

ГЛАВА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ¹

5.1. Общие принципы определения расходов воды

Расходом воды называется ее объем, протекающий через поперечное (живое) сечение потока в единицу времени. Как правило, расход воды выражается м³/с, а для малых водотоков, родников, ручьев и т. п. – в дм³/с.

Существующие методы определения расхода воды можно разделить на *прямые* и *косвенные*.

К *прямым методам* измерения относится так называемый объемный (весовой) метод, основанный на измерении расхода воды посредством мерных сосудов с последующим делением объема воды в сосуде на время его наполнения. Этот способ применяют при контрольных замерах, градуировании водоизмерительных устройств и приборов, а также на мелиоративных системах при небольшом расходе воды.

На практике в основном пользуются косвенными способами измерения расхода воды. Особенностью косвенных методов определения расхода воды является то, что в них измеряется не сам расход, а отдельные элементы потока, при этом величина расхода получается путем вычисления.

Косвенные методы определения расхода воды можно разделить на три группы:

- по измеренным скоростям течения воды и площади поперечного сечения потока (метод «скорость – площадь»);
- с помощью мерных устройств (гидрометрических лотков, водосливов) расход определяется по гидравлическим зависимостям;
- методами смешения (электролитический, тепловой, калориметрический).

В настоящее время получили развитие два способа:

¹ Раздел написан совместно с Н. Н. Шпендик.

- интеграция скоростей по вертикали вертушками, а также посредством твердых, воздушных и жидкостных поплавков;
- интеграция поверхностных скоростей по ширине потока, а также ультразвуковыми установками.

Метод «скорость – площадь» во всех его разновидностях составляет метрологическую базу современной речной гидрометрии.

Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены по следующей модели

$$Q = \sum_{i=0}^N 0,5(V_i + V_{i+1}) \cdot f_{i+1}, \quad (5.1)$$

где V_i , V_{i+1} – проекция средних скоростей на граничных вертикалях; f_{i+1} – площадь между вертикалями.

Достоинство модели (5.1) перед другими подобными моделями в том, что данная модель допускает различную степень дискретизации поля скоростей и глубины: количество промерных вертикалей, как правило, назначается в 2...3 раза больше, чем скоростных, кроме того, она дает более точные результаты.

5.2. Измерение расхода воды гидрометрической вертушкой

При измерении расхода воды вертушкой производятся следующие виды работ:

- описание состояния реки при определении расхода воды;
- наблюдения за уровнем воды;
- промер глубин по гидрометрическому створу. Если за время определения расхода воды ожидается изменение уровня более чем на 0,1 м, то высота уровня измеряется дополнительно 3 – 4 раза. В этом случае отмечается время наблюдений за уровнем и время измерения скорости течения на каждой вертикали. По значениям наблюдаемых уровней строится график колебаний уровня за время измерений расхода воды, и с него снимаются значения

уровня для моментов времени, когда производились измерения на каждой скоростной вертикали;

- измерение скорости течения воды в отдельных точках живого сечения потока по гидрометрическому створу;
- нивелировка уклона водной поверхности.

После окончания измерений сразу же производится вычисление расхода воды и уклона водной поверхности, чтобы в случае обнаружения недочетов можно было сделать повторные измерения и наблюдения. Окончательная проверка и оформление результатов производится при камеральной обработке.

5.3. Измерение расхода воды в различных условиях

1. При наличии ледяного покрова:

- при промерах глубин в гидростворе на всех промерных вертикалях измеряется также толщина погруженного льда и шуги, а на скоростных вертикалях толщина льда и шуги измеряется повторно непосредственно перед измерением скорости;
- точки урезов воды по нижней поверхности льда в гидростворе обязательно определяются в натуре (по нескольким лункам и у каждого берега) с измерением расстояний от постоянного начала мерной ленты. Расстояние от постоянного начала до урезов по уровню воды определяется по профилю гидроствора;
- в случае образования нескольких ярусов ледяного покрова, расходы воды потоков, протекающих между прослойками льда, определяются отдельно. В каждом потоке производятся самостоятельные промеры глубин и для измерения скорости течения назначается соответствующее число вертикалей;
- если зимой поверхностный сток в русле отсутствует и русло занесено снегом, следует заранее, до начала половодья, подготовить гидростворы к весенним измерениям. Для этого в наиболее низком месте русла, в снегу прокапывается канавка шириной 0,5...1,0 м и длиной не менее 20 м, по которой измерили бы первый весенний поток. Паводочные измерения начинаются в

таком искусственном снежном русле, которое постепенно разрабатывается текучей водой.

2. При русле, заросшем травой, измерения расхода воды производится на гидростворе, на котором выкашивается водная растительность на участке реки 3...5 м выше и ниже гидроствора.

3. При косоструйном течении реки относительно гидроствора должны соблюдаться следующие условия:

- незначительная косина (до 10°) струй во внимание не принимается;
- при измерении скорости течения вертушкой, укрепляемой подвижно на штативе перпендикулярно гидроствору, даже значительная косина струй (до 30°) автоматически учитывается вертушкой и сильно снижает ошибку в величине определяемого расхода воды;
- при измерении вертушкой, подвешенной на тросе, при косине струй более 10° , дополнительно должно измеряться направление течения поплавком.

4. При неустойчивом русле выполняются следующие условия:

- в случае возникновения, вследствие плановой деформации русла на участке наблюдений, косины струй, превышающей 10° , следует или перенести гидроствор в другое место или изменить его направление так, чтобы оно было опять перпендикулярно общему направлению течения;
- при очень резкой деформации русла, когда данный участок реки для точного учета стока воды становится вообще непригодным, гидрометрический створ переносится на новое место;
- промеры глубин по гидроствору по ходу «туда» производятся перед измерением скорости на вертикалях, а по ходу «обратно» – после;
- измерение скорости течения воды в точках на вертикали ведутся от дна к поверхности.

5. При измерении с мостов необходимо выполнять следующие требования:

- при выборе моста предпочтение следует отдавать тем из них, у которых ось моста расположена перпендикулярно направлению течения реки;
- выбор низовой или верховой стороны моста для измерений производится индивидуально для каждого моста с учетом преимуществ той или другой стороны;
- если русло реки под мостом загромождено крупными валунами или сваями и т. д., которые не могут быть удалены, а также при больших размывах дна, мост не пригоден для измерений;
- в случае многопролетного моста каждый пролет следует рассматривать как отдельное русло. В каждом мостовом пролете назначается не менее трех скоростных вертикалей. Одна должна быть расположена в середине пролета моста, а две – вблизи стенок мостовых опор (берегового устоя), не ближе чем $0,5 \dots 1$ м от них и обязательно вне зоны завихрения струй потока;
- для измерения с мостов необходимо иметь специальные лебедки с большим выносом стрелы;
- при измерении расхода воды с моста по правилам техники безопасности не допускается крепить приспособления за перила моста.

5.4. Вычисление расхода воды аналитическим способом

Расход воды как результат косвенных измерений получается по данным обработанных измеренных значений элементов.

Вычисление расхода воды аналитическим способом производится в следующей последовательности:

1. Определяется площадь отсеков между скоростными вертикалями f_j посредством планиметрирования частей поперечного профиля или аналитическим методом трапеций по формуле:

$$f_j = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N_j-1} (h_{i,j} + h_{i+1,j}) \cdot b_{ji}, \quad (j = 0, n), \quad (5.2)$$

где $h_{i,j}$ – глубина воды на i -й вертикали j -го отсека, N_{j-1} – количество промерных вертикалей в отсеке (рис. 5.1); b_{ji} – ширина между промерными вертикалями в j -м отсеке.

Результат вычисления записывается с погрешностью: при $f_i < 10 \text{ м}^2$ – до $0,01 \text{ м}^2$, при $10 \leq f_i < 100 \text{ м}^2$ – до $0,1 \text{ м}^2$, при $f_i \geq 100 \text{ м}^2$ – до 1 м^2 .

2. Вычисляется средняя скорость на вертикали в зависимости от состояния реки и числа точек измерения по формулам, приведенным в гл. 4.
3. По рабочим глубинам всех промерных вертикалей со срезкой на расчетный уровень вычисляют площади живого сечения между скоростными вертикалями.

Вместо срезки глубин по всем промерным вертикалям можно сначала подсчитать площади живого сечения между скоростными вертикалями по уровню воды при промере, а затем провести срезку на разницу в площадях по уровню. Разницу в площадях определяют как

$$\pm \Delta f = b \cdot \Delta H, \quad (5.3)$$

где b – расстояние между скоростными вертикалями, ΔH – разница между уровнем при промерах и расчетных уровнях.

Полученная величина $\pm \Delta f$ прибавляется или вычитается из площади живого сечения между скоростными вертикалями, вычисленной по уровню при промере.

4. Средняя скорость $V_{j,s}$ в отсеке между скоростными вертикалями вычисляется как полусумма скоростей V_j и V_{j+1} :

$$V_j = 0,5(V_j + V_{j+1}), \quad (j=0, n). \quad (5.4)$$

5. Частные расходы q_j находят как произведение $V_j f_j$, а полный расход как

$$Q = \sum_{j=0}^{n+1} q_j. \quad (5.5)$$

Вычисляемые значения расходов воды округляются до $10 \text{ м}^3/\text{с}$ при $Q \geq 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, до первых значащих цифр при $1 \leq Q < 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$, до $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ при $0,1 \leq Q < 1 \text{ м}^3/\text{с}$ при $Q < 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, расчетная формула для полного расхода через все живое сечение приобретает вид:

$$Q = k V_i f_0 + 0,5 \sum_{j=1}^{n-1} (V_j + V_{j+1}) \cdot f_j + k^1 V_n \cdot f_n. \quad (5.6)$$

В случае, если за время измерений расхода воды уровень в реке изменился, необходимо определить расчетный уровень, который принимается при вычислении расхода воды. При изменении уровня не более чем на 10 см за расчетный уровень принимают его среднее значение за время измерения расхода.

При быстром и значительном изменении уровня расчетный уровень определяется как средневзвешенный по формуле:

$$h_{расч} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot q_j \cdot b_j}{\sum_{j=1}^n q_j \cdot b_j}, \quad (5.7)$$

где h_j – уровень над нулем графика для данной вертикали, относящийся по времени к моменту измерения скорости на глубине $0,6 \cdot h$; $q_j = n_j \cdot h_j$ – элементарный расход на данной вертикали; b_j – частичная ширина реки, относящаяся к данной вертикали.

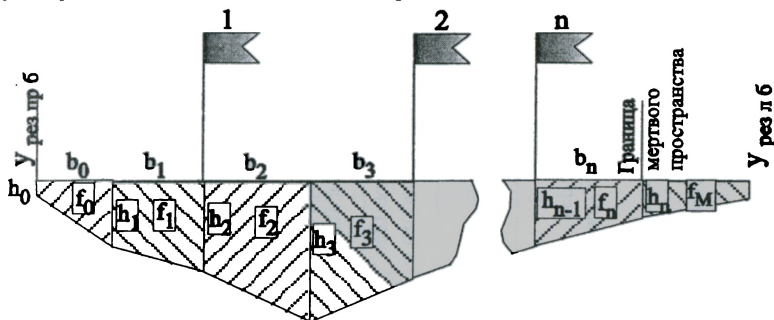


Рис. 5.1. Схема к вычислению частных площадей живого сечения

Результаты измерений записываются в книжки стандартного образца формы КГ-3М для детального способа измерения и КГ-4М для основного способа.

В соответствующих разделах книжки (бланка) для записи измерения расхода воды отмечают явления, которые могут проявляться на условиях протекания воды и отразятся на точности измерения расхода. Вычисление расхода воды аналитическим способом по формуле (5.4) ведется в табличной форме (табл. 5.1).

Результаты расчета по всем расходам и створам сводят в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Таблица для вычисления расхода воды

Промеры											
№ промерных	№ вертикалей	расстояние от постоянного начала, м	глубина, м			угол отнosa троса	поправка на угол отнosa	глубина, м			расстояние между промерными вертикалями, м
			I	II	среднее			рабочая	со срезкой	между вертикалями	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Продолжение табл. 5.1

Площадь водного сечения, м ²		Вычисление расхода воды					Для заметок
между промерными вертикалями	между скоростными вертикалями	№ скоростных вертикалей	скорость средняя, м/с		площадь живого сечения между скоростными вертикалями, м ²	расход между скоростными вертикалями, м ³ /с	
			на скоростных вертикалях	между вертикалями			
13	14	1	2	3	4	5	
E= _____ м ²					м ²		
					м ³ /с		

В табл. «Принятые данные» (табл. 5.3.) выписываются следующие характеристики расхода воды:

1. Состояние реки указывается для участка гидроствора следующими условными обозначениями: *св* – река свободная от льда; *тр* – русло заросло водной растительностью; *рлх* – редкий ледоход; *лх* – средний и густой ледоход; *заб* – забереги; *закр* – закраины; *вл* – вода течет поверх льда; *лдст* – ледостав.
2. Расчетный уровень на основном посту над нулем графика.

3. Расход воды (Q), м³/с.

Таблица 5.2

Измеренные расходы воды

№ расхода	Дата измерения	№ створа	Состояние реки на участке гидроствора	Уровень воды (см) над нулем графика основного водпоста гидроствора	Расход воды, м ³ /с	Площадь водного сечения, м ²	Скорость течения, м/с	
							средняя	наибольшая
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Продолжение табл. 5.2

Ширина реки, м	Глубина, м		Уклон водной поверхности, ‰	Способ измерения расхода	Метод вычисления расхода	Примечание
	средняя	наибольшая				
10	11	12	13	14	15	16

- Площадь водного сечения (F), мертвых пространств (F_m), погруженного льда (F_l) и шуги ($F_{ш}$) и полное ($F_{пол}$), м².
- Скорости течения: средняя (V_{cp}), и наибольшая (V_{max}), м/с.
- Ширина по уровню воды (B), м.
- Глубина: средняя (h_{cp}), наибольшая (h_{max}), м.
- Уклон водной поверхности (I) в промилле (‰).
- Способ измерения расхода воды. Приводятся сведения о вертушке, которой измерены скорости течения, о числе скоростных вертикалей в створе и количестве скоростных точек в сечении.

5.5. Измерение расхода воды поплавками

Устройство и описание поплавков, а также условия их применения рассмотрены в гл. 4.

Состав и порядок измерения расхода воды поплавками (поверхностными, глубинными или поплавками-интеграторами) те же, что и при измерении расхода воды вертушкой, кроме определения скорости.

Устройство и описание поплавков, а также условия их применения и порядок выполнения работ по измерению скоростей течения рассмотрены в гл. 4.

5.6. Вычисление расхода воды, измеренного гидрометрическими поплавками

Поверхностные поправки

Если измерение проводили поплавками, запускаемыми по всей ширине водотока, то вычисления выполняют в такой последовательности:

1. По данным промеров глубин вычисляют площадь живого сечения по основному створу.
2. Строится эпюра продолжительности хода поплавков и для каждой скоростной вертикали снимают с эпюры продолжительность хода поплавка и вычисляют поверхностную скорость.
3. Вычисляют величину фиксированного расхода (Q_ϕ) по (5.6).
4. Вычисляют действительный расход (Q) воды по формуле:

$$Q = Q_\phi \cdot K_1, \quad (5.8)$$

где K_1 – переходный коэффициент от фиктивного расхода к действительному.

Наиболее точно коэффициент K_1 определяется опытным путем, т. е. по данным измерения (5 – 6) расходов воды вертушкой и поплавками при уровнях воды, наиболее близких к уровню, при котором измерялся расход поплавками. Приняв расход, измеренный вертушкой за действительный, величину переходного коэффициента находят из соотношения

$$K_1 = Q / Q_\phi. \quad (5.9)$$

Для определения K_1 при других отметках уровня воды производят несколько одновременных измерений и строят график зависимости K_1 от уровня, используемого в дальнейшем при измерении расхода воды поплавками.

Продолжение табл. 5.3

Определение уклона водной поверхности									
берег _____ г _____ м.		начальный				конечный			
		№ сваи (рей-ки)	от-счет, см	отметки, см		№ сваи (рейки)	от-счет, см	отметки, см	
				сваи (рей-ки)	уров-ня			сваи (рей-ки)	уров-ня
Уклон водопо-	верхний								
	нижний								
Падение, м									
Уклон, ‰									
Расстояние между уклонами, водностями или между крайними точками нивелирования									

Величину переходного коэффициента часто выражают через соотношение скоростей

$$K_1 = \frac{v}{v_{нов}}, \quad (5.10)$$

где $v_{нов}$ – средняя поверхностная скорость.

При невозможности определить K_1 вышеописанными способами, можно пользоваться эмпирической формулой:

$$K_1 = \frac{C}{C + 6}; \quad (5.11)$$

где C – коэффициент Шези, значения которого приведены в *приложении К* в зависимости от величины коэффициента шероховатости.

Если измерение расхода воды производится поплавками, запускаемыми только на стрежень реки, то вычисление расхода осуществляют в следующей последовательности:

1. Вычисляют площадь живого сечения.
2. Определяют наибольшую поверхностную скорость течения как среднее арифметическое из показаний трех поплавков с наибольшей скоростью.
3. Вычисляют величину фиктивного расхода по формуле

$$Q'_ф = \bar{V}_{max} \cdot F. \quad (5.12)$$

4. Рассчитывают величину действительного расхода по формуле

$$Q = Q'_\phi \cdot K_2, \quad (5.13)$$

где K_2 – переходной коэффициент от фиктивного расхода к действительному.

Величина переходного коэффициента K_2 определяется аналогично коэффициенту K_1 . При невозможности его определения экспериментальным путем можно воспользоваться формулой

$$K_2 = \frac{C}{1,34 \cdot C + 6}. \quad (5.14)$$

Ориентировочное представление о величинах переходных коэффициентов K_1 и K_2 дает табл. 5.4.

В таблице «Принятые обозначения» в графе «Способ измерения расхода воды» поверхностные поплавки условно обозначаются ПЛП, поплавки льдины – НЛЛД и поплавки, пускаемые только на стрежень потока для определения наибольшей скорости, ПЛПС. Рядом с условным обозначением поплавков указывается общее число измеренных поплавков, например, ПЛП 10, ПЛЛД 17, ПЛПС-64.

В графе «Способ измерения расхода воды» рядом со способом вычисления (аналитический – а) указывается принятый переходной коэффициент, например а, 0,82.

По результатам измерений на плане делается уточнение положения основного гидрометрического створа в следующей последовательности:

- строится план участка реки на миллиметровой;
- для каждой группы поплавков вычисляется среднее время хода поплавок, а затем – скорость течения воды путем деления расстояния между крайними створами на среднюю продолжительность хода поплавков;
- на план наносится средняя траектория движения групп поплавков;
- в пересечении траекторий основного створа в масштабе откладываются векторы скоростей по касательной к траектории, после чего под планом строится векторный многоугольник скоростей.

Глубинные гидрометрические поплавки

Вычисление расхода воды, измеренного глубинными поплавками (или части расхода по вертикалям со скоростями течения менее 0,08...0,15 м/с), производится так же, как расхода, измеренного вертушкой.

В графе «Способ измерения расхода воды» глубинный поплавок обозначается ПЛГ и указывается число вертикалей, и число точек измерения скорости, например, ПЛГ 6/17.

Таблица 5.4

Значения коэффициентов K_1 и K_2

Характеристика русла и условий протекания	К-т	Средняя глубина, м		
		<1	1 – 5	>5
Русла прямые, чистые, земляные (глина, песок), галечные, гравийные	K_1	0,80	0,84	0,86
	K_2	0,64	0,66	0,67
Русла извилистые, частично заросшие травой, каменистые. Поймы сравнительно разработанные, с растительностью (травы, редкий кустарник)	K_1	0,75	0,80	0,83
	K_2	0,60	0,63	0,65
Русла и поймы значительно заросшие, с глубокими промоинами. Русла извилистые, сложенные из крупных валунов. Поймы со сложными косоструйными течениями	K_1	0,65	0,74	0,80
	K_2	0,55	0,59	0,62
Поймы сплошь лесные, таежного типа	K_1	0,57	0,69	0,75
	K_2	0,46	0,56	0,60

5.7. Ускоренные методы измерения расходов воды

Способы ускоренных измерений расходов воды весьма многочисленны и многообразны: наряду с точечными наблюдениями они включают и такие сложные, как интеграционные, акустические и аэрогидродинамические.

Сокращенные способы измерения расхода воды

При сокращенных измерениях уменьшается количество скоростных вертикалей до тех пор, пока среднеквадратическая ошибка полученных расходов от результатов, измеренных основным способом,

не будет превышать 5%. При этом количество скоростных вертикалей в зависимости от характеристики русла может колебаться от 1 до 3.

В настоящее время существуют два варианта сокращенных измерений:

- применение интерполяционно-гидравлической модели расхода воды;
- использование его репрезентативных элементов.

Интерполяционно-гидравлическая модель расхода воды:

$$Q = \sum_{j=1}^n \left(a_0 \left(\frac{h_j + h_{j+1}}{2} \right) + P_j \left(V_j + V_{j+1} - a_0 \left(h_j^{2/3} + h_{j+1}^{2/3} \right) \right) \right) \cdot f_j, \quad (5.15)$$

где h_j – глубина воды на j -й скоростной вертикали; P_j – весовой коэффициент: $P_j=0,7$ для прибрежных отсеков ($j=1; j=n$); $P_j=0,5$ для всех остальных отсеков ($1 < j < n$); n – количество скоростных вертикалей.

Значения a_0 устанавливаются по характерным фазам режима на основе специальных многоточечных измерений. Вместе с достаточной для практики точностью a_0 можно вычислить непосредственно по данным каждого конкретного измерения элементов расхода воды, а именно

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{V_j}{h_j^{2/3}}. \quad (5.16)$$

Преимущество модели (5.15) над ранее рассмотренной моделью (5.4) состоит в том, что она практически исключает систематическую погрешность – занижение расхода воды при сокращении скоростных вертикалей. Такой эффект достигается тем, что интерполяция средних скоростей на вертикалях по ширине отсека между ними ведется с учетом распределения глубин. При использовании интерполяционно-гидравлической модели достаточно измерять скорости всего на трех-четырёх вертикалях, размещенных на равных расстояниях. В табл. 5.5 приведен пример определения расхода при трех скоростных вертикалях в створе равнинной реки.

Отклонение полученного значения от расхода воды, вычисленного по 3 скоростным вертикалям, составило всего 2,6%.

Модель сокращенных измерений расходов воды с использованием репрезентативных элементов применима для устойчивых русел, когда площадь живого сечения (F) становится однозначной функцией уровня, все измерения расхода воды сводятся к определению средней скорости потока (V).

Таблица 5.5

Пример вычисления расхода воды р. Лесной – ст. Катин Бор на основе его интерполяционно-гидравлической модели

Определение гидравлического коэффициента и составляющих средних скоростей на вертикалях						
№ скоростной вертикали	рабочая глубина h_j , м	средняя скорость V_j , м	$h_j^{2/3}$	$a_j = \frac{V_j}{h_j^{2/3}}$	$V = a_0 h_j^{2/3}$	$\Delta V_j = V_j - V$
1	0,44	0,45	0,58	0,78	0,20	0,25
2	1,39	0,51	1,25	0,41	0,44	0,07
3	1,81	0,54	1,49	0,36	0,52	0,02

Продолжение табл. 5.5

Вычисление расхода воды								
№ скоростной вертикали	площадь отсека f_j , м ²	ширина отсека b_j , м	средняя глубина, м	$h_j^{2/3}$	$\bar{V}_s = a_0 h_j^{2/3}$	$\Delta V_s = \frac{1}{2}(\Delta V_j + \Delta V_{j+1})$, м/с	$V_s = \bar{V}_s + \Delta V_s$, м/с	$g_s = V_j \cdot f_j$, м ³ /с
$K=0,7$	1,65	1	3,3	2,22	1,11		1,11	
1	3,98	1	3,98	2,51	1,26	0,16	1,27	1,0
2	2,2	1	2,2	1,69	0,85	0,36	1,63	0,15
3	2,0	1	2,0	1,59	0,79	0,01	1,64	0,04
$K=0,7$	1,61	1	3,22	2,18	1,09			1,19

В качестве репрезентативных точек используются скорости на вертикалях в прибрежных частях потока, расположенных на расстояниях 0,2В и 0,8В (считая от одного из урезов воды). Расчетное уравнение регрессии в этом случае имеет вид :

$$V_{cp} = a_0 + a_1 \cdot V_{0,2B} + a_2 \cdot V_{0,8B} \quad (5.17)$$

Точность определения расхода зависит от фазы гидрологического режима в каналах. Точность расчетов существенно повышается, когда сохраняется призматичность и устойчивость формы русла и тогда для определения V_{cp} достаточно использовать одну репрезентативную вертикаль. В этом случае выполняется измерение непосредственно средней скорости потока (V_{cp}) в одной точке, определяемой по градуированной таблице, которая строится предварительно по поперечным размерам b , m и шероховатости русла и для заданного диапазона глубин h . Положение репрезентативной вертикали и точки для трапецидального сечения канала приведено на рис. 5.2.

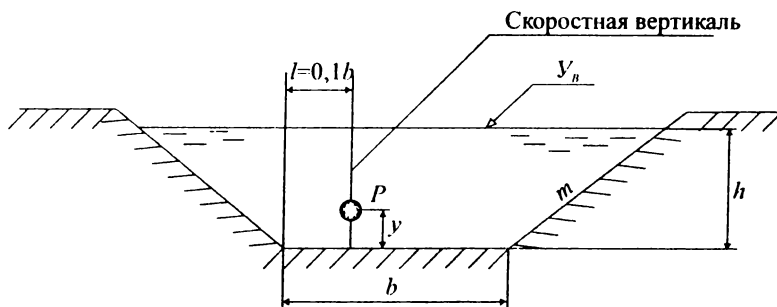


Рис. 5.2. Положение репрезентативной точки в канале трапецидального сечения

Последовательность выполнения операций при измерении расхода воды следующая:

- измеряют уровень воды (h) в створе;
- определяют по градуированной таблице соответствующие уровню воды (h) площадь живого сечения (F) и ординату y точки (P) измерения скорости (V);
- измеряют скорость (V) в точке (P);
- вычисляют расход $Q = V \cdot F$.

5.8. Определение расходов воды с интеграцией поверхностных скоростей по косым галсам

Суть интеграционного способа определения расходов воды в реках и больших каналах состоит в измерении глубин по косому галсу и определения величины сноса судна за время переправы с одного берега на другой. Схема определения расходов воды с интеграцией поверхностных скоростей по косому галсу представлена на рис. 5.3.

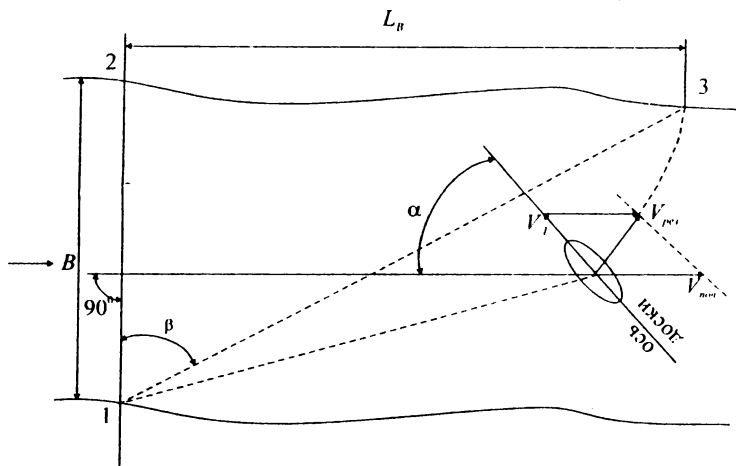


Рис. 5.3. Схема определения расходов воды с интеграцией поверхностных скоростей по косому галсу

Приборы и оборудование: лодка в комплекте – 1; наметка – 1; секундомер – 1; буссоль – 1; мерная лента – 1; вешки – 4.

Способ косых галсов может быть применен в различных вариантах. Рассмотрим некоторые из них. Работа выполняется в следующем порядке:

- на выбранном прямолинейном участке разбивают поперечный створ 1 – 2 и закрепляют его на берегах вехами. В процессе работы ведут наблюдения за уровнем воды на ближайшем водомерном посту;
- выполняют промеры глубин по галсу (рис. 5.3). Для этого устанавливают лодку у берега в точке 1, отчаливают ее и начинают

отсчет времени. Лодку перемещают не в створе 1 – 2, а чтобы ось ее была направлена примерно под углом $\alpha_1 \approx 80^\circ$ к направлению течения потока. За время движения лодки по галсу (линия 1 – 3) через равные промежутки наметкой измеряют глубины потока и записывают в журнале наблюдений. Кроме измерения глубин на галсе, измеряются углы α_1 с помощью буссоли. В момент причаливания лодки к противоположному берегу засекают время переправы;

- измеряют лентой относ лодки (расстояние L_B);
- для контроля правильности измерений работы по определению расхода воды необходимо выполнять несколько раз. Количество галсов принимается из расчета расхождения между последующими измерениями относ лодки не более 10%, а общее число галсов должно быть не менее 6;
- ширина реки (B) определяется тригонометрическим путем, т. е. $B = L_B \cdot \operatorname{ctg} \beta$. Для этого из точки 1 определяется угол β . При этом точки 1 и 3 должны быть на урезах воды, а расстояние 2 – 3 должно быть измерено также по урезу воды.

Для каждого галса вычисляется расход воды по одной из формул, приведенных ниже.

$$Q = K_1 \frac{BL_B h_{cp}}{T_B} \left(1 + \frac{B}{L_B} \operatorname{ctg} \alpha_n\right), \quad (5.18)$$

где K_1 – коэффициент, определяется как изложено выше; T_B – время

переправы с одного берега на другой; $h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$ – средняя глубина потока; n – число измеренных глубин на галсе.

Если интегрирование поверхности производилось при постоянном угле переправы, равном $\alpha_n \approx 80^\circ$, то расход можно вычислить по формуле

$$Q = \frac{L_B \cdot h_{cp} \cdot B}{T_B}. \quad (5.19)$$

При невозможности измерения ширины реки можно выразить ее ширину как $B = L_B \cdot \operatorname{ctg} \beta$ и тогда формула (5.19) примет вид

$$Q = \frac{L_B^2 \cdot h_{cp} \cdot \operatorname{ctg} \beta}{T_B} \quad (5.20)$$

При $\beta \approx 45^\circ$ получим

$$Q = \frac{L_B^2 \cdot h_{cp}}{T_B} \quad (5.21)$$

Расход воды можно определять по формуле (5.21), т. е. не переправляясь на противоположный берег реки. Соблюдая угол $\alpha_n \approx 80^\circ$, следует доплыть до середины реки, а затем возвратиться к берегу (рис. 5.4).

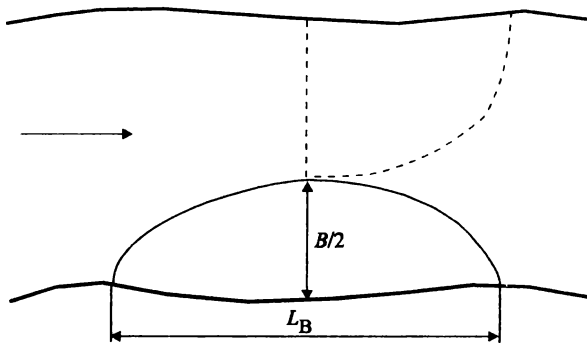


Рис. 5.4. Схема к определению расхода воды с интеграцией поверхностных скоростей по изогнутому косому галсу

Нахождение лодки на середине реки контролируется дальномером. При этом необходимо измерить расстояние L_B от места отчаливания до места причаливания (на одном берегу), время и глубину по галсу. Такой способ называется способом определения расходов воды по изогнутым косым галсам. Чтобы избежать влияния ассиметрии профиля по длине реки и неточности определения середины реки, измерения делаются несколько раз на разных участках реки и средний расход вычисляется из нескольких его определений.

5.9. Измерение расходов воды на малых реках

Применение метода «скорость – площадь» на малых водотоках сопряжено с рядом трудностей и помех, связанных с неустойчивостью дна и берегов, изначальной косоструйностью, малыми глубинами, а также большой изменчивостью расходов воды во времени, требующей повышенной частоты их измерений. В этих условиях наилучшие результаты дает применение контрольных русел и гидрологических расходомеров. Расходы воды родников и малых ручьев измеряются объемным способом.

Упорядоченные и контрольные русла

Упорядочение естественных русел включает простейшие виды работ по их спрямлению, планированию и закреплению берегов, очистке дна от камней, топляков и мусора. Если же эти меры не дают эффекта, тогда создают искусственные русла, чтобы сосредоточить поток в одном устойчивом ложе.

Контрольные русла (временные или постоянные) устраиваются для создания фиксированной формы поперечного сечения створа, исключающей деформацию, что повышает точность измерения расходов воды. Они создаются путем крепления ложа и берегов реки каменной отмосткой или бетонным покрытием.

В местах резкого перелома продольного профиля контрольное русло приобретает свойства гидрологического расходомера с устойчивой связью между расходом и уровнем воды, поэтому, получив для него зависимость $Q(H)$, в первые годы после сооружения в дальнейшем можно ограничиться лишь периодическими (контрольными) измерениями расходов воды.

Гидрологические расходомеры

Гидрологические расходомеры – это водосливы, потоки, пороги, насадки и т. п., применяемые на реках и каналах. Эти сооружения относятся к типу транзитных расходомерных установок с высокой точностью. Средняя квадратическая погрешность их составляет 2...5%, при этом можно достичь точности измерения расхода до $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$,

что в сочетании с простотой измерений (расход воды определяется по гидравлическим зависимостям на основании измерения только уровня (напора) воды) дает возможность использовать гидрологические расходомеры для автоматизации учета стока малых рек. При этом в сочетании с самописцами уровня воды они обеспечивают непрерывную фиксацию расходов воды.

Водослив

Водослив представляет собой преграду на пути движения потока в виде вертикальной стенки или порога, через которые переливается вода (рис. 5.5).

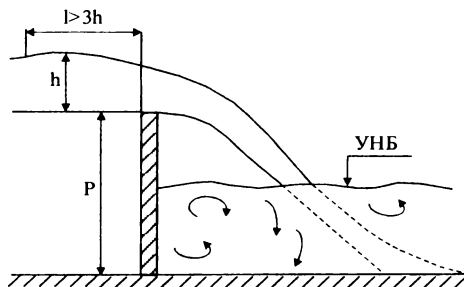


Рис. 5.5. Схема водослива с тонкой стенкой и его параметры

В зависимости от толщины этой преграды и формы его продольного профиля выделяют водосливы с тонкой стенкой, широким порогом практического профиля. По очертаниям водосливного отверстия водосливы подразделяются на прямоугольные, треугольные, трапецеидальные, радиальные, параболические и т. п.

5.10. Определение расходов воды водосливами с тонкой стенкой

Водосливы с тонкой стенкой применяют главным образом как незатапливаемые водосливы $h_{н.б.} < P_{н.б.}$, где $h_{н.б.}$ – глубина потока в нижнем бьефе; $P_{н.б.}$ – высота порога со стороны нижнего бьефа.

Треугольный водослив с тонкой стенкой рекомендуется применять при больших колебаниях расхода воды. Наиболее распространен

ны водослива с центральным углом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 5.6). Его биссектриса при установке должна оставаться вертикальной.

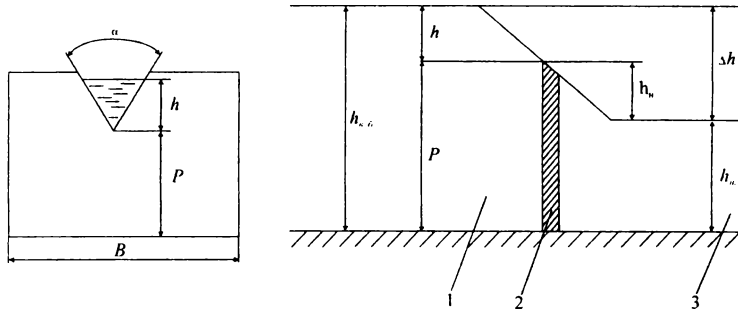


Рис. 5.6. Схема треугольного водослива с тонкой стенкой:

a – вид спереди; b – продольный разрез; 1 – подводящее русло (верхний бьеф); 2 – стенка водослива; 3 – нижний бьеф

Рабочая формула водослива для расхода воды в $\text{м}^3/\text{с}$ имеет вид:

$$Q = 2,361 \cdot C \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot h_l^{5/2}, \quad (5.22)$$

где $h_l = h + \Delta h$ – приведенный напор над вершиной центрального угла в створе измерения уровня; Δh – поправка на вязкость жидкости и поверхностное натяжение для треугольного водослива, убывает от 2,75 до 0,85 мм при возрастании α от 22,5 до 120° (при $\alpha = 90^\circ$, $\Delta h = 0,85$ мм); C – коэффициент расхода, зависящий от угла α и соотношения высоты порога P ; ширины подводящего русла B и

напора h . Например, при $\frac{P_{\text{с.б.}}}{B} \leq 0,2$ и $\frac{h_l}{P_{\text{с.б.}}} \leq 0,8$:

α	$22,5^\circ$	45°	60°	90°	120°
C	0,592	0,580	0,577	0,578	0,587

При $\alpha = 90^\circ$ получим рабочую формулу:

$$Q = 1,4 h_l^{5/2}, \quad (5.23)$$

где Q в $\text{м}^3/\text{с}$; h_l в м.

Диапазон измерения расходов воды в зависимости от размеров порога составляет $0,1 \dots 30 \text{ м}^3/\text{с}$.

Малые расходы воды измеряются треугольными водосливами с большей точностью, чем прямоугольными, так как у первых при одинаковых расходах получается больший напор. Минимальный напор, ниже которого наблюдается прилипание струи к стенке водослива, $h_{\min}=0,05 \text{ м}$; следует принимать $h_{\max}=0,6 \text{ м}$. Расстояние от стенки водослива до створа измерения напора должно составлять $\ell=3h_{\max}$. Из числа треугольных водосливов основными считаются водосливы с $\alpha=90^\circ$.

Трапецидальный водослив с тонкой стенкой удобен для установки в каналах с пологими откосами (рис. 5.7). Для земляных русел предназначен водослив с углом наклона боковых граней $\alpha=45^\circ$ ($\text{tg } \alpha=1$).

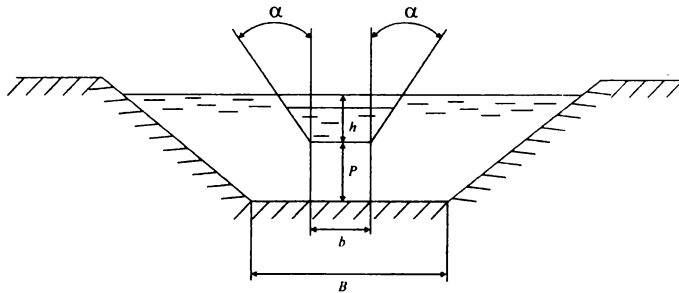


Рис. 5.7. Схема трапецидального водослива с тонкой стенкой

Расходы воды через водослив рассчитываются по формуле

$$Q = 1,86 \cdot c_f \cdot b_0 \cdot h^{3/2}, \quad (5.24)$$

где $c_f = (b_0 + h) / (b_0 + 0,25 \cdot h)$.

При $\frac{\alpha}{2}=14^\circ$ рабочая формула (5.24) примет вид

$$Q = 1,86 \cdot b_0 \cdot h^{3/2}. \quad (5.25)$$

С помощью больших трапецидальных водосливов (при $b=2 \text{ м}$) могут быть измерены расходы воды до $10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Водосливы с тонкой стенкой обеспечивают достаточно высокую точность измерения расходов воды. Среднеквадратическая относительная погрешность множителя в этой формуле составляет 2,5%.

Для успешной эксплуатации водосливов необходимо соблюдать следующие условия:

- вся вода полностью должна переливаться через водослив;
- поток перед водосливом должен быть прямолинейным;
- измерительная стрелка водослива должна быть совершенно плоской и располагаться строго вертикально и перпендикулярно к общему направлению потока перед водосливом;
- скорость течения воды непосредственно перед водосливом (скорость подхода) не должна превышать при пропуске небольших расходов воды 0,50 м/с;
- уровень воды за водосливом под струей переливающейся воды должен быть всегда ниже ребра водослива;
- под струю переливающейся воды должен быть всегда обеспечен свободный доступ воздуха;
- край выреза стрелки должен иметь толщину 1 мм и быть острым;
- ребро водослива должно возвышаться над дном реки не менее 0,1 м;
- измерение напора на водосливе должны производиться в верхнем бьефе на расстоянии от водосливной стрелки не менее трехкратной величины наибольшего напора;
- скопления наносов у водосливной стенки должно систематически удаляться.

Определение расходов воды водосливами с широким порогом

Стандартный водослив с широким порогом имеет горизонтальную прямоугольную поверхность и предназначен для применения в каналах трапециевидного сечения с большим количеством взвешенных наносов. Верховая и низовая грани вертикальные, т. е. водослив имеет острую входную и выходную кромки (рис. 5.8), ширина порога $b=B$, где B – ширина подводящего русла.

Параметры водослива принимаются следующие: $H \geq 0,06$ м; $b \geq 0,3$ м; $p_{с.б.} > 0,15$ м; $0,15 \leq p_{с.б.}/L \leq 4$, где L – длина порога водослива.

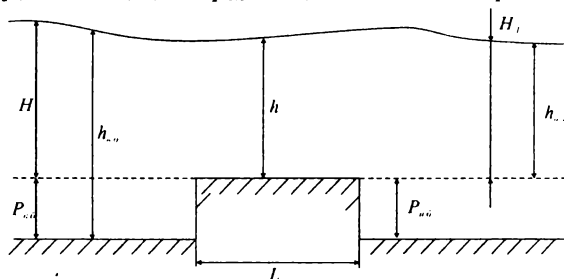


Рис. 5.8. Схема водослива с широким порогом прямоугольного профиля

Уравнение расхода воды записывается в виде

$$Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} C_l \cdot C_v \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}, \quad (5.26)$$

где C_l – коэффициент истечения; C_v – коэффициент, учитывающий влияние скорости в подводящем русле.

При соблюдении условий $0,1 \leq H/L \leq 0,4$; $0,15 \leq H/p_{с.б.} \leq 0,6$ коэффициент $C_l = 0,864$.

При условиях $0,4 \leq H/L \leq 1,6$ и $H/p_{с.б.} < 0,6$:

$$C_l = 0,782 + 0,191 \cdot H/L. \quad (5.27)$$

При $H/p_{с.б.} < 0,6$ $C_v = 1$.

Значения C_v при $H/L < 0,85$ и $0,6 < H/p_{с.б.} \leq 1,50$ изменяются от 1,011 до 1,123 (определяется по специальным таблицам). Среднеквадратическая относительная погрешность произведения $C_l \cdot C_v$ составляет 3%.

Определение расходов воды гидрометрическими лотками

Гидрометрический лоток представляет собой сужающее поток устройство, благодаря которому на коротком участке потока происходит увеличение кинематической энергии, приводящее к образованию перепада уровней. Расход воды зависит от уровня воды (напора) перед сужением (H) при заданной ширине горловины (b). По сравнению с

водосливами гидрометрические лотки в меньшей степени искажают естественную зависимость между уровнями и расходами водотока и меньше препятствуют транспорту наносов.

На рис. 5.9 дана схема гидрометрического лотка Вентури. Он состоит из входной части, конфузора (сужающей части), горловины и выходного диффузора. Дно лотка горизонтальное, все поперечные сечения прямоугольные.

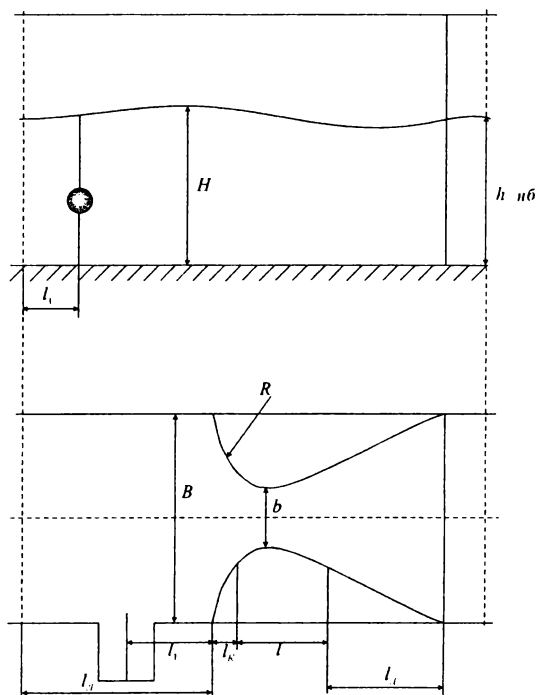


Рис. 5.9. Схема гидрометрического лотка Вентури:

а – вид в разрезе; *б* – вид сверху

Входная часть лотка имеет длину $l_1 = (4 \dots 5)H_{\max}$. В ее боковой стенке имеется отверстие, соединенное с колодезем для измерения уровня (напора). Размер $l_1 = 3H_{\max}$; $l'_1 = l_1 - 2H_{\max}$. Сужающая часть в форме криволинейного конфузора очерчивается по радиусу $R = 2(B - b)$. Размер $l_k = 1,32(B - b)$. Длина горловины $l = 1,5 \cdot H$. Выходной диффузор

имеет длину по оси $l_d = 3(B - b)$. Минимальный напор $H_{\min} = 0,05$ м. Ширина подводящего русла $B \leq 6$ м. Рабочая формула для определения расхода воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) имеет вид:

$$Q = 1,705 \cdot C_l \cdot C_v \cdot H^{3/2}. \quad (5.28)$$

Коэффициент C_l , зависящий от напора, определяется как:

$$C_l = \left(\frac{(H - 0,003 \cdot l) \cdot b}{(b + 0,004l) \cdot H} \right)^{3/2}. \quad (5.29)$$

Коэффициент C_v , учитывающий влияние скорости подхода, зависит от степени сжатия потока горловиной лотка и определяется из уравнения

$$\left(\frac{2}{3\sqrt{3}} - \frac{b}{B} \right)^2 \cdot C_v^2 - C_v^{3,67} + 1 = 0. \quad (5.30)$$

Коэффициент C_v изменяется в пределах 1,000...1,147. Лоток должен работать, как незатопленный, что соблюдается при условии $h_{н.б.}/H \leq 0,80$.

Определение расходов воды ключей и родников

Расходы воды ключей и родников обычно не велик, что позволяет применять объемный способ их измерения. Суть метода заключается в том, что расход воды определяется как $Q = W/t$, где W – объем накопившейся воды за время t . Точность измерения зависит от времени наполнения сосуда (t_0), которое можно определить по формуле:

$$t_0 = \frac{100 \cdot \Delta t}{\bar{\sigma}_Q - \delta W}, \quad (5.31)$$

где Δt – погрешность отсчета времени, с; $\bar{\sigma}_Q$ – допустимая погрешность измерения расходов воды; δW – относительная погрешность определения объема нужного сосуда, %.

Объемный способ может быть использован в качестве рабочего эталона при градуировке лотков и водосливов, так как он позволяет обеспечить необходимый класс точности измерений, удовлетворяющий требованиям метрологической аттестации средств измерений.

При каптаже ключей и родников вода обычно отводится посредством металлических и пластмассовых труб, в этом случае при свободном истечении струи из кольцевого сечения трубопровода расход воды может быть определен по формуле:

$$Q = 0,705 l F \sqrt{g / h}, \quad (5.32)$$

где g – ускорение свободного падения; l и h – геометрические параметры струи (рис. 5.10).

При выборе участка для установки транзитных водомерных сооружений необходимо руководствоваться требованиями к выбору участка для руслового гидромоста.

В период практики необходимо познакомиться с наиболее распространенными транзитными водомерами: водомерным лотком Вентури; водосливами с тонкой стенкой и водосливами с широким порогом.

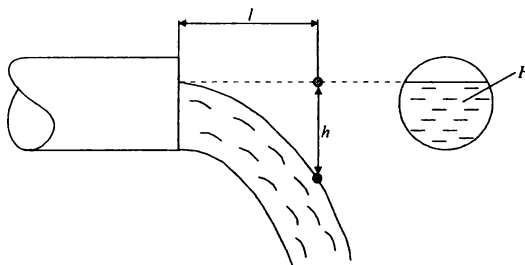


Рис. 5.10. Схема истечения воды из кольцевого сечения трубопровода

Приборы и оборудование: гидрометрический лоток – 1 шт.; треугольный водослив – 1; шпигмасштаб – 1; водомерная рейка – 1; нивелир с рейкой – 1; топор – 1; колышки – 2.

В период учебной практики на водотоке устанавливается гидрометрический треугольный водослив и лоток Вентури. При установке водослива необходимо тщательно определить нуль водослива, т. е. отметку поверхности воды, совпадающей с горизонтальной поверхностью, которая проходит через вершину угла. Это можно сделать при помощи нивелирования, после установки водослива до подъема уровня воды перед ним.

При выполнении работы необходимо построить график связи $q = f(u)$ и определить расход выбранного водотока.

Измерение расхода воды в коллекторах и дренах

В открытых горизонтальных коллекторах и дренах расход воды измеряют чаще всего объемным способом. Результаты измерений записывают в журнал (табл. 5.6).

Измерения производят не реже одного раза в день. Расход воды (графа 12) определяют делением объема мерного сосуда (графа 7) на время его наполнения (графа 11). Модуль стока (графа 13) определяют как частное от деления расхода воды (графа 12) на площадь, осушаемую дренажной системой (графа 6).

При полном или частичном заполнении водой дренажного устья измерения стока определяют скорость движения воды в устьевой трубке и площадь ее поперечного сечения. С этой целью перед паводком к концу устьевой трубы 1 присоединяют небольшую контрольную трубку 2 диаметром 20...25 мм, как показано на рис. 5.11, измеряют расстояние от устья трубы до места введения трубки l .

Таблица 5.6

Полевой журнал для записи измерений дренажного стока
за 6 июля 2001 г.

Система канала 1-К

Дата измерений	№ дрены	Глубина дрены, м	Длина дрены, м	Расстояние между дренами, м	Площадь осушения одной дренажной, га	Объем мерного сосуда, м ³	Время наполнения мерного сосуда				Расход воды из дрен, м ³ /с	Модуль стока, дм ³ /с 1 га	Примечание
							1-е измерение	2-е измерение	3-е измерение	средние значения измерений			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6,07	3	1,2	120	20	0,24	0,01	59	60	60	60	0,168	0,7	

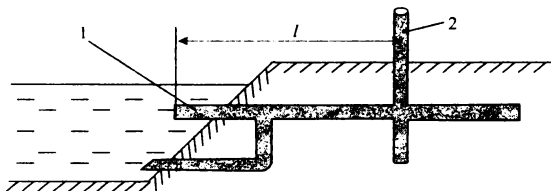


Рис. 5.11. Схема установки по контрольной трубе при измерении расходов из полностью заполненного дренажного устья: 1 – устье системы, 2 – контрольная труба

В эту трубу вводят хорошо видимый краситель и одновременно пускают секундомер. Отмечают время выхода красителя из устья. Расход воды определяют по формуле

$$Q = F \cdot l / t, \quad (5.33)$$

где F – площадь сечения трубы, дм^2 ; l – расстояние от контрольной трубки до устья, дм ; t – время прохождения красителя, с .

Водомер для незатопленной закрытой дрены – это навесной прибор, позволяющий учитывать расход воды, поступающей по дрене в открытый коллектор. Водомер надевают на конец трубы дрены. Он состоит из кожуха и водоучитывающего прибора с самописцем расхода (рис. 5.12). Кожух имеет треугольный вырез по форме водослива, а в дно кожуха заделан патрубок прибора. Вода из дрены поступает в кожух через щелевые отверстия, имеющиеся у основания дрены по длине кожуха. Основной расход вытекает через торцевое отверстие, а парциальный – через патрубок прибора.

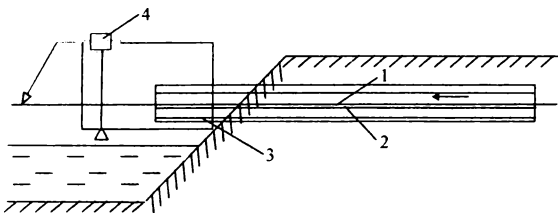


Рис. 5.12. Схема водомерного устройства для устья закрытой дрены: 1 – дрена; 2 – навесной кожух; 3 – перфорация дрены; 4 – водоучитывающий прибор

Находящийся в патрубке поршень прибора воспринимает давление воды, которое зависит от величины расхода. Это давление механизмом прибора преобразуется в показание расхода на шкале.

Водомерное устройство измеряет расходы от 0,2 до 15 дм³/с с использованием одной шкалы и записывает эти расходы на ленту, которую заменяют через 5–6 дней.

Погрешность в измерениях расхода этим прибором – 3...4%.

5.11. Определение максимальных расходов воды по меткам уровней

Максимальные расходы воды паводков и половодий особенно редкой повторяемости часто приходится определять при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. При этом используются метки уровня, остающиеся на берегах и гидротехнических сооружениях.

В основу способа определения расхода паводка по меткам высоких вод положены следующие допущения:

- движение потока во время паводка считается установившимся, равномерным;
- шероховатость русла и гидротехнический уклон потока во время паводка равны их значениям во время их определения.

Формула для определения максимального паводкового расхода воды с учетом дополнительных сопротивлений имеет вид

$$Q = \frac{F_p}{k_m} (h - h_b)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{gBI}{gBn_0^2 + 0,0026(h - h_b)^{\frac{4}{3}}}}, \quad (5.34)$$

где F_p – площадь живого сечения, м²; k_m – коэффициент, учитывающий влияние изгибов потока; h – средняя глубина потока, м; h_b – высота волн над спокойным уровнем, м; B – ширина водного потока, м; I – гидравлический уклон; n_0 – коэффициент шероховатости.

Расчетная площадь водного сечения рассчитывается как

$$F_p = F - B \cdot h_b, \quad (5.35)$$

где F – площадь живого сечения в рассматриваемом створе, определенная по меткам уровня, оставшегося на берегах и прибрежных сооружениях.

При вычислении расходов воды по меткам уровня важно правильно определить площадь живого сечения. Следует иметь ввиду, что линия заточки береговых откосов соответствует гребням наиболее высоких волн, которые образуются на поверхности стремительных потоков.

Высоту волн над спокойным уровнем рассчитывают по зависимости:

$$h_b = 0,122 \cdot h \cdot C \cdot \sqrt{I/g}, \quad (5.36)$$

где C – коэффициент Шези, определенный как $C = h/n_0$ (по Маннингу). Коэффициент шероховатости n_0 принимается по табл. 5.7.

В качестве параметра формы русла принимается относительная ширина русла (b), которая отражает влияние берегов и пространственного режима течения на гидравлическое сопротивление. Применительно к рекам и временным водотокам при $0,025 < n_0 < 30^\circ$ и с учетом этого влияния коэффициент шероховатости должен определяться по формуле:

$$n = n_0 \sqrt{1 + \frac{0,0026 h^{\frac{1}{3}}}{g \cdot b \cdot n_0^2}}. \quad (5.37)$$

Влияние изгибов потока и меандрирования русла может быть учтено умножением n на коэффициент $k_m > 1$

$$n_{изг} = k_m \cdot n. \quad (5.38)$$

Для k_m рекомендованы значения: 1,15 – ощутимая степень меандрирования, 1,30 – значительное меандрирование.

Приборы и оборудование: нивелир – 1 комплект; рейка нивелирная – 2; лента мерная – 1; палетка – 1; вехи створные – 6; топор – 1; колышки пикетные – 20; опросный лист – 1.

Работа по определению максимальных расходов воды выполняется в следующей последовательности:

1. Осмотр участка водотока и выбор створов производятся в соответствии с требованиями, изложенными в гл. 2, и заносятся в опросный лист (*приложение Л*). Дополнительно необходимо учесть, что поперечное сечение водотока должно быть правильной корытооб-

разной формы. Геометрические параметры (ширина, глубина, продольный уклон и т. д.) водотока, по возможности должны быть однообразными. Пойма должна быть прямой и узкой, свободной от древесной и кустарниковой растительности. На выбранном участке разбивают (не менее трех) створы с примерно равными расстояниями между ними и закрепленными вехами. Длина участка реки должна быть такой, чтобы падение между крайними нивелируемыми точками составляло более 0,5 м. Если водоток извилистый, плесы чередуются с перекатами, то створы для определения расходов разбиваются так, чтобы один из них располагался в месте, где размеры русла близки к средним на всем участке, второй – в более узком сечении (плес) и третий – в наиболее широкой части русла (перекат). Для определения продольного уклона водной поверхности (или дна русла) необходимо взять участок, включающий хотя бы два – три плеса и переката. На водотоках с малыми уклонами эта длина должна составлять примерно 1,5...2,0 км. На очень малых водотоках участки должны быть такой длины, чтобы падение было около 1,0 м.

2. Нахождение отметок уровня высоких вод на местности осуществляется путем осмотра поймы по характерным признакам: отложениям на берегах растительного мусора, стволам деревьев, илистым образованиям, сплыву берегов русла и склонов долины, искусственным меткам, закрепленным на различных сооружениях, а также по опросу местных жителей. Кроме этого, необходимо выяснить наличие причин, искажающих естественный режим максимальных уровней.
3. Нивелирование меток уровня высоких вод, обнаруженных на местности. Определяется уклон водной поверхности (I) методами, рассмотренными выше. В случае отсутствия достоверных меток уровня высоких вод, в первом приближении можно считать, что уклон водной поверхности возле прохождения высокого паводка равен уклону водной поверхности в момент проведения измерений.
4. По линии намеченного створа, в пределах меток высоких вод, разбивают пикетаж и проводят нивелировку. В русле реки выполняют промеры глубин. По полученным данным строится поперечный профиля створа водотока, на который наносится уровень

профиля створа водотока, на который наносится уровень высоких вод и определяется площадь живого сечения (рис. 5.13).

5. Расход воды по меткам высокого уровня вычисляется в следующей последовательности:

- определяется средняя глубина потока $h = F / B$.

Для примера, приведенного на рис. 5.13, $h = 165,46 / 65 = 2,55$ м;

- по табл. 5.7 определяется коэффициент шероховатости n_0 .

Таблица 5.7

Унифицированная шкала коэффициентов шероховатости речных русел и пойм

n_0	Характеристика русел и пойм	
	равнинные реки	поймы
0,020	Прямолинейные русла канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	—
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищ с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлении струй, неровностями дна и берегов и внесением донных наносов	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество староречных и мелких проток
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые с неспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листьев), изрезанная староречными протоками
0,065	Скальные русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Пойма, покрытая редким кустарником с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Поймы, покрытые кустарником и большой густоты (весной без листвы)
0,100	Русла рек сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником большой густоты с листвой

n_0	Характеристика русел и пойм	
	равнинные реки	поймы
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей, и густым ивняком
0,200	–	Глухие, сплошь заросшие, труднопроходимые поймы таежного типа

Для сравнительно чистых русел постоянных водотоков – $n_0=0,40$.

- по формуле Маннинга определяется коэффициент Шези

$$C = h^{1/6} / n_0 = 2,55^{1/6} / 0,040 = 29,22;$$

- определяется уклон водной поверхности

$$I = \Delta h / L = 0,6 / 1500 = 0,0004;$$

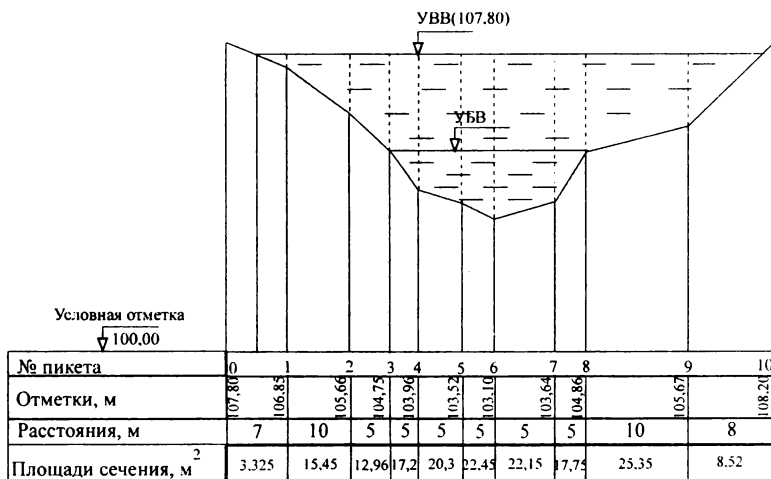


Рис. 5.13. Поперечный профиль створа водотока

- определяется превышение уровня над его спокойной поверхностью

$$h_B = 0,122 \cdot h \cdot C \cdot \sqrt{\frac{I}{g}} = 0,122 \cdot 2,55 \cdot 29,22 \cdot \sqrt{\frac{0,0004}{9,8}} = 0,06 \text{ м};$$

- уточняется расчетная площадь живого сечения

$$F_p = F - B \cdot h_b = 165,46 - 65 \cdot 0,06 = 161,56 \text{ м}^2;$$

- рассчитывается расход воды, так как участок реки прямолинейный, принимаем $k_m = 1,0$

$$Q = \frac{F_p}{k} (h - h_B)^{2/3} \sqrt{\frac{gBI}{gBn_0 + 0,0026(h - h_B)^{2/3}}} = \frac{161,59}{1} (2,55 - 0,06)^{2/3} \times \\ \times \sqrt{\frac{9,8 \cdot 65 \cdot 0,0004}{9,8 - 65 \cdot 0,04^2 + 0,0026(2,55 - 0,06)^{2/3}}} = 147,78 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5.12. Оценка погрешности, текущий контроль измерений расходов воды

Погрешность измерения воды вертушкой

Расход воды получается как результат косвенных измерений. В этом случае погрешность измерения расхода воды может быть представлена суммой частных погрешностей.

При взаимной независимости частных погрешностей средняя квадратическая погрешность результата выражается геометрической суммой составляющих. Структура формулы для оценки средней квадратической погрешности зависит от аналитической формы модели расхода воды и для вертикальной дискретизации модели она имеет вид:

$$\bar{\sigma}_Q = \sqrt{\frac{\beta(\bar{\sigma}_{ff}^2 + \bar{\sigma}_{vj}^2)}{N_0}}, \quad (5.39)$$

где $\bar{\sigma}_{ff}$ и $\bar{\sigma}_{vj}$ – относительные погрешности измерения соответственно площадей в каждом из отсеков между скоростными вертикалями и средних скоростей потока в этих отсеках; N_0 – количество скоростных вертикалей; β – метрологический параметр, зависящий от гидравлической структуры потока и степени дискретизации измерений:

$$\beta = \frac{N_0}{Q^2} \sum_{j=1}^N g_j^2. \quad (5.40)$$

Параметр $\beta=1,0$ для прямоугольного русла и при равномерном размещении скоростных вертикалей; $\beta=1,2\dots 1,8$ – речное беспойменное русло, а при наличии пойм – $1,8<\beta<3,0$.

Рассмотрим частные погрешности, входящие в формулу (5.34).

Средняя квадратическая погрешность определения площади отсеков зависит от инструментальных погрешностей, применяемых для промеров приборов, и надежности геодезической основы гидрометрических работ. Методика определения этих измерений была рассмотрена ранее в гл. 3.

Решающее влияние на точность определения расхода воды оказывают погрешности измерения средних скоростей на вертикалях ($\bar{\sigma}_v$) и средняя по отсеку ($\bar{\sigma}_{vj}$) оценка погрешности ($\bar{\sigma}_v$) производится в зависимости от числа точек измерения скорости на вертикали с учетом пульсационной и инструментальной составляющих:

$$\bar{\sigma}_v = \sqrt{\frac{\sigma_n^2(1,67 - 0,2N_T^2 + \tau_{k/T})}{N_T}} = 0,5\bar{\sigma}_n^2, \quad (5.41)$$

где N_T – число точек измерения скоростной вертикали; T – продолжительность измерения скорости в точке n ; $\bar{\sigma} = \sigma_{\%}$ (число Кармана).

Суммарная средняя квадратическая погрешность определения средней скорости в отсеке представляется следующим образом

$$\sigma_{vj} = \sqrt{\frac{5}{3}\bar{\sigma}_{wj}^2(1 - 10\frac{h_j}{b_j} + 50\frac{h_j^2}{b_j^2}) + 0,5\bar{\sigma}_v^2}, \quad (5.42)$$

где $\bar{\sigma}_{wj}^2$ – относительное среднее квадратическое значение структурной составляющей средней скорости в отсеке v_j , $\bar{\sigma}_{wj} = \sigma_{wj} / v_j$.

Помимо случайных погрешностей, при измерениях присутствуют систематические погрешности, которых трудно избежать. Систематические погрешности могут достигать тех же значений, что и случайные. При этом совокупная погрешность может быть оценена как

$$\overline{\sigma}_{сов} = 1,4\overline{\sigma}_Q \quad (5.43)$$

Приведенные выше формулы дают возможность определить основную погрешность измерения расхода воды, т. е. погрешность при нормальных условиях.

Погрешность измерения расхода воды поплавками

При измерении расхода воды поплавками погрешность измерений зависит от многих факторов, а именно: надежности геодезического обоснования и засечек поплавков, данных о площади живого сечения русла и в наибольшей мере от точности определения переходного коэффициента k . Как показала практика, погрешность поправочных измерений в одних и тех же условиях в 2,5...3,0 раза выше, чем основным способом вертушкой.