постоянного начала и рабочая глубина (колонки 1—3) записываются только в начальной строке каждой скоростной вертикали. Остальные графы колонок 1—3 на данной скоростной вертикали остаются пустыми (см. табл. 10.5). При точечном способе измерения скорости (в данном случае основном) в колонке 4 записывается глубина опускания

вертушки, выраженная в долях рабочей глубины (в нашем примере 0,2 и 0,8), а в колонке 5 — соответствующая глубина в метрах: 0,14 и 0,54 — для скоростной вертикали № 1. При многоточечном способе точки измерения у поверхности воды кодируются как 0,0 а у дна — числом 1,0. При интеграционном способе измерения в графе 4 вместо точек измерения скорости (долей глубины) записывается число 10 — код интеграционного способа измерения скорости на данной вертикали. В колонке 6 записываются вычисленные скорости.

Упражнение 10.4. Способ записи данных измерений мутности воды в таблице ТГ-10М.

Д а н о: 1. Образец таблицы ТГ-10М (табл. 10.9).

2. Исходные данные приведены в тексте.

Т р е б у е т с я: заполнить таблицу ТГ-10М с учетом применяемых кодов и указаний.

Р е ш е н и е: в таблицу ТГ-10М записываются значения мутности единичных проб наносов за месячный период по данным книжки для записи проб наносов КГ-10. Рассмотрим общие правила заполнения ТГ-10М на примере р. Туапсе — г. Туапсе за июль 1979 г.

а. Код гидрологии 41, код поста 82013, период наблюдения 7907 (июль 1979 г.), код информации, т. е. код данных мутности воды, 12021, дата перфорации 790825 (25 августа 1979 г.) записываются по предыдущим указаниям.

б. Графа, соответствующая записи кода факторов, изменяющих естественный режим реки, заполняется только при условии, если эти факторы действуют в течение всего месяца. К таким факторам относятся: забор или сброс воды выше поста, наличие плотины выше или ниже поста и т. д. Кодирование производится согласно приложению 4. В нашем примере графа остается свободной.

в. В строках с номерами 1 и 2 записываются наибольшая и наименьшая мутность за месяц и даты их наблюдения. Наибольшая и наименьшая мутность воды выбираются из всех срочных значений мутности данного месяца. В нашем примере наибольшая мутность воды наблюдалась 1 июня в 20 ч и составила 1700 г/м^3 . В строке с номером 1 записываем: в первой графе число 1, в графе 3 мутность 1700. Остальные графы в строке не заполняются. Наименьшая мутность воды наблюдалась 15 и 30 июля и составила 17 г/м^3 . В строке с номером 2 в первой графе записываем составное число 153002, в котором 15 — первая дата наблюдения наименьшей мутности, 30 — последняя дата наблюдения наименьшей мутности, 02 — количество дней, в течение которых она отмечалась (2 дня). Если экстремальное значение мутности наблюдалось только 1 день, то записывается это число (пример с наибольшей мутностью воды). В графе 3 строки 2 запишем значение наименьшей мутности 17. Остальные графы остаются свободными.

г. Начиная со строки с номером 3 записываются данные измерения мутности воды. Рассмотрим правила заполнения таблицы по данным за 1, 11 июля и 4 пентаду (с 16 по 20 июля).

Таблица 10.9

Мутность воды единичная срочная

ТГ-10М

Код гидрологии		Код поста		Год, месяц			
: : 41		82013		7907			
Вид информации: Мутность воды единичная срочная				Код информации		((12021	
Река Туапсе				Код поста		82013	
Пост Туапсе							
Год 1979		месяц июль		Период наблюдения		7907	
Дата перфорации				Дата перфорации		790825	
Код факторов, изменяющих естественный режим водного объекта							
Номер строки	Число	Час	Мутность г/м ³	Код определения мутности	Код дополнительных факторов, влияющих на режим мутности		
	1	2	3		4	5	6	7
Наиб.	=1	1	1700				
Наим.	=2	153 002	17				
	=3	1	8	1300			

	=26	11	820	25	1		

	=30	1620	820	18Ю	5		

1 июля пробы воды на мутность отбирались в 8 и 20 ч и каждая проба обрабатывалась отдельно. В строке 3 в соответствии с названием колонок запишем: число 1, время с точностью до 1 ч 8, значение мутности воды 1300. Мутность воды записывается с точностью до двух значащих цифр, но не точнее 0,01 г/м³. Если мутность

меньше $0,01 \text{ г/м}^3$, то в соответствующей графе записывается число 0,00. Графа «Код определения мутности» не заполняется, так как единичная мутность определялась в срок наблюдения, (табл. 10.10). В графах 5—7 кодируются местные факторы, влияющие на режим мутности: разработка карьеров по берегам реки, обвал берега, намывные работы в русле, массовое купание и т. д. В нашем примере графы остаются свободными.

11 июля в течение суток отобраны две пробы воды на мутность (в 8 и 20 ч), которые объединены в одну суммарную пробу. В соответствующей строке таблицы записываем: число 11; время отбора пробы записываем составным числом 820, в котором 8 — срок отбора первой пробы, 20 — срок отбора следующей пробы. Если количество отобранных проб было больше двух, то время их отбора также записывается составным числом, в котором последовательно перечисляются все те сроки отбора, пробы которых объединены в одну суммарную пробу, при этом недостающее до двух количество цифр в каждом сроке восполняется впередистоящими нулями.

Таблица 10.10
Код особенностей определения единичной мутности воды

- | | |
|----------|---|
| 1 | — определяется средняя суточная мутность (из двухсрочных или многосрочных наблюдений) |
| без кода | — определяется единичная мутность в срок наблюдения |
| 5 | — определяется средняя пентадная мутность |
| 10 | — определяется средняя декадная мутность |
| 2 | — определяется средняя мутность за произвольный период (не равный пентаде или декаде) |
| 3 | — был пропуск наблюдений или данные забракованы |
| / | — данные отсутствуют по причине: река пересохла, река промерзла |
| 4 | — наблюдения за мутностью не производятся, сток взвешенных наносов за этот период вычисляется по доле меженного стока наносов от годового |
| 6 | — пост открыт или начаты наблюдения за наносами |
| 7 | — пост закрыт или прекращены наблюдения за наносами |
| 8 | — значение мутности определено методом интерполяции |

В графе 3 запишем значение мутности 25, а в графе 4 — код 1, означающий, что определялась средняя суточная мутность по результатам отбора пробы в 2 срока (8 и 20 ч). Графа 5 остается свободной.

В период с 16 по 20 июля ежедневно отобранные в 8 и 20 ч пробы в связи с незначительной мутностью объединены в одну суммарную пробу с пентадой. Запись в данном случае должна быть следующей. В соответствующей строке таблицы в графе 1 записываем дату составным числом 1620, в котором 16 — дата начала периода осреднения, 20 — дата конца периода осреднения; в графе 2 время отбора проб запишем согласно вышеуказанным правилам составным числом 820 (8 и 20 ч). Если ежедневно отбиралась одна проба, этот срок отбора записывается в графу. В графе 3 записано значение мутности 18, после которого стоит буква Ю, означающая, что мут-

ность измерена с пониженной точностью. В графе 5 запишем код 5, означающий, что определялась средняя пентадная мутность.

10.4. Занесение данных наблюдений на технический носитель

Упражнение 10.5. Нанести на перфоленту данные из книжки КГ—1М.

Д а н о: 1. Перфолента.

2. Данные из табл. 10.2.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть общие правила занесения данных на перфоленту.

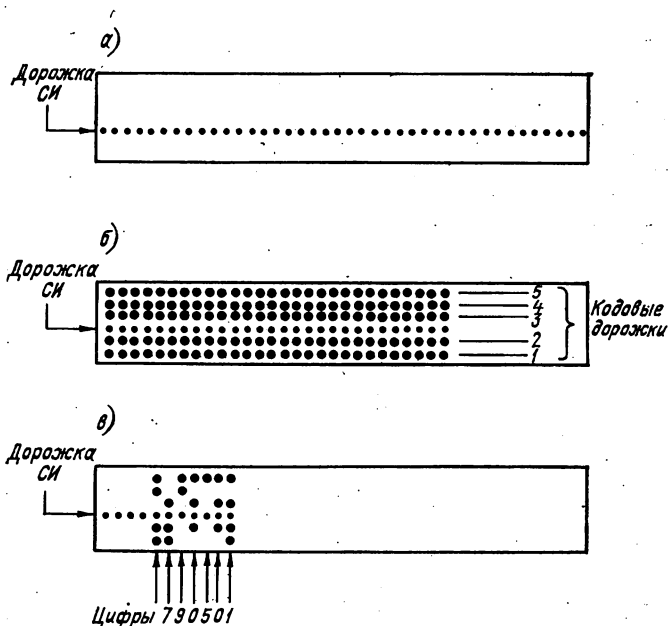


Рис. 10.3. Образец пятидорожковой перфоленты
 а — пробита синхродорожка, б — все отверстия пробиты (без кода),
 в — отверстия пробиты по коду

2. Рассмотреть порядок занесения данных на перфоленту отдельно для каждой графы КГ—1М.

3. Рассмотреть правила исправления ошибок перфорации.

Р е ш е н и е: 1. Перфолента — это бумажная лента, на которой данные представляются с помощью системы отверстий. Для регистрации гидрологической информации применяется пятидорожковая лента шириной 17,5 мм.

На рис. 10.3, а представлена перфолента с продольным рядом мелких отверстий, называемых дорожкой синхроимпульсов (дорожки СИ). Синхродорожка разделяет перфоленту на две неравные части, в одной из которых две дорожки, а в другой — три. На рис. 10.3 б представлен образец перфоленты с пробитыми отверстиями всех пяти кодовых дорожек. Отверстия, расположенные

поперек ленты, образуют строку перфоленты, соответствующую одному символу (букве, цифре, знаку). Каждый символ набивается во втором международном телеграфном коде (МТК-2), приведенном на рис. 10.4.

N комбинации	Кодовые комбинации					Буквенный регистр	Цифровой регистр
	1	2	3	4	5		
1	●	●	○			А	—
2	●		○		●	Б	
3		●	○	●	●	Ц	:
4	●		○		●	Д	X (кто у-аппарата)
5	●		○			Е	3
6	●		○	●	●	Ф	9
7		●	○		●	Г	Ш
8			○	●		Х	Щ
9		●	○	●		И	8
10	●	●	○		●	Й	Ю
11	●	●	○	●	●	К	(
12		●	○		●	Л)
13			○	●	●	М	
14			○	●	●	Н	г
15			○		●	О	9
16		●	○	●	●	П	0
17	●	●	○	●	●	Я	1
18		●	○		●	Р	4
19	●		○	●		С	(апостроф)
20			○		●	Т	5
21	●	●	○	●		У	7
22		●	○	●	●	Ж	=
23	●	●	○		●	В	2
24	●		○	●	●	Ь	/
25	●		○	●	●	Ы	6
26	●		○		●	З	+
27			○		●	(возврат каретки)	
28		●	○			(перевод строки)	
29	●	●	○	●	●	Латинь (лат)	
30	●	●	○		●	Цифры (циф)	
31			○	●		Пробел	
32			○			Русский регистр (рус)	

Рис. 10.4. Международный телеграфный код МТК-2

В коде имеются 32 комбинации из пяти пробивок. Поскольку различных комбинаций из 5 пробивок недостаточно для представления всех символов, то 26 комбинаций используется в двух регистрах — буквенном и цифровом, а шесть комбинаций (27—32) работает независимо от регистра.

Для занесения данных на перфоленту применяется рулонный телеграфный аппарат (Т-51; Т-63), клавиатура которого приведена

на рис. 10.5. Перфорация, или получение нужной комбинации отверстий, происходит при нажатии на ту или иную клавишу аппарата. Перед тем как перфорировать символы цифрового регистра, необходимо нажать на клавишу «циф» и только потом нажатием на нужные клавиши получить на перфоленте интересующие нас символы (комбинации пробивок). Все остальные символы в МТК-2 набиваются на перфоленту в буквенном регистре, т. е. перед их перфорацией необходимо нажать на клавишу «рус». Если для служебных целей на перфоленте нужно пробить только синхродорожку, то для этого используется клавиша «рус», не дающая ни одной информативной пробивки.

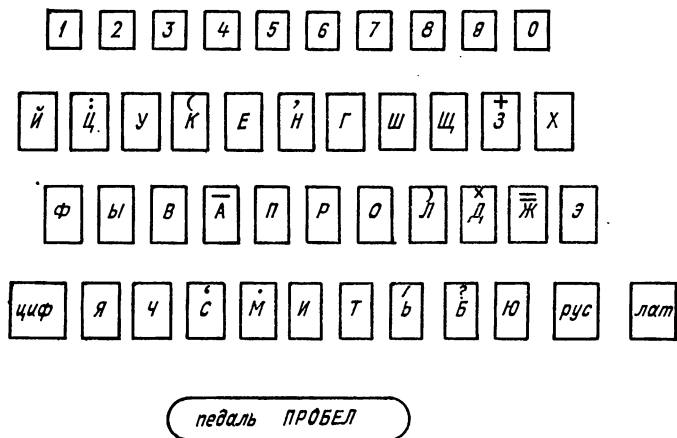


Рис. 10.5. Клавиатура телетайпа

Рассмотрим пример нанесения какого-либо числа на перфоленту. Расход воды был измерен 1 мая 1979 г. Согласно правилам кодирования дата измерения записывается числом 790501. На рис. 10.3 в приведен образец перфоленты с нанесенным в коде МТК-2 числом 790501. С помощью рис. 10.4 «прочитаем» построчно перфоленту. Первые четыре пробивки образуют синхродорожку, которая получена нажатием на клавишу телетайпа «рус». Далее в строке перфоленты имеются пробивки на 1, 2, 4, 5-й дорожках, что соответствует 30-й комбинации на рис. 10.4 — «Цифры». Символ «Цифры» является указанием, что далее информация набита в цифровом регистре, поэтому символы будем определять по колонке 9 на рис. 10.4. Вслед за строкой «Цифры» на ленте имеются пробивки в 1, 2, 3-й дорожках, что соответствует 21-й комбинации, т. е. цифре 7 (она получена нажатием на клавишу телетайпа с цифрой 7); в следующей строке — пробивки в 4-й и 5-й дорожках ленты, что соответствует 15-й комбинации, т. е. цифре 9. Таким же способом с помощью кода на рис. 10.4 читаем в следующих строках перфоленты цифры 0; 5; 0; 1.

На рулонных телеграфных аппаратах одновременно с перфорацией на узкой ленте (перфоленте) происходит печать этой же информации на широкой бумажной ленте. Буквы, цифры и знаки на широкой ленте соответствуют кодовым комбинациям на перфоленте. Не печатаются лишь служебные символы (рус, цифры и т. д.). Широкая лента (см. табл. 10.11) содержит информацию в обычной форме и поэтому удобна для чтения. Отпечатанный на широкой ленте текст используется для контроля правильности перфорации.

Таблица 10.11

Образец печати данных из книжки КГ-1М и вкладыша КГ-1МС на широкой ленте телетайпа

```

: : 41.75074.7903.
((12011.75074.7903.790410.
=1.1.3.2.1.
.
=21.28.20.Ш.146.Ш.
=22.1.22.Ш.600.Ш.
=41.1.8.146.565.2Ш. — 140./00.Ш.
.
=49.4.20.152.565.537.Ш.1,0.271.00.Ш.
.
=92.26.8.262Ю.542.570.Ш.0,0,0,42).23.Ш.
.

```

2. Рассмотрим порядок и правила нанесения гидрологических данных на перфоленту из книжки КГ-1М и вкладыша к ней КГ-1МС. Данные вкладыша отдельным сообщением не перфорируются, так как в нем отсутствует перфорируемая призначная часть. Как уже указывалось, содержание широкой печати телетайпа отражает в удобном для чтения виде содержание перфоленты, поэтому порядок и правила перфорации удобно проследить по табл. 10.11. На рис. 10.6 приводится схема размещения данных на перфоленте.

а. Перед началом перфорации оставляется свободный конец перфоленты длиной не менее 1,5 м, необходимый для заправки перфоленты в механизм фотоввода в ЭВМ. Перфорация начинается с последовательного занесения символов «рус», «Цифры», набираемых на соответствующих клавишах телетайпа, и далее последовательно заносятся данные из строк книжки КГ-1М. Как указывалось ранее, в первых двух строках книжки записаны призначные данные, с помощью которых осуществляется поиск информации в ЭВМ, поэтому их правильная перфорация особенно важна.

б. Графа «Код гидрологии» — пробивается символом $::$, являющимся признаком начала любого гидрометеорологического сообщения, путем нажатия дважды на клавишу телетайпа $\boxed{::}$; пробивается число 41 путем последовательного нажатия клавиш $\boxed{4}$ и $\boxed{1}$;

Дорожка СИ

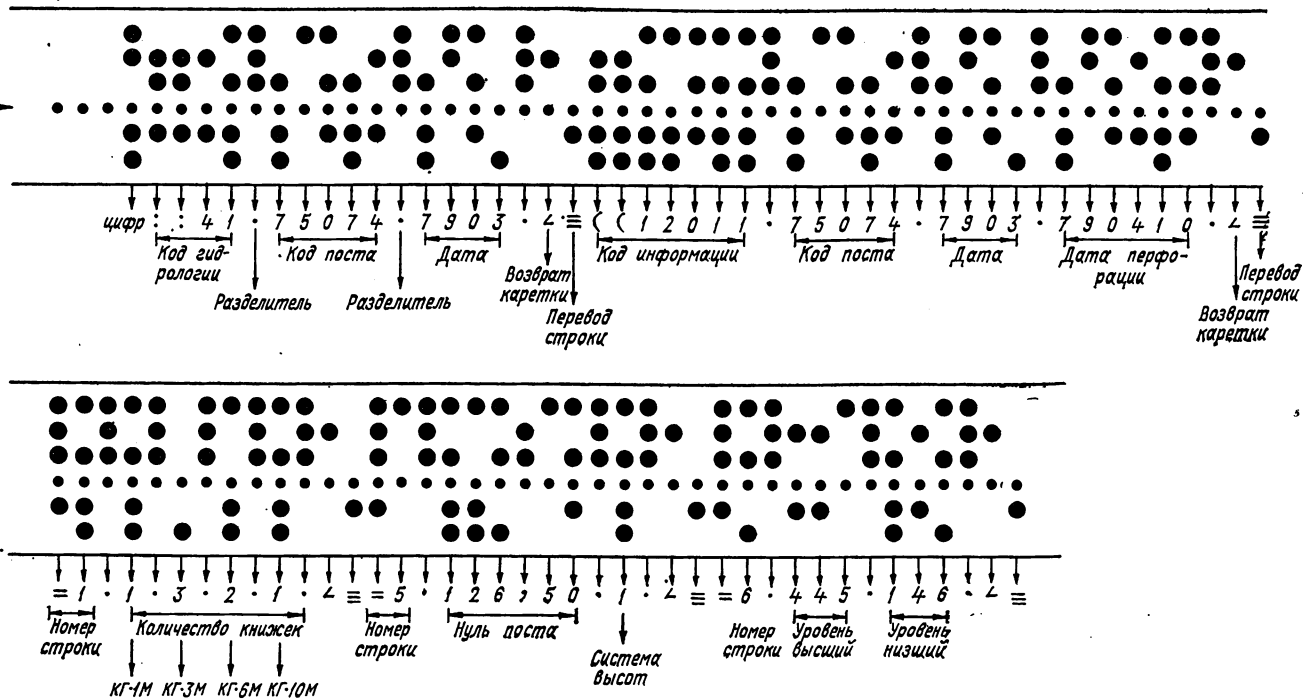


Рис. 10.6. Образец записи перфоленты

пробивается символ точка \cdot , имеющий смысл разделителя групп (отдельных граф книжки). Символ \cdot набивается после каждой группы. Положительные числа перфорируются без знака, перед отрицательными набивается знак минус.

в. Код поста в нашем примере равен 75074, он набивается на ленту последовательным нажатием соответствующих клавиш телетайпа (см. рис. 10.5), после чего перфорируется знак разделителя. Период наблюдения перфорируется числом 7903 (март 1979 г.) со знаком разделителя после числа.

Первая строка из книжки КГ-1М окончилась, необходимо нажать на клавиши $<$ (возврат каретки) и \equiv (перевод строки) и перейти к перфорации следующей строки. Возврат каретки телетайпа и перевод строки могут производиться только после перфорации очередного символа \cdot .

г. Из графы «Код информации» набиваются символы ((путем нажатия дважды на соответствующую клавишу телетайпа, число 12011 и разделитель группы. Символ ((является отличительным признаком начала единичного сообщения (в данном случае книжки), а 12011 — код книжки КГ-1М. В данном упражнении рассматривается перфорация на примере только одной книжки, поэтому трудно показать различие назначений некоторых кодов (например, символов :: и ()).

Следующие графы второй строки набиваются аналогично предыдущим графам. После набивки числа 790410 (даты перфорации) из последней графы строки перфорируется разделитель группы и символы «возврат каретки» и «перевод строки».

д. Строка с номером 1. Набивается символ =, номер строки 1, разделитель группы \cdot и далее содержимое всех граф, при этом после каждой графы перфорируется разделитель $\cdot\cdot$. В строке с номером 2 данные отсутствуют, поэтому она не перфорируется.

ж. Строка с номером 5. Набивается символ =, номер строки 5, разделитель группы. В графе 1 записана отметка нуля поста 125,50 м. На перфоленте путем последовательного нажатия соответствующих клавиш набивается целая часть числа 126, затем — запятая, дробная часть числа 50 и разделитель \cdot . Из второй графы перфорируется код системы высот 1, разделитель. Следует заметить, что в качестве разделителя вместо точки может использоваться другой знак. Если будет принято решение в десятичных числах целую часть отделять от дробной точкой, то при перфорации разделителем групп будет запятая. Отсутствие данных в графе или в последовательности граф наносится на перфоленту символом Ш или символом Щ с повторителем П, равным числу пустых рядом стоящих граф. Рассмотрим данный случай на примере перфорации данных из строки 7.

з. Строка с номером 7. Набивается знак =, цифра 7, разделитель. Три последующие графы пусты, поэтому повторитель П равен 3. На перфоленте набивается ЗЩ путем последовательного на-

жания на клавиши [З] и [Ш]. Следует заметить, что буква Ш набивается в цифровом регистре (см. рис. 10.4). После перфорации разделителя набивается знак тире из графы 4 и разделитель. Последняя в строке графа 5 не заполнена, поэтому отсутствие данных в графе набить буквой «Ш».

Строка с номером 8 не перфорируется, так как в ней нет данных. Строки с номерами 21 и 22 перфорируются по вышеизложенным правилам.

з. Строка с номером 41. По правилам набивается номер строки с символом = и далее из табл. 10.2 содержимое первых четырех граф, после каждой из которых фиксируется разделитель. В графах 5 и 6 данные отсутствуют, поэтому перфорируется ШЦ и разделитель. В графе 7 записана температура воздуха: — 14,0. На перфоленте набивается знак минус —, целая часть числа 14, затем запятая, цифра 0 и разделитель. Из графы 8 перфорируем наклонную черту / и разделитель. Из графы 9 — код 00 путем нажатия дважды на клавишу [О] и разделитель. В графе 10 ничего не записано, поэтому набивается буква Ш

Все остальные строки из книжки КГ-1М перфорируются в порядке возрастания номеров строк по вышеизложенным правилам. Закончив перфорацию из книжки КГ-1М, набивают информацию из вкладыша КГ-1МС.

После окончания перфорации данных из книжки КГ-1М и вкладыша КГ-1МС набиваются 20—30 символов «рус» и далее перфорируются данные из следующей книжки. Если таких книжек нет, то после символа «рус» набивается признак конца перфоленты — символы «цифры» и три буквы ЭЭЭ, после чего оставляется свободный конец длиной 1,5 м.

После перфорации данных производится визуальный просмотр перфоленты. При просмотре выявляется: 1) нет ли масляных пятен; если есть, то их надо зачернить простым карандашом; 2) нет ли разрывов перфоленты; если есть, то сделать аккуратно склейку; 3) при наличии склеек проверить, правильно ли они сделаны: хорошо ли держит клей, нет ли перекосов, несовпадения синхродорожки; 4) проверить, нет ли смещения синхродорожки, нарушений неравномерности шага телетайпа.

Подготовленная перфолента сматывается в рулон концом внутрь, подписывается, причем диаметр рулона не должен превышать 18 см.

3. В процессе перфорации осуществляется контроль правильности занесения данных на перфоленту путем сравнения значений, напечатанных на широкой ленте телетайпа с данными книжки. Рассмотрим правила исправления основных видов допускаемых при перфорации ошибок. Примеры приводим по данным табл. 10.2 и 10.11.

а. Номер строки ошибочно отперфорирован меньшим числом, совпадающим с одним из номеров строк книжки.

Например, было отперфорировано:

= 92.26.8.262Ю. и т. д.

= 93.26.14.291. и т. д.

= 92.26.20.290. и т. д. Вместо номера строки 94 ошибочно отперфорировали 92. При исправлении вначале повторно набивается номер строки 92, совпадающий с неверно отперфорированным, и относящаяся к нему истинная информация. Далее перфорировуется правильный номер строки и ее содержимое:

= 92.26.8.262Ю. и т. д.

= 94.26.20.290. и т. д.

б. Номер строки отперфорирован большим числом. Исправляется номер строки и вся информация строки заново набивается.

в. При перфорации номера строки пропущен символ =. В этом случае заново перфорировуется информация последней правильно отперфорированной строки с ее номером и неверно отперфорированная строка (номер строки со знаком равенства и вся информация строки).

г. Если ошибка состоит в пропуске данных при перфорации одной или нескольких граф, то на перфоленту при исправлении заносится номер неверной строки и перфорация этой строки повторяется заново с учетом использования символа Ш. Символом Ш замещаются те графы строки, которые отперфорированы правильно и нет необходимости повторять перфорацию их содержимого. Если в строке таких граф несколько подряд стоящих, то они замещаются символом Ш с повторителем, равным числу граф. Повторитель перфорировуется перед символом Ш. Например, если число граф равно 3, то перфорировуется: 3Ш. Если данные из каких-либо граф ошибочно отперфорированы несколько раз подряд, перфорировуется вся строка заново с использованием символа Ш.

П р и м е р. Пусть третий элемент в строке 1 (количество книжек КГ-6М, подлежащих перфорации, 2) отперфорирован трижды: = 1.1.3.2.2.2.1. Исправление готовится так:

= 1.2Ш.2.1. или = 1.1.3.2.1.

д. При пропуске разделителя (символа ·) произойдет слияние содержимого двух соседних групп (граф) и сдвиг информации. При исправлении заново перфорировуется вся строка с использованием символа Ш.

П р и м е р. Отперфорировано: = 1.1.32.1. При перфорации пропущен символ · между второй и третьей группой (графой). Исправление: = 1.Ш.3.2.1. или 1.1.3.2.1.

ж. Если ошибка сделана в самой смысловой информации и она обнаружена до начала перфорации следующей группы, то после ошибочной графы набивается символ ·, далее символ ? и правильное значение содержимого графы.

П р и м е р. = 21.28.10.? 20.Ш.146.— неверно занесен срок наблюдения 10, исправлено на 20.

з. Если ошибка в смысловой информации обнаружена после перфорации нескольких последующих граф, то после последней

отперфорированной группы ставится · и заново перфорируется вся строка с использованием символа Ш.

Пример. Отперфорировано: = 49.4.20.252.565.537. и т. д.

В третьей группе вместо значения уровня воды 152 набили ошибочно 252. Исправление: = 49.2Ш.152.2Ш. и т. д. или: = 49.4.20.152.565.537. и т. д.

и. Если вместо пустой графы ошибочно отперфорировано какое-либо значение, то при исправлении пустая графа перфорируется символом Ш. Если необходимо заменить ряд групп (граф) элементом отсутствия, символ Ш употребляется с повторителем.

Пример. Нужно отперфорировать: = 41.1.8.146.565.2Ш.— 14,0./00. Неправильно отперфорировали, пропустив графу 3 (уровень 146): = 41.1.8.565.2Ш.— 14,0./00.

Исправление: = 41.1.8.146.565.2Ш.— 14,0./00. или: = 41.1.8.146.565.Ш.Ш.— 14,0./00. или = 41.2Ш.146.565.2Ш.— 14,0./00.

10.5. Подготовка и нанесение на технический носитель справочных сведений и параметров контроля данных наблюдений

Упражнение 10.6. Подготовка паспорта поста к нанесению на перфокарты.

Дано: 1. Образец таблицы «Параметры контроля и справочные сведения о гидрологических постах и створах».

2. Образец бланка для символического кодирования.

3. Исходные данные по р. Оке — п. Калуга приведены в тексте.

4. Перфокарта.

Требуется: 1. Привести общие сведения о паспорте поста.

2. Заполнить таблицу «Параметры контроля» и бланк для символического кодирования.

Решение: 1. На посту из паспорта поста подготавливается вспомогательная информация, которая включает сведения: о местоположении и оборудовании поста, значения площади водосбора, отметки нуля поста, а также данные, используемые в качестве критериев контроля (параметры контроля). Паспорт используется практически на всех этапах работы автоматизированной системы: при контроле, вычислениях, печати таблиц, выдаче различных справок. Особое значение имеют параметры контроля, с помощью которых удается учесть особенности режима водного объекта каждого поста при контроле результатов наблюдений. Параметры контроля в основном включают экстремальные значения гидрологических величин по уровенному, температурному, ледовому режиму рек, а также стоку воды, взвешенных и влекомых наносов.

Подготовленные в гидрометеорологических обсерваториях паспортные данные записываются в специальные таблицы «Параметры контроля» и высылаются в вычислительный центр (ВЦ). В ВЦ данные из таблицы переписываются на бланки для символического

кодирования, перфорируются на перфокарты и далее заносятся на магнитную ленту для использования в обработке информации постов на ЭВМ.

2а. Таблица 10.12 «Параметры контроля» заполняется для большинства постов один раз. При уточнении сведений или дополнении новых параметров в таблице делается пометка «Исправление» и таблица с новыми значениями высылается в ВЦ. Для записи информации по каждому посту в таблице отведена одна строка. Таблица разделена на три части (колонки 1—8; 9—24; 25—31), содержание каждой из которых будет заноситься на отдельную перфокарту. В шапке таблицы указаны номера колонок перфокарт (над названием колонок) и номера колонок таблицы. Рассмотрим правила записи данных в колонках на примере р. Оки — г. Калуга (табл. 10.12). В колонке 1 проставляется порядковый номер записываемых строк — 1.

Колонка 2 заполняется в ВЦ, где производится сквозная нумерация всех постов, информация по которым обрабатывается в данном ВЦ. Каждому посту присваивается четырехзначный номер (0001—9999), по которому ведется поиск нужного поста в ЭВМ. В нашем примере запишем 0001. В колонке 3 записывается код поста 75314. Название водного объекта и пункта наблюдений, координаты поста (колонки 4—6), расстояние от истока (колонка 9) приводятся в каталоге. Код водного объекта (р. Ока) записывается девятизначным числом 110001755.

Номер выпуска «Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (ЕДС) записывается в соответствии с номенклатурой изданий ЕДС. Данные по посту Калуга публикуются в ЕДС, том 4, выпуск 3, поэтому в колонке 7 записано 3. В колонке 8 указывается код УГКС, в ведении которого находится пост. Согласно приложению 2 следует записать 29.

Расстояние от истока записывается с точностью до 1 км, а при необходимости с точностью до 0,1 км (для рек длиной менее 10 км или если расстояние между постами менее 1 км). В нашем примере 391 км. Отметка нуля поста (116,72 м БС) записывается с точностью до 0,01 м. Третьей цифрой после запятой добавляется показатель системы высот согласно коду, приведенному в табл. 10.3. Для данного случая запишем 116,721.

Площадь водосбора (колонка 11) приводится с точностью до трех значащих цифр, но не точнее 0,01 км².

В колонках 12—31 таблицы записываются экстремальные значения величин, причем для таких элементов, как уровень и расход воды, приводятся максимальные и минимальные значения, для остальных элементов — только максимальные значения. Следует также учесть, что при выборе максимальных значений округлять величины нужно в сторону максимума, а при выборе минимальных — в сторону минимума. Например, если в нашем случае максимальный уровень над нулем поста 1672 см, и минимальный уровень — 196 см, то в колонке 12 запишем 168 (значение уровня записывается

Таблица 10.12

Параметры контроля и справочные сведения о гидрологических постах и створах

№ п/п	12—15	16—20	21—59	60—68	69—77	78	79,80	2—я перфокарта									
	Порядковый номер поста в регионе	Код поста						Название водного объекта и пункта наблюдений	Код водного объекта	Координаты поста	№ выпуска ДС	Код УТКС	Расстояние от истока, км	Отметка нуля поста, м	Площадь водосбора, км ²	Уровень, дм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
1	0001	75314	р. Ока—г. Калуга	110001755		3	29	391	116,721	54 900	168	—20	28	4			
								3—я перфокарта									
47,48	49,50	51,52	53,54	55—61		62—67	68—71	72—75	76—80	16—18	19—21	22—27	28—34	35—41	42—47	48—54	
h _{лд} макс, дм	h _ш макс, дм	ΔH макс., см/ч	ΔT макс, °С/ч	Q м ³ /с		V _{макс} , м	J _{макс} , %	F _{лд} , м ²	h макс, м	V макс, м/с	F _в макс, м ²	R макс, кг/м	ρ макс, г/м	Сток наносов, тыс. т	Расход влечкомых наносов, кг/с		
				макс.	мин.												
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
8	99	91	0,3	13 600	30,9	572	0,52	264	17	2,4	5480	2900	1300	2300			

с точностью до 1 дм), а в колонке 13: — 20 дм. Максимальные значения высоты снега на льду, толщины льда и погруженной шуги (колонки 15—17) также записываются с точностью до 1 дм. Максимальная температура воды (колонка 14) записывается с точностью до целого градуса: 28.

Максимальная интенсивность изменения уровня воды, выраженная в целых сантиметрах в час (колонка 18), определяется для периода наиболее интенсивного подъема или спада уровня как разность его значений между двумя соседними сроками наблюдений, деленная на продолжительность времени (в часах) между этими сроками. В нашем случае она равна 91 см/ч. Максимальная интенсивность изменения температуры воды в десятых долях градуса в час (колонка 19) определяется аналогично интенсивности изменения уровня воды и равна в нашем примере 0,3. Экстремальные значения расхода воды (колонки 20 и 21) записываются с точностью до 0,1 при расходе менее 100 м³/с и с округлением до трех значащих цифр при расходе более 100 м³/с. В нашем случае в колонках 20 и 21 соответственно записываем: 13600 и 30,9.

Максимальные ширина и глубина реки (колонки 22 и 25) записываются целым числом с точностью до 1 м: 572 и 17. Максимальный уклон реки (колонка 23) приводится с точностью до двух значащих цифр, но не точнее 0,01 % — 0,52. Площадь погруженного льда и площадь водного сечения (колонки 24 и 27) записываются целым числом с точностью до 1 м²: 264 и 5480. Максимальная скорость (колонка 26) приводится с точностью до 0,1 м/с — 2,4. Расход взвешенных наносов, мутность воды, расход влекомых наносов (колонки 28, 29, 31) приводятся с точностью до двух значащих цифр, но не точнее 0,1. В нашем случае колонка 31 не заполнена, так как на посту не проводились наблюдения за влекомыми наносами. Сток наносов записывается целым числом: 2300 тыс. т.

б. Данные из таблицы «Параметры контроля» переписываются на специальные символные бланки для разных типов машин, (например «ССК—Минск-32»). В данном пособии принцип перенесения не приведен.

в. Перфокарта представляет собой карточку, изготовленную из плотного электроизоляционного картона длиной 187,4 мм, шириной 82,5 мм и толщиной 0,18 мм (стандарт международного образца) (рис. 10.7), Левый верхний угол перфокарты срезан, чтобы было легче контролировать правильность ее положения в перфокартотеке. Каждая перфокарта содержит 12 строк, пронумерованных в следующем порядке снизу вверх: 9—8—7—6—5—4—3—2—1—0—11—12. 11-я и 12-я строки расположены выше нулевой, их номера не напечатаны. Вертикальный ряд цифр (напечатаны от 0 до 9) образуют колонку. При одинаковой длине и ширине перфокарты могут иметь 45 или 80 колонок. В гидрологии используются 80-колонные карты с пробивкой отверстий прямоугольной формы. Если речь идет об одной колонке, то вместо строк

можно говорить о позициях, имеющих ту же нумерацию, что и строки. Информация на перфокарты наносится поколонно, т. е. каждой колонке соответствует один символ. Символ на перфокарте представляется в виде комбинации пробивок в колонке. Для раз-

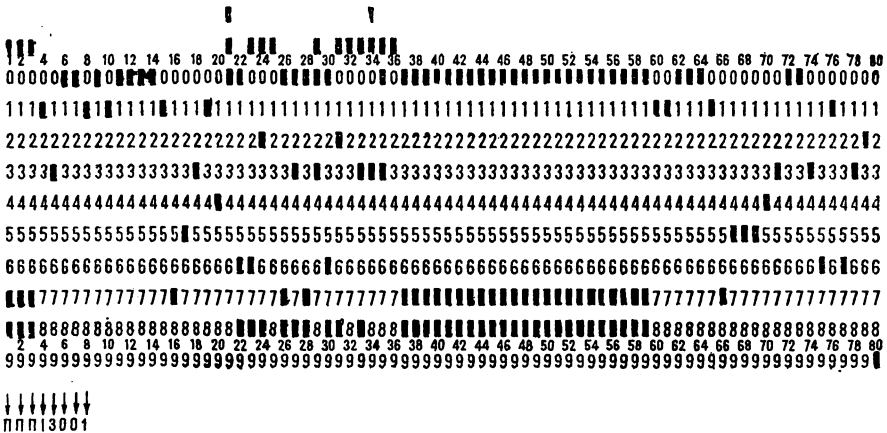


Рис. 10.7. Перфокарта с нанесенными данными по коду

ных устройств подготовки данных на картах (УПДК) коды символов неодинаковы. Для контроля ввода карт в каждой колонке содержится нечетное количество пробивок.

10.6. Автоматизированный контроль и обработка гидрологических данных

Упражнение 10.7. Технология и методы контроля гидрологических данных из книжки КГ-1М.

Д а н о: алгоритмы контроля гидрологических данных КГ-1М.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть технологическую схему и методы контроля гидрологических данных.

2. Составить алгоритм синтаксического и смыслового контроля значений уровня воды из книжки КГ-1М.

Р е ш е н и е: 1. Контроль достоверности данных проводится на всех этапах получения и преобразования информации. Первым этапом контроля, выполняемого ЭВМ, является контроль первичных данных, поступающих на обработку на перфокартах в коде МТК-2.

а. Технологическая схема контроля гидрологических данных. Информация вводится в оперативную память ЭВМ, раскодируется (символы из кода МТК-2 преобразуются в соответствующий код ЭВМ), последовательно происходит распознавание призначной части массива и поиск паспорта поста. В том случае, если опознать

массив не удастся, на алфавитно-цифровом печатающем устройстве (АЦПУ) выдается сообщение «Информация не опознана» и массив игнорируется. Аналогично поступает программа с массивами, в которых есть ошибки в общей призначной части, или в массиве паспортных данных отсутствует паспорт данного поста. В этих случаях на АЦПУ выдаются сообщения: «Ошибки в призначной части», «Отсутствие паспорта поста» с указанием раскодированной призначной части. Если все необходимые условия формирования массива данных для обработки соблюдены, программа приступает к последующему контролю. В процессе контроля исходных данных составляется массив признаков, в котором каждому элементу ставится в соответствие некоторая метка, указывающая на ошибочность или достоверность этого элемента. На основе этого массива далее печатается на АЦПУ таблица ошибок (листинг ошибок).

Если программа контроля обнаружила ошибки, то происходит запись данных на магнитную ленту, закрепленную за ошибочной информацией и печать таблицы ошибок. При обнаружении ошибки в какой-либо графе книжки печатается номер строки и содержимое граф с пометкой о сомнительности отдельных элементов. В таблице в той или иной форме печатаются уведомления обо всех обнаруженных ошибках. Таблица ошибок анализируется специалистами и выявленные ошибки исправляются. Исправленная информация заново перфорируется и после ввода в ЭВМ происходит поиск соответствующего массива данных на магнитной ленте с ошибочными данными и их исправление. Исправленная информация заново контролируется в соответствии с описанной технологией. Естественно, что при разработке контрольных тестов необходимо стремиться к тому, чтобы ошибочная информация была автоматически исправлена в ЭВМ на основе анализа дополнительных сведений и определения критериев контроля.

Если программа контроля не обнаружила ошибочных элементов, то на АЦПУ выдается сообщение о том, что ошибок нет и информация записывается на результирующую ленту, закрепленную за достоверной информацией, для дальнейшей обработки данных.

Далее приводятся наиболее простые методы контроля. К настоящему времени разработаны пространственно-временные методы.

б. Методы контроля. Все многообразие контрольных испытаний, используемых в системе автоматизированной обработки гидрологических данных, сводится к двум основным видам:

— испытания на правомерность (законность) отдельных символов и их комбинаций в заданной системе кодирования и структуре представления данных, а также на правомерность комбинаций символов в определенных ситуациях;

— испытания на допустимость расхождений между контролируемой величиной и ее независимым значением.

Для реализации контрольных испытаний первого вида применяются методы синтаксического контроля. Они реализуются алго-

ритмами, приведенными в табл. 10.13.

Таблица 10.13

Номер алгоритма	Название
1	Проверка на знак числа
2	Проверка на целочисленность
3	Проверка на количество десятичных запятых в числе
4	Проверка на заданное количество цифр после запятой
5	Проверка на количество цифр в числе
6	Проверка на значение элемента
7	Проверка на присутствие величины
8	Проверка на точность представления величины
9	Проверка на абсолютные физические пределы
10	Проверка на взаимосвязь с другими элементами
11	Проверка на монотонность
12	Проверка на совместимость совокупности элементов
13	Проверка на полноту данных

Методы синтаксического контроля проверяют данные в чисто формальном структурном аспекте и позволяют обнаружить ошибки, возникающие в результате неправильного кодирования, нарушения правил заполнения исходных документов, перфорации.

Второй, более высокий уровень контроля достоверности информации — смысловой. Наиболее простыми являются методы смыслового контроля, основанного на проверке данных по предельным значениям, использовании логических соотношений между различными элементами, на проверке аналитических зависимостей между отдельными элементами или группой элементов. Все эти методы по своему характеру близки к синтаксическому контролю и могут использоваться на первом этапе контроля.

Суть метода контроля по предельным значениям заключается в сравнении контролируемой величины с ее экстремальными значениями, приведенными в паспорте поста. Помимо контроля абсолютных значений, возможен контроль некоторых элементов по скорости их изменения во времени. В этом случае вычисляется скорость (интенсивность) изменения величины между наблюдаемыми сроками и сравнивается с предельной скоростью, определенной по фактическим многолетним данным (из паспорта поста).

Контроль данных на логическую совместимость выявляет все случаи отклонений от заранее заданных реальных сочетаний гидрологических явлений и числовых соотношений элементов.

Дальнейшее совершенствование методов контроля гидрологических элементов возможно на основе анализа закономерностей временного и пространственного распределения элементов режима,

применимости математических методов для их описания и интерпретации. Контроль должен проводиться как на уровне непосредственных измерений, так и на уровне обобщенных величин.

2. Рассмотрим составление алгоритмов контроля на примере данных наблюдений из книжки КГ-1М.

а. Определяется перечень алгоритмов для всего комплекса наблюдений.

По заданным алгоритмам (с 1 по 9) контролируется отдельно каждый элемент, а затем (алгоритмы 10—13-й) в совокупности с другими элементами.

б. Для реализации на ЭВМ алгоритмов синтаксического контроля необходимо иметь полную характеристику каждого элемента (знак числа, точность представления, может ли отсутствовать данный элемент в сообщении и в каких случаях). С этой целью составляется таблица характеристик всех элементов, входящих в состав КГ-1М. Например, для уровня воды в таблице помещаются такие сведения: может быть вещественным числом: положительным или отрицательным; представляется с точностью до 1 см или 0,1 см; абсолютные физические пределы: 0—4000 см; может отсутствовать в графе; вместо цифрового значения в графе могут быть записаны: — /; рядом с числовым значением могут быть записаны символы Ю) + X.

в. Из списка, приведенного в табл. 10.13, выбираются алгоритмы, необходимые для контроля данного элемента. Так, для уровня воды целесообразно применить следующие алгоритмы: 3, 4, 8, 9, 10. Поясним использование алгоритмов 3 и 10. Алгоритм 3 применяется при контроле вещественных чисел для исключения ошибок перфорации (случай, когда допущен пропуск разделителя между двумя соседними графами, содержащими вещественные числа).

Алгоритм 10 для значений уровня воды, записанных на стр. 4 книжки КГ-1М в колонке 3 (см. табл. 10.2), включает следующие проверки:

— значение уровня — целое число, если графа 4 в строке 5 пустая;

— если в справочных сведениях в графе 1 строки 7 стоит знак —, то в колонке 3 в течение всего месяца не должно быть цифрового значения уровня (т. е. вместо уровня могут быть знаки —, / или графа пустая);

— вместо цифрового значения уровня может быть знак / в том случае, если за данный срок наблюдения отмечалось промерзание или пересыхание реки (коды 575 или 660);

— если графа 1 в строке 7 пустая, то значение уровня воды не может отсутствовать (графа колонки 3 не может быть пустой) в основные сроки наблюдений: 8 (7) и 20 (19) часов;

— должны выполняться соотношения: $N_b \geq N_i \geq N_n$, где N_i — цифровое значение уровня воды в срок наблюдения, N_b , N_n — значения высшего и низшего уровня воды, записанные в графах

1 и 2 строки 6; $H'_в = H_в$, $H'_н = H_н$, где $H'_в$, $H'_н$ — высший и низший уровни из ряда значений H_i за месячный период;

— если вместо значений $H_в$, $H_н$ стоит знак минус, то и в ряду H_i за месяц должен быть хотя бы один знак — вместо значения H_i .

Здесь приведены проверки на взаимосвязь значений уровня только с теми элементами, правила записи которых изложены в упр. 10.2.

г. На первом этапе смыслового контроля данных из книжки КГ-1М реализуются следующие алгоритмы: проверка на допустимые абсолютные пределы изменения гидрологических элементов; проверка на предельные значения интенсивности изменения величин между сроками наблюдения; проверка на логическую совместимость совокупности элементов.

При контроле по первому алгоритму должно выполняться условие:

$$X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max}, \quad (10.1)$$

где X_{\min} , X_{\max} — минимальное и максимальное значение элемента, приведенное в паспорте поста. По данному алгоритму контролируются следующие элементы: уровень воды, температура воды, температура воздуха, осадки, высота снега на льду, толщина льда, толщина погруженной шуги. Контролю на допустимые пределы подлежат осадки, полученные по осадкомеру, и значения которых записаны в КГ-1М вещественным числом с точностью до сотых долей (сотые доли числа при контроле не учитываются, так как они представляют собой код вида осадков). Уровень воды контролируется по соотношению (10.1), все остальные элементы по соотношению: $X_i \leq X_{\max}$. При сравнении учитывается, в каких единицах измерения представлены величины в паспорте поста и в исходных данных. Так, в паспорте поста экстремальные значения уровня приведены в дециметрах, а в КГ-1М — в сантиметрах. Проверка на предельные значения интенсивности изменения величин между сроками наблюдения осуществляется для таких элементов, как уровень воды, температура воды.

Изменение значений между сроками наблюдения вычисляется по формуле

$$\Delta X = (X_i - X_{i-1})/T, \quad (10.2)$$

где T — время между соседними сроками наблюдений. Значение ΔX не должно превышать ΔX_{\max} , приведенное в паспорте поста. Если условие не выполняется, то к анализу привлекаются дополнительные сведения и производится логический контроль по совокупности элементов. Если в срок наблюдения или в предшествующий срок наблюдались такие явления, как затор, зажор, ледоход, шугоход, то значение уровня в данный срок считается верным. Если перечисленные ледовые явления отсутствуют, но в данный срок наблюдения или в предшествующий ему срок выписываются коды,

отражающие искажение уровня воды естественными или искусственными явлениями, или же выпадали осадки, то значение уровня считается также верным. Если ни одно из названных явлений не наблюдалось, а в срок, следующий за данным ($i + 1$), уровень такой же, как и в предшествующий срок ($i - 1$), значение уровня в данный срок наблюдения i принимается равным значению в срок ($i - 1$). Если значение уровня в сроки ($i - 1$) и ($i + 1$) отличаются друг от друга, то уровень в данный срок наблюдения ставится под сомнение. Логический контроль осуществляется совместно по книжкам КГ-1М и КГ-3М.

д. В результате контроля печатаются таблицы с ошибочными значениями элементов. Таблицы должны быть достаточно удобными для визуального анализа и содержать не только указание о сомнительности величины, но и информацию о том, по каким критериям величина забракована. Если в какой-либо строке книжки обнаружена ошибка, то печатаются данные всей строки с указанием сомнительных значений и номера алгоритмов, по которым данный элемент забракован. Размещение данных на алфавитно-цифровой печати рассматривается в упражнении 10.8.

Упражнение 10.8. Алгоритмы обработки данных из книжки КГ-1М, вкладыша КГ-1МС, книжки КГ-3М и получение месячных таблиц на АЦПУ.

Д а н о: данные гидрологических наблюдений, проконтролированные на ЭВМ и записанные месячными массивами по каждому посту на магнитной ленте согласно макетам книжки КГ-1М, вкладыша КГ-1МС, книжки КГ-3М.

Т р е б у е т с я: 1. Рассмотреть алгоритмы обработки данных гидрологических наблюдений (уровней и температуры воды, состояния водного объекта, температуры воздуха и осадков) и получение таблицы «Ежедневные данные гидрологических наблюдений».

2. Рассмотреть алгоритм обработки данных измерения расхода воды и получение таблицы «Измеренные расходы воды».

Р е ш е н и е: 1. Для оперативного обслуживания потребителей предусмотрено получение на ЭВМ таблиц с результатами обработки гидрологической информации за месячный период. С этой целью составляются алгоритмы расчета необходимых данных и макет выводной таблицы. Алгоритмы обработки составляются на основе анализа информации, выбора расчетных формул, формализации методов ручной обработки, учета особенностей способов измерений, расчетов и представления результатов обработки. Рассмотрим далее алгоритмы обработки, реализованные на ЭВМ ЕС.

а. Обработка месячного массива данных по уровням воды включает вычисление средних значений уровня за сутки, декаду, месяц, а также определение экстремальных уровней за месяц и дат их наблюдения. Прежде всего за каждые сутки объединяются данные из КГ-1М и КГ-1МС путем расстановки по хронологии данных самописца между сроками основных наблюдений (уровни по само-

писцу могут быть не за каждые сутки). Признаком того, что на посту работал самописец, является пустая графа 2 в строке 7.

Средний суточный уровень вычисляется по формуле, учитывающей вес времени для каждого значения уровня воды:

$$H_{\text{ср.сут}} = \left(\frac{H_0 + H_1}{2} T_{1-0} + \frac{H_1 + H_2}{2} T_{2-1} + \dots \dots \dots + \frac{H_n + H_{24}}{2} T_{24-n} \right) : 24, \quad (10.3)$$

где H_1, H_2, \dots, H_n — уровни, измеренные в любые сроки суток между 0 и 24 ч; H_0 и H_{24} — уровни воды соответственно в 0 и 24 ч. При отсутствии в исходных данных срока 24 ч расчетных суток H_{24} принимается равным H_0 последующих суток (при отсутствии срока 0 ч расчетных суток H_0 принимается равным H_{24} предыдущих суток). При отсутствии сроков 0 и 24 ч уровень на границе суток рассчитывается по интерполяции между крайними сроками наблюдений смежных суток:

$$H_{24} = H_n + \frac{(H_{i+1} - H_n)(24 - T_n)}{(24 - T_n) + T_{i+1}}, \quad (10.4)$$

$$H_0 = H_n^{i-1} + \frac{(H_1 - H_n^{i-1})(24 - T_n^{i-1})}{(24 - T_n^{i-1}) + T_1}, \quad (10.5)$$

где $i + 1$ — индекс последующих суток; $i - 1$ — индекс предыдущих суток; H_{24}, H_0, H_1, H_n — значения уровня воды за сроки наблюдений текущих суток; T_1, T_n — первый и последний срок наблюдений текущих суток.

Для первого и последнего числа месяца H_{24} и H_0 вычисляется с учетом сроков наблюдений, записанных в строках 21 и 22 (последнего срока предыдущего месяца и первого срока последующего).

Средний суточный уровень не вычисляется, если в течение суток хотя бы в один из сроков уровень отсутствует. При этом причины отсутствия (пропуск наблюдения, река промерзла или пересохла, в русле стоячая вода) запоминаются, при обработке формируются соответствующие признаки, которые используются при дальнейшей обработке и печати месячной таблицы.

При отсутствии уровня вследствие пропуска в наблюдении вместо значения уровня будет печататься минус. Вместо значения уровня будет печататься «прсх» или «прмз», если река промерзла или пересохла. Определяющими признаками этих случаев являются:

1) вместо значения уровня в колонке 3 книжки КГ-1М в срок наблюдения стоит наклонная черта/. При этом: а) если за данный срок наблюдения в колонке 4 или 5 книжки КГ-1М записан код 575, то печатается «прмз»; б) если за данный срок наблюдения в этих колонках записан код 660, то печатается «прсх».

Если в течение суток были сделаны измерения уровня и в один из сроков отмечено пересыхание русла («прсх»), то средний суточный уровень не вычисляется. В таблице будет печататься высший уровень за данные сутки, а в примечании под таблицей дается пояснение: «Приведен высший уровень, отмечалось «прсх» с указанием числа.

Если в течение суток в один из сроков отмечался пропуск наблюдения (знак —), а в другой из сроков «прсх», то вместо среднего суточного уровня будет печататься знак —. В примечании под таблицей в этом случае дается пояснение «состояние «прсх» перемежалось паводками» с указанием числа.

Если в один из сроков, используемых для подсчета среднего уровня воды рядом с числовым значением уровня стоит признак пониженной точности, то этот признак присваивается среднему значению уровня за сутки и печатается в таблице.

Среднее декадное и среднее месячное значение уровня вычисляются как среднее арифметическое из средних суточных значений за декаду или месяц. Кроме того, средний месячный уровень не вычисляется, если хотя бы за одни сутки не вычислен уровень или в случае нарушения однородности ряда в течение месяца (признак нарушения однородности ряда указан в строке 5 книжки).

Если вместо среднего суточного значения уровня за все сутки декады (месяца) было принято в результате обработки «прсх» или «прмз», то вместо среднего декадного (среднего месячного) уровня принимается «прсх» или «прмз» и печатается в таблице. Во всех остальных случаях печатается знак —.

Высший уровень воды за месяц принимается равным значению, записанному в строке 6 КГ-1М. Дата наблюдения высшего уровня выбирается из срочных значений уровня, записанных в КГ-1М и КГ-1МС. При этом, если в течение месяца значение высшего уровня встречалось в течение двух и более суток, то определяется первая и последняя дата, а также количество суток, в которые оно отмечалось. Если в течение месяца имелись случаи отсутствия наблюдений, то дата не определяется.

Низший уровень воды за месяц принимается равным значению, записанному в строке 6 КГ-1М. Если рядом с числовым значением уровня записан знак /, являющийся признаком того, что в течение месяца наблюдалось промерзание или пересыхание реки, то в зависимости от кода состояния реки (575 и 660) в колонке 4 КГ-1М вместо низшего уровня в таблице будет печататься «прмз» или «прсх». Дата наблюдения низшего уровня выбирается аналогично дате высшего уровня.

Обработка результатов измерения температуры воды заключается в вычислении средних значений температуры воды за сутки, декаду и месяц, а также в определении наибольшей температуры за месяц и даты ее наблюдения.

Средняя температура за сутки вычисляется как средняя арифметическая из значений температуры за 8 и 20 (7 и 19) ч. Если за сутки

приведены значения температуры воды в еще какие-либо сроки, кроме перечисленных, то эти значения при подсчете среднего суточного в расчет не принимаются. Если температура воды измерялась в один срок 8 (7) ч, то она принимается за среднюю суточную. Среднее суточное значение температуры воды вычисляется с точностью до десятых долей градуса. В случае пропуска измерения температуры воды в один из сроков или пересыхания реки средняя температура за данные сутки не вычисляется.

При вычислении средней декадной температуры воды за неполную декаду, т. е. за 8 или 9 дней, когда в месяце 28 или 29 дней, а также за декаду, содержащую 11 дней (если в месяце 31 день), полученная сумма соответственно делится на 8, 9 или 11.

При отсутствии измерений температуры воды вследствие пересыхания реки или пропуска в наблюдениях в течение одного или двух дней средняя декадная температура вычисляется как средняя за число суток без «прсх» или без дней с пропуском наблюдений. Во всех остальных случаях, когда по какой-либо причине средняя суточная температура не вычислена в течение декады более чем за двое суток, средняя температура за данную декаду не вычисляется.

Если сумма средних значений температуры воды за декаду получилась равной 0,5 °С и менее, средняя температура за декаду принимается равной нулю.

Средняя месячная температура воды вычисляется делением суммы средних декадных значений температуры на три (число декад в месяце). Среднее месячное значение температуры воды вычисляется только в том случае, если имеются данные за все три декады.

Наибольшая температура воды за месяц и даты ее наблюдения выбираются так же, как и высший уровень воды.

Обработка результатов измерений температуры воздуха заключается в вычислении средних значений температуры воздуха за сутки с точностью 0,1 °С. Значение средней температуры за сутки вычисляется по тем же правилам, что и температура воды.

В исходных данных могут быть приведены как результаты измерения осадков по осадкомеру, так и результаты визуальных наблюдений. По данным осадкомера вычисляется суммарное количество осадков за сутки с точностью до 0,1 мм. Если хотя бы в один из сроков был пропуск в наблюдении или же в один из сроков производились только визуальные наблюдения, то суммарное количество осадков не вычисляется. В таблице будет печататься знак—.

Если в течение суток производились только визуальные наблюдения (в графах колонки 8 книжки КГ-1М в срок наблюдения записан один из кодов: 1; 2; 3), то в месячной таблице за соответствующие сутки будет печататься вид осадков.

Если в графе 2 строки 8 КГ-1М стоит —, то суммарное количество осадков не вычисляется в связи с отсутствием осадков или отсутствием наблюдений. В этом случае за каждые сутки просматривается содержимое граф колонки 8 «Осадки». Если в течение

суток наблюдения за осадками не производились в соответствии с программой (графы пустые), то в таблице печатается знак —.

Если в течение суток осадки отсутствовали (в графе записан знак /), то в таблице на месте осадков ничего не печатается.

При ручной обработке данных по состоянию водного объекта анализ сведений, записанных наблюдателем в полевую книжку, проводится специалистом-гидрологом. При автоматизированной обработке должно быть произведено обобщение срочных сведений о состоянии водного объекта. С этой целью при составлении алгоритма обработки проведено объединение оперативных кодов состояния в группы, называемые режимными, поскольку они будут использоваться при анализе и публикации режимной гидрологической информации. Например, такие явления, как ледостав с ровным ледяным покровом, ледостав с торосами, шуговая дорожка, вода на льду объединены в одну группу — ледостав. В результате обобщения выделено около 40 режимных групп, в то время как оперативный код включает более 100 явлений (см. приложение 4). Следует заметить, что перечень режимных групп, используемый при обработке информации на ЭВМ «Минск-32» существенно усовершенствован в связи с созданием новой системы оперативных кодов. Таким образом, исходными данными для автоматизированной обработки состояния водного объекта являются коды состояния, записанные за каждый срок наблюдения в книжке КГ-1М; массив оперативных кодов в объеме, приведенном в приложении 4; массив режимных групп с перечнем оперативных кодов, принадлежащих соответствующим режимным группам.

Оперативный код состояния преобразуется в режимный код по следующему алгоритму. Проверяется код состояния в срок наблюдения (назовем далее срочным кодом) на соответствие кодам внутри одной режимной группы.

При соответствии срочному коду состояния присваивается режимный код и далее идет анализ следующего срочного кода состояния. Если код срочного состояния не соответствует ни одному из кодов состояния данной режимной группы, то производится проверка этого же срочного кода на соответствие следующей режимной группе состояний и в таком порядке производится проверка состояния по срокам наблюдений на все группы режимного кода. В результате работы программы может быть выделена за одни сутки одна или несколько групп. Все эти группы условными знаками печатаются в месячной таблице.

Рассмотрим преобразование оперативного кода состояния водного объекта в режимные группы на примере данных из табл. 10.2. За 4 марта в сроки 8, 13 и 20 ч записаны коды 565 — ледостав, ровный ледяной покров и 537 — вода на льду. Оба эти кода отнесены к одной режимной группе — ледостав, поэтому в таблице за данные сутки будет напечатан знак ледостава.

6. По окончании обработки данных наблюдений из КГ-1М, КГ-1МС формируется массив результатов обработки за месяц по

одному посту и печатаются таблицы «Ежедневные данные гидрологических наблюдений» и «Результаты ледовых измерений». Для этой цели предназначено устройство печати алфавитно-цифровой информации (АЦПУ). Одна строка листа АЦПУ содержит 128 позиций. В каждой позиции может быть отпечатан один символ (заглавная русская или латинская буква, цифры и специальные знаки).

Для написания программы печати таблицы необходимо составить макет таблицы на бланке АЦП и определить расположение данных в ней по строкам и позициям, учитывая такие характеристики величины, как точность представления и пределы их изменения. При печати месячные таблицы, получаемые на ЭВМ, оформляются следующим способом: шапки таблицы ограничиваются рамкой из пунктирной линии, колонки отделяются друг от друга только в шапках таблиц вертикальной линией из двоеточий. При печати разрядность чисел по возможности должна соблюдаться. В противном случае числа фиксируются по правому краю колонки.

2. Информация по измеренным расходам воды, прошедшая контроль на ЭВМ, записана на магнитной ленте по макету книжки КГ-3М. Обработка данных измерений заключается в вычислении измеренного расхода воды, если они не были произведены вручную на гидрологической станции.

На необходимость производства вычислений на ЭВМ указывает код 2, записанный в графе 6 строки с номером 2 книжки КГ-3М. Если графа 6 пустая, то измеренный расход воды вычисляется с целью контроля ручных расчетов.

В основу алгоритма автоматизированной обработки положен аналитический метод расчета, применяемый при ручной обработке данных (см. упражнение 4.2). Особенность составления алгоритма обработки на ЭВМ заключается в том, чтобы в схеме расчета предусмотреть все возможные условия измерения расхода воды. Частично это достигается тем, что уже при записи результатов измерений учитываются специфические условия путем их различного кодирования. Например, при наличии мертвого пространства в алгоритме вычисления его площади должно быть учтено, что мертвое пространство может быть не только у берега, но и посередине реки. Рассмотрим более подробно алгоритм вычисления в этих двух случаях. При этом напомним, что код границы мертвого пространства, примыкающего к берегу, 885 (у правого берега) и 886 (у левого берега); код границы мертвого пространства в середине реки — 888.

ЭВМ по программе прежде всего выделяет из массива «Промеры» (колонка 2 раздел «Промеры» в книжке КГ-3М) код уреза воды. Далее последовательно перебираются графы колонки 2. Встретив границу мертвого пространства, ЭВМ анализирует его значение. Если код 885 или 886, то вычисляется площадь мертвого пространства от берега (уреца воды) до границы мертвого пространства. Если код 888, то ЭВМ путем дальнейшего анализа граф колонки 2

находит второй код 888 и вычисляет площадь мертвого пространства, заключенную между двумя одинаковыми кодами.

На ЭВМ округление промежуточных значений в процессе вычисления расхода воды не производится, округляются лишь итоговые характеристики. Невязка итоговых характеристик, подсчитанная вручную и на ЭВМ, за счет округления может быть различной и в основном зависит от абсолютных значений величины и от сочетания случаев округления в сторону уменьшения или увеличения.

Как показали результаты сравнения расходов воды и площадей, вычисленных на ЭВМ и вручную, разница за счет округления в основном не превышает 1%. Однако при малых расходах (менее 1 м³/с) разница может достигать 20%. В программе обработки результатов измерения расхода воды допуск на возможную разницу в итоговых данных за счет округления принят равным $\pm aT$ (T — точность представления числа). Если расход воды вычисляется на ЭВМ с целью контроля ручных расчетов и при этом разница в итоговых данных выше предела допуска, то ручные расчеты выдаются на печать как сомнительные.

В общем виде схема расчета измеренного расхода воды на ЭВМ следующая. Вычисляется средняя скорость на вертикали. Выбор расчетной формулы производится в зависимости от детальности измерения скорости на вертикали [см. формулы (3.13) и (3.18)].

При измерении скорости интеграционным способом в книжке КГ-3М вместо точек измерения скорости (долей глубины) записывается код 10, являющийся признаком того, что измерена средняя скорость на вертикали.

После вычисления средней скорости на вертикали вычисляются последовательно все частичные площади водного сечения, мертвого пространства, живого сечения, общая площадь водного сечения. Далее рассчитываются частичные и полный расход воды. При вычислении частичных расходов воды в прибрежных отсеках значение коэффициента K принимается равным: 0,5 — при наличии мертвого пространства, примыкающего к берегу; 0,7 — глубина на урезу равна 0,00 м, берег пологий (код уреза записан в КГ-3М как 666 или 555); 0,8 — глубина на урезу больше 0,00 м, берег обрывистый (код уреза 666 или 555); 0,9 — глубина на урезу больше 0,00 м, берег — гладкая бетонная или сплошь обшитая досками стенка (код уреза записан как 664 или 554). Расчет заканчивается после вычислений площадей погруженного льда, шуги и всех характеристик, входящих в состав принятых данных.

На ЭВМ реализован также алгоритм вычисления расхода воды видеоизмененным вариантом аналитического способа (для случаев, когда число скоростных вертикалей совпадает с числом промерных).

По окончании обработки измеренного расхода воды формируется массив результатов вычислений вместе с поступившими на обработку исходными данными, записывается на магнитную ленту по определенному макету и по запросам потребителей печатается таблица «Измеренные расходы воды».

10.7. Автоматизированное получение ежегодно публикуемых гидрологических данных

Начиная с материалов за 1978 г. Госкомгидрометом вместо издававшихся раньше Гидрологических ежегодников издаются «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (ежегодник Государственного водного кадастра — ГВК).

Ежегодники ГВК часть 1 «Реки и каналы» включают данные государственного учета вод и их использования за прошедший календарный год, а данные о ледовых явлениях, характерных уровнях и расходах воды публикуются за гидрологический год.

В первой части ежегодника ГВК публикуются проверенные и обработанные результаты стандартных гидрологических наблюдений на реках и каналах, соединяющих различные водные системы или служащих для переброски стока, а также обобщенные данные учета использования вод, рассчитанные характеристики водных ресурсов и водных балансов.

В этой части ежегодника ГВК помещаются сведения об уровне, стоке, заборах воды из водных объектов и сбросах воды в них, русловых водных балансах, мутности воды, стока наносов, их гранулометрическом составе и плотности, температуре воды, толщине льда и высоте снега на льду, ледовых явлениях, ресурсах поверхностных вод.

Большинство материалов для публикации и обслуживания запросов потребителей до издания ежегодников ГВК получается на ЭВМ.

В состав таблиц, получаемых на ЭВМ «Минск-32», входят: уровень воды (средние суточные и характерные уровни воды); температура воды, толщина льда и высота снега на льду; мутность воды (срочная мутность воды и ежедневная мутность воды);

расходы воды, расходы взвешенных и влекомых наносов; гранулометрический состав и плотность наносов.

Кроме того, по разработанным программам на ЭВМ могут быть получены по запросу не публикуемые в ежегоднике ГВК таблицы «Измеренные расходы воды», «Измеренные расходы взвешенных и влекомых наносов» [30].

Упражнение 10.9. Описание алгоритмов получаемых на ЭВМ ежегодных данных по уровню и температуре воды, толщине льда и снега на льду на реках.

Д а н о: 1. Данные гидрологических наблюдений на реках, обработанные на ЭВМ и накопленные за год на магнитной ленте в виде результатов по срокам наблюдений.

2. Система автоматизированного получения ежегодных материалов ГВК.

Т р е б у е т с я: описать алгоритмы и технологию получения таблиц 10.9 а «Уровень воды», 10.9 б «Температура воды», 10.9 в «Толщина льда и высота снега на льду».

Р е ш е н и е:

Таблица 10.9 а. Исходной информацией являются уровни воды и состояния водного объекта в сроки наблюдений, записанные в книжке КГ-1М и вкладышах КГ-1МА; КГ-1МС.

Обработка кода состояния водного объекта состоит из двух этапов: а) преобразование оперативного кода КН-15 в код, используемый в режимной информации и при печати таблиц гидрологического ежегодника; б) определение кода состояния водного объекта для каждых суток. Код состояния водного объекта за каждый срок наблюдения в течение суток относят к той или иной группе режимного кода. Таким образом, за одни сутки после преобразования может быть выделена одна или несколько групп. Все эти группы необходимы в последующей обработке данных (определение характера ледостава, типа печати при отсутствии данных измерения толщины льда).

Если в результате обобщения срочных кодов КН-15 получилась одна или две режимные группы кодов за сутки, то они печатаются в годовой таблице в соответствии с принятыми обозначениями. Если за сутки в результате получилось более двух режимных групп, то для печати кода состояния за эти сутки выбираются две группы с более высоким номером. Номер группы условно определяет приоритет этой группы.

Обработка массива уровней воды за год заключается в вычислении средних и экстремальных значений за год. Средний уровень за год вычисляется по формуле

$$H_{\text{ср. год}} = \sum H_{\text{ср. мес}} / 12. \quad (10.6)$$

При отсутствии данных о среднем месячном уровне воды хотя бы за один месяц средний годовой уровень не вычисляется и на его месте в годовой таблице печатается тире.

Из всех высших месячных уровней воды выбирается высший уровень за год, а также дата (число, месяц) его наблюдения. Если в течение года максимальное значение уровня наблюдалось несколько раз, то определяется его первая и последняя даты, а также общее количество суток, в которые оно отмечалось. Для сокращенной таблицы, когда полностью отсутствуют данные за один и более месяцев, уровень за год и его дата не выбираются. Вместо них в таблице печатается знак тире. Перед выборкой низшего уровня за год (период) определяется характер ледостава (устойчивый или неустойчивый). Если неподвижный ледяной покров непрерывно наблюдался в течение периода не менее 20 суток, то ледостав считается устойчивым. Неподвижный ледяной покров характеризуют такие режимные группы, как ледостав, ледостав с торосами или с шугой, несплошной ледостав и т. д.

Если ледостав водного объекта принят как устойчивый, то определяются границы зимнего и летне-осеннего периода (в пределах календарного года). В течение года могут быть определены два

зимних периода: один в первой половине (1—6-й месяцы), другой — в конце (9—12-й месяцы).

Началом зимнего периода считается дата, когда впервые наблюдались ледяные образования (сало, забереги, ледоход и т. д.) при условии, что в последующие дни они присутствовали непрерывно (перерывы продолжительностью не более трех суток не учитываются). Определенная таким образом дата начала зимнего периода принимается только в случае, если в последующие за ней сутки наблюдался неподвижный ледяной покров не менее 20 дней.

За дату конца зимнего периода принимаются сутки, в которые последний раз в данном сезоне отмечались ледяные образования. Если за календарный год выделены два зимних периода, то минимальное значение уровня выбирается за каждый период отдельно.

Часть года, не охваченная зимним периодом, определяется как период поиска низшего уровня летне-осенней межени.

Если ледостав водного объекта определен как неустойчивый, то из всех минимальных значений выбирается низший уровень за год и дата его наблюдения. Значение низшего уровня не выбирается, если в течение года или периода было отмечено промерзание и пересыхание потока. В таблице вместо значения печатается отметка «прмз» или «прсх».

Если в течение года или периода низший уровень отмечен несколько раз, то определяется его первая и последняя даты, а также общее количество суток, в которые он встречался. Для сокращенной таблицы при отсутствии данных за один месяц и более низший уровень и его дата не выбирается. Вместо них в таблице печатается знак тире.

В зависимости от заказа на печать выдаются два вида таблиц: ежедневный уровень воды (ЕУВ) и декадный уровень воды (ДУВ). В первом случае на одном листе алфавитно-цифровой печати (60 строк) помещается таблица по одному посту, причем нижние шесть строк остаются пустыми — на их месте должны быть напечатаны выводные данные за весь период наблюдений.

Так как один лист алфавитно-цифровой печати (АЦП) составляет половину формата ежегодника, то на полном листе ежегодника будут помещаться две таблицы ЕУВ.

В первой строке каждой таблицы печатается ее название с указанием единицы измерения приводимых величин, том, выпуск ежегодника и год наблюдения. Ниже, отступив одну строку, печатается с правой стороны таблицы отметка нуля поста. Название системы высот печатается в виде: м БС, м усл., м абс. Шапка таблицы занимает четыре строки АЦПУ. Все горизонтальные разделительные линии таблицы печатаются пунктиром, а вертикальные линии — двоеточием. Выделяются 13 колонок. Колонка «число» занимает 7 позиций, все остальные колонки — по 9 позиций. Размеры даны без учета одной позиции на разделительный знак колонки.

Расположение данных в таблице строго фиксировано. Значение уровней воды в колонках таблицы печатаются с соблюдением раз-

рядности чисел. Если значение уровня воды отрицательное, то знак минус ставится непосредственно перед значением уровня. Если исходные данные полностью отсутствуют за весь месяц, то вместо значения уровня воды в таблице печатается знак тире. Если в течение календарного года выделены два зимних периода, то низшие зимние уровни и их даты печатаются в две строки: в первой — за первую половину года (1—6-й месяцы), во второй — за вторую половину года (9—12-й месяцы). Если в результате обработки выбран низший уровень за год без разделения на зимний и летне-осенний период, то его значение печатается всегда на месте низшего уровня периода летне-осенней межени, а колонки, предназначенные для записи низшего уровня зимнего периода, остаются пустыми.

Справа от значения уровня воды, отступив на одну позицию (один пробел), символами печатается состояние водного объекта. Если за одни сутки нужно напечатать символы двух явлений, то первым указывается символ явления, наиболее важного с точки зрения его влияния на режим водного объекта (группа с более высоким номером). Для печати даты наблюдения экстремального значения уровня воды предусмотрены три колонки. Если экстремальный уровень воды наблюдался в году несколько раз, то в таблице печатается первая и последняя даты его наблюдения, а также число суток, в течение которых отмечался (число случаев). Если экстремальный уровень воды наблюдался в году только один раз, то в таблице его дата печатается в колонке «первая», а колонка «последняя» остается пустой. Все даты в таблице указываются в виде числа и месяца, разделенных точкой, причем как число, так и месяц печатаются двумя цифрами (10.04). Число случаев печатается и тогда, когда оно равно единице.

Таблица «Декадные уровни воды» выдается по постам, по которым в соответствии с наставлением не печатается таблица «Ежедневные уровни воды». При заказе на печать таблицы ежегодника указывается вид таблицы и номера постов.

На одном листе АЦП помещаются данные по трем постам, а на листе ежегодника — по шести постам. Номер таблицы, ее название, том, выпуск ежегодника, а также шапка таблицы печатаются на листе один раз перед информацией первого поста и занимают пять строк. Выделяется 13 колонок. Колонка «декада» занимает 17 позиций, все остальные колонки по восемь позиций (размеры даны без учета одной позиции на разделительный знак колонки). После шапки таблицы печатается информация первого на данном листе поста. Один пост занимает 17 строк.

Значения среднего декадного, высшего, низшего уровней за месяц печатаются таким образом, что одноименные разряды чисел в колонке занимают одни и те же разряды строки. Состояние водного объекта в таблице не приводится.

Если высший (низший) уровень воды за месяц наблюдался несколько раз, то в строке «Дата» в соответствующей колонке вначале печатается первое число, после него ставится запятая и далее пе-

печатается последнее число. Если высший (низший) уровень наблюдался за месяц один раз, то его дата (число) печатается на месте «последнего числа», т. е. отступив два пробела от правого края колонки. Число случаев печатается ниже, в следующей строке, отступив два пробела от правого края колонки.

Годовые выводы в таблице занимают три строки, расположение данных в которых также фиксировано. Все величины, выходящие в состав годовых выводов, печатаются, отступив один пробел после соответствующего названия. Если высший (низший) уровень воды наблюдался один раз в году, то печатается его дата (число, месяц), после нее ставится запятая, далее оставляется один пробел и печатается число случаев. Если высший (низший) уровень воды наблюдался несколько раз в году, то при печати первая и последняя даты разделяются запятой. После печати данных по одному посту, пропустив одну строку, печатаются данные второго поста.

Таблица 10.9 б. Исходной информацией для получения таблицы являются значения температуры воды в сроки наблюдений (8 и 20 ч или 7 и 19 ч), записанные в книжке КГ-1М с точностью до 0,1 °С. В некоторых случаях значения температуры воды в диапазоне от 1,2 до 2,0 °С приведены с точностью 0,01°.

Обработка годового массива включает выборку наибольшей температуры за год и дат перехода температуры воды через 0,2 и 10 °С для весеннего и осеннего периода. Наибольшая температура воды за год и дата ее наступления (число и месяц) выбираются из наибольших месячных значений. Если значение наибольшей температуры было отмечено несколько раз, то следует определить первую и последнюю дату и количество суток в году, за которые она наблюдалась. На одном листе АЦП помещаются данные по семи постам, а на листе ежегодника — данные по 14 постам. Результаты обработки данных по температуре воды занимают четыре строки АЦП. В первой из отведенных строк печатаются: дата перехода температуры воды весной и осенью через 0,2 и 10 °С, значения температуры воды за первую декаду каждого месяца и наибольшая температура воды за год. Во второй строке печатаются температура воды за вторую декаду каждого месяца и первая дата наибольшей температуры воды за год.

В третьей строке печатается температура воды за третью декаду каждого месяца и последняя дата наибольшей температуры воды за год. Если «последняя дата» отсутствует, графа остается пустой.

В четвертой строке печатаются средние месячные значения температуры воды и число случаев (количество суток в году, за которые наблюдалась максимальная температура).

Дата перехода температуры воды через 0,2 и 10 °С, а также дата наибольшей температуры воды за год указываются в виде числа и месяца, разделенных точкой, причем как число, так и месяц печатаются цифрами (05.04). Если устойчивый переход температуры отсутствовал, то соответствующая графа таблицы остается пустой. Число случаев печатается и тогда, когда она равно единице. Значе-

ния температуры воды в колонках печатаются с соблюдением разрядности чисел. После окончания печати данных по одному посту пропускается одна строка и печатаются данные следующего поста.

Таблица 10.9 в. Исходной информацией для получения таблицы являются результаты ледовых измерений у берега и на середине реки, записанные в книжке КГ-1М. Наряду с другими результатами наблюдений все данные ледовых измерений из книжки КГ-1М подлежат долговременному хранению. Для печати таблицы ежегодника используются значения толщины льда и снега на льду на середине реки. Обработка годового массива данных включает выборку наибольшего значения толщины льда за год.

На одном листе АЦП помещаются данные по шести постам, на листе ежегодника — данные по 12 постам. В таблице приводятся данные за девять месяцев календарного года (1—6, 9—12-й). Значения величин в колонках печатаются с соблюдением разрядности чисел.

Вместо значения толщины льда печатается «прмз», если река перемерзла. Тире печатается в случае, когда толщина льда неизвестна из-за пропуска измерений в период неподвижного ледяного покрова.

На месте значения толщины льда и высоты снега на льду за какую-либо пентаду ничего не печатается (пустая графа), если толщина льда не измерялась из-за отсутствия неподвижного ледяного покрова.

Наибольшая толщина льда печатается в первой колонке в строке за 5-е число, ниже — первая дата наблюдения, в следующей строке — последняя дата и ниже печатается число случаев наблюдения наибольшей толщины льда. Если в результате обработки выбрана только одна дата, то она печатается на месте первой (в строке за 10-е число), а место последней даты остается пустым.

Упражнение 10.10. Описание алгоритмов получаемых на ЭВМ ежегодных данных по измеренным расходам воды.

Д а н о: данные измерений расходов воды на реках, проконтролированные и обработанные на ЭВМ и накопленные за год на магнитной ленте.

Т р е б у е т с я: описать алгоритмы и технологию получения таблицы «Измеренные расходы воды».

Результаты измерения и обработки расходов воды накапливаются на магнитной ленте в течение года и далее сортируются. Прежде всего расходы воды комплектуются по постам за годовой период. Внутри годового периода расходы размещаются в хронологическом порядке. Проверяется соответствие нумерации расходов воды хронологической последовательности измерений расхода воды для каждого поста, т. е. № 1 должен быть присвоен расходу, измеренному первым в данном году (например, 3 января), № 2 — расходу, измеренному вторым (например, 20 января) и т. д. Если расход воды измерен в нескольких протоках и порядок номеров расходов не совпадает с порядком дат их, то расходы помещаются

в хронологическом порядке. Кроме того, предусмотрена возможность исключения из ряда отдельных забракованных расходов воды и в связи с этим присвоения последующим расходам новых номеров.

По окончании года таблица печатается по каждому посту и рассылается в соответствующие УГКС для анализа и использования. Таблица включает «Принятые данные» всех измеренных расходов воды данного поста за год. Для большинства данных в таблице разрядность чисел при печатании не соблюдается. Состояние реки на гидростворе печатается буквенными сокращениями. Состояние водного объекта на основном посту не печатается.

В таблице следующие сокращения. При печати типа прибора и способа измерения расхода воды (колонка 14 годовой таблицы): вертушка — В; глубинные поплавки — ГП; ВГП — вертушка и глубинные поплавки (совместное измерение); поверхностные поплавки — ПП; поверхностные поплавки, пущенные по стержню — ПС; поплавки — интеграторы — ПИ; интеграционный способ измерения с помощью вертушки — ВИНТЕГР; объемный способ — объемный; способ ионного паводка — ИОНПАВД; электролитический способ — ЭЛЕКТРОЛИТ; аэрометод — АЭРОМЕТОД.

При печати метода вычисления (колонка 15 годовой таблицы): аналитический — А; графоаналитический — ГА; графический — Г; гидравлический — ГВЛ. Если расход воды измерялся с помощью поплавков, то перед буквенным индексом метода вычисления печатается значение переходного коэффициента: 0,82А.

После печати «Принятых данных» за весь год по данному посту, отступив одну строку, печатаются подтабличные примечания. Если отдельные расходы воды выражены в л/с, то об этом указывается в пояснении: расход воды выражен в л/с — № 1, 5, 7, 9.

Если в книжке КГ-ЗМ в колонке «Примечание» записан код примечания, то в пояснениях он расшифровывается следующим образом: код 1 — не учтен расход протоки; код 2 — не учтен расход поймы; код 3 — русло разделено перемычкой изо льда или шуги; код 5 — расход измерен между опорами моста; код 6 — не учтена площадь погруженного льда у берегов; код 7 — недоучтен расход воды подо льдом; код 8 — не доучтен сток поверх льда; код 9 — лед лежит на береговой отмели. После словесного пояснения печатаются номера расходов с протоками, к которым эти пояснения относятся.

Упражнение 10.11. Описание алгоритмов и технологии получения на ЭВМ таблицы «Мутность воды».

Д а н о: сведения об ежедневных измерениях единичной мутности воды и параметрах перехода от единичной мутности к средней, накопленные за год на магнитной ленте после автоматизированного контроля и предварительной обработки.

Т р е б у е т с я: описать алгоритмы и технологию получения таблицы «Мутность воды».

Р е ш е н и е: по окончании года на магнитной ленте формируются по каждому посту проконтролированные массивы данных

«Мутность воды единичная срочная» и «Параметры перехода от единичной мутности к средней». Массив «Мутность воды единичная срочная» составляется в течение года по мере поступления и контроля данных. Данные на магнитную ленту записываются подряд по мере их поступления и контроля, без сортировки по постам и во времени. По окончании года производится сортировка данных:

1) данные формируются по постам годовыми массивами;

2) внутри годового массива месячные массивы располагаются в хронологическом возрастающем порядке месяцев года;

3) справочные сведения о месте и способе отбора единичных проб мутности на посту и параметры перехода от единичной мутности к средней располагаются в начале каждого годового массива.

При обработке данных годового массива «Мутность воды единичная срочная» в начале обрабатывается отдельно каждый месячный массив, а затем годовой массив в целом.

По данным мутности единичных проб воды производится вычисление средних суточных значений мутности за все те сутки, в течение которых было отобрано несколько проб с последующим определением мутности отдельно в каждой пробе, т. е. в срок наблюдений.

В результате обработки создается месячный массив ежедневной (средней суточной) единичной мутности.

Используя параметры перехода от единичной мутности, измеренной в точке (K) или на вертикали (a), к средней мутности потока и учитывая периоды действия этих параметров, производится расчет ежедневной средней мутности речного потока

$$S_{\text{ср}} = KS_{\text{ед}} \pm a. \quad (10.7)$$

По данным средней суточной мутности вычисляется средняя декадная мутность как среднее арифметическое из суточных данных.

Среднее декадное значение мутности вычисляется только в том случае, если в течение декады нет пропуска в наблюдениях.

Если в течение декады наблюдаются периоды отсутствия стока (река пересохла, перемерзла, в русле стоячая вода), среднее декадное значение вычисляется как среднее арифметическое из суммы имеющихся значений мутности за декаду, деленное на число суток в декаде с учетом числа суток с отсутствием стока.

Среднее месячное значение мутности вычисляется как среднее арифметическое из декадных значений при условии, что средняя декадная мутность определена для всех трех декад.

После обработки всех месячных массивов по данному посту за год определяются экстремальные значения мутности воды за год и даты их наблюдения, а также повторяемость мутности. Этот массив информации служит для составления таблицы «Мутность воды».

При печати таблицы на одном листе АЦП помещаются данные по пяти постам, а на листе ежегодника — данные по 10 постам. Шапка таблицы печатается на листе ежегодника два раза.

10.8. Автоматизированное вычисление ежедневных расходов воды

Автоматизация вычисления средних суточных значений стока воды и получения таблицы «Расходы воды» вследствие трудоемкости работы является особенно целесообразной. Вместе с тем для больших рек, где однозначная связь $Q = f(H)$ отсутствует или нарушается вследствие деформации, зарастания русла, ледовых явлений, переменного подпора или по другим причинам, автоматизация вычисления средних суточных расходов воды является весьма сложной задачей.

Используемые методы автоматизации вычисления ежедневных расходов воды можно объединить в три группы: полуавтоматизированные, универсальные автоматизированные и комплексные.

К первому направлению относятся методы, основной особенностью которых является то, что вид зависимости $Q = f(H)$ и период их использования определяются специалистом, а на ЭВМ осуществляется только интерполяция и выдача на печать таблицы «Расходы воды». Универсальные методы отличаются тем, что при их реализации на ЭВМ предполагается создание единого алгоритма для вычисления стока независимо от особенностей водного и ледово-термического режима рек.

Особенностью третьей группы методов является то, что они позволяют автоматически выбирать способ вычисления ежедневных расходов воды в зависимости от особенностей фазы режима реки и предполагают использование набора (комплекса) различных вычислительных схем, которые в большинстве случаев представляют ту или иную модификацию известных способов подсчета стока, применяемых при ручной обработке. Они наиболее применимы в сложных ситуациях режима рек.

Упражнение 10.12. Описание алгоритмов вычисления средних суточных расходов воды и получение таблицы «Расходы воды» на ЭВМ.

Д а н о: 1. Сведения об уровнях воды, состоянии водных объектов и измерений расходов воды, обработанные на ЭВМ и накопленные на магнитных лентах.

2. Комплексы программ вычисления ежедневных расходов воды и получения таблицы «Расходы воды».

Т р е б у е т с я: 1. Описать алгоритмы полуавтоматизированного расчета ежедневных расходов воды.

2. Описать алгоритмы автоматизированного расчета ежедневных расходов воды методом стандартной кривой и получения на ЭВМ таблицы «Расходы воды».

3. Описать алгоритмы автоматизированного расчета ежедневных расходов воды комплексным методом.

Р е ш е н и е: 1. Метод полуавтоматизированного расчета ежедневных расходов воды основан на использовании связи расходов воды с уровнем, включая многолетние, годовые и временные за-

зависимости $Q = f(H)$. В случае когда специалистом установлено, что сток может быть подсчитан по устойчивой многолетней или однозначной годовой зависимости, автоматизированное вычисление ежедневных расходов воды производится методом криволинейной интерполяции, а для некоторых видов зимнего режима — прямолинейной интерполяции. В качестве машинного аналога графической интерполяции, применяемой при ручной обработке, служит интерполяция модифицированным кубическим сплайном, или так называемой интерполяцией с учетом хода уровня, согласующая ход гидрографа в период отсутствия измерений расходов воды с ходом уровня. Используемая при этом расчетная формула имеет вид:

$$Q = (H, T) = Q_i + \frac{Q_{i+1} - Q_i}{H_{i+1} - H_i} [H(T) - H_i], \quad (10.8)$$

где Q_i, Q_{i+1} — два последовательно измеренных значения расхода (в момент времени T_i, T_{i+1}); H_i, H_{i+1} — соответствующие им значения уровня; T — промежуток времени между измерениями расходов воды; $H(T)$ — значения уровня, соответствующие T . В тех случаях, когда при ручной обработке сток подсчитывается с использованием системы временных кривых, каждая кривая имеет свой определенный конечный период действия, границы которого не всегда могут быть определены достаточно четко. Это обстоятельство, затрудняющее автоматизацию расчета, преодолевается введением в рассмотрение непрерывной функции двух переменных уровня H и времени T :

$$Q = f(H, T) = \alpha_0(T) + \alpha_1(T)H + \alpha_2(T)H^2 + \dots + \alpha_n(T)H^n, \quad (10.9)$$

где $\alpha_0(T), \dots, \alpha_n(T)$ — заданные непрерывные функции времени, параметры которых определяются методом наименьших квадратов по результатам измерений уровней и расходов воды.

В результате многоэтапных расчетов вычисленные срочные значения расходов воды формируются в массив и печатаются в виде табуляграммы. По ним вычисляются средние суточные расходы воды по формуле

$$Q_{\text{сут}} = \sum_{i=1}^{n-1} [(Q_i + Q_{i+1})(T_{i+1} - T_i)] + (Q_1 + Q_0)T_1 + \\ + (24 - T_n)(Q_n + Q_{24})/48, \quad (10.10)$$

где n — число измерений, сут; Q_i — расходы воды, соответствующие времени измерения; Q_0 и Q_{24} — расходы воды, соответствующие наблюдениям за уровнем воды в 00 и 24 ч.

2. Схемой расчета ежедневных расходов воды методом стандартной кривой предусматривается использование сведений об уровнях воды за расчетный календарный год, а измерений расходов воды — за расчетный и предыдущий год. Использование данных измерений расходов воды за предыдущий год предусматривается в тех случаях,

когда в расчетном году производилось малое количество измерений или ими неравномерно освещена амплитуда колебаний уровня воды.

Для экстраполяции зависимости расходов воды от уровней на неохваченную измерениями часть амплитуды уровней воды используются координаты зависимости $Q = f(H)$ за многолетний период, которые после введения в ЭВМ преобразуются в аналитическое выражение в виде степенного многочлена:

$$Q_i = a_0 + a_1 H_1 + a_2 H_i^2 + \dots + a_n H_i^n, \quad (10.11)$$

где a_k ($k = 0, 1, \dots, n$) — эмпирические коэффициенты многочлена, определяемые методом наименьших квадратов по координатным точкам.

Решение о необходимости применения экстраполяционной кривой принимается на основе анализа так называемой экстраполяционной разности ΔQ_3 , представляющей собой разность между расходами воды, вычисленными по текущей Q_i и экстраполяционной Q_3 зависимостям для уровней воды H_{\max} или H_{\min} в соответствующих точках перехода с текущей кривой на экстраполяционную. Эти уровни одновременно представляют верхнюю (нижнюю) границу, по которой расчет ежедневных расходов воды производится без экстраполяции.

Автоматизированное вычисление ежедневных срочных расходов воды производится по единому алгоритму как сумма двух составляющих: расхода воды в зависимости от уровня вод и некоторой добавочной величины ΔQ , зависящей от времени наблюдения T :

$$Q(H, T) = f(H) + q(T). \quad (10.12)$$

Функции $f(H)$ и $\Delta Q = q(T)$ аппроксимируются отдельно полиномами по измерениям расходов воды за один или два года. Полученные при этом коэффициенты полиномов используются для вычисления срочных и ежедневных расходов воды по данным регулярных наблюдений за уровнем воды. Функция $\Delta Q = q(T)$ является временной характеристикой изменений состояния водного объекта и пропускной способности русла в периоды ледовых явлений, зарастания русла и т. д.

После завершения расчетов срочных значений расходов воды по формуле (10.12) вычисляются их средние суточные значения.

Средние декадные и средние месячные расходы воды вычисляются как средние арифметические из ежедневных расходов воды соответственно за декаду или за месяц.

Среднее годовое значение расхода воды вычисляется как среднее арифметическое из средних месячных значений, если эти данные имеются за все месяцы. Если среднее годовое значение расхода воды вычислено, то рассчитываются объем стока, модуль стока и слой стока. В качестве алгоритмов для расчета объема, модуля и слоя стока используются формулы (5.35), (5.38), (5.41), (5.43).

3. При автоматизированном расчете ежедневных расходов ком-

плексным методом в качестве основного алгоритма зависимости расходов воды от уровней используется формула В. Г. Глушкова вида

$$Q = a(H - H_0)^b, \quad (10.13)$$

где a , b — параметры, переменные не только для каждого пункта, но и для одного и того же пункта в зависимости от уровня воды.

Для интерполяции расходов воды с учетом хода уровня используется формула

$$Q = (H, T) = \frac{H}{H_i} \left(Q_i + \frac{Q_{i+1}H_i - Q_iH_{i+1}}{H_{i+1}} \cdot \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i} \right). \quad (10.14)$$

Параметры a и b принимаются постоянными для всего диапазона изменения уровней на посту, а для компенсации этого недостатка вводятся поправки ΔQ к расходам, вычисленным по уравнению (10.13). Оценка точности выбора кривой расходов воды выполняется программным путем исходя из оценки точности определения расхода воды и оценки допустимого отклонения точек измеренных расходов воды от кривой $Q = f(H)$. Автоматически же выносится заключение о наличии или отсутствии однозначной зависимости между расходами и уровнями воды и в случае однозначной зависимости производится вычисление срочных расходов воды за период свободного русла, формируются массивы уровней воды, измеренные в период зарастания русел и производится расчет стока за период зарастания. При наличии ледостава происходит автоматический переход к программе вычисления стока за период ледостава. Как в случае зарастания, так и при наличии ледостава вычисление срочных расходов воды выполняется по выражению

$$Q_i = K_i Q_{св.т.} \quad (10.15)$$

где K_i — коэффициент зарастания или ледостава, меняющийся во времени и определяемый на ЭВМ с использованием метода кубических сплайнов.

При отсутствии однозначной зависимости расходов от уровней для периода свободного русла автоматизированным путем выясняется наличие деформации русла на гидрологическом посту путем расчета параметров зависимости

$$h_{\max} = aH + b, \quad (10.16)$$

где h_{\max} — наибольшая глубина в створе измерений расходов воды, а параметры a и b те же, что в формуле (10.13).

Для проверки наличия деформации русла производится также автоматизированная проверка постоянства наибольшей глубины на гидрологическом створе.

В случае наличия деформации осуществляется автоматизированное построение временных кривых зависимостей расходов воды от уровня и расчет средних суточных расходов воды по этим кривым. Переход между временными кривыми производится методом

скользящих переходных кривых, суть которого в том, что временная кривая с номером i постепенно трансформируется в кривую с номером $i + 1$.

В случаях когда при деформации русла не удается получить временные кривые, ежедневные расходы воды вычисляются методом Больстера. Этот же метод используется при неустановившемся режиме реки.

При наличии паводочных петель определение параметров кривой $Q = f(H)$ производится для ветви спада от наибольшего уровня до начала зарастания или ледовых явлений по уравнению (10.13), а для ветви подъема по уравнению

$$Q = a + bH + cH^2 + \alpha H \cdot \Delta H + l\Delta H + q\Delta H^2, \quad (10.17)$$

где H — уровень при измеренном расходе; ΔH — приращение расхода; a, b, c, α, q — параметры, определяемые методом наименьших квадратов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Шкала шероховатости речных русел и пойм по И. Ф. Карасеву

п	Характеристика русел и пойм		
	А. Равнинные реки	Б. Полугорные и горные реки	В. Поймы
1	2	3	4
0,020	Прямолинейные русла канализированных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых наносов	—	—
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые). $I = 0,8 \div 1,0 \text{ ‰}$	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищ с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлениях струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих лугов) в благоприятных условиях. Правильные хорошо разработанные галечные русла в нижнем течении. $I = 3 \div 7 \text{ ‰}$	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество староречий и мелких проток
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые, с беспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические водотоки с крупногалечным покрытием ложа. $I = 7 \div 15 \text{ ‰}$	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листвы), изрезанная староречьями
0,065	Скальные русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно-валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки. $I = 15 \div 20 \text{ ‰}$	Пойма под редким кустарником и деревьями с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью. $I = 50 \div 90 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной без листвы)

Продолжение прилож. 1

п	Характеристика русел и пойм		
	А. Равнинные реки	Б. Полугорные и горные реки	Б. Поймы
1	2	3	4
0,100	Русла рек, сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Русла водопадного типа преимущественно в верховьях с крупновалунным ложем и бурным течением. $I = 90 \div 200 \text{ ‰}$	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с листвой
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла водопадного типа, загроможденные обломками скал и валунами $I = 90 \div 200 \text{ ‰}$	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей и густым ивняком
0,200	—	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, трудно проходимые поймы таежного типа

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения коэффициента Шези $C \text{ м}^{0.5}/\text{с}$ по формуле
Г. В. Железняка

R, $h_{\text{ср}}, \text{ м}$	п									
	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050	0,080	0,10	0,20
0,1	80,7	49,2	34,5	26,0	20,5	14,1	10,5	5,47	3,92	1,01
0,3	89,7	57,3	41,4	32,1	26,0	18,6	14,3	8,09	6,13	2,37
0,5	94,0	61,2	44,9	35,3	28,9	21,1	16,5	9,73	7,54	3,29
0,7	96,9	63,8	47,4	37,6	31,1	22,9	18,1	11,0	8,65	4,04
0,9	99,1	65,8	49,2	39,3	32,6	24,4	19,4	12,0	9,58	4,69
1,2	101,6	68,2	51,4	41,3	34,5	26,1	21,0	13,3	10,8	5,56
1,6	104,1	70,5	53,6	43,4	36,5	27,9	22,7	14,8	12,1	6,55
2,0	106,1	72,4	55,4	45,1	38,1	29,4	24,1	16,0	13,2	7,43
2,5	108,1	74,3	57,1	46,8	39,8	31,0	25,6	17,2	14,4	8,41
3,0	109,7	75,8	58,6	48,2	41,1	32,2	26,8	18,3	15,4	9,28
3,5	111,1	77,1	59,9	49,4	42,3	33,3	27,8	19,3	16,3	10,1
4,0	112,3	78,3	61,0	50,5	43,3	34,3	28,8	20,2	17,1	10,8
4,5	113,4	79,3	61,9	51,4	44,2	35,2	29,6	20,9	17,9	11,5
5,0	114,3	80,2	62,8	52,2	45,1	36,0	30,4	21,6	18,6	12,1

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Ординаты кривой обеспеченности при $C_s = 2C_v$

P %	Коэффициент изменчивости C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,01	1,42	1,92	2,52	3,20	3,98	4,85	5,81	6,85	7,98	9,21
0,05	1,36	1,79	2,29	2,85	3,48	4,18	4,95	5,77	6,66	7,60
0,1	1,34	1,73	2,19	2,70	3,27	3,89	4,56	5,30	6,08	6,91
0,5	1,28	1,62	1,94	2,43	2,74	2,99	3,68	4,00	4,74	5,30
1	1,25	1,52	1,82	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,60
5	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	3,00
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,67	1,80	1,94	2,06	2,19	2,30
20	1,08	1,16	1,24	1,31	1,38	1,43	1,50	1,54	1,58	1,61
30	1,05	1,09	1,13	1,16	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20
50	0,997	0,986	0,970	0,948	0,918	0,886	0,846	0,800	0,748	0,693
60	0,972	0,938	0,898	0,852	0,803	0,748	0,692	0,632	0,568	0,511
70	0,945	0,886	0,823	0,760	0,691	0,622	0,552	0,488	0,424	0,357
80	0,915	0,830	0,745	0,656	0,574	0,496	0,419	0,352	0,280	0,223
90	0,874	0,754	0,640	0,532	0,436	0,352	0,272	0,208	0,154	0,105
95	0,842	0,696	0,565	0,448	0,342	0,256	0,181	0,120	0,082	0,051
99	0,782	0,594	0,436	0,304	0,206	0,130	0,076	0,040	0,019	0,010
99,9	0,719	0,492	0,319	0,192	0,107	0,052	0,027	0,008	0,002	0,001

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Код состояния водного объекта

Пятая группа — ледовые явления

Период образования и разрушения ледяного покрова

- 511 сало
- 512 * снежура
- 513 * забереги (первичные, наносные); припай шириной менее 100 м — для озер, водохранилищ
- 514 припай шириной более 100 м — для озер, водохранилищ
- 515 * забереги нависшие
- 516 * ледоход; для озер, водохранилищ — дрейф льда; снегоход — для пересыхающих рек
- 517 * ледоход, лед из притока, озера, водохранилища
- 518 * ледоход поверх ледяного покрова
- 519 * шугоход
- 520 внутриводный лед (донный; глубинный)
- 521 пятры
- 522 осевший лед (на береговой отмели после понижения уровня)
- 523 навалы льда на берегах (ледяные валы)
- 524 ледяная перемычка в створе поста
- 525 ледяная перемычка выше поста
- 526 ледяная перемычка ниже поста
- 527 стеснение русла ледяными образованиями ниже поста (сопровождается подъемом уровня)
- 528 стеснение русла ледяными образованиями выше поста (сопровождается падением уровня)
- 530 затор льда выше поста
- 531 затор льда ниже поста

Продолжение прилож. 4

- 532 затор льда искусственно разрушается
534 зажор льда выше поста
535 зажор льда ниже поста
536 зажор льда искусственно разрушается
537 вода на льду
538 вода течет поверх льда (после промерзания реки; при наличии воды подо льдом)
539 * закраины
540 лед потемнел
541 снежница
542 лед подняло (вспучило)
543 подвижка льда
544 * разводья
545 лед тает на месте
546 забереги остаточные
547 наслуд
548 * битый лед — для устьевых участков рек; озер; водохранилищ
549 * блинчатый лед — для устьевых участков рек; озер; водохранилищ
550 * ледяные поля — для устьевых участков рек; озер; водохранилищ
551 * ледяная каша — для устьевых участков рек; озер; водохранилищ
552 стамуха
553 лед относит (отнесло) от берега — для озер, водохранилищ
554 лед прижимает (прижало) к берегу — для озер, водохранилищ

Ледостав

- 563 * ледостав неполный
564 * ледяной покров с полыньями (промоинами, пропаринами)
565 ледостав, ровный ледяной покров
566 ледостав, ледяной покров с торосами
567 ледяной покров с грядами торосов — для водохранилищ
568 шуговая дорожка
569 подо льдом шуга
570 трещины в ледяном покрове
571 наледь
572 лед нависший (ледяной мост)
573 лед ярусный (ледяной покров состоит из отдельных слоев, между которыми находится вода)
574 лед на дне (осевший, в результате промерзания реки)
575 река (озеро) промерзла
576 лед искусственно разрушен (ледоколом, взрыванием и др. техническими средствами)

Шестая группа — дополнительные сведения о состоянии водного объекта
600 — чисто

Лесосплав

- 611 * лесосплав
612 на дне топляки леса
614 залом леса выше поста
615 залом леса ниже поста

Зарастание

- 622 * растительность у берега
623 * растительность по всему сечению потока
624 * растительность по сечению потока пятнами
625 растительность стелется по дну
626 растительность на гидростворе выкошена
627 растительность легла на дно (осенью)
628 растительность занесена илом (во время спуска рыбных прудов и т. д.)
629 растительность погибла в результате загрязнения реки

Продолжение прилож. 4

Русловые процессы

- 635 обвал (оползень) берега в створе поста
- 636 обвал (оползень) берега выше поста
- 637 обвал (оползень) берега ниже поста
- 638 дноуглубительные работы в русле
- 639 намывные работы в русле
- 640 проведена расчистка русла
- 641 русло реки сужено на гидростворе для измерения расхода воды
- 642 образовалась коса
- 643 коса
- 644 образовался осередок
- 645 осередок
- 646 образовался остров
- 647 остров
- 648 смещение русла в плане

Прочие сведения

- 652 снежный завал в створе поста
- 653 снежный завал выше поста
- 654 снежный завал ниже поста
- 655 прорыв снежного завала
- 656 прохождение селя
- 657 течение реки изменилось на противоположное
- 658 сгон воды — для устьевых участков рек, озер, водохранилищ
- 659 нагон воды — для устьевых участков рек, озер, водохранилищ
- 660 река пересохла
- 661 волнение слабое 1 балл — для больших рек, озер, водохранилищ
- 662 волнение умеренное 2—3 балла — для больших рек, озер, водохранилищ
- 663 волнение сильное, более 4 баллов — для больших рек, озер, водохранилищ
- 664 стоячая вода (перемерз или пересох расположенный выше или ниже перекат)
- 665 стоячая вода подо льдом
- 666 прекратилась лодочная переправа
- 667 прекратилось пешее сообщение
- 668 началось пешее сообщение
- 669 началось движение транспорта по льду
- 670 прекратилось движение транспорта по льду
- 671 началась лодочная переправа
- 672 подпор от озера, реки
- 673 начало навигации
- 674 конец навигации

Хозяйственные мероприятия

- 677 забор воды выше поста
- 678 забор воды ниже поста
- 679 забор воды выше поста прекратился
- 680 забор воды ниже поста прекратился
- 681 сброс воды выше поста
- 682 сброс воды ниже поста
- 683 сброс воды выше поста прекратился
- 684 сброс воды ниже поста прекратился
- 685 плотина (перемычка, запруда, дамба) выше поста
- 686 плотина (перемычка, запруда, дамба) ниже поста
- 687 разрушена плотина (перемычка, запруда, дамба) выше поста
- 688 разрушена плотина (перемычка, запруда, дамба) ниже поста
- 689 подпор от засорения русла
- 690 подпор от мостовых переправ
- 691 попуски воды из озера, водохранилища

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Код УГКС

№ п/п	Название	Код
1	Северное	01
2	Мурманское	02
3	Северо-Западное	03
4	Эстонское	04
5	Латвийское	05
6	Литовское	06
7	Белорусское	07
8	ЦВ ГМО	08
9	Уральское	09
10	Украинское	10
11	Молдавское	11
12	Приволжское	12
13	Северо-Кавказское	13
14	Грузинское	14
15	Азербайджанское	15
16	Армянское	16
17	Омское	17
18	Казахское	18
19	Узбекское	19
20	Западно-Сибирское	20
21	Красноярское	21
22	Иркутское	22
23	Забайкальское	23
24	Якутское	24
25	Дальневосточное	25
26	Приморское	26
27	Камчатское	27
28	ЦЧО	28
29	Верхне-Волжское	29
30	Туркменское	30
31	Таджикское	31
32	Киргизское	32
33	Колымское	33
34	Сахалинское	34
35	Амдерминское	35
36	Диксонское	36
37	Тиксинское	37
38	Певекское	38

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Погрешность гидрологических наблюдений

Наименование элементов	Условия измерения	Единицы измерения погрешностей	Погрешность срочных наблюдений	
			средняя —	предельная ±
1	2	3	4	5
Уровень воды	Равнинные реки ¹	см	1—2	2—5
	1) защищенный пост		1—3	2—6
	2) открытый пост	см	2—3	4—6
			2—5	4—10
Наивысший уровень воды за этот год	Самописец, многосрочные наблюдения	см	2—4	4—8
	1) летняя межень	см	1—2	2—5
Расход воды	2) зимняя межень	см	2—5	5—12
	А. Измерение гидрометрической вертушкой	%		
	1) русло без поймы ²		1—2	2,5—5
			2—4	5—10
	2) русло с поймой		3—5	7—12
	3) заросшее русло		3—5	8—12
	4) ледостав		1—3	2,5—8
	5) горные реки с относительно чистым руслом		2—4	5—10
	6) горные реки с валунным руслом		5—10	12—25
	Б. Поплавочные наблюдения		4—7	10—16
Средняя глубина потока	В. Метод смешения		10—20	25—50
	А. Твердое ровное дно при $v < 1,50$ м/с, без волнения наметка, штанга	см	0,5—1	1,0—2,5
	лот	см	1—2	2,5—5,0
	Б. Илистое и валунное дно штанга, наметка, лот	см	2—3	5—8
Мутность воды	В. Зашугованное русло	см	7—15	20—45
	Определяется в пробе, взятой батометром длительного наполнения	%	5—15	10—30
Расход взвешенных наносов	Метод измерения «мутность — скорость — площадь»	%	10—25	20—50
Температура воды	1. Весенний и летне-осенний периоды	°С	0,3—0,5	0,6—1,0
	2. Предледоставный период и начальный период весеннего половодья	°С	0,6—2,2	1,2—4,5
Толщина ледяного покрова в точке измерения	1. Ледяной покров ровный	см	2	4
	2. Ледяной покров торосистый	см	4	8

¹ В знаменателе даны значения для горных рек.

² В числителе — расходы воды, измеренные многоточечным, в знаменателе — основным способом.

Список литературы

1. А лекин О. А. Основы гидрогеохимии. — Л.: Гидрометеозидат 1953.
2. Б арышников Н. Б. Речные поймы— Л.: Гидрометеозидат, 1978.— 152 с.
3. Б лизняк Е. В. Водные исследования.— М.: Речиздат, 1952.— 652 с.
4. Б ыков В. Д., В асильев А. В. Гидрометрия.— Изд. 4-е. Л.: Гидрометеозидат, 1977.— 448 с.
5. В еликанов М. А. Гидрология суши.— Л.: Гидрометеозидат, 1964.— 403 с.
6. В оскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза.— Л.: Гидрометеозидат, 1962.— 543 с.
7. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике Гидрометеослужбы.— Л.: Гидрометеозидат, 1978.— 40 с.
8. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике. Картирование снежного покрова.— Л.: Гидрометеозидат, 1978.— 76 с.
9. Г авич И. К., Л учшева А. А., С еменова С. М. Сборник задач по общей гидрогеологии.— М.: Высшая школа, 1964.— 251с.
10. Гидрологические приборы и гидрометрические сооружения, ч. I, II.— Л.: Гидрометеозидат, 1978.— 304 с.
11. Г л у ш к о в В. Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— 414 с.
12. Г о р о ш к о в И. Ф. Гидрологические расчеты.— Л.: Гидрометеозидат, 1979.— 430 с.
13. Ж е л е з н я к о в Г. В. Теоретические основы гидрометрии.— Л.: Гидрометеозидат, 1968.— 291 с.
14. Ж е л е з н я к о в Г. В. Теория гидрометрии.— Л.: Гидрометеозидат, 1976.— 343 с.
15. Ж е л е з н я к о в Г. В. Гидрология и гидрометрия.— М.: Высшая школа, 1981.— 364 с.
16. Ж е л е з н я к о в Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек.— Л.: Гидрометеозидат, 1981.— 308 с.
17. Ж е л е з н я к о в Г. В., Д а н и л о в и ч Б. Б. Точность гидрологических измерений и расчетов.— Л.: Гидрометеозидат, 1966.— 240 с.
18. К а р а с е в И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов.— Л., Гидрометеозидат, 1980.— 310 с.
19. К а р а у ш е в А. В. Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеозидат, 1969.— 416 с.
20. К о л б а с о в А. В., К о р з у н В. И., К а в е р и н А. М. Новое в водном законодательстве.— М.: Юридическая литература, 1972.— 95 с.
21. Код для составления телеграмм с результатами гидрологических наблюдений на реках, озерах и водохранилищах (КН-15).— Л.: Гидрометеозидат, 1976.— 76 с.
22. К у п р и я н о в В. В., П р о к а ч е в а В. Г. Спутниковая информация в гидрологических исследованиях.—Обнинск, изд. ВНИИГМИ—МЦД, 1979.— 65 с.
23. Л у ч ш е в а А. А. Практическая гидрология.— Л.: Гидрометеозидат, 1976.— 440 с.
24. Методическое пособие по измерению расходов воды с самолета, № 72.— Л.: Гидрометеозидат, 1966.— 52 с.

25. Методические рекомендации к измерению расходов воды рек аэро-методами.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.— 133 с.
26. Методические указания управлениям Гидрометеослужбы (система ОГСНК).— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 59 с.
27. Методические указания управления Гидрометеослужбы, № 91.— Л.: Гидрометеоздат, 1978.— 54 с.
28. Методические указания по ведению государственного водного кадастра. Разд. 1, в. 6, ч. 1. Обнинск, изд. ВНИИГМИ—МЦД, 1983.— 140 с.
29. Методические указания по ведению Государственного Водного кадастра. Разд. 1, в. 7, ч. 1. Обнинск, изд. ВНИИГМИ—МЦД, 1980.— 130 с.
30. Методические указания по ведению государственного водного кадастра. Разд. 1, в. 3, ч. 1.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.— 163 с.
31. Методические рекомендации по оценке точности и гидрологическому контролю данных государственного учета вод и их использования.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 116 с.
32. Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходные периоды.— Л.: Гидрометеоздат, 1980.— 49 с.
33. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР.— Л. Гидрометеоздат, 1970.— 90 с.
34. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, в. 6, ч. I.— Л.: Гидрометеоздат, 1957.— 400 с.
35. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, в. 6, ч. II, Л.: Гидрометеоздат, 1972.— 266 с.
36. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, в. 2, ч. II.— Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 263 с.
37. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, в. 6, ч. I.— Л.: Гидрометеоздат, 1978.— 384 с.
38. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, в. 10, ч. II.— Л.: Гидрометеоздат, 1980.— 63 с.
39. П и к у ш Н. В. Методы и приборы в гидрометрии.— Л.: Гидрометеоздат, 1967.
40. Пособие по электрополюции кривых расходов воды до наивысших уровней.— Л.: Гидрометеоздат, 1966.— 115 с.
41. Практические рекомендации по расчету разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.— 101 с.
42. Р а т к о в и ч Д. Я. Многолетние колебания речного стока.— Л.: Гидрометеоздат, 1976.— 256 с.
43. Рекомендации по применению интегральных показателей для оценки качества воды и загрязненности рек и водоемов.— Л.: Гидрометеоздат, 1977.— 72 с.
44. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду.— Л.: Гидрометеоздат, 1979.— 64 с.
45. Р о ж д е с т в е н с к и й А. В., Ч е б о т а р е в А. И. Статистические методы в гидрологии.— Л.: Гидрометеоздат, 1974.— 424 с.
46. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 111 с.
47. С о к о л о в Ю. П. Таблица и номограмма для расчета результатов гидрохимических анализов.— М.: Госгеотехиздат, 1968.— 205 с.
48. С о к о л о в с к и й Д. Л. Речной сток.— 3-е изд.— Л.: Гидрометеоздат, 1968.— 539 с.
49. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН-435-72.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 54 с.
50. Указания по расчету заилнения водохранилищ при строительном проектировании.— Л.: Гидрометеоздат, 1973.— 54 с.
51. Ф е д о р о в Н. И. Гидрометрия рек и каналов. Методы измерения расходов воды. О. Информационный центр, 1977.— 42 с.
52. Ч е б о т а р е в А. И. Общая гидрология.— Л.: Гидрометеоздат, 1975.— 544 с.
53. Ш м и д т С. В. Техника безопасности при гидрологических работах.— Л.: Гидрометеоздат, 1961.

Предметный указатель

А

- Автоматизированный контроль 383
- Автоматизированная информационная система АМС 342
- Азимут магнитный 73—75
- Алгоритм 385, 386, 388, 393, 395, 400—403
- Анализ гранулометрический, метод спиртовой 214, 215
- —, — обмера 221
- —, — фотографирования 223
- Атмосферные явления 22, 355
- Аэрометоды 319
- Аэроснимок 327
- Аэросъемка 327
- Аэрофотосъемка 323

Б

- Банк данных 347
- — специализированный 344
- Бассейн 205
- Базис 323
- Блок-схема обработки 346
- Буи 328
- Буйковая система 328

В

- Вероятность превышения эмпирических точек 300 •
- Вертикаль промерная 28, 121
- скоростная 28, 121
- Вертушка гидрометрическая 61
- , градуировка 61
- Влага гигроскопическая 209
- Вода поверхностная 342
- подземная 343
- природная, качество 258
- , химический состав 249, 253, 254
- Водосбор поверхностный 207
- Время добегания 311
- Вскрытие рек 28
- Высота слоя стока 208
- — осадков 208

Г

- Гидравлическая крупность 218, 219
- Гидробомба 323—326

- Гидрограф 24, 254
- Гидрометфонд СССР 345
- Гидродинамический процесс разбавления 259
- Гидрометрическая трубка 70
- Глубина потока в точке 30
- — средняя 37
- График комплексный 23
- Грузовместимость лодки 57

Д

- Движение неустановившееся 8, 193
- Дешифрирование ледовой обстановки 333, 335

Ж

- Жесткость общая 251
- устранимая 251
- постоянная 251

З

- Забереги 282—284
- Загрязнение 259, 264
- Закраины 197
- Зараствание 198
- Зажор 199
- Зона влияния 259
- загрязнения 259

И

- Изобаты 49
- Изотахи 127, 131, 141, 142
- Интеграция 150
- Интерполяция глубин аналитическая 50
- — графическая 50
- Информация спутниковая 329, 333
- Информативность 331
- Использование вод 343
- Искусственный спутник Земли ИСЗ 330
- —, телевизионные снимки 333, 335, 336

К

- Кинематический эффект Г. В. Желзнякова 197

Клавиатура телетайпа 373
Книжка наблюдений, полевая 14,
115, 350, 361
Код гидрологической информации
347, 348, 355, 365, 367, 370, 410—
413
— телеграфный международный 372
Кодирование 347, 361, 369, 375, 383
Корректив скорости 9
Корреляция 288—294
Коэффициент асимметрии 301
— зимний переходный 199
— зарастания 199
— изменчивости (вариации) 301
— корреляции 289, 291, 392
— Кориолиса 13, 110, 111
— модульный 209
— ледохода 280
— переходный 94, 96, 97, 98, 99
— планиметра 80
— рассеяния 74
— регрессии 294
— сопротивления подвижного дна
241
— стока 208
— турбулентного обмена 260, 261,
262, 263, 275
— устойчивости 74
— Шези безразмерный 84
— — размерный 82
— по Железнякову 83, 409
— шероховатости 408
— шугохода 286, 287
Крепость троса 55
Кривая расхода воды 176, 180
— площадей живого сечения 176, 180
— средних скоростей 176, 180
— обеспеченности расходов и уров-
ней 301, 306
— повторяемости и продолжитель-
ности уровня 297
— обеспеченности концентрации за-
грязняющего вещества 266, 267,
268
— связи соответственных уровней
313
— тахиграфическая 131, 142
Критерии подвижности 241

Л

Лед, объем 282
—, расход 279, 280
—, толщина 42, 43
— — допустимая при движении ав-
томашин 57, 58
Ледовая обстановка 334, 335
Ледостав 28
Ледоход 28
Лента магнитная 101
Линия наибольших глубин 52

М

Магистраль 101
Массив данных 368, 396
Метод аналитический вычисления
расхода воды 119, 120, 136
— — — взвешенных наносов 232,
234
— — — влекомых наносов 243,
244
— графический вычисления расхода
воды 122—124, 137
— — — взвешенных наносов 237
— графоаналитический вычисления
расхода воды при свободном русле
127
— — — — при ледяном покрове
148
— — — — взвешенных наносов 237
— гидравлический вычисления ско-
рости течения 81
— изотах 127, 141
— космический 330—336
— статический 287
Модель расхода 117
Модуль стока 207
Морфологический расход 196
Мутность 231, 332, 363

Н

Наносы взвешенные 232, 233
— влекомые 232, 233
— донные 233
—, классификация частиц 214
—, масса 210
—, плотность 211
Нивелирование гидрологического
поста 5
Нуль наблюдений 7
— графика гидрологического поста 6

О

Обеспеченность гидрологической ве-
личины 300
Обстановка работ 365
Общегосударственная служба наблю-
дений и контроля за загрязнением
объектов окружающей среды —
ОГСНК 258, 261
Осадки 208
Отряд гидрометрический, состав 56
Охрана водных ресурсов 258

П

Паводок ионный 157
Паводочная петля 195
Параметр гидроморфологический

М. А. Веляканова 195, 196
 — — Г. В. Глушкова 39, 195, 196
 — — Г. В. Железнякова 195, 196
 — кинетичности 193
 Паспорт поста 6, 379
 Периметр смоченный 38, 44
 Перфолента 375, 371
 Перфокарта 379, 383
 Планиметрирование 80
 Площадь живого сечения 35
 — водного сечения 35
 — мертвого пространства 34, 35
 Погрешность гидрологических наблюдений 18, 144
 — глубин 37
 — гидравлического радиуса 38
 — зимнего стока 143
 — коэффициентов корреляции 293
 — — вариации 303
 — — регрессии 294
 — — Шези 105
 — площади сечения 37
 — расстояний 37
 — расхода 171
 — скорости, измеренной вертушкой 105
 — —, — поплавками 107, 109
 — —, — авиаизмерений 327
 — случайная 18
 — систематическая 18
 — средняя квадратическая 19
 — уклона 9
 — уровня 12
 — химического анализа воды 250
 Показатели гидрологические загрязненности потока 264
 — — пространственного загрязнения 271
 Поплавок поверхностный 100
 — интегратор 93
 Подземное питание 254
 Поток селевой 103
 —, транспортирующая способность 242
 Пост гидрологический 5
 — — уровень 6
 — — расходный 6
 Правила безопасности при аэрогидрометрических работах 59
 Предельно-допустимая концентрация ПДК 265, 266—268
 Приводка 7
 Профиль реки поперечный 35, 42
 — водного сечения, схематизированный 46
 Показатель стока растворенных веществ 257
 Пункт наблюдений, репрезентативный 315

Р

Радиус гидравлический 38
 Разностная интегральная кривая 317
 Расход воды авиаизмерение 323
 — —, автоматизированный расчет 405
 —, полуавтоматизированный 403
 — — в сечении 115
 — —, аналитический метод 119, 120, 136
 — —, графический метод 122—124, 137
 — —, графоаналитический метод 127, 148, 237
 — — на вертикали 124—127, 140
 — —, при ледяном покрове 133
 — —, способ ионного паводка 157
 — —, — объемный 166, 167
 — —, — поверхностных поплавков 144
 — —, — электролитический 162
 — —, точность определения 169
 — взвешенных наносов, аналитический метод 232, 234
 — влекомых наносов, аналитический метод 243, 244
 — — — графический метод 237
 — — — в точке 237, 238
 — растворимых веществ 255
 — тепловой 276
 — фиктивный 88
 Рейка гидрометрическая 17
 Рекомендации к измерению скорости в точке 66
 Ряд наблюдений репрезентативный 314

С

Самоочищение 259
 Связь обеспеченности, повторяемости и характеристики года 305
 Сечение водное 35
 — живое 35
 Сеть гидрологических постов 17, 18
 Синтаксический контроль 384
 Слой стока воды 208
 Скоростная вертикаль 119, 120
 Скорость течения, динамическая 84
 — — арифметический способ вычисления 72
 — — начальная 61
 — — поверхностная на вертикали 76, 77
 — — донная на вертикали 76, 77
 — — в точке на вертикали 76, 77
 — — средняя на вертикали 79
 — — средняя в сечении 121
 — дрейфа льда 333

— погружения гидробомбы 325
 — всплытия масла 325
 — падения гидробомбы в воздухе 325
 — движения судна 31
 — движения автомашины по льду 59
 Способность водотока предельная 242
 — — транспортирующая 242
 Способ определения скорости течения арифметический 72
 — — — — геометрический 73
 — — — — вертушкой
 — — — — многоточечный 64
 — — — — основной 65
 — — — — ускоренный 66
 — — — — интеграционный 92, 328
 — — расхода воды интеграционный, по всему сечению 149, 150
 — — — — по поверхностной скорости 153
 — — — — по скорости на вертикали 156
 — смещения 167
 Створ достаточного перемешивания 275
 Степень перемешивания 275
 Сток растворенных веществ 255
 — тепловой 277, 278
 —, объем 207
 Съемка аэрогидрометрическая 318

Т

Таблица градуировочная 63
 — годовая расходов 205
 — — уровней 23
 — расхода воды, расчетная 204
 Температура воды средняя по сечению 276, 277
 Техника безопасности 55

У

Увязка кривых расхода площади и скорости 183
 Уровень воды 6
 — — средний суточный 21, 383
 — — средний месячный 336
 — — средний годовой 23
 — — высший, низший за год 23
 — — условный, срезочный 47
 — — медианный 298
 — — квадратильный 298
 —, продолжительность 295—297
 — расчетный 112, 113
 — соответственный 310
 —, срезка 29, 48, 201
 Уклон водной поверхности 8
 — — — продольный 8
 — — — поперечный 13

Уравнения расхода воды при автоматизированных методах вычисления 404—407
 — регрессии 294
 Уровень повторяемости 295—297
 Устройство запоминающее 331

Ф

Фарватер 52
 Фокусное расстояние 336, 337
 Форма выражения химического состава воды ионная 248
 — — — — эквивалентная 248
 — — — — процент-эквивалентная 249
 Фотосъемка 336
 Фотограмметрические координаты 339
 Фракциометр 218

Х

Характеристики стока 205—209
 — водного сечения, гидравлические 35, 41, 43
 — — — морфологические 35, 41, 43

Ц

Цена деления планиметра 81

Ч

Частота 297
 Число Фруда 95
 — — локальное 95
 — — относительно средней скорости 95
 — — относительно поверхностной скорости 95
 — — относительно наибольшей скорости 95

Ш

Ширина реки 37, 43
 Шкала шероховатости речных русел и поймы 408
 Шуга 283
 —, объем 286
 —, расход 281
 Шугоход 285, 286

Э

Экстраполяция кривой расхода для пойменных створов 185, 186, 187

Электрическая проводимость 162,
163, 164
Эпюра на вертикали скорости 239
— — — мутности 239
— — — единичного расхода на-
носов 239
— в живом сечении расхода 238
— — — — средней скорости 238
— — — — поверхностной скорости
128

— — — — донной скорости 128
— — — — мутности 238
— — — — единичного расхода на-
носов 238
Эффективный диаметр 230
Эхограмма 52, 53

Я

Якорь 61

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. УРОВЕНЬ ВОДЫ	5
1.1. Составление профиля гидрологического поста	—
1.2. Уклон водной поверхности	8
1.3. Обработка данных наблюдений за уровнем воды	16
1.4. Годовая таблица и график колебания уровней воды	22
1.5. Комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений	23
Глава 2. ГЛУБИНЫ РЕК	28
2.1. Приведение промеров глубин к расчетному уровню	—
2.2. Вычисление глубины реки и обработка книжек промеров	30
2.3. Построение поперечных профилей и вычисление морфометрических характеристик русла с оценкой точности определения	34
2.4. План реки в изобатах	47
2.5. Обработка данных промеров, произведенных эхолотом	52
2.6. Техника безопасности гидрометрических работ	55
Глава 3. СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ВОДЫ	61
3.1. Обработка данных градуирования вертушек	—
3.2. Скорость и направление течения в точке наблюдения	64
3.3. Средняя скорость на вертикали и в сечении	76
3.4. Гидравлико-гидрометрический способ вычисления переходных коэффициентов от средней и наибольшей поверхностной скорости к средней по сечению	94
3.5. Направление гидрометрического створа	100
3.6. Точность определения скорости течения	105
Глава 4. РАСХОД ВОДЫ	112
4.1. Приведение расхода воды к расчетному уровню	—
4.2. Расход воды, измеренный вертушкой при свободном русле	114
4.3. Расход воды, измеренный вертушкой при ледяном покрове	133
4.4. Расход воды, измеренный поверхностными поплавками	144
4.5. Расход воды, измеренный интеграционными способами	149
4.6. Расход воды, измеренный способом ионного плавка	157
4.7. Расход воды, измеренный электролитическим способом	162
4.8. Расход воды, определяемый объемным способом и способом смещения	166
4.9. Погрешность определения расходов воды	169
Глава 5. СВЯЗЬ РАСХОДОВ ВОДЫ И УРОВНЕЙ; ПОДСЧЕТ СТОКА	
5.1. Построение кривой расхода при однозначной зависимости между расходами и уровнями	175
5.2. Экстраполяция кривых расходов для пойменных створов	185
5.3. Вычисление ежедневных расходов в период ледовых образований и зарастания русла	198
5.4. Вычисление ежедневных расходов при размываемом русле	202
5.5. Годовая таблица расхода воды и вычисление характеристик стока	204

Глава 6. РАСХОД НАНОСОВ И РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ. ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ	209
6.1. Гигроскопическая влага и плотность наносов	—
6.2. Гранулометрический анализ проб наносов	214
6.3. Расход взвешенных и влекомых наносов	231
6.4. Расчет стока растворенных веществ	248
6.5. Охрана водных ресурсов. Расчеты качества вод и уровня их загрязнения	258
Глава 7. ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ И ЛЕДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ	276
7.1. Обработка данных наблюдений за температурой воды на реках	—
7.2. Расход льда и шуги	279
Глава 8. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	287
8.1. Общие указания	—
8.2. Корреляционные зависимости двух переменных	288
8.3. Построение кривых повторяемости и продолжительности уровней	295
8.4. Расчет расходов воды и уровней заданной обеспеченности	299
8.5. Оценка репрезентативности ряда наблюдений	314
Глава 9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОМЕТОДОВ В ГИДРОМЕТРИИ. СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ. ВЫСОТ- НАЯ ФОТОСЪЕМКА С БЕРЕГА	318
Глава 10. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ГИДРОЛОГИ- ЧЕСКИХ ДАННЫХ	342
10.1. Общие сведения об автоматизированной информационной системе обработки гидрологических данных	—
10.2. Технология сбора и автоматизированной обработки гид- рометрических данных	344
10.3. Запись и кодирование данных наблюдений	347
10.4. Занесение данных наблюдений на технический носитель	371
10.5. Подготовка и занесение на технический носитель спра- вочных сведений и параметров контроля данных наблю- дений	379
10.6. Автоматизированный контроль и обработка гидрологи- ческих данных	383
10.7. Автоматизированное получение ежегодно публикуемых гидрологических данных	395
10.8. Автоматизированное вычисление ежедневных расходов воды	403
ПРИЛОЖЕНИЯ	
1. Шкала шероховатости речных русел и пойм по И. Ф. Кара- севу	408
2. Значения коэффициента Шези $C_m^{0,5}$ по формуле Г. В. Же- лезнякава	409
3. Ординаты кривой обеспеченности при $C_a = 2C_v$	410
4. Код состояния водного объекта	—
5. Код УГКС	413
6. Погрешность гидрологических наблюдений	414
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	415
Предметный указатель	417

Александра Анатольевна Лучшева

Практическая гидрометрия

Редактор Л. А. Чепёлкина Художник И. Н. Кошаровский. Художественный редактор В. В. Быков. Технический редактор Е. А. Маркова. Корректор Т. В. Алексеева

ИБ № 1523

Сдано в набор 23.03.83. Подписано в печать 18.08.83. М - 29 160. Формат 60 × 90 1/16. Бум. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 26,5. Кр.-отт. 26,5. Уч.-изд. л. 29,4. Тираж 4900 экз. Индекс ГЛ—217. Заказ 793. Цена 1 р. 40 к. Гидрометеиздат, 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая, 14.