

П. В. ПАВЛИВ

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ РЕК

Конечной целью нивелирования рек является определение уровней воды, которые непрерывно меняются. Изменение уровней вызывается неустановившимся, турбулентным движением естественных водотоков и воздействием на массы протекающей воды ряда сил (в большинстве случаев с изменяющейся величиной и направлением).

Поверхность воды в реке всегда стремится занять перпендикулярное положение к равнодействующей всех сил, действующих на водоток.

Поэтому зафиксированные (рабочие) уровни отражают не только изменения в количестве протекающей воды, но и изменения в величине и направлении сил, действующих на массы потока.

При изображении речной сети на планах и картах, а также при изысканиях для решения задач гидротехнического строительства необходимо знать уровни для всей реки и ее притоков на какой-то наиболее характерный момент. Такие уровни можно было бы получить мгновенным нивелированием, но практически для всей реки и ее притоков это сделать невозможно.

Для этой цели на основании систематических фиксаций уровней на речных гидрометрических станциях и постах устанавливают условный уровень, близкий к среднему многолетнему меженному уровню (СММУ). Затем приводят к СММУ и рабочие уровни в точках между водомерными постами.

Как процесс фиксации рабочих уровней, так и процесс их приведения к СММУ сопровождается неизбежными ошибками. Эти ошибки в зависимости от процесса, которому они сопутствуют, можно разделить на две группы, а именно: ошибки фиксации и ошибки приведения к условным уровням (ошибки срезки).

Из сказанного выше следует, что точность фиксации зависит как от точности отсчета по водомерному устройству, так и от точности учета воздействий на массы воды потока таких факторов, как изгиб русла, вращение Земли, лунно-солнечное притяжение, боковой ветер и разность атмосферных давлений у противоположных берегов реки.

При повороте русла в водотоке возникает дополнительная центробежная сила, благодаря которой внешняя сторона водотока возвышается над внутренней на величину Δh_1 , определяемую на основании следующей зависимости [2]:

$$\Delta h_1 = \frac{v^2 B}{gr}, \quad (1)$$

где v , B , g , r — соответственно средняя скорость течения, ширина русла, ускорение силы тяжести и радиус поворота русла.

При производстве работ на реках шириной менее 100 м и при слабом и умеренном ветре для определения суммарного превышения можно пользоваться формулой в следующем виде:

$$\Delta h'' = B \frac{v^2}{rg} \quad (10)$$

Для учета поперечных уклонов наблюдения за уровнем воды в реках ведут у двух берегов и отметки устанавливаются как среднее из двух наблюдений. Однако в связи с непостоянной скоростью течения по всему живому сечению водотока, поперечный профиль поверхности воды не представляет собой прямую линию и среднее из отметок у противоположных берегов не будет соответствовать отметке оси водотока. Это несоответствие и является одним из основных источников ошибок, возникающих в таком случае. Произведенная нами обработка результатов экспериментальных исследований рельефа водной поверхности [3, 5] в лабораторных, полигонных и натуральных условиях показала, что такое несоответствие $m_{\Delta h}$ составляет 23,5% от величины превышения уровней у противоположных берегов.

Средняя квадратическая ошибка фиксации m_{ϕ} выразится следующей зависимостью:

$$m_{\phi} = \sqrt{m_0^2 + m_{\Delta h}^2} \quad (11)$$

где m_0 — средняя квадратическая ошибка отсчета уровня по водомерному устройству, которая при фиксации уровней с точностью до 1 см составляет 3,0 мм.

Учитывая выражения (11) для рек шириной 50, 200, 400 м, со средней скоростью течения, равной 1 м/сек, и соотношением $\frac{B}{r} = \frac{2}{3}$, m_{ϕ} соответственно можно получить:

$$\begin{aligned} m_{\phi_{50}} &= 16 \text{ мм;} \\ m_{\phi_{200}} &= 17 \text{ мм;} \\ m_{\phi_{400}} &= 23 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (12)$$

Срезку h_c определяют интерполированием, согласно формуле

$$h_c = \frac{h_A l_B + h_B l_A}{L} \quad (13)$$

где h_A, h_B — разности рабочих H_p и условных средних многолетних меженичных уровней $H_{смму}$ на нижнем A и верхнем B водомерных постах;

l_A и l_B — расстояния от точки приведения C до водомерных постов A и B ;

L — расстояние между постами A и B .

Однако погрешности, допущенные в определении аргументов формулы (13), передаются интерполированием на величину срезки h_c . Поэтому среднюю квадратическую ошибку m_{h_c} в определении h_c при учете только этого обстоятельства получим после дифференцирования

формулы (13) и перехода к средним квадратическим ошибкам в таком виде:

$$m_{h_c'} = \sqrt{\left(\frac{l_B}{L}\right)^2 m_{h_A}^2 + \left(\frac{l_A}{L}\right)^2 m_{h_B}^2 + \left(\frac{h_A}{L}\right)^2 m_{l_B}^2 + \left(\frac{h_B}{L}\right)^2 m_{l_A}^2 + \left(\frac{h_A l_B + h_B l_A}{L^2}\right)^2 m_L^2} \quad (14)$$

где m_{h_A} , m_{h_B} , m_{l_B} , m_{l_A} , m_L — средние квадратические ошибки в определении соответствующих аргументов формулы (13).

Величины h_A и h_B определяются как разности зафиксированных условных и рабочих уровней. Принимая точность фиксации одинаковой, получим

$$m_{h_A} = m_\phi \sqrt{2}. \quad (15)$$

$$m_{h_B} = m_\phi \sqrt{2}. \quad (16)$$

Из практики известно, что значения $\left(\frac{h_A}{L}\right)$, $\left(\frac{h_B}{L}\right)$, $\left(\frac{h_A l_B + h_B l_A}{L^2}\right)^2$ — всегда очень малые величины, в основном не превышающие 0,001, поэтому с незначительным приближением можно записать

$$m_{h_c'} = \frac{m_\phi}{L} \sqrt{2(l_A^2 + l_B^2)}. \quad (17)$$

$$\text{При } l_A = \frac{1}{4}L, \quad l_B = \frac{3}{4}L \quad m_{h_c'} = 1,1 m_\phi. \quad (17a)$$

Необходимо отметить, что кроме погрешностей аргументов формулы интерполирования на точность срезки влияют и такие два фактора, как: неодновременность изменения уровней и изменение элементов водотока на рассматриваемом участке реки.

Допустим, что во время нивелирования на верхнем водомерном посту B уровень изменился на величину Δh_B , а на нижнем водомерном посту A этого изменения еще не произошло. Согласно принятой методике определения срезки, величина изменения в точке приведения C должна быть пропорциональна расстоянию от водомерного поста B , хотя в действительности этого может и не быть.

Для исследования этого фактора продифференцируем формулу (13) по h_B . В результате получим

$$\frac{\partial h_c}{\partial h_B} = \frac{l_A}{L}. \quad (18)$$

Так как $\frac{l_A}{L} \leq 1$, то

$$m_{h_c''} = \frac{1}{3} \Delta h_B. \quad (19)$$

При

$$\Delta h_B = 5 \text{ см},$$

$$m_{h_c''} = 1,7 \text{ см}. \quad (19a)$$

При исследовании влияния изменений элементов водотока на точность определения срезки рассмотрим отдельно ту часть водотока, в которой протекает срезочное количество воды.

Известно (6), что падение

$$\Delta H = \frac{Q^2 l}{\omega^2 C^2 R}, \quad (20)$$

где Q , ω , C и R — соответственно средние значения расхода, поперечного сечения, коэффициента Шези и гидравлического радиуса для рассматриваемого участка.

Однако

$$\omega = B \cdot h, \quad C = \frac{1}{n} R^{0,2}, \quad (21)$$

где B , h , n — соответственно ширина водотока, средняя глубина и коэффициент шероховатости.

С учетом формул (21) получим

$$\Delta H = \frac{Q^2 n^2 l}{B^2 h^2 R^{1,4}}. \quad (22)$$

Практика показала, что разность между R и h в основном не превышает 1%. Учитывая тот факт, что мы рассматриваем только срезочную часть водотока, расхождение между R и h будет еще меньшим. Поэтому в данном случае с незначительным приближением можно принять

$$h = R = h_c'''. \quad (23)$$

Таким образом, формулу (22) можно записать в следующем виде:

$$h_c'''^{3,4} = \frac{Q^2 n^2}{B^2 I}, \quad (24)$$

где I — уклон.

Следовательно, учитывая средние значения изменений аргументов формулы (24) на участке между смежными водомерными постами, можно оценить возможные изменения величины срезки.

Считая все аргументы формулы (24) независимыми, после логарифмирования, дифференцирования и перехода к средним квадратическим ошибкам получим:

$$\frac{m_{h_c'''} }{h_c'''} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{m_Q^2}{Q^2} + \frac{m_n^2}{n^2} + \frac{m_B^2}{B^2} + \frac{1}{4} \frac{m_I^2}{I^2} \right)}, \quad (25)$$

где $m_{h_c'''}$, m_Q , m_n , m_B , m_I — соответственно средние квадратические значения изменений срезки, расхода, шероховатости, ширины и уклона водотока.

Для примера рассмотрим бесприточный участок р. Днестр в районе г. Залещики, где $\frac{m_Q}{Q} = 0$, $\frac{m_n}{n} = 10\%$, $\frac{m_B}{B} = 13\%$ и $\frac{m_I}{I} = 37\%$.

С учетом выражения (25) получим

$$\frac{m_{h_c'''} }{h_c'''} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(100 + 169 + \frac{1369}{4} \right)} = 14,3\%, \quad (25a)$$

При условии независимости действия рассмотренных трех факторов суммарное значение средней квадратической ошибки срезки будет

$$m_{h_c} = \sqrt{m_{h_c'}^2 + m_{h_c''}^2 + m_{h_c'''}^2}. \quad (26)$$

Исследование точности срезки

№ п.п.	Дата	Время суток	$\pm h_B$	$\pm h_A$	$\pm h_{C_3}$	$\pm h_C$	$\pm(h_{C_3}-h_C)$	$\pm \Delta h_C$	$(\Delta h_C)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25/III-63	8	-25	-19	-28	-21	-7	-14	196
2		20	27	31	31	29	2	9	81
3	26	8	28	33	32	31	1	8	64
4		20	32	37	37	35	2	9	81
5	27	8	31	36	36	34	2	9	81
6		20	30	35	35	33	2	9	81
7	28	8	-20	-12	-19	-15	-4	11	121
8		20	+19	+17	+20	+18	+2	5	25
9	29	0	31	41	32	37	-5	12	144
10		4	49	59	50	55	-5	12	144
11		8	59	69	67	65	+2	-5	25
12		12	65	66	72	65	7	0	0
13		16	68	69	76	69	7	0	0
14		20	71	72	85	72	13	+6	36
15	30	4	72	74	86	73	13	6	36
16		8	70	73	86	72	14	7	49
17		12	72	72	85	72	13	6	36
18		20	70	71	84	71	13	6	36
19	31	0	69	70	83	70	13	6	36
20		4	67	68	81	68	13	6	36
21		8	64	66	78	65	13	6	36
22		12	62	64	76	63	13	6	36
23		16	54	61	68	58	10	3	9
24	31/III-63	20	51	59	65	56	9	2	4
25	1/IV-63	0	49	57	63	54	9	2	4
26		4	47	54	61	51	10	3	9
27		8	45	51	58	48	10	3	9
28		12	44	49	56	47	9	2	4
29		16	42	48	55	46	9	2	4
30		20	41	48	54	45	9	+2	4
31	2	0	41	56	53	50	3	-4	16
32		4	40	55	52	49	3	4	16
33		8	39	55	51	48	3	4	16
34		12	38	54	51	48	3	4	16
35		16	38	54	50	48	2	5	25
36	1/IV-63	20	37	53	50	46	4	3	9
37	3	0	36	53	48	46	2	5	25
38		4	34	50	46	44	2	5	25
39		8	33	49	45	42	3	4	16
40		12	31	47	43	40	3	4	16
41		16	29	45	41	38	3	4	16
42		20	27	43	39	36	3	4	16
43	4	0	23	39	35	32	3	4	16
44		4	19	35	31	28	3	4	16
45		8	16	23	27	20	7	0	0
46		12	13	20	23	17	6	1	1
47		16	10	16	19	14	5	2	4
48		20	7	12	15	10	5	2	4
49	5	8	0	5	5	3	+2	5	25
50		20	0	1	0	1	-1	8	64
51	6/IV-63	8	0	1	0	1	-1	8	64
52		20	0	0	1	0	+1	6	36
53	7	8	6	13	14	10	4	-3	9
54		20	16	21	27	19	8	+1	1
55	8	8	35	50	46	44	2	-5	25
56		20	48	63	62	57	5	-2	4
57	9	8	62	68	76	66	10	+3	9
58		20	72	78	87	76	11	4	16
59	10	0	72	78	87	76	11	4	16
60		4	71	78	87	75	12	5	25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
61		8	70	78	87	75	+12	+5	25
62		12	69	76	85	73	12	5	25
63		16	69	75	84	72	12	5	25
64		20	68	75	84	72	12	5	25
65	11	8	66	73	82	70	12	5	25
66		20	58	67	76	63	13	6	36
67	12	8	52	62	68	58	10	3	9
68		20	54	61	68	58	10	3	9
69	13	8	62	63	70	63	7	0	0
70		20	80	87	95	84	11	4	16
71	14	0	116	114	136	115	21	14	196
72	14/IV-63	20	147	149	176	148	28	21	441
73	15	0	154	157	184	156	28	21	441
74		8	162	164	190	163	27	20	400
75		12	170	167	194	168	26	+19	361
Σ					46,49		+549		4012

При среднем значении $h_c = 0,5$ м с учетом зависимостей (12), (17а), (19а), (25а) для указанного участка реки Днестр получим $m_{h_c} = 8,6$ см, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований.

Для установления практически возможных погрешностей срезки произведен анализ специальных наблюдений за режимом уровней на указанном выше участке р. Днестр (см. таблицу).

Наблюдения за режимом уровней велись на трех водомерных постах А, С и В, расстояния между которыми соответственно равны $l_A = 1020$ м, $l_B = 1440$ и $L = 2460$ м. Фиксация уровней производилась, как правило, через четыре часа и лишь при устойчивых уровнях — два раза в сутки. За условный уровень принят уровень наиболее устойчивого периода, близкий к меженному, когда колебание за сутки не превышало 1 см, то есть 6 апреля 1963 года.

Вычисляя по формуле (13) значения срезки h_c и сравнивая с истинной величиной h_c , полученной непосредственно из наблюдений, видим, что Δh_c может составлять величину, превышающую 25% от соответствующей величины срезки (см. таблицу).

Для обработки указанных расхождений используем следующую формулу

$$m_{\Delta h_c} = \sqrt{\frac{|\Delta h_c \cdot \Delta h_c|}{k}}, \quad (27)$$

где k — количество измерений.

В результате обработки данных, приведенных в таблице, получено

$$m_{\Delta h_c} = \pm 7,3 \text{ см}; \quad \frac{m_{\Delta h_c}}{h_{c \text{ ср}}} = 11,8\%. \quad (27а)$$

Предположим, что ошибки распределены нормально. Задавшись доверительной вероятностью 0,90, найдем, что стандарт будет

$$0,88 m_{\Delta h_c} < \sigma < 1,16 m_{\Delta h_c}; \\ 10,4\% < \sigma < 13,7\%. \quad (28)$$

Следовательно, величина ошибки определенной срезки может составить $11,8 \pm 1,9\%$, что и подтверждают произведенные выше расчеты (25а).

ВЫВОДЫ

1. Формула (8) выражает совместное влияние рассмотренных факторов на массы протекающей воды, поэтому, учитывая особенности воздействия соответствующих факторов, по формуле (8) можно всегда предвычислить превышения уровней у противоположных берегов в любой точке реки и таким образом установить необходимость двухсторонней фиксации уровней.

2. При проектировании изыскательских работ на реках формула (26) позволяет предвычислить точность срезки, а также, учитывая особенности реки, разработать такую методику, при которой ошибки срезки будут минимальными.

3. На основании формулы (26) при учете допустимой ошибки срезки и отклонений от средних значений основных характеристик рек в каждом конкретном случае можно выбрать и установить допустимую длину срезочного участка реки.

4. Таким образом, учитывая средние квадратические ошибки фиксации, срезки, а также нивелирования, можно всегда предвычислить точность получаемых отметок уровней рек, и следовательно, разработать наиболее рациональную методику изыскательских работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Гидрометеиздат, Л., 1957.
2. Видуев Н. Г. и Ракитов Д. И. Специальные нивелирные работы. Госстройиздат УССР, Киев, 1961.
3. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеиздат, М., 1960.
4. Офицеров А. С. Вторичные течения. Госстройиздат, М., 1959.
5. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. Издательство АН УССР, Киев, 1957.
6. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Госэнергоиздат, М., 1962.

Работа поступила
25 ноября 1966 г.