

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Р. Н. ВОСТРОВА, О. К. НОВИКОВА

**НЕРАВНОМЕРНОЕ
УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ
ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ
ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ**

Учебно-методическое пособие

Гомель 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Р. Н. ВОСТРОВА, О. К. НОВИКОВА

НЕРАВНОМЕРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного факультета
в качестве учебно-методического пособия
по выполнению курсовой работы
для студентов специальности 1-70 04 03
«Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»*

Гомель 2013

УДК 556.536 (075.8)
ББК 30.123
В78

Рецензент – д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и рациональное использование водных ресурсов»
А. Б. Невзорова (УО «БелГУТ»)

Вострова, Р. Н.

В78 Неравномерное установившееся движение воды в открытых призматических руслах : учеб.-метод. пособие / Р. Н. Вострова, О. К. Новикова ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.
ISBN 978-985-554-193-7

Рассмотрены теоретические основы гидравлических расчетов неравномерного установившегося движения воды в открытом призматическом русле, основанные на построении линии свободной поверхности методом Б. А. Бахметева, даны исходные данные для выполнения курсовой работы, приведен порядок проведения расчетов и графических построений.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 1-70 04 0-3 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов».

УДК 556.536 (075.8)
ББК 30.123

ISBN 978-985-554-193-7

© Вострова Р. Н., Новикова О. К., 2013
© Оформление. УО «БелГУТ», 2013

ВВЕДЕНИЕ

При гидравлическом расчете движения воды в открытых руслах в основном решается задача построения кривой свободной поверхности потока перед искусственным сооружением (плотиной, перепадом) или на быстротоке, определения характера сопряжения падающей с искусственного сооружения струи с нижним бьефом, проектирования гасителя энергии в нижнем бьефе (в случае необходимости).

1 СОСТАВ И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа состоит из графической части (1 лист формата А1) и сброшюрованной расчетно-пояснительной записки (20–25 с. машинописного текста, напечатанного на одной стороне листа формата А4).

В **пояснительной записке** должны быть отражены все этапы выполнения работы:

1 Определение нормальной и критической глубины потока графоаналитическим способом.

2 Определение критического уклона.

3 Прогнозирование формы кривой свободной поверхности.

4 Определение коэффициента пропорциональности (j) для построения линии свободной поверхности. Построение графика зависимости коэффициента пропорциональности от средней глубины потока.

5 Определение гидравлического показателя русла.

6 Определение расстояния (l) участков потока, ограниченного начальной и конечной глубиной.

6 Графическое построение гидравлических осей и линии свободной поверхности.

7 Определение сопряжения бьефов.

8 В случае возможности возникновения отогнанного и в сжатом сечении гидравлического прыжка, расчет водобойного сооружения (водобойного колодца). Проверка сопряжения бьефов за водобойным сооружением.

Графическая часть курсовой работы должна содержать:

1 Графическое определение нормальной и критической глубины.

- 2 Построение графика зависимости коэффициента пропорциональности (j) в зависимости от средней глубины потока.
- 3 Прогнозирование формы линии свободной поверхности.
- 4 Построение линии свободной поверхности при неравномерном установившемся движении.
- 5 Определение сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением.
- 6 Расчет параметров водобойного сооружения.

2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Курсовая работа направлена на закрепление теоретических навыков по проведению гидравлических расчетов в области изучения основных законов неравномерного установившегося движения воды в открытом призматическом русле.

Использование знаний по данной дисциплине позволяют определить основные характеристики потоков, рассчитать величину расходов и уровней, прогнозировать форму и производить построение линии свободной поверхности, что является необходимым условием расчета параметров для проектирования искусственных каналов и очистных сооружений природных и сточных вод в зависимости от их назначения.

Сведения по данной дисциплине могут быть полезными как на этапе курсового и дипломного проектирования, так и при выполнении научно-исследовательской работы студентами специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» высших учебных заведений.

Задание типа А. Неравномерное движение и сопряжение бьефов за плотиной. В канале трапециевидального поперечного сечения сооружается бетонная плотина с водосливом практического профиля (рисунок 1). Данные для расчета приведены в таблице 1.

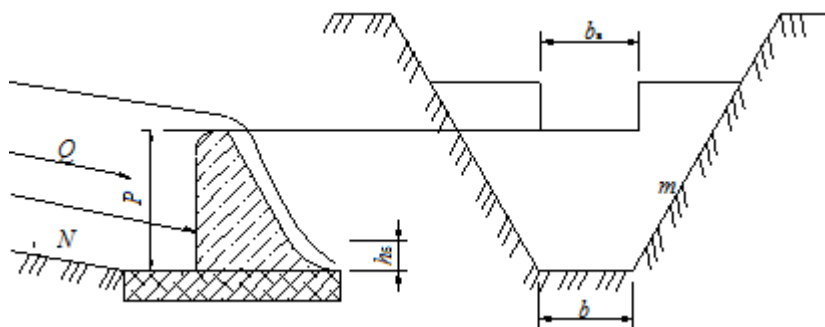


Рисунок 1 – Расчетная схема неравномерного движения воды через плотину
 Таблица 1 – Исходные данные для расчета неравномерного движение и сопряжение бьефов за плотиной

Вариант	Параметр							
	Q	b	m _в	i	Материал дна и стенок канала	P	b _в	h _б
1	42	8	0,4 5	0,000 8	Плотная глина	5,5	8	2,75
2	40	9	0,4 7	0,000 9	Нормальная глина	1,0	10	2,50
3	38	7	0,4 5	0,000 9	Плотная глина	5,6	8	2,60
4	52	1 0	0,4 2	0,001 0	Нормальная глина	6,0	10	2,40
5	43	8	0,4 4	0,001 0	Плотная супесь	3,9	8	2,30
6	61	1 2	0,4 6	0,001 0	Нормальная глина	4,8	12	2,50
7	49	1 0	0,4 8	0,000 9	Плотный лесс	5,7	10	2,60
8	54	1 1	0,4 6	0,000 8	Нормальная глина	4,7	10	2,20
9	28	1 0	0,4 7	0,000 6	Мягкая глина	4,9	8	2,00
10	34	9	0,4 8	0,000 7	Нормальная глина	4,9	8	2,80
11	62	1 0	0,4 6	0,000 8	Нормальная глина	6,0	12	3,90
12	45	8	0,4 5	0,000 6	Плотная супесь	7,0	10	3,00
13	55	1 2	0,4 4	0,000 8	Нормальная глина	5,0	12	2,70
14	65	1 2	0,4 5	0,000 9	Нормальная глина	6,0	12	2,50
15	60	1 0	0,4 6	0,000 8	Нормальная глина	7,0	12	2,50
16	50	1 0	0,4 8	0,000 9	Плотная супесь	5,5	10	2,20
17	49	8	0,4 6	0,000 6	Нормальная глина	5,3	10	2,50
18	40	8	0,4 5	0,000 7	Нормальная глина	5,4	8	2,50
19	32	8	0,4 6	0,000 8	Плотный лесс	7,0	8	2,00
20	30	1	0,4	0,000	Мягкая глина	5,6	10	1,60

		0	8	9				
21	50	1 0	0,4 7	0,000 8	Плотная глина	7,3	10	2,70
22	55	1 0	0,4 5	0,000 9	Плотная глина	6,0	12	2,60
36	44	1 0	0,4 8	0,001 5	Нормальная глина	5,0	10	2,50
37	32	1 0	0,4 0	0,001 1	Плотная глина	6,0	10	2,00
38	42	1 5	0,4 8	0,001 0	Плотный гравий	6,5	15	1,80
39	40	1 2	0,4 8	0,001 3	Плотная глина	7,0	12	1,95
40	40	1 0	0,4 8	0,001 1	Плотная глина	6,5	10	2,03
41	34	1 2	0,4 8	0,001 2	Плотная глина	5,5	12	1,83
42	50	1 0	0,4 7	0,001 7	Плотный гравий	5,0	10	1,83
43	36	1 5	0,4 0	0,001 5	Плотная глина	5,5	15	1,60
44	55	1 0	0,4 1	0,001 6	Плотная глина	6,0	10	1,95
45	35	1 5	0,4 5	0,001 5	Плотный гравий	5,5	15	2,55
46	41	9	0,4 0	0,000 7	Плотный лесс	9,0	9	2,51
47	55	1 0	0,4 8	0,000 8	Плотная глина	6,0	10	1,85
48	46	1 2	0,4 5	0,001 0	Плотная супесь	5,5	12	1,86
49	50	1 1	0,4 0	0,001 0	Плотный лесс	6,4	11	1,90
50	48	9	0,4 0	0,000 9	Плотная супесь	8,0	9	2,50
51	43	1 2	0,4 5	0,001 0	Плотная глина	7,5	12	2,70
52	45	1 0	0,4 1	0,000 8	Плотный лесс	6,1	10	1,98
53	49	1 2	0,4 0	0,000 8	Плотная супесь	5,5	12	1,88

Окончание таблицы 1

Вариант	Параметр							
	Q	b	m_a	i	Материал дна и стенок канала	P	b_a	h_b
54	39	9	0,4	0,001	Плотная глина	7,5	9	2,05

			2	0				
55	50	1 2	0,4 5	0,000 8	Плотная супесь	8,9	12	1,90
56	44	1 0	0,4 2	0,001 0	Плотный лесс	7,7	10	2,60
57	48	9	0,4 8	0,001 2	Плотная супесь	8,5	9	2,40
58	52	1 0	0,4 8	0,000 7	Плотный лесс	5,9	10	1,95
59	55	1 1	0,4 3	0,000 8	Плотная супесь	6,6	11	2,61
60	45	9	0,4 9	0,001 0	Плотная глина	5,5	9	2,55

Задание типа В. Неравномерное движение воды и сопряжение бьефов за перепадом. В канале трапециевидального поперечного сечения устроен перепад (рисунок 2). В конце канала на стенке перепада устанавливается критическая глубина h_k . Данные для расчета приведены в таблице 2.

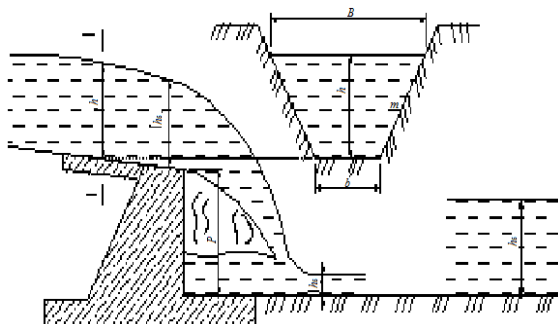


Рисунок 2 – Расчетная схема неравномерного движения воды на перепаде

Таблица 2 – Исходные данные для расчета неравномерного движения и сопряжение бьефов за перепадом

Вариант	Параметр					
	Q	b	i	P	h_b	Грунт
1	28,0	8	0,00031	1,83	1,51	Суглинок
2	30,2	7	0,00022	1,96	1,65	Глина
3	35,6	8	0,00023	1,51	1,22	Лесс
4	33,6	5	0,00034	1,93	1,61	Суглинок
5	32,0	8	0,00069	2,01	1,73	Глина
6	40,1	7	0,00057	1,85	1,56	Глина

7	42,3	10	0,00046	1,78	1,21	Лесс
8	40,1	8	0,00032	1,87	1,41	Суглинок
9	39,3	10	0,00051	1,63	1,31	Суглинок
10	40,8	9	0,00075	1,87	1,28	Глина

Продолжение таблицы 2

Вариант	Параметр					
	Q	b	i	P	h_0	Грунт
11	31,9	8	0,00083	1,76	1,43	Глина
12	28,3	9	0,00041	1,62	1,31	Суглинок
13	34,3	8	0,00082	1,74	1,31	Глина
14	31,5	9	0,00083	1,86	1,58	Лесс
15	48,4	10	0,00074	1,95	1,54	Суглинок
16	33,0	9	0,00065	1,83	1,42	Глина
17	34,0	8	0,00056	1,72	1,41	Суглинок
18	40,0	10	0,00047	1,64	1,22	Глина
19	35,6	9	0,00039	1,56	1,17	Суглинок
20	32,8	8	0,00027	1,38	1,11	Глина
21	30,5	9	0,00038	1,72	1,34	Суглинок
22	29,9	8	0,00046	1,60	1,34	Глина
23	40,1	10	0,00097	1,91	1,65	Глина
24	31,2	9	0,00082	1,84	1,56	Суглинок
25	38,5	8	0,00071	1,76	1,37	Лесс
26	25,8	9	0,00063	1,65	1,48	Глина
27	30,3	8	0,00054	1,81	1,59	Суглинок
28	36,6	10	0,00058	2,08	1,88	Глина
29	31,8	8	0,00056	1,81	1,37	Суглинок
30	32,1	8	0,00047	1,95	1,56	Лесс
31	33,3	8	0,00045	1,61	1,64	Глина
32	34,1	9	0,00051	2,14	1,72	Суглинок
33	27,7	8	0,00035	2,35	1,55	Лесс
34	28,5	8	0,00028	2,46	1,59	Суглинок
35	29,6	8	0,00025	2,87	1,55	Лесс
36	32,4	9	0,00031	1,58	1,12	Суглинок

						к
37	38,3	10	0,00035	1,89	1,16	Суглинок
38	24,5	12	0,00041	2,11	1,18	Лесс
39	40,8	10	0,00045	2,02	1,31	Суглинок
40	26,7	9	0,00052	2,63	1,18	Суглинок
41	42,8	6	0,00055	2,24	1,51	Глина
42	30,1	10	0,00063	1,95	1,33	Суглинок
43	28,9	11	0,00065	1,86	1,25	Лесс
44	30,4	12	0,00074	1,75	1,28	Глина
45	35,4	10	0,00075	2,55	1,25	Лесс
46	30,5	8	0,00045	2,00	1,88	Глина
47	32,3	9	0,00056	1,98	1,93	Лесс
48	40,4	11	0,00060	1,69	2,01	Глина
49	31,5	8	0,00028	2,03	1,91	Суглинок
50	48,8	11	0,00057	1,71	2,02	Лесс
51	30,6	11	0,00038	2,15	1,85	Суглинок
52	45,1	11	0,00046	1,96	1,89	Глина

Окончание таблицы 2

Вариант	Параметр					
	Q	b	i	P	h_0	Грунт
53	49,5	8	0,00059	2,01	1,94	Суглинок
54	51,5	10	0,00048	1,81	2,03	Лесс
55	46,7	11	0,00058	2,18	1,92	Глина
56	50,1	12	0,00049	1,91	1,90	Суглинок
57	30,7	8	0,00036	2,19	1,90	Лесс
58	45,1	12	0,00047	2,02	1,80	Суглинок
59	40,3	11	0,00035	2,20	1,75	Глина
60	30,5	10	0,00055	2,25	1,95	Лесс

Задание типа С. Неравномерное движение воды и сопряжение бьефов за быстротоком. Вода из нагорной канавы сбрасывается в русло реки бетонным каналом быстротоком трапециевидального поперечного сечения (рисунок 3). Нагорная канава сопрягается с быстротоком при помощи переходного участка, в конце которого (перед входом на быстроток) устанавливается критическая глубина h_k . Данные для расчета приведены в таблице 3.

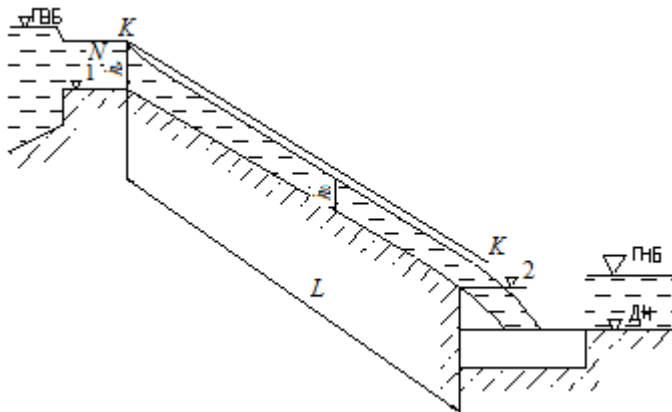


Рисунок 3 – Расчетная схема неравномерного движения воды на быстротоке.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета неравномерного движения и сопряжения бьефов за быстротоком

Вариант	Параметр								
	Q	b	m	i	L	Δ_2	n	$\Delta_{\text{дн}}$	$\Delta_{\text{г.в.}}$
1	46	10	1,5	0,30	70	101,5	0,017	99,3	101,8
2	45	12	1,5	0,20	73	110,1	0,020	108,4	109,3
3	44	13	1,5	0,25	65	120,3	0,013	118,1	120,1
4	43	14	1,5	0,35	64	130,1	0,013	128,3	131,2
5	42	10	1,5	0,20	66	180,2	0,017	178,2	180,1

Продолжение таблицы 3

Вариант	Параметр								
	Q	b	m	i	L	Δ_2	n	$\Delta_{\text{дн}}$	$\Delta_{\text{г.в.}}$
6	41	10	1,5	0,25	68	150,3	0,020	148,5	149,9
7	40	10	2,0	0,26	70	206,4	0,017	204,5	205,7
8	55	15	1,5	0,31	72	200,5	0,011	198,3	200,3
9	54	16	1,5	0,25	73	205,4	0,020	203,4	205,4
10	65	18	2,0	0,27	71	160,7	0,017	158,4	159,8
11	53	15	1,5	0,30	72	210,8	0,011	208,6	209,7
12	52	15	1,5	0,28	73	201,9	0,017	199,3	210,0
13	51	14	1,5	0,29	74	105,1	0,013	103,4	105,2
14	60	18	2,0	0,30	75	108,2	0,011	106,1	107,8
15	50	14	1,5	0,31	65	180,3	0,017	178,4	179,9
16	58	15	1,5	0,24	71	193,4	0,020	191,6	193,2
17	51	15	1,5	0,25	70	120,5	0,011	118,4	119,7
18	65	20	2,0	0,26	70	192,6	0,013	190,4	191,8
19	56	18	1,5	0,24	68	191,8	0,011	189,3	190,9
20	55	19	1,5	0,25	64	110,9	0,017	108,3	109,7

21	50	16	1,5	0,33	69	190,1	0,017	188,3	190,4
22	40	12	1,0	0,32	68	170,3	0,011	168,2	170,3
23	41	10	1,5	0,31	66	160,4	0,013	158,1	159,9
24	42	10	1,5	0,20	76	150,6	0,020	148,2	149,6
25	43	12	1,5	0,30	74	155,5	0,011	153,4	155,5
26	44	11	1,5	0,26	71	130,8	0,013	128,3	129,8
27	46	15	1,5	0,25	70	100,9	0,017	98,2	99,8
28	48	12	1,5	0,20	75	151,8	0,013	149,3	151,8
29	49	10	1,5	0,21	70	155,3	0,020	153,0	155,0
30	50	8	2,0	0,25	72	151,4	0,011	148,9	151,0
31	52	8	1,5	0,30	73	150,5	0,013	148,0	150,2
32	55	15	2,0	0,35	75	160,0	0,017	158,5	160,0
33	46	10	1,5	0,40	60	101,1	0,020	99,3	101,8
34	45	10	1,5	0,40	60	200,3	0,020	198,3	200,3
35	44	15	1,5	0,25	65	108,6	0,011	106,1	107,8
36	43	15	1,5	0,25	66	110,3	0,011	108,3	109,7
37	42	10	1,5	0,30	67	150,0	0,020	148,2	149,6
38	41	15	1,5	0,35	65	155,5	0,015	153,4	155,5
39	40	10	1,5	0,21	60	102,3	0,011	101,5	103,1
40	42	12	1,5	0,22	65	111,4	0,013	110,5	112,1
41	46	15	1,0	0,19	70	102,1	0,017	101,3	103,2
42	48	20	1,0	0,18	71	103,0	0,020	102,3	103,2
43	49	21	2,0	0,23	72	121,2	0,017	120,5	121,7
44	50	12	1,0	0,24	70	106,2	0,013	105,6	107,3
45	55	25	1,5	0,25	75	106,5	0,025	105,5	107,2
46	45	10	1,0	0,20	55	101,5	0,013	101,1	102,1
47	49	13	1,5	0,26	70	101,9	0,016	101,6	102,5

Окончание таблицы 3

Вариант	Параметр								
	Q	b	m	i	L	Δ_2	n	$\Delta_{дн}$	$\Delta_{г.в.}$
48	50	19	1,5	0,23	65	101,9	0,018	101,7	102,9
49	54	14	1,0	0,27	57	101,6	0,017	101,3	101,9
50	46	21	1,5	0,22	70	102,5	0,016	102,1	102,3
51	56	15	1,0	0,28	63	103,9	0,015	102,6	102,9
52	57	20	1,5	0,30	62	105,2	0,014	103,5	104,8
53	51	11	1,0	0,33	56	102,8	0,013	101,2	102,8
54	58	10	1,5	0,21	69	104,3	0,016	102,2	103,7
55	47	17	1,5	0,34	70	101,8	0,014	101,8	101,9
56	53	22	1,0	0,29	58	103,7	0,015	102,3	103,9
57	59	16	1,5	0,24	61	101,9	0,017	101,4	101,9
58	52	18	1,0	0,31	60	102,8	0,018	102,4	102,9
59	48	12	1,5	0,32	65	104,0	0,017	101,9	103,5

Принятые обозначения:

Q – расчетный расход воды, м³/с;
 b – ширина канала по дну, м;
 m – коэффициент заложения откосов;
 i – продольный уклон дна канала;
 P – высота водосливной стенки и высота стенки перепада, м;
 b_v – ширина водосливного отверстия, м;
 m_v – коэффициент расхода водослива;
 n – коэффициент шероховатости русла;
 h_0 – бытовая глубина, м;
 L – длина быстротока, м;
 l – длина участка русла, м;
 Δ_1 ; Δ_2 – геодезические отметки дна в начале и конце быстротока, м;
 $\Delta_{\text{дн}}$ – отметка дна отводящего русла, м;
 $\Delta_{\text{г.в}}$ – отметка горизонта воды в отводящем русле, м.

3 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА

Неравномерное установившееся движение воды в каналах характеризуется изменением вдоль потока основных его характеристик, т.е. давление и скорость изменяются вдоль потока, в связи с изменением глубины. Уклоны дна, свободной поверхности и гидравлический уклон не равны между собой. Вертикальное сечение призматического русла не изменяется по длине потока, поэтому площадь живого сечения потока зависит только от глубины.

В одних случаях неравномерное движение возникает за счет изменения уклона, в других – как результат деформации формы живого сечения потока. Это, как правило, вызвано строительством в русле каких-либо гидротехнических сооружений. Постоянной гидравлической характеристикой потока при неравномерном установившемся движении остается величина расхода Q , м³/с. Как правило, движение в открытых руслах происходит в доквадратичной области гидравлических сопротивлений.

Построение кривой свободной поверхности потока, т.е. кривой пересечения вертикальной продольной плоскости со свободной поверхностью потока, представляет большой практический интерес. Построив кривую можно найти глубины воды в канале в различных его сечениях. Зная глубины воды, можно решить вопрос об определении площади вертикального сечения потока и пропускной способности.

Неравномерное установившееся движение потока описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i + \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 + \frac{Q^2 B}{g \omega^3}} \quad (1)$$

где i – продольный уклон дна канала;
 Q – расчетный расход воды, м³/с;
 ω – площадь поперечного сечения, м²;
 C – коэффициент Шези, $\sqrt{м}/с$;
 R – гидравлический радиус, м;
 B – ширина потока по верху, м;
 g – ускорение силы тяжести, м²/с.

Решение уравнения (1) предложено Б. А. Бахметевым

$$\frac{il}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (i - j_{cp}) [B(\eta_2) - B(\eta_1)], \quad (2)$$

где i – уклон;
 l – длина, м;
 h_0 – нормальная глубина, м;
 η_1, η_2 – относительные глубины соответственно в первом и во втором сечениях, м;
 j_{cp} – коэффициент пропорциональности;

$B(\eta_1), B(\eta_2)$ – функции Бахметева, определяются в зависимости от относительных глубин η_1, η_2 и гидравлического показателя русла x .

При решении задачи о построении кривой свободной поверхности методом Б. А. Бахметева весь расчет удобно разбить на отдельные пункты и пояснить их выполнение. Для этого необходимо определить нормальную и критическую глубину; критический уклон; относительные глубины; гидравлический показатель русла; относительные глубины; коэффициент пропорциональности; функции Бахметева. Затем рассчитать зависимость между длиной участка и глубинами его ограничивающими, согласно уравнению (2) и построить линию свободной поверхности.

3.1 Определение нормальной глубины наполнения

Нормальная глубина – это глубина, которая при заданном расходе установилась бы в призматическом русле, в случае равномерного движения.

В случае равномерного движения $dh/dl \rightarrow 0$, при этом числитель правой части дифференциального уравнения (1) тоже стремится к нулю. Введем предположение

$$i + \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = 0. \quad (3)$$

Модуль расхода K , м³/с, которым характеризуется рассчитываемый канал на некоторой глубине, определяется по формуле

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (4)$$

Тогда, решив уравнение (3) относительно K_0 , получим:

$$K_0 = \omega C \sqrt{R}. \quad (5)$$

Сложность расчета заключается в том, что в правой части уравнения все множители зависят от величины h , поэтому удобно производить расчет нормальной глубины h_0 , м, графоаналитическим способом. Для этого задаваясь рядом значений h (не менее трех), для каждого из которых определяется расходная характеристика K_i , м³/с, по формуле

$$K_i = \omega_i C_i \sqrt{R_i}. \quad (6)$$

Расчет значений расходной характеристики для различных h удобнее проводить в табличной форме (таблица 4), где задаваясь рядом значений h определяются параметры, характеризующие русло (площадь вертикального поперечного сечения, длина смоченного периметра, гидравлический радиус, коэффициент Шези, модуль расхода водослива) и для каждого h вычисляется соответствующий модуль расхода K , соответствующий данной глубине.

Таблица 4 – Определение нормальной глубины графоаналитическим методом

h , м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , \sqrt{m}/c	K , м ³ /с
Контроль нормальной глубины h_0					
$h_0 =$					

Площадь поперечного сечения русла ω , м²,

$$\omega = h(b + mh), \quad (7)$$

где h – глубина наполнения канала, м;

b – ширина канала по дну, м;

m – коэффициент заложения откоса.

Длина смоченного периметра, м,

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}. \quad (8)$$

Гидравлический радиус, м,

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (9)$$

Коэффициент Шези, \sqrt{m}/c ,

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (10)$$

где n – коэффициент шероховатости русла, принимается в зависимости от вида дна русла по [7];

y – коэффициент, зависящий от шероховатости и гидравлического радиуса русла, согласно [7], $y \approx 0,2$.

Коэффициент Шези можно определить из таблицы 5.

Таблица 5 – Значения коэффициента C по формуле Н. Н. Павловского

R	Значения коэффициента шероховатости n							
	0,011	0,013	0,017	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040
	Коэффициент C							
0,10	67,2	54,3	38,1	30,6	22,4	17,3	13,8	11,2
0,12	68,8	55,8	39,5	32,6	23,5	18,3	14,7	12,1
0,14	70,3	57,2	40,7	33,0	24,5	19,1	15,4	12,8
0,16	71,5	58,4	41,8	34,0	25,4	19,9	16,1	13,4
0,18	72,6	59,5	42,7	34,8	26,2	20,6	16,8	14,0
0,20	73,7	60,4	43,6	35,7	26,9	21,3	17,4	14,5
0,22	74,6	61,3	44,4	36,4	27,6	21,9	17,9	15,0
0,24	75,5	62,1	45,2	37,1	28,3	22,5	18,5	15,5
0,26	76,3	62,9	45,9	37,8	28,8	23,0	18,9	16,0
0,28	77,0	63,6	46,5	38,4	29,4	23,5	19,4	16,4
0,30	77,7	64,3	47,2	39,0	29,9	24,0	19,9	16,8

0,35	79,3	65,8	48,6	40,3	31,1	25,1	20,9	17,8
0,40	80,7	67,1	49,8	41,5	32,2	26,0	21,8	18,6
0,45	82,0	68,4	50,9	42,5	33,1	26,9	22,6	19,4
0,50	83,1	69,5	51,9	43,5	34,0	27,8	23,4	20,1
0,55	84,1	70,4	52,8	44,4	34,8	28,5	24,0	20,7
0,60	85,3	71,4	53,7	45,2	35,5	29,2	24,7	21,3
0,65	86,0	72,2	54,5	45,9	36,2	29,8	25,3	21,9
0,70	86,8	73,0	55,2	46,6	36,9	30,4	25,8	22,4
0,80	88,3	74,5	56,5	47,9	38,0	31,5	26,8	23,4
0,90	89,4	75,5	57,5	48,8	38,9	32,3	27,6	24,1
1,00	90,9	76,9	58,8	50,0	40,0	33,3	28,6	25,0
1,10	92,0	78,0	59,8	50,9	40,9	34,1	29,3	25,7
1,20	93,1	79,0	60,7	51,8	41,6	34,8	30,0	26,3
1,30	94,0	79,9	61,5	52,5	42,3	35,5	30,6	26,9
1,50	95,7	81,5	62,9	53,9	43,6	36,7	31,7	28,0
1,70	97,3	82,9	64,3	55,1	44,7	37,7	32,7	28,9
2,00	99,3	84,8	65,9	56,6	46,0	38,9	33,8	30,0
2,50	102,1	87,3	68,1	58,7	47,9	40,6	35,4	31,5
3,00	104,4	89,4	69,8	60,3	49,3	41,9	36,6	32,5

Последние наибольшие глубины воды h должны быть такими, чтобы величина K_0 находилась между значениями K , подсчитанными по этим h . По данным таблицы 4 строят график $K = f(h)$ (рисунок 4), по которому, откладывая полученную по формуле (4) величину K_0 , определяется искомое значение нормальной глубины h_0 .

Кривая $K = f(h)$ проходит через начало координат (так как при $h = 0$ величина $K = 0$).

Для контроля правильности определения нормальной глубины необходимо подставить найденное значение h_0 в формулу модуля расхода, в результате должно получиться значение K'_0 , причем расхождение не должно быть более 2 %:

$$\Delta = \frac{K_0 - K'_0}{K_0} \cdot 100 \% \leq 2 \% \quad (11)$$

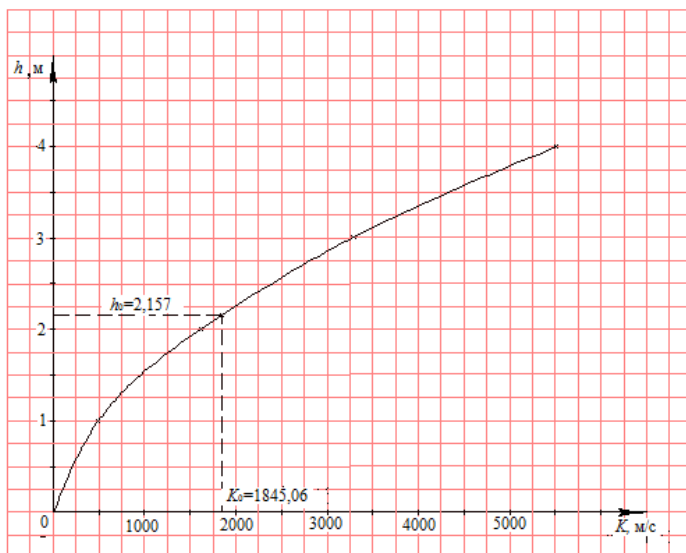


Рисунок 4 – График для определения нормальной глубины

3.2 Определение критической глубины потока

Удельная энергия потока жидкости в общем случае имеет вид уравнения:

$$E = z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}. \quad (12)$$

Рассмотрим ее значение для открытого потока. При постоянной величине расхода Q удельная энергия сечения E является функцией глубины h .

Проанализируем изменение величины удельной энергии сечения с изменением глубины h .

Если $h \rightarrow 0$ ($\omega \rightarrow 0$), то потенциальная энергия $E_{\text{п}} \rightarrow 0$, а кинетическая энергия $E_{\text{к}} \rightarrow \infty$, так как знаменатель второго слагаемого стремится к нулю. В итоге полная удельная энергия $E \rightarrow \infty$, а ось абсцисс является асимптотой кривой $E = E(h)$.

Если же $h \rightarrow \infty$ ($\omega \rightarrow \infty$), то удельная потенциальная энергия $E_{\text{п}} \rightarrow \infty$, а удельная кинетическая энергия $E_{\text{к}} \rightarrow 0$, так как знаменатель второго слагаемого стремится к бесконечности. И в данном случае также полная

удельная энергия сечения $E \rightarrow \infty$, а асимптотой кривой $E = E(h)$ будет биссектриса координатного угла, которая графически представляет изменение потенциальной энергии. Изменение удельной кинетической энергии сечения будет иметь вид гиперболы (рисунок 5).

Известно, что если непрерывная функция $E = E_n + E_k = E(h)$ при граничных значениях аргумента уходит в бесконечность, то такая функция будет иметь минимум E_{\min} . Та глубина, при которой удельная энергия принимает минимальное значение, называется критической глубиной.

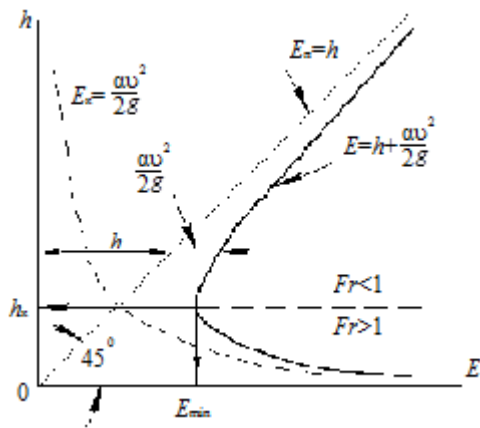


Рисунок 5 – График удельной энергии сечения

Для определения критической глубины необходимо найти производную $\frac{dE}{dh}$ и приравнять ее к нулю:

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot \omega^3} \cdot \frac{d\omega}{dh} = 0. \quad (13)$$

где $d\omega/dh = B$ – ширина канала по верху, м.

Тогда условие минимума удельной энергии сечения определяется уравнением

$$1 = \frac{\alpha Q^2}{g \omega_k^3} B_k, \quad (14)$$

или

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad (15)$$

где ω_k – площадь живого сечения при критической глубине, м²;

B_k – ширина по верху потока при критической глубине, м.

Индексы «к» указывают, что площадь живого сечения ω_k и ширина канала B_k соответствуют критической глубине h_k .

Если глубина $h > h_k$, то удельная потенциальная преобладает над удвоенной удельной кинетической энергией – поток находится в спокойном состоянии.

При $h < h_k$, удвоенная кинетическая преобладает над удельной потенциальной энергией – поток находится в бурном состоянии.

В случае, если $h = h_k$ – критическое состояние потока, удвоенная удельная кинетическая энергия равна удельной потенциальной энергии. Следовательно, критическая глубина является границей между бурным и спокойным состоянием потока.

Коэффициент Кориолиса при турбулентном движении может быть определен по формуле Г. В. Железнякова

$$\alpha = 1 + 0,88 \left(0,34 + \frac{1 + \frac{\sqrt{g}}{C}}{2,3 + 0,3 \frac{C}{\sqrt{g}}} \right)^2, \quad (16)$$

где g – ускорение силы тяжести, м²/с;

C – коэффициент Шези, \sqrt{m}/c .

По заданному расходу Q подсчитывается левая часть уравнения (15). Задаваясь рядом значений h (не менее пяти значений), вычисляют соответствующие им величины ω^3 / B и результаты заносят в таблицу 6.

Таблица 6 – Определение критической глубины

h , м	mh , м	$(b+mh)$, м	ω , м ²	ω^3 , м ⁶	$B = b + 2mh$, м	ω^3/B , м ⁵
...						
Контроль критической глубины h_k						
$h_k =$						

По данным таблицы 6 строят график функции $\omega^3 / B = f(h)$ (пример графика изображен на рисунке 6). По графику, зная величину $\alpha Q^2 / g$, определяется критическая глубина h_k .

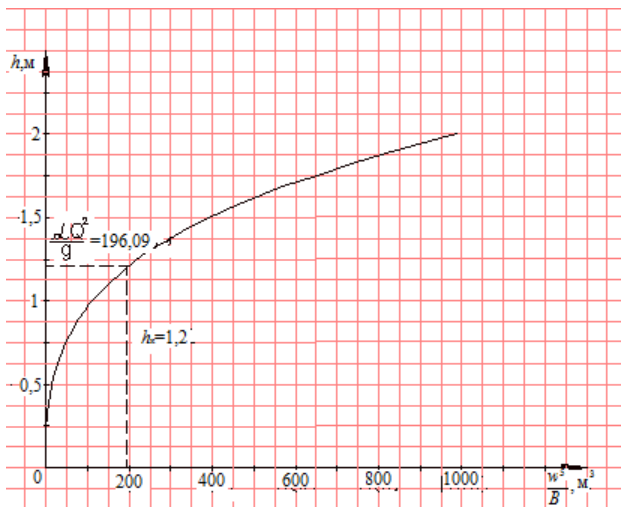


Рисунок 6 – График для определения критической глубины

Для каналов прямоугольного сечения критическая глубина определяется по формуле

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}; \quad (17)$$

для каналов треугольного сечения

$$h_k = \sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{g m^2}}. \quad (18)$$

Критическая глубина зависит от расхода и формы поперечного сечения канала и не зависит от уклона дна.

Для контроля правильности определения критической глубины необходимо найденное значение h_k подставить в правую часть уравнения критического состояния (15), причем расхождение с левой частью не должно превышать 2 %.

3.3 Определение критического уклона

Анализ формул для определения критических глубин показывает, что $h_{кр}$ зависит только от геометрической формы поперечного сечения русла и расхода, но не зависит от уклона дна i и, кроме того, в призматическом русле $h_{кр} = \text{const}$ по всей его длине.

При изучении равномерного движения было отмечено, что нормальная глубина зависит от уклона. Тогда, очевидно, для любого призматического русла при заданном расходе Q можно подобрать такое значение i , при котором нормальная глубина h_0 станет $h_{кр}$. Уклон, при котором глубина в канале при равномерном движении становится равной критической, носит название *критического уклона*.

Величину критического уклона i_k можно определить из формулы Шези:

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k C_k^2 R_k} . \quad (19)$$

Значение критического уклона так же можно определить из формулы

$$Q^2 = \frac{\omega_k^3}{B_k} \cdot \frac{g}{\alpha} . \quad (20)$$

Подставляя значение Q^2 в уравнение (19) и учитывая, что $R_k = \omega_k / \chi_k$, получим:

$$i_k = \frac{g}{\alpha C_k^2} \cdot \frac{\chi_k}{B_k} . \quad (21)$$

Для каналов большой ширины, когда $\chi_k / B_k \approx 1$, формула (21) упрощается и принимает вид

$$i_k = \frac{g}{\alpha C_k^2} . \quad (22)$$

Если канал имеет уклон дна меньше критического ($i < i_k$), то глубина при равномерном движении (*нормальная глубина* – h_0) $h_0 > h_k$ – имеет место спокойное состояние потока ($Fr < 1$).

Когда уклон больше критического ($i > i_k$), тогда $h_0 < h_k$ – бурное состояние потока. В случае бурного состояния потока существует опасность разрушения канала. В связи с этим, часто проектируют русла с критическим уклоном дна, при этом поток обладает минимальной удельной энергией.

Когда уклон дна меньше критического, поток имеет определенный запас потенциальной энергии (в сравнении с минимальным значением при h_k), которая при определенных условиях может перейти в кинетическую.

3.4 Прогнозирование формы свободной поверхности потока

При неравномерном движении формы кривых свободной поверхности отличаются большим разнообразием. Их можно систематизировать по ряду признаков.

В зависимости от изменения глубины вдоль потока наблюдается два вида кривых свободной поверхности:

1 Кривые подпора, когда при движении потока происходит увеличение глубины.

2 Кривые спада, характеризующиеся уменьшением глубины потока вниз по течению.

Кроме этого, эти кривые можно систематизировать в зависимости от положения их относительно критической и нормальной глубин, а также в зависимости от соотношения уклона дна и критического уклона.

Каналы могут быть с прямым уклоном дна ($i > 0$), горизонтальные ($i = 0$), с обратным уклоном ($i < 0$). Существует 8 наиболее часто встречающихся типов кривых свободной поверхности при прямом уклоне дна, из них шесть являются кривыми подпора, две – кривыми спада.

Кривая подпора – это кривая свободной поверхности потока, вдоль которой (по течению) глубины потока возрастают.

Кривая спада – это кривая свободной поверхности, вдоль которой (по течению) глубины потока уменьшаются.

Для анализа кривых свободной поверхности потока воспользуемся дифференциальным уравнением неравномерного движения (1) и запишем его в виде:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{(\omega C \sqrt{R})^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}}. \quad (23)$$

Если обозначить критерий Фруда:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3} = Fr, \quad (24)$$

учесть преобразования

$$Q^2 = iK_0^2. \quad (25)$$

$$K = \omega C \sqrt{R}. \quad (26)$$

и вынести за скобки i , уравнение (23) примет вид:

$$\frac{dh}{dl} = i \frac{1 - (K_0 / K)^2}{1 - Fr}, \quad (27)$$

где K_0 и K – расходные характеристики для равномерного и неравномерного движения соответственно при одном и том же расходе.

Анализ этого уравнения позволяет установить вид свободной поверхности в различных случаях.

В задании указано, что канал имеет прямой уклон дна ($i > 0$). Здесь возможны три случая:

Первый случай (рисунок 7), когда уклон дна канала меньше критического ($i < i_k$). При этом нормальная глубина больше критической глубины ($h_0 > h_k$). На продольном профиле канала изображено две линии: линия нормальной глубины ($N-N$) и линия критической глубины ($K-K$), которые параллельны дну канала.

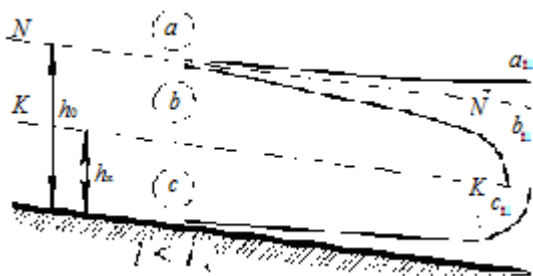


Рисунок 7 – Кривые свободной поверхности при $i < i_k$

Этими линиями выделяются три характерные области (диапазона) изменения глубины неравномерного потока (a, b, c). Свободная поверхность потока может находиться в каждой из этих зон.

Зона a . Здесь поток имеет глубину больше нормальной ($h > h_0$), поэтому расходная характеристика K больше расходной характеристики K_0 (

$K > K_0$), а их отношение в квадрате меньше единицы ($(K/K_0)^2 < 1$).

Числитель в уравнения (27) – положительное число.

Так как поток в спокойном состоянии ($h > h_k$). Число Фруда $Fr < 1$. Знаменатель уравнения (27) также положителен, поэтому положительно значение правой части уравнения (27), тогда $\frac{dh}{dl} > 0$. В данном случае имеет место вогнутая кривая подпора типа a_1 . Эта кривая в верх по течению асимптотически приближается к нормальной глубине h_0 . В нижней части кривая свободной поверхности a_1 стремится к горизонтальной линии [2]. Подобная кривая будет иметь место, когда в русле канала имеется препятствие или канал впадает в водоем.

Зона b. В данном случае глубина потока в канале находится между нормальной и критической глубинами ($h_0 > h > h_k$). Тогда $K < K_0$, а число Фруда $Fr < 1$. Поток в спокойном состоянии. Числитель уравнения (27) имеет отрицательное значение, а знаменатель – положительное. Поэтому $\frac{dh}{dl} < 0$. Имеет место выпуклая кривая спада типа b_1 . Анализируя уравнение (27), можно сделать вывод, что данная кривая также в верхней части асимптотически приближается к глубине равномерного движения h_0 . В нижней части кривая b_1 стремится к линии критической глубины ($K-K$) условно под прямым углом $\left(\frac{dh}{dl} \rightarrow \infty\right)$. Это имеет место, когда канал заканчивается уступом (водопадом).

Зона c. В зоне c глубина потока в канале находится между дном канала и линией критических глубин ($h_0 > h_k > h$). Тогда $K < K_0$, а число Фруда $Fr > 1$. В данном случае числитель и знаменатель имеют отрицательные значения, а дробь положительна $\frac{dh}{dl} > 0$. Имеет место кривая подпора типа c_1 . Кривая свободной поверхности потока начинается за сжатым сечением при истечении из-под щита. Заканчивается кривая c_1 гидравлическим прыжком (о гидравлическом прыжке речь пойдет ниже).

Второй случай ($i > i_k$). В данном случае нормальная глубина меньше критической глубины ($h_0 < h_k$). Как и в предыдущем случае область возможного существования потока разбивается линиями $K-K$ и $N-N$ на три зоны (a , b , c). Формы сводной поверхности потока в каждой из них приведены на рисунке 8.

Зона а. В рассматриваемой зоне глубина потока больше критической и больше нормальной глубин ($h > h_k > h_0$). Тогда $K > K_0$, а число Фруда $Fr < 1$. Числитель и знаменатель в правой части выражения положительны, следовательно, и дробь правой части уравнения (27) положительна. Тогда $\frac{dh}{dl} > 0$. Имеет место кривая подпора типа a_2 . Анализ выражения (27) показывает, что кривая свободной поверхности выпуклая начинается с гидравлического прыжка и стремится к горизонтальной линии.

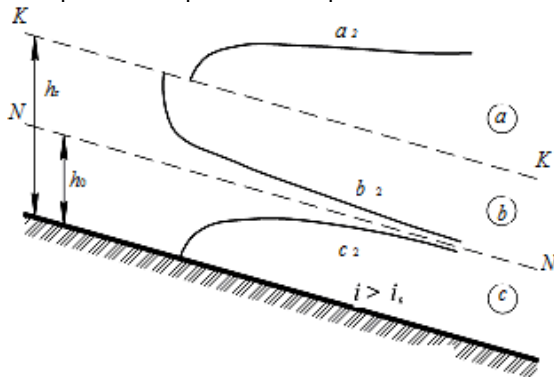


Рисунок 8 – Кривые свободной поверхности при $i > i_k$

Зона б. В данном случае $h_k > h > h_0$, $K > K_0$, $Fr > 1$. Свободная поверхность потока находится между линиями $K-K$ и $N-N$. Числитель правой части уравнения (27) положителен, а знаменатель – отрицателен.

Сама дробь имеет отрицательное значение. Тогда $\frac{dh}{dl} < 0$. Имеет место вогнутая кривая спада типа b_2 . Анализ выражения (27) показывает, что кривая свободной поверхности потока начинается с водопада (канала меньшего уклона) и стремится к линии нормальных глубин $N-N$.

Зона с. Здесь диапазон изменения глубин будет следующим: $h_k > h_0 > h$. Тогда $K < K_0$, а $Fr > 1$. Числитель и знаменатель правой части выражения

(27) будут отрицательными, а сама дробь – положительна. Тогда $\frac{dh}{dl} > 0$.

Имеет место выпуклая кривая типа c_2 , которая стремится к линии нормальных глубин, а начинается с канала большего уклона.

Третий случай ($i = i_k$). В рассматриваемом случае $h_k = h_0$. Линии $K-K$ и $N-N$ совпадают. Здесь возможны две зоны a и c . Формы свободной поверхности в этих зонах приведены на рисунке 9.

Зона а. В этой зоне $h > h_k = h_0$, $K > K_0$, $Fr < 1$. Числитель и знаменатель выражения (27) положительны, а $dh/dl > 0$. Имеет место кривая подпора типа a_3 , близкая к горизонтальной прямой. Начинается она с линии критической глубины $K-K$ ($N-N$) и заканчивается перед плотиной (водоемом).

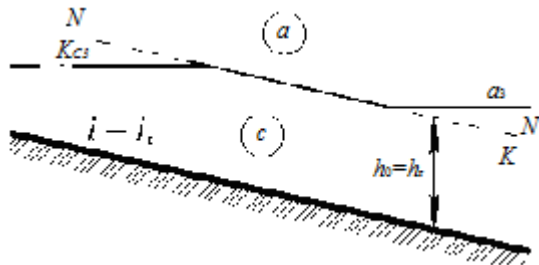


Рисунок 9 – Кривые свободной поверхности при $i = i_k$

Зона с. В рассматриваемой зоне $h < h_k = h_0$, $K < K_0$, $Fr > 1$. Числитель и знаменатель выражения (27) будут иметь отрицательные значения, а сама дробь – положительна. Тогда $dh/dl > 0$. Имеет место кривая подпора типа c_3 . Эта линия также будет близка горизонтальной прямой. Эта линия встречается при сопряжении каналов с $i > i_k$ и $i = i_k$.

3.5 Определение гидравлического показателя русла x

Для интегрирования уравнения (1) Бахметев Б. А. предложил использовать показательную зависимость:

$$\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 = \left(\frac{h_0}{h}\right)^x, \quad (28)$$

где K – расходная характеристика при неравномерном движении потока с глубиной h ;

K_0 – расходная характеристика при равномерном движении потока с глубиной h_0 ;

x – гидравлический показатель русла (зависит от формы русла).

Для трапецидальных призматических русел с прямым уклоном дна ($i > 0$) гидравлический показатель русла может быть определен с некоторым приближением по формуле

$$x = 2 \frac{\lg K_{\text{cp}} - \lg K_{\text{cp}}}{\lg h_{\text{cp}} - \lg h_0}, \quad (29)$$

где K_{cp} – модуль расхода, соответствующий средней глубине, м³/с;
 h_{cp} – средняя глубина на данном участке потока, м,

$$h_{\text{cp}} = \frac{(h_{\text{нач}} + h_{\text{кон}})}{2}, \quad (30)$$

$h_{\text{нач}}$ – глубина в начале заданного русла, м;

$h_{\text{кон}}$ – глубина в конце заданного русла, м.

Для кривых типа a_1 , b_1 начальная глубина $h_{\text{нач}}$, м, определяется по формуле

$$h_{\text{нач}} = (h_0 \pm \Delta h), \quad (31)$$

$$\Delta h = (0,01 \dots 0,02) h_0. \quad (32)$$

Знак плюс относится к кривой подпора (a_1), знак минус – к кривой спада (b_1).

Для кривой типа c_1 начальная глубина соответствует критической глубине

$$h_{\text{нач}} = h_{\text{кр}}. \quad (33)$$

Глубина $h_{\text{кон}}$ намечается всегда ниже по течению глубины $h_{\text{нач}}$ (отсчет сечений всегда ведется по течению).

При определении конечной глубины для плотины необходимо учесть величину напора H перед плотинной

$$h_{\text{кон}} = P + H, \quad (34)$$

где P – высота гребня водосливной стенки, м;

H – напор перед плотинной, м,

$$H = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{2gm^2b^2}}, \quad (35)$$

Для перепада $h_{\text{кон}} = h_{\text{к}}$.

В конце быстрого течения в первом приближении конечная глубина, м,

$$h_{\text{кон}} = h_0 + 0,02. \quad (36)$$

Величина x для русел разных форм поперечного сечения имеет разное значение, но для данного призматического русла ее можно считать постоянной ($x = \text{const}$). Полученное значение округляется до ближайшего табличного значения [7].

3.6 Определение коэффициента пропорциональности $j_{\text{ср}}$

Коэффициент пропорциональности

$$j_{\text{ср}} = \frac{\alpha i C_{\text{ср}}^2}{g} \cdot \frac{B_{\text{ср}}}{x_{\text{ср}}}, \quad (37)$$

где $C_{\text{ср}}$, $B_{\text{ср}}$, $x_{\text{ср}}$ – соответственно коэффициент Шези, ширина потока по верху и смоченный периметр, вычисленные по средней глубине.

Существует два разных способа учета величины $j_{\text{ср}}$ при построении свободной поверхности потока.

Первый способ (менее точный) предполагает, что величина $j_{\text{ср}}$ постоянна по всей длине потока.

Второй способ (более точный). Согласно этому способу рассматриваемое русло разбивается на участки, причем принимается, что $j_{\text{ср}}$ постоянно только в пределах одного участка.

Количество участков зависит от разности глубин в начале $h_{\text{нач}}$ и в конце русла $h_{\text{кон}}$ и

$$n = \frac{(h_{\text{кон}} - h_{\text{нач}})}{\Delta h}, \quad (38)$$

где Δh – разность глубин в начале и конце каждого участка, м, принимается равной 0,15–0,20 для плотины и 0,08–0,10 для перепада и быстрого течения.

Задавая значениями h (в пределах от $h_{\text{нач}}$ до $h_{\text{кон}}$), определяют значение j по формуле

$$j = \frac{\alpha i C^2}{g} \cdot \frac{B}{x}. \quad (39)$$

Результаты расчетов сводят в таблицу 7.

Таблица 7 – Определение коэффициента $j_{\text{ср}}$

h , м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , $\sqrt{\text{м}} / \text{с}$	C^2 , м/с ²	B , м	j
$h_{\text{нач}} =$							
...							
$h_{\text{кон}} =$							

По данным таблицы 7 строят график $j = f(h)$. Пример графика приведен на рисунке 10.

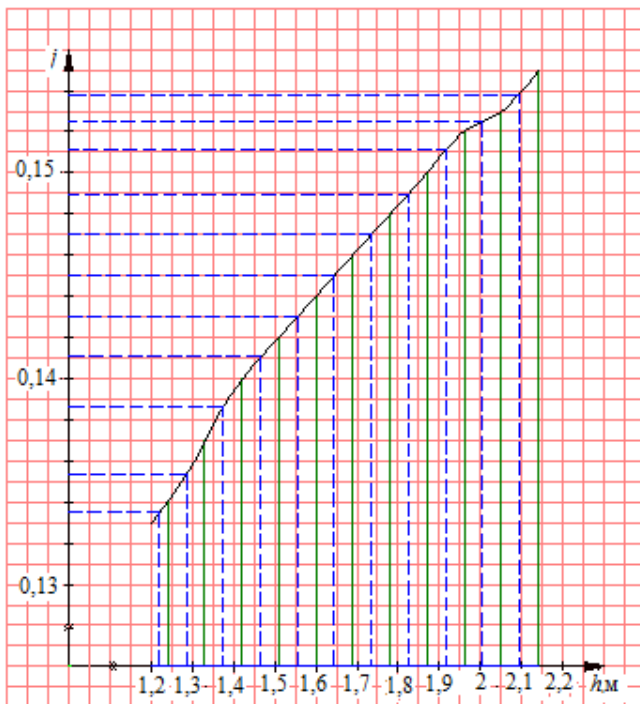


Рисунок 10 – Кривая $j = f(h)$

3.7 Определение координат кривой свободной поверхности потока по уравнению Б.А. Бахметева

Все русло от начальной $h_{\text{нач}}$ до конечной глубины $h_{\text{кон}}$ разбиваем на участки.

Для плотины перепада расчет ведем от сооружения вверх против течения; для быстроготока – идем вниз по течению, однако ход расчета остается аналогичным.

Для определения координат кривой свободной поверхности потока составляют таблицу 8.

Таблица 8 – Определение координат кривой свободной поверхности потока

Номер участка	h , м	$h_{\text{ср}}$, м	$j_{\text{ср}}$	η	$B(\eta)$	l , м
---------------	---------	---------------------	-----------------	--------	-----------	---------

1						
2						
...						
<i>n</i>						

Средняя глубина на каждом участке, м,

$$h_{\text{cp}} = \frac{(h_1 + h_2)}{2}, \quad (40)$$

где h_1, h_2 – глубина соответственно в начале и в конце каждого участка русла, м.

Глубина h_2 у каждого участка русла всегда назначается ниже по течению за глубиной h_1 .

По полученной величине h_{cp} по графику (см. рисунок 9) определяется величина j_{cp} .

Относительные глубины, м, соответственно в первом и во втором сечениях каждого участка:

$$\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}, \quad \eta_2 = \frac{h_2}{h_0}. \quad (41)$$

Длина каждого участка, м, определяется из уравнения неравномерного движения (Б. А. Бахметева)

$$l = \frac{h_0}{i} (\eta_2 - \eta_1 - (1 - j_{\text{cp}}) [B(\eta_2) - B(\eta_1)]), \quad (42)$$

где h_0 – нормальная глубина, м;

i – уклон;

η_1, η_2 – относительные глубины соответственно в первом и во втором сечениях, м;

$B(\eta_1), B(\eta_2)$ – функции Бахметева, находится по таблице 9 в зависимости от относительных глубин η_1, η_2 и гидравлического показателя русла x .

Таблица 9 – Значение функции $B(\eta)$ для положительного уклона дна русла $i > 0$ при различных значениях η и x [7]

	x
--	-----

η	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50
0	0,549	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0,619	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
0,10	0,693	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
0,15	0,709	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
0,20	0,725	0,201	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
0,25	0,741	0,252	0,251	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,30	0,758	0,304	0,302	0,301	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
0,35	0,775	0,357	0,354	0,352	0,351	0,351	0,351	0,350	0,350	0,350
0,40	0,792	0,411	0,407	0,404	0,403	0,403	0,402	0,401	0,400	0,400
0,45	0,810	0,468	0,461	0,458	0,456	0,455	0,454	0,452	0,451	0,450
0,50	0,829	0,527	0,527	0,513	0,510	0,508	0,507	0,504	0,502	0,501
0,55	0,848	0,590	0,575	0,570	0,566	0,564	0,561	0,556	0,554	0,552
0,60	0,867	0,657	0,637	0,630	0,624	0,621	0,617	0,610	0,607	0,605
0,61	0,907	0,671	0,650	0,642	0,636	0,632	0,628	0,621	0,618	0,615
0,62	0,950	0,685	0,663	0,654	0,648	0,644	0,640	0,632	0,629	0,626
0,63	0,996	0,699	0,676	0,667	0,660	0,656	0,652	0,644	0,640	0,637
0,64	1,045	0,714	0,689	0,680	0,673	0,668	0,664	0,656	0,651	0,648
0,65	1,098	0,729	0,703	0,693	0,686	0,681	0,676	0,998	0,662	0,659
0,66	1,156	0,744	0,717	0,706	0,699	0,694	0,688	0,680	0,674	0,670
0,67	1,221	0,760	0,731	0,720	0,712	0,707	0,700	0,692	0,686	0,681
0,68	1,293	0,776	0,746	0,734	0,725	0,720	0,713	0,704	0,698	0,692
0,69	1,375	0,792	0,761	0,748	0,739	0,733	0,726	0,716	0,710	0,704
0,70	1,472	0,809	0,776	0,763	0,753	0,746	0,739	0,728	0,722	0,716
0,72	1,527	0,843	0,807	0,793	0,781	0,774	0,766	0,754	0,747	0,740
0,74	1,589	0,880	0,840	0,823	0,811	0,802	0,794	0,780	0,773	0,764
0,76	1,658	0,919	0,874	0,855	0,843	0,832	0,823	0,808	0,799	0,788
0,78	1,738	0,960	0,911	0,890	0,877	0,865	0,854	0,837	0,826	0,814
0,80	1,831	1,006	0,950	0,927	0,913	0,900	0,887	0,867	0,854	0,842
0,82	1,945	1,056	0,993	0,968	0,951	0,937	0,922	0,898	0,884	0,872
0,84	2,092	1,110	1,040	1,013	0,992	0,976	0,960	0,933	0,917	0,904
0,86	2,297	1,170	1,092	1,062	1,039	1,019	1,002	0,972	0,953	0,938
0,88	2,646	1,238	1,151	1,116	1,092	1,069	1,049	1,015	0,992	0,975
0,90	∞	1,316	1,218	1,179	1,152	1,127	1,103	1,065	1,038	1,017
0,91	2,652	1,361	1,257	1,216	1,186	1,159	1,132	1,093	1,063	1,040
0,92	2,307	1,411	1,300	1,257	1,223	1,194	1,165	1,124	1,091	1,066
0,93	2,107	1,469	1,348	1,302	1,265	1,235	1,204	1,159	1,122	1,095
0,94	1,966	1,535	1,403	1,352	1,312	1,280	1,247	1,198	1,157	1,128
0,95	1,857	1,610	1,467	1,411	1,367	1,332	1,297	1,241	1,197	1,165
0,96	1,768	1,701	1,545	1,483	1,435	1,395	1,356	1,292	1,246	1,209
0,97	1 0	1,820	1,644	1,575	1,521	1,475	1,431	1,362	1,308	1,265
0,98	0,050	1,985	1,783	1,703	1,640	1,587	1,537	1,460	1,394	1,344
0,99	0,100	2,264	2,018	1,921	1,844	1,777	1,714	1,614	1,538	1,474
1,00	0,151	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
1,01	0,202	1,863	1,419	1,265	1,138	1,031	0,936	0,790	0,680	0,598
1,02	0,255	1,591	1,193	1,053	0,940	0,847	0,766	0,641	0,546	0,474
1,03	0,309	1,432	1,061	0,931	0,827	0,742	0,668	0,555	0,468	0,402

Окончание таблицы 9

η	x									
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50
1,04	0,365	1,320	0,967	0,845	0,747	0,668	0,600	0,494	0,415	0,353

1,05	0,423	1,234	0,896	0,779	0,687	0,612	0,548	0,447	0,375	0,317
1,06	0,484	1,164	0,838	0,726	0,640	0,566	0,506	0,411	0,343	0,290
1,07	0,693	1,105	0,790	0,682	0,600	0,529	0,471	0,381	0,316	0,266
1,08	1,629	1,053	0,749	0,645	0,565	0,497	0,441	0,355	0,292	0,245
1,09	1,573	1,009	0,713	0,612	0,534	0,469	0,415	0,332	0,271	0,226
1,10	1,522	0,969	0,680	0,583	0,506	0,444	0,392	0,312	0,253	0,210
1,12	1,436	0,901	0,626	0,533	0,461	0,402	0,354	0,277	0,223	0,183
1,14	1,363	0,846	0,581	0,493	0,424	0,368	0,337	0,250	0,200	0,162
1,16	1,301	0,797	0,542	0,458	0,391	0,339	0,295	0,227	0,181	0,145
1,18	1,247	0,755	0,510	0,427	0,364	0,314	0,272	0,208	0,165	0,130
1,20	1,199	0,718	0,480	0,400	0,341	0,292	0,252	0,192	0,151	0,118
1,22	1,156	0,685	0,454	0,377	0,320	0,272	0,235	0,177	0,138	0,108
1,24	1,117	0,656	0,431	0,356	0,301	0,255	0,219	0,164	0,126	0,098
1,26	1,081	0,630	0,410	0,337	0,284	0,240	0,205	0,152	0,116	0,090
1,28	1,049	0,606	0,391	0,320	0,268	0,226	0,193	0,142	0,107	0,082
1,30	1,018	0,582	0,373	0,304	0,254	0,214	0,181	0,133	0,099	0,076
1,32	0,990	0,561	0,357	0,290	0,241	0,202	0,171	0,125	0,092	0,070
1,34	0,964	0,542	0,341	0,277	0,229	0,192	0,161	0,117	0,086	0,064
1,36	0,940	0,524	0,328	0,265	0,219	0,182	0,153	0,109	0,080	0,058
1,38	0,917	0,508	0,316	0,253	0,209	0,173	0,145	0,103	0,074	0,054
1,40	0,896	0,492	0,304	0,243	0,199	0,165	0,137	0,097	0,070	0,050
1,42	0,876	0,477	0,293	0,233	0,191	0,157	0,131	0,091	0,066	0,046
1,44	0,856	0,463	0,283	0,225	0,183	0,150	0,125	0,085	0,062	0,044
1,46	0,838	0,450	0,273	0,217	0,175	0,144	0,119	0,081	0,058	0,042
1,48	0,821	0,438	0,263	0,209	0,168	0,138	0,113	0,077	0,054	0,040
1,50	0,805	0,426	0,255	0,201	0,162	0,132	0,108	0,073	0,052	0,038
1,55	0,767	0,399	0,235	0,184	0,147	0,119	0,097	0,065	0,045	0,032
1,60	0,733	0,376	0,218	0,170	0,134	0,108	0,087	0,058	0,039	0,027
1,65	0,703	0,355	0,203	0,157	0,123	0,098	0,079	0,052	0,034	0,023
1,70	0,675	0,336	0,189	0,145	0,113	0,090	0,072	0,046	0,030	0,020
1,75	0,650	0,318	0,177	0,134	0,104	0,083	0,065	0,041	0,026	0,017
1,80	0,626	0,303	0,166	0,124	0,096	0,077	0,060	0,037	0,023	0,015
1,85	0,605	0,289	0,156	0,115	0,089	0,071	0,055	0,033	0,020	0,013
1,90	0,585	0,276	0,147	0,108	0,083	0,066	0,050	0,030	0,018	0,011
1,95	0,567	0,264	0,139	0,102	0,078	0,061	0,046	0,027	0,016	0,009
2,0	0,550	0,253	0,132	0,097	0,073	0,057	0,043	0,025	0,015	0,008
2,2	0,490	0,216	0,108	0,077	0,057	0,043	0,032	0,018	0,010	0,006
2,4	0,444	0,188	0,090	0,063	0,046	0,034	0,024	0,013	0,007	0,004
2,6	0,405	0,165	0,076	0,052	0,037	0,028	0,019	0,0095	0,0050	0,0025
2,8	0,374	0,146	0,065	0,044	0,030	0,022	0,015	0,0075	0,0040	0,0015
3,0	0,346	0,131	0,056	0,037	0,025	0,0165	0,0125	0,0060	0,0030	0,00075
3,5	0,294	0,104	0,041	0,026	0,017	0,0125	0,0075	0,0035	0,0020	0,00050
4,0	0,255	0,084	0,031	0,019	0,012	0,0085	0,0050	0,0020	0,0010	0,00025
4,5	0,226	0,070	0,025	0,014	0,009	0,0065	0,0035	0,0015	0,0005	0
5,0	0,203	0,059	0,020	0,010	0,007	0,0050	0,0025	0,0010	0	0
6,0	0,168	0,047	0,014	0,007	0,004	0,0030	0,0015	0,0003	0	0
8,0	0,126	0,029	0,009	0,004	0,002	0,0015	0,0010	0,0002	0	0
10,0	0,100	0,021	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0	0	0

По результатам таблицы 8, строится кривая свободной поверхности на чертеже продольного профиля русла.

Обычно подобные профили строятся в искаженном масштабе (вертикальный масштаб более крупный, чем горизонтальный) от 1:10000 до 1:25000 (для плотины и перепада) и более крупный для быстротока, вертикальный – 1:100 (или 1:50).

При построении продольного профиля русла в таком масштабе линию дна русла следует намечать, разумеется, не по заданному углу наклона ее к горизонту, а по катетам, откладываемым в разных масштабах (в вертикальном и горизонтальном).

При малых уклонах i (плотина, перепад) следует измерять длины участков l по горизонтали.

Чертеж кривой свободной поверхности должен быть выполнен на миллиметровой бумаге, которую необходимо затем подшить в пояснительную записку.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ПАДАЮЩЕЙ СТРУИ С НИЖНИМ БЬЕФОМ

Сопряжение бьефов представляет собой соединение потока, поступающего из верхнего бьефа, с потоком нижнего бьефа. Любое гидротехническое сооружение (ГТС) в русле является сопротивлением движению потока, для преодоления которого необходима дополнительная энергия. Она накапливается перед сооружением в виде потенциальной энергии при увеличении глубины потока (рисунок 11).

При переходе через ГТС потенциальная энергия переходит в кинетическую путем уменьшения глубины до сжатой h_c и увеличения скорости. Поток поступает в нижний бьеф, как правило, в бурном состоянии при условии $h_c < h_k$.

Рассмотрим общую картину потока на участке дорожного водопропускного сооружения. Поток в верхнем бьефе, стесненный на подходе к сооружению, находится в спокойном состоянии; в ГТС он переходит в бурное состояние ($h < h_k$); затем в НБ он снова приобретает спокойное состояние ($h_{нб} > h_k$).

Переход бурного состояния потока сооружения в спокойный поток нижнего бьефа возможен в виде гидравлического прыжка. В зависимости от глубины потока нижнего бьефа (h_6) и глубины в сжатом сечении (h_c) различают три типа сопряжения бьефов.

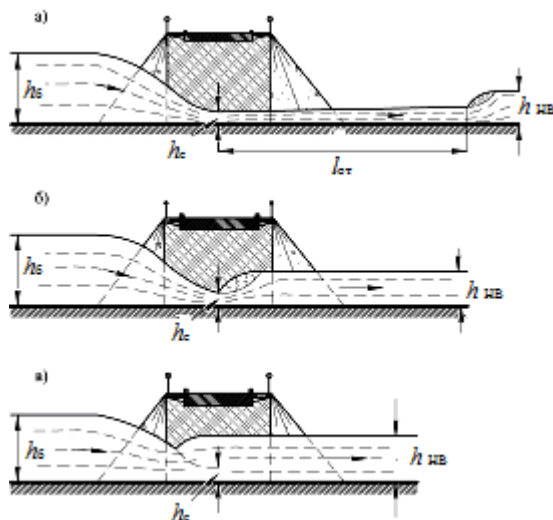


Рисунок 11 – Сопряжение бьефов:

а – с отогнанным прыжком; б – с прыжком в сжатом сечении; в – с затопленным прыжком

Первый тип: сопряжение происходит в виде отогнанного прыжка (см. рисунок 11, а). В данном случае прыжок находится на некотором расстоянии от сжатого сечения. Расстояние от сжатого сечения до гидравлического прыжка называется длиной отгона $l_{от}$. На этом участке свободная поверхность потока представляет собой кривую подпора. Происходит увеличение глубины от сжатой до первой сопряженной глубины гидравлического прыжка h_1 . Глубина нижнего бьефа при этом равна второй сопряженной глубине ($h_6 = h_2$). При рассматриваемом типе сопряжения поток на расстоянии $l_{от}$ находится в бурном состоянии, что может привести к разрушению дна и берегов русла.

Второй тип: гидравлический прыжок находится в сжатом сечении ($l_{от} = 0$). Этот тип часто называют сопряжение прыжком в сжатом сечении (рисунок 11, б). В данном случае глубина в сжатом сечении потока равна первой сопряженной глубине гидравлического прыжка ($h_c = h_1$), а глубина в нижнем – второй сопряженной глубине ($h_6 = h_2$).

Третий тип: данный тип сопряжения носит название сопряжения по типу затопленного гидравлического прыжка (рисунок 10, в). В данном случае глубина в сжатом сечении больше первой сопряженной глубины гидравлического прыжка ($h_c > h_1$), а $h_6 > h_2$.

Гидравлический расчет сопряжения бьефов начинается с определения типа сопряжения. Для этого необходимо определить глубину потока в сжатом сечении (h_c).

Несмотря на различие в конструкциях сооружений (водосливная плотина, перепад, быстрое течение) гидравлический расчет их аналогичен (используют одни и те же расчетные формулы).

Русло в нижнем бьефе считается прямоугольным, ширина его, м, равна ширине водослива b_v (для плотины) или ширине потока по верху B в конце канала (для перепада и быстрого течения).

Удельный расход воды, $\text{м}^3/\text{м}^2$:

– для плотины

$$q = \frac{Q}{b_v}; \quad (43)$$

– для перепада и быстрого течения

$$q = \frac{Q}{B}. \quad (44)$$

Критическая глубина в нижнем бьефе, м,

$$h'_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}. \quad (45)$$

Полный напор T_0 , м,

$$T_0 = T + \frac{v_0^2}{2g}, \quad (46)$$

где T – свободный напор перед сооружением, м;

v_0 – скорость подхода воды к сооружению, м/с.

Для плотины и перепада свободный напор перед сооружением определяется по формуле

$$T = h_{\text{кон}} + P. \quad (47)$$

Для быстрого течения

$$T = h_{\text{кон}} + (\nabla_2 - \nabla_{\text{дн}}). \quad (48)$$

Скорость подхода воды к сооружению, м/с,

$$v_0 = \frac{Q}{\omega_{\text{кон}}} . \quad (49)$$

Глубина в сжатом сечении h_c , м, определяется из уравнения

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{2gh_c^2\varphi_c^2} , \quad (50)$$

где φ_c – коэффициент скорости, учитывающий потери напора в пределах сооружения, значения φ_c изменяются в пределах от 0,80 до 0,98 в зависимости от очертания водосливной стенки.

Так как уравнение (50) является кубическим в отношении h_c , то решение его находится подбором. При этом следует иметь в виду, что глубина h_c должна быть меньше критической. В связи с этим из трех корней кубического уравнения надо интересоваться только тем, который удовлетворяет условию $0 < h_c < h'_k$.

Если ввести замену

$$A = \frac{q^2}{2g\varphi_c^2} = \text{const}, \quad (51)$$

то уравнение (51) примет вид

$$T_0 = h_c + \frac{A}{h_c^2} . \quad (52)$$

Задавая ряд значений h_c , в соответствии с условием $0 < h_c < h'_k$, по формуле (52) рассчитывают величину T_0 . Результаты расчетов сводят в таблицу 10.

Таблица 10 – Определение полного напора

h_c , м	h_c^2 , м ²	A/h_c^2 , м ²	T_0 , м

По результатам таблицы 10 строят график зависимости $T_0 = f(h_c)$ (рисунок 12). По графику $T_0 = f(h_c)$ определяется глубина в сжатом сечении h_c в зависимости от рассчитанной величины T_0 по формуле (52).

Вторая глубина прыжка, м, сопряженная с глубиной в сжатом сечении, определяется по уравнению гидравлического прыжка для прямоугольного русла

$$h'_c = \frac{h_c}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \frac{h_k}{h_c}} - 1 \right). \quad (53)$$

Сопоставляя полученное значение h'_c с глубиной воды в нижнем бьефе h_6 (бытовой глубиной), определяется тип сопряжения бьефа.

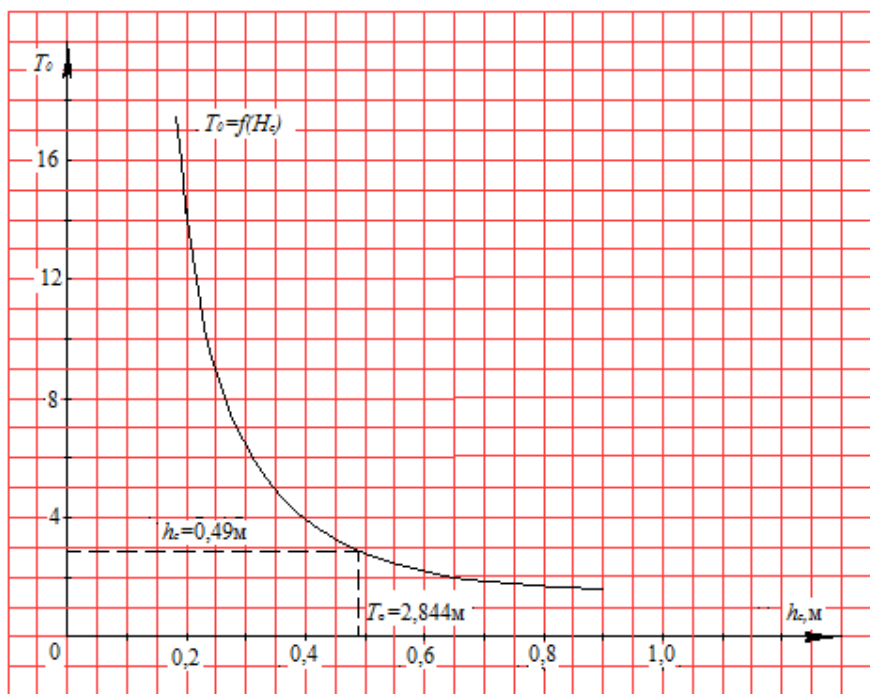


Рисунок 12 – График для определения глубины в сжатом сечении

При уклоне отводящего русла $i < i_k$ (что обычно и имеет место в практике) возможны три типа сопряжения бьефов:

1) $h_6 < h'_c$ – сопряжение бьефов при помощи отогнанного прыжка. В этом случае прыжок устанавливается на некотором расстоянии от сооружения;

2) $h_6 > h'_c$ – сопряжение бьефов при помощи затопленного прыжка. В этом случае нижний бьеф затапливает прыжок;

3) $h_6 = h'_c$ – прыжок в сжатом сечении. В этом случае нижний бьеф не затапливает прыжка, но и отгона прыжка тоже нет; прыжок начинается в сжатом сечении. Этот тип сопряжения является неустойчивым и при небольших изменениях расхода может перейти в отогнанный прыжок.

При получении в расчете первого или третьего типа сопряжения бьефов необходимо спроектировать в нижнем бьефе сооружения водобойный колодец.

5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАСИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЫЖКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ

Бурный поток, образующийся после перелива через плотину или в конце быстротока, обладает относительно большой кинетической энергией и может разрушать русло, что опасно и для самого сооружения, которое может оказаться подмытым.

Наличие больших скоростей воды за сооружением заставляет строить в нижнем бьефе мощное и дорогостоящее крепление.

Для того чтобы уменьшить мощность этого крепления и снизить его стоимость, на более короткой длине за сооружением необходимо:

1) преобразовать часть получившейся в нижнем бьефе кинетической энергии в потенциальную, доведя относительно малую глубину h_c до величины h_6 ;

2) погасить оставшуюся часть избыточной кинетической энергии, т.е. рассеять ее, преобразовав в тепло за счет работы сил трения.

Гася за сооружением избыточную кинетическую энергию, вместо отогнанного гидравлического прыжка получаем затопленный прыжок, причем мощность крепления в нижнем бьефе снижается. Специальные устройства, сооружаемые в нижнем бьефе с целью гашения, называются гасителями энергии гидравлического прыжка.

В качестве гасителей энергии гидравлического прыжка можно применить водобойный колодец или водобойную стенку.

5.1 Расчет водобойного колодца

Чтобы предупредить образование отогнанного прыжка в нижнем бьефе сооружений, необходимо увеличить глубину нижнего бьефа. Для этого устраивают водобойные колодцы (рисунок 13).

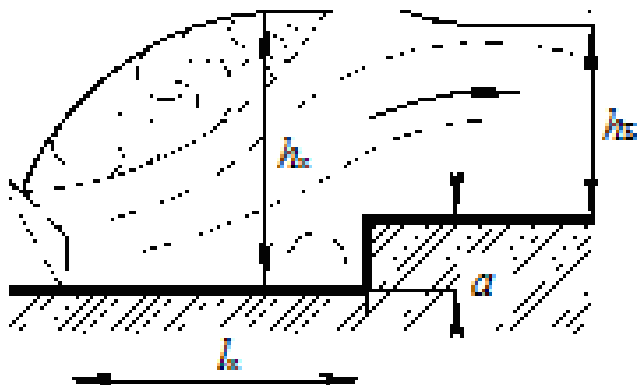


Рисунок 13– Водобойный колодец

Гидравлический расчет водобойного колодца состоит в определении глубины колодца a и его длины l_k .

Необходимая глубина колодца a , м, при которой получается затопленный прыжок, должна удовлетворять условию

$$a + h_6 > h'_c. \quad (54)$$

При этом перепадом на водобойном уступе можно пренебречь.

Предварительно определяется так называемая теоретическая глубина колодца a_0 , м, при которой прыжок устанавливается в сжатом сечении и которая удовлетворяет уравнению

$$a_0 + h_6 = h'_c. \quad (55)$$

Уравнение (55) необходимо решать подбором. Задаваясь различными значениями a_0 , определяются величины

$$T'_0 = T_0 + a_0. \quad (56)$$

По графику (рисунок 11) определяют величины h_c , по уравнению (53) вычисляются соответствующие величины h'_c . Результаты вычислений сводят в таблицу 11.

Таблица 11 – Определение глубины колодца

a_0 , м	T'_0 , м	h_c , м	h'_c , м	(a_0+h_0) , м

По данным таблицы 11 строят кривую $h'_c = f_1(a_0)$ и прямую $(a_0 + h_0) = f_2(a_0)$ (рисунок 14). Точка пересечения этих линий соответствует теоретической глубине колодца a_0 .

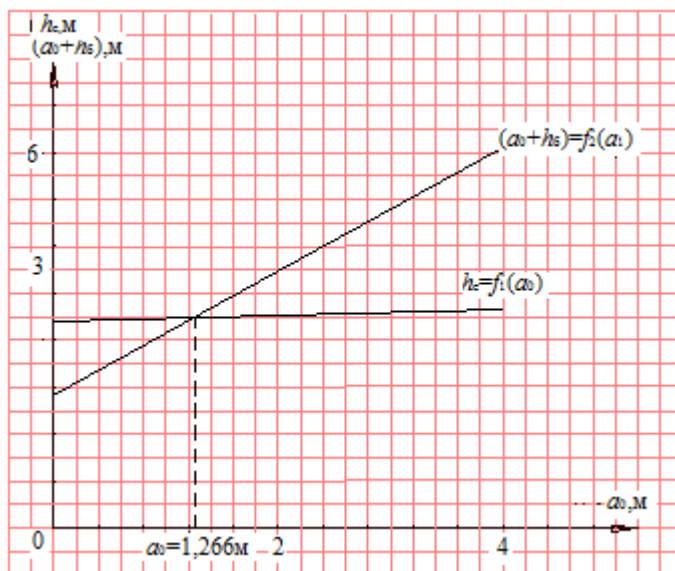


Рисунок 14 – График для определения глубины колодца

Чтобы получить затопленный прыжок, глубину колодца необходимо увеличить на 5–10%, при этом действительная глубина колодца определяется из выражения

$$a = (1,05 \dots 1,10)a_0. \quad (57)$$

Длина колодца, м, зависит от типа сооружения и для плотины определяется по формуле $l_k = L$

$$L = (0,7 \dots 0,8)l_{пл}, \quad (58)$$

где l_{Π} – длина гидравлического прыжка, м.

В случае перепада на канале (и быстротоке) длина колодца, м,

$$L = l_1 + (0,7 \dots 0,8) l_{\Pi}, \quad (59)$$

где l^1 – дальность отлета струи, м.

Длина гидравлического прыжка рассчитывается по эмпирической формуле Сафранца

$$l_{\Pi} = 4,5 h'_{\text{СК}}, \quad (60)$$

где $h'_{\text{СК}}$ – вторая глубина прыжка, м, соответствующая действительной глубине колодца a .

Дальность отлета струи, м,

$$l_1 = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2c + h_{\text{КОП}}}{g}}. \quad (61)$$

5.2 Расчет водобойной стенки

Водобойная стенка представляет собой преграду в русле нижнего бьефа в виде водослива практического профиля (рисунок 135).

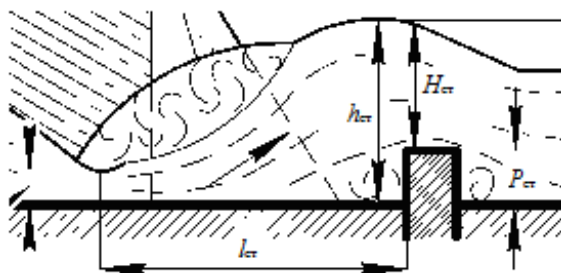


Рисунок 15 – Водобойная стенка

Водобойная стенка должна обеспечить сопряжение по типу затопленного гидравлического прыжка. Гидравлический расчет водобойной стенки сводится к определению высоты стенки $P_{\text{ст}}$ и расстояния ее до

сжатого сечения $l_{ст}$. Глубина воды перед стенкой должна быть больше второй сопряженной глубины ($h_{ст} \geq h_2$).

Глубина воды перед стенкой

$$h_{ст} \geq P_{ст} + H_{ст}, \quad (62)$$

где $H_{ст}$ – геометрический напор перед стенкой, м.

Тогда

$$\sigma h_2 = P_{ст} + H_{ст}, \quad (63)$$

откуда,

$$P_{ст} = \sigma h_2 - H_{ст}, \quad (64)$$

Принимая водобойную стенку как неподтопленный водослив практического профиля без бокового сжатия, получим выражение напора

$$H_{ст} = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{\alpha v_{ст}^2}{2g}, \quad (65)$$

где Q – расход потока, поступающего в нижний бьеф, м³/с;

$m \approx 0,40$ – коэффициент расхода водослива;

b – длина водобойной стенки (ширина русла нижнего бьефа), м;

$v_{ст}^2$ – средняя скорость потока на подходе к водобойной стенке, м/с.

$$v_{ст} = \frac{Q}{bh_{ст}}. \quad (66)$$

После определения высоты водобойной стенки необходимо определить условие сопряжения потока за стенкой. В случае, если за стенкой наблюдается отогнанный прыжок, то для предотвращения отгона прыжка необходимо рассчитать вторую стенку или запланировать устройство комбинированного водобойного колодца.

Расстояние от сжатого сечения до водобойной стенки определятся аналогично расчету длины водобойного колодца.

6 ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Построение линии свободной поверхности можно осуществить, используя пакет прикладных программ MathCAD с применением метода численного интегрирования (метода Рунге – Кутта).

Методом Рунге – Кутта можно решить основное дифференциальное уравнение неравномерного установившегося движения, используя только заданные характеристики русла водотока и расход воды.

Метод Рунге – Кутта имеет несколько достоинств. Поскольку для вычисления Y_{i+1} -го значения функции нужно лишь одно начальное значение Y_i , то метод является самостартующим. Выбор величины шага в программе осуществляется автоматически.

Данный метод реализуется в среде MathCAD функцией

$$Z = rkfixed(y_0, x_0, x_{end}, N, D), \quad (67)$$

где $y_0 = y(x_0)$ – начальное значение функции в точке x_0 ;

x_0 и x_{end} – соответственно значения начала и конца отрезка интегрирования;

N – количество итераций;

$$D(s, h) = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}. \quad (68)$$

Таким образом, задав начальное значение функции y_0 , границы отрезка x_0 и x_{end} , число итераций N , получаем координаты точек кривой свободной поверхности. Используя полученные значения и задавая различный уклон, можно построить кривую свободной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Калицун, В. И.** Гидравлика, водоснабжение и канализация : учеб. пособие для вузов по специальности «Пром. и гражд. стр-во» / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. – М. : Стройиздат, 2002. – 396 с.

2 **Сайриддинов, С. Ш.** Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения : учеб. пособие для вузов по специальности «Водоснабжение и водоотведение» направления подгот. дипломир. специалистов «Стр-во» / С. Ш. Сайриддинов. – М.: Ассоц. строит. вузов, 2004. – 338 с.

3 **Ухин, Б. В.** Гидравлика: учебник по специальности 270112 (2912) «Водоснабжение и водоотведение» / Б. В. Ухин, А. А. Гусев. – М. : Инфра-М, 2008. – 430 с.

4 **Кузнецов, Е. В.** Гидравлический расчет каналов и гидротехнических сооружений на них / Е. В. Кузнецов. – Краснодар : КГАУ, 2003. – 34 с.

5 **Железняков, Г. В.** Гидравлика и гидрология. – М. : Транспорт, 1989. – 376 с.

6 Методические указания по курсу «Гидравлика, водоснабжение и канализация» / Сост.: В. М. Люпаев, С. В. Дудынов. – Саранск : Морд. ун-т, 1993. – 33 с.

7 Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. – М. : Энергия, 1972. – 312 с.

Учебное издание

*ВОСТРОВА Регина Николаевна
НОВИКОВА О К*

НЕРАВНОМЕРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ
В ОТКРЫТЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. М. Маруняк*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 20.06.2013 г. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,65. Тираж 80 экз.

Зак. № _____, Изд. № 68.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.