

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ  
БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»**

**ВОСТРОВА Р. Н., НОВИКОВА О. К.,  
РАТНИКОВА А. М.**

**ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ СВОБОДНОЙ ПО-  
ВЕРХНОСТИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ УСТА-  
НОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ**

**Учебно-методическое пособие**

**Гомель 2015**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕ-  
ЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»

Р. Н. ВОСТРОВА, О. К. НОВИКОВА, А. М. РАТНИКОВА

## ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХ- НОСТИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ УСТАНОВИВ- ШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ

*Одобрено учебно-методической комиссией строительного факультета  
в качестве учебно-методического пособия  
по выполнению расчетно-графической работы №2  
для студентов строительных специальностей*

Гомель 2015

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 Построение линии свободной поверхности при неравномерном установившемся движении воды : учеб.-метод. пособие / Р. Н. Вострова, О. К. Новикова, А. М. Ратникова ; М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 43 с.  
ISBN 978-985-554-193-7

Рассмотрены теоретические основы построения линии свободной поверхности методом Б. А. Бахметева, даны исходные данные для выполнения расчетно-графической работы, приведен пример проведения расчетов и графических построений.

Предназначено для студентов, обучающихся по строительным специальностям 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов», 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», 1-37 02 05 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство»

УДК 556.536 (075.8)  
ББК 30.123

ISBN 978-985-554-193-7

© Вострова Р. Н., Новикова О. К.,  
Ратникова А. М. 2015  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1 Состав и объем расчетно-графической работы</b> .....	4
<b>2 Исходные данные</b> .....	5
<b>3 Построение кривой свободной поверхности потока</b> .....	11
3.1 Определение нормальной глубины наполнения .....	13
3.2 Определение критической глубины потока .....	16
3.3 Определение критического уклона .....	20
3.4 Прогнозирование формы свободной поверхности потока .....	21
3.5 Определение гидравлического показателя русла $x$ .....	25
3.6 Определение коэффициента пропорциональности $j_{cp}$ .....	27
3.7 Определение координат кривой свободной поверхности потока по уравнению Б. А. Бахметева .....	28
<b>4 Определение характера сопряжения падающей струи с нижним бьефом</b> .....	33
<b>5 Проектирование гасителя энергии гидравлического прыжка в нижнем бьефе</b> .....	37
5.1 Расчет водобойного колодца .....	37
5.2 Расчет водобойной стенки .....	40
<b>6 Построение линии свободной поверхности методом численного интегрирования</b> .....	41
<b>7 Пример выполнения расчетно-графической работы</b> .....	42
<b>Список литературы</b> .....	60

## ВВЕДЕНИЕ

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

### 1 СОСТАВ И ОБЪЕМ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Расчетно-графическая работа состоит из расчетно-пояснительной записки (18-20 с. машинописного текста Times New Roman (14), напечатанного на одной стороне листа формата А4) и графической части (1 лист формата А3).

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

1 Расчет основных параметров потока, согласно форме поперечного сечения.

2 Определение критической глубины потока графоаналитическим способом.

3 Определение нормальной глубины потока графоаналитическим способом.

4 Определение критического уклона.

5 Прогнозирование формы кривой свободной поверхности.

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

7 Определение гидравлического показателя русла.

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

9 Графическое построение гидравлических осей и линии свободной поверхности.

10 Определение сопряжения бьефов.

11 В случае возникновения отогнанного и в сжатом сечении гидравлического прыжка, расчет водобойного сооружения. Проверка сопряжения бьефов за водобойным сооружением.

**Графическая часть** расчетно-графической работы должна содержать:

- 1 Графическое определение нормальной и критической глубины.
- 2 Построение графика зависимости коэффициента пропорциональности ( $j$ ) в зависимости от средней глубины потока.
- 3 Построение линии свободной поверхности при неравномерном установившемся движении.
- 4 Определение сопряжения бьефов за гидротехническим сооружением.
- 5 Расчет параметров водобойного колодца.

## 2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Расчетно-графическая работа предназначена для закрепления теоретических навыков по проведению гидравлических расчетов в области изучения основных законов неравномерного установившегося движения воды в открытом призматическом русле.

Знания в области гидравлических расчетов открытого русла, полученные на лекционных занятиях, позволяют определить основные характеристики потоков, рассчитать величину расходов и уровней воды, прогнозировать форму и производить построение линии свободной поверхности, что является необходимым условием расчета параметров для проектирования искусственных каналов, малых мостов и очистных сооружений природных и сточных вод в зависимости от их назначения.

Навыки, полученные при выполнении расчетно-графической работы, могут быть полезными, как при выполнении курсового и дипломного проектирования, так и при выполнении научно-исследовательской работы студентами специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов», 1-37 02 05 Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство высших учебных заведений.

Умение произвести расчет линии свободной поверхности потока при помощи методов пошагового интегрирования позволит сократить время при необходимости многовариантного расчета.

**Задание А.** Неравномерное движение воды в трапецидальном призматическом русле в верхнем бьефе плотины практического профиля и сопряжение бьефов за гидротехническим сооружением (рисунок 1). Нижний бьеф имеет прямоугольную форму призматического русла. Данные для расчета приведены в таблице 1. Необходимо построить линию свободной поверхности методом Б.А.Бахметева, установить сопряжение струи с нижним бьефом и запроектировать гаситель энергии гидравлического прыжка в случае необходимости.

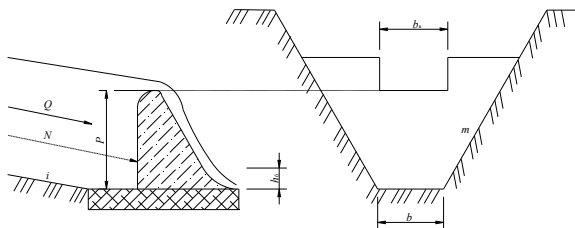


Рисунок 1 – Расчетная схема неравномерного движения воды через плотину

Таблица 1 – Исходные данные для расчета неравномерного движения и сопряжение бьефов за плотинной

Вариант	Параметр							
	$Q$	$b$	$m_w$	$i$	Материал дна и стенок канала	$P$	$b_w$	$h_b$
1	42	8	0,45	0,0008	Плотная глина	5,5	8	2,75
2	40	9	0,47	0,0009	Нормальная глина	1,0	10	2,50
3	38	7	0,45	0,0009	Плотная глина	5,6	8	2,60
4	52	10	0,42	0,0010	Нормальная глина	6,0	10	2,40
5	43	8	0,44	0,0010	Плотная супесь	3,9	8	2,30
6	61	12	0,46	0,0010	Нормальная глина	4,8	12	2,50
7	49	10	0,48	0,0009	Плотный лесс	5,7	10	2,60
8	54	11	0,46	0,0008	Нормальная глина	4,7	10	2,20
9	28	10	0,47	0,0006	Мягкая глина	4,9	8	2,00
10	34	9	0,48	0,0007	Нормальная глина	4,9	8	2,80
11	62	10	0,46	0,0008	Нормальная глина	6,0	12	3,90
12	45	8	0,45	0,0006	Плотная супесь	7,0	10	3,00
13	55	12	0,44	0,0008	Нормальная глина	5,0	12	2,70
14	65	12	0,45	0,0009	Нормальная глина	6,0	12	2,50
15	60	10	0,46	0,0008	Нормальная глина	7,0	12	2,50
16	50	10	0,48	0,0009	Плотная супесь	5,5	10	2,20
17	49	8	0,46	0,0006	Нормальная глина	5,3	10	2,50
18	40	8	0,45	0,0007	Нормальная глина	5,4	8	2,50
19	32	8	0,46	0,0008	Плотный лесс	7,0	8	2,00
20	30	10	0,48	0,0009	Мягкая глина	5,6	10	1,60
21	50	10	0,47	0,0008	Плотная глина	7,3	10	2,70
22	55	10	0,45	0,0009	Плотная глина	6,0	12	2,60
36	44	10	0,48	0,0015	Нормальная глина	5,0	10	2,50
37	32	10	0,40	0,0011	Плотная глина	6,0	10	2,00
38	42	15	0,48	0,0010	Плотный гравий	6,5	15	1,80
39	40	12	0,48	0,0013	Плотная глина	7,0	12	1,95
40	40	10	0,48	0,0011	Плотная глина	6,5	10	2,03

**Задание В.** Неравномерное движение воды и сопряжение бьефов за перепадом. В канале трапецидального поперечного сечения устроен перепад (рисунок 2). В конце канала на стенке перепада устанавливается критическая глубина  $h_k$ . Нижний бьеф имеет прямоугольную форму. Необходимо построить линию свободной поверхности методом Б.А.Бахметева, установить сопряжение струи с нижним бьефом и запроектировать гаситель энергии гидравлического прыжка в случае необходимости. Данные для расчета приведены в таблице 2.

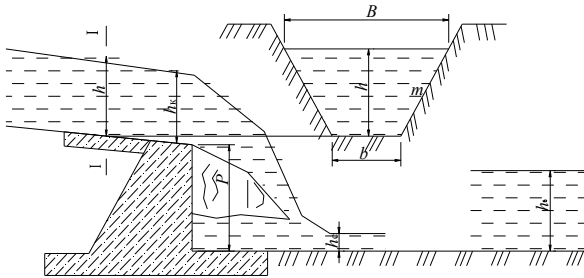


Рисунок 2 – Расчетная схема неравномерного движения воды на перепаде

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

Вариант	Параметр					Грунт
	$Q$	$b$	$i$	$P$	$h_b$	
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
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



Окончание таблицы 2						
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
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

**Задание С.** Неравномерное движение воды и сопряжение бьефов за быстротоком. Вода из нагорной канавы сбрасывается в русло реки бетонным каналом быстротоком трапецидального поперечного сечения (рисунок 3). Нагорная канава сопрягается с быстротоком при помощи переходного участка, в конце которого (перед входом на быстроток) устанавливается критическая глубина  $h_k$ . Необходимо построить линию свободной поверхности методом Б.А.Бахметева, установить сопряжение струи с нижним бьефом и запроектировать гаситель энергии гидравлического прыжка в случае необходимости. Данные для расчета приведены в таблице 3.

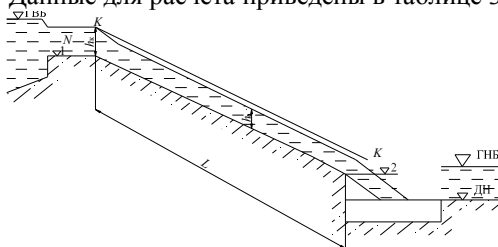


Рисунок 3 – Расчетная схема неравномерного движения воды на быстротоке.

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

Вариант	Параметр								
	$Q$	$b$	$m$	$i$	$L$	$\Delta_2$	$n$	$\Delta_{дн}$	$\Delta_{г.в.}$
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
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

Принятые обозначения:

$Q$  – расчетный расход воды, м<sup>3</sup>/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 водосливногo отверстия, м;

$m_v$  – коэффициент расхода водослива;

$n$  – коэффициент шероховатости русла;

$h_b$  – бытовая глубина, м;

$L$  – длина быстроготока, м;

$l$  – длина участка русла, м;

$\Delta_1; \Delta_2$  – геодезические отметки дна в начале и конце быстроготока, 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. Уклоны дна –  $i_{\partial}$ , свободной поверхности –  $i_n$  и гидравлический уклон –  $i$  не равны между собой ( $i_{\partial} \neq i_n \neq i$ ). Сечение призматического русла не изменяется по длине ( $\partial\omega/\partial l = 0$ ), поэтому площадь живого сечения потока зависит только от глубины –  $\omega = f(h)$ .

В одних случаях неравномерное движение возникает за счет изменения уклона, в других – как результат деформации формы живого сечения потока, что вызвано строительством в русле каких либо инженерных сооружений.

Основной задачей неравномерного установившегося движения воды в каналах является определение глубины в конкретном его сечении или построение линии свободной поверхности на протяжении некоторого участка потока.

Постоянной гидравлической характеристикой потока при неравномерном установившемся движении остается величина расхода  $Q$ .

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, в зависимости от длины потока, можно решить вопрос об определении площади вертикального сечения потока и пропускной способности русла.

Неравномерное установившееся движение потока описывается дифференциальным уравнением

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

где  $i$  – продольный уклон дна канала;  
 $Q$  – расчетный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  
 $\omega$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  
 $C$  – коэффициент Шези,  $\sqrt{м}/с$ ;  
 $R$  – гидравлический радиус, м;  
 $B$  – ширина потока по верху, м;  
 $g$  – ускорение силы тяжести, м<sup>2</sup>/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;  
 $\eta_1, \eta_2$  – 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  $\eta_1, \eta_2$  и гидравлического показателя русла  $x$ .

При решении задачи о построении кривой свободной поверхности методом Б. А. Бахметева 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  $K$ , м<sup>3</sup>/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 сомножители зависят от величины  $h$ , поэтому удобно производить расчет нормальной глубины  $h_0$ , м, графоаналитическим способом.

Для этого задаваясь рядом значений  $h$  (не менее пяти), для каждого из которых определяется расходная характеристика  $K_i$ , м<sup>3</sup>/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), задаваясь рядом значений  $h$  определяются параметры, характеризующие русло:

- площадь вертикального поперечного сечения,
- длина смоченного периметра,
- гидравлический радиус,
- коэффициент Шези,
- модуль расхода водослива

Для каждого  $h$  вычисляется соответствующий модуль расхода  $K$ , соответствующий данной глубине.

Таблица 4 – Определение нормальной глубины графоаналитическим методом

$h, \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\chi, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$C, \sqrt{\text{м}} / \text{с}$	$K, \text{ м}^3/\text{с}$
Контроль нормальной глубины $h_0$					
$h_0 =$					

Площадь поперечного сечения русла  $\omega, \text{ м}^2$ ,

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

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,  $\sqrt{\text{м}} / \text{с}$ ,

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

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла, принимается в зависимости от вида дна русла по [3];

$y$  – коэффициент, зависящий от шероховатости и гидравлического радиуса русла, согласно [3],  $y \approx 0,2$ .

Коэффициент Шези можно определить из таблицы 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  $K = 0$ ).

Таблица 5 – Значения коэффициента  $C$  по формуле Н. Н. Павловского [4]

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

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 %:

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

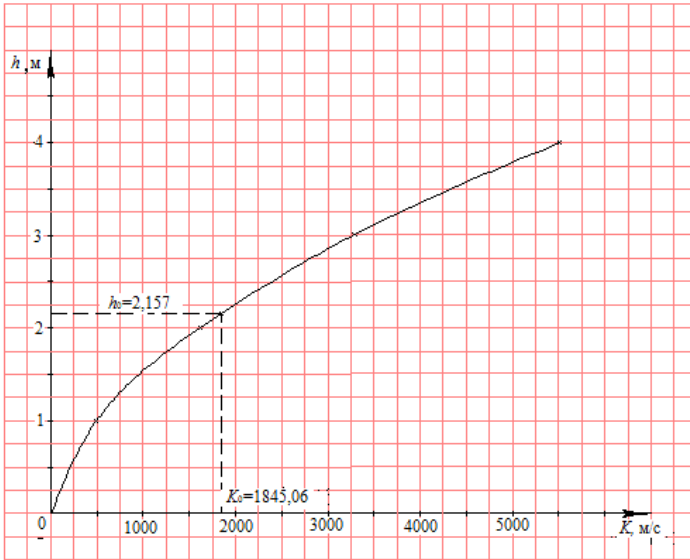


Рисунок 4 – График для определения нормальной глубины

### 3.2 Определение критической глубины потока

Удельная энергия потока жидкости в общем случае имеет вид уравнения:

$$E = h + \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g \cdot \omega^2}. \quad (12)$$

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 удель-



ная 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  $E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = E(h)$  при граничных значениях аргумента уходит в бесконечность, то такая функция будет иметь минимум  $E_{\text{min}}$ . Та глубина, при которой удельная энергия принимает минимальное значение, называется критической глубиной.

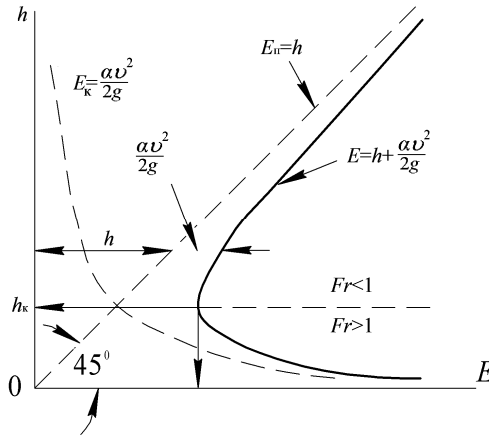


Рисунок 5 – График удельной энергии сечения

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

$$\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot \omega^3} \cdot \frac{d\omega}{dh} = 1, \quad (14)$$

или

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

где  $\omega_k$  – площадь живого сечения при критической глубине,  $\text{м}^2$ ;  
 $B_k$  – ширина по верху потока при критической глубине,  $\text{м}$ .

Индексы «к» указывают, что площадь живого сечения  $\omega_k$  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 равен 1.

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

**Таблица 6 – Определение критической глубины**

$h, \text{ м}$	$mh, \text{ м}$	$(b+mh), \text{ м}$	$\omega, \text{ м}^2$	$\omega^3, \text{ м}^6$	$B = b + 2mh, \text{ м}$	$\omega^3/B, \text{ м}^5$
....						
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  $h_k$ .

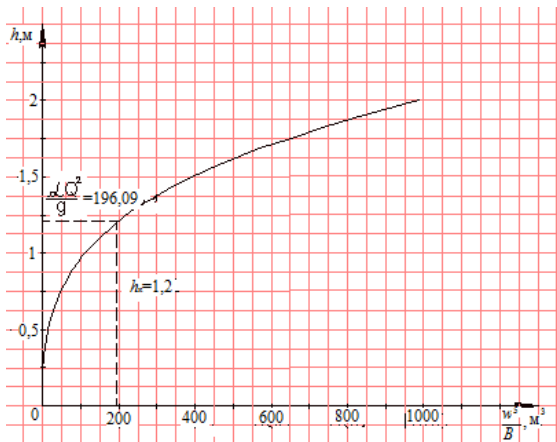


Рисунок 6 – График для определения критической глубины

Для каналов прямоугольного сечения критическая глубина определяется по формуле

$$h_{\text{к}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (16)$$

Для каналов треугольного сечения

$$h_{\text{к}} = \sqrt[5]{\frac{2 \cdot \alpha \cdot Q^2}{g \cdot m^2}} \quad (17)$$

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  $h_{\text{к}}$  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  $h_{\text{кр}}$  зависит только от геометрической формы поперечного сечения русла и расхода, но не зависит от уклона дна  $i$  и, кроме того, в призматическом русле  $h_{\text{кр}} = \text{const}$  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:

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k \cdot C_k^2 \cdot R_k} \quad (18)$$

Значение критического уклона так же можно определить из формулы

$$Q^2 = \frac{\omega_k^3}{B_k} \cdot \frac{g}{\alpha} \quad (19)$$

Подставляя значение  $Q^2$  в уравнение (18) и учитывая, что  $R_k = \frac{\omega_k}{\chi_k}$  получим:

$$i_k = \frac{g}{\alpha \cdot C_k^2} \cdot \frac{\chi_k}{B_k} \quad (20)$$

Для каналов большой ширины, когда  $\frac{\chi_k}{B_k} \approx 1$ , формула (20) упрощается и принимает вид

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

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 [4].

### 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).

Если обозначить критерий Фруда:

$$\frac{\alpha \cdot Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3} = Fr \quad (22)$$

учесть преобразования

$$Q^2 = iK_0^2. \quad (23)$$

$$K = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R} \quad (24)$$

и вынести за скобки  $i$ , уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dh}{dl} = i \cdot \frac{1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2}{1 - Fr} \quad (25)$$

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 [4]:

**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 [2].

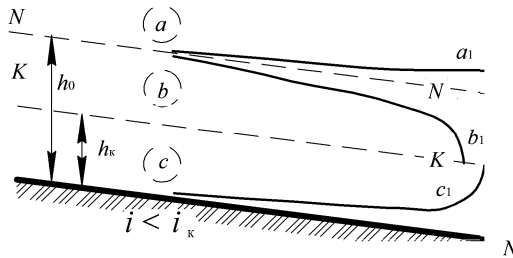


Рисунок 7 – Кривые свободной поверхности при  $i < i_k$

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 а.** 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 (25) – положительное число.

Так как поток в спокойном состоянии ( $h > h_k$ ). Число Фруда  $Fr < 1$ . Знаменатель уравнения (25) также положителен, поэтому положительно значение правой части уравнения (25), 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 (25) имеет отрицательное значение, а знаменатель – положительное. Поэтому  $\frac{dh}{dl} < 0$ . Имеет место выпуклая кривая спада типа  $b_1$ . Анализируя уравнение (25), 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 *a*.** 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 (25) положительна. Тогда  $\frac{dh}{dl} > 0$ . Имеет место кривая подпора типа  $a_2$ . Анализ выражения (25) показывает, что кривая свободной поверхности выпуклая начинается с гидравлического прыжка и стремится к горизонтальной линии.

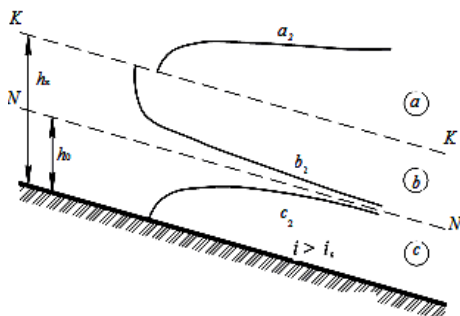


Рисунок 8 – Кривые свободной поверхности при  $i > i_k$

**Зона b.** 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 (25) положителен, а знаменатель – отрицателен. Сама дробь имеет отрицательное значение. Тогда  $\frac{dh}{dl} < 0$ . Имеет место вогнутая кривая

спада типа  $b_2$ . Анализ выражения (25) показывает, что кривая свободной поверхности потока начинается с водопада (канала меньшего уклона) и стремится к линии нормальных глубин  $N-N$ .

**Зона c.** Здесь диапазон изменения глубин будет следующим:  $h_k > h_0 > h$ . Тогда  $K < K_0$ , а  $Fr > 1$ . Числитель и знаменатель правой части выражения (25) 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 a.** В этой зоне  $h > h_k = h_0$ ,  $K > K_0$ ,  $Fr < 1$ . Числитель и знаменатель выражения (25) 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).



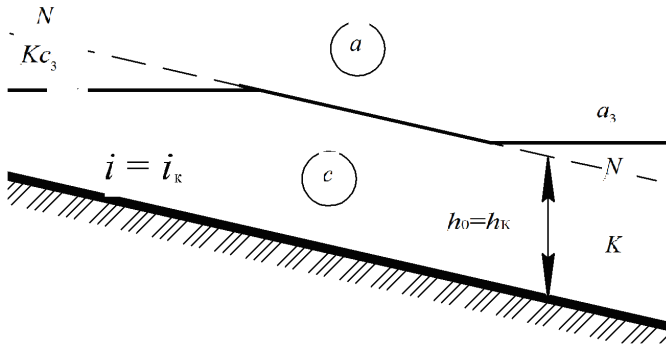


Рисунок 9 – Кривые свободной поверхности при  $i = i_k$

**Зона с.** В рассматриваемой зоне  $h < h_k = h_0$ ,  $K < K_0$ ,  $Fr > 1$ . Числитель и знаменатель выражения (25) 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:

$$\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 = \left(\frac{h_0}{h}\right)^x, \quad (26)$$

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

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

$x$  – 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

$$x = 2 \frac{\lg K_{cp} - \lg K_{cp}}{\lg h_{cp} - \lg h_0}, \quad (27)$$

где  $K_{cp}$  – модуль расхода, соответствующий средней глубине,  $m^3/c$ ;

$h_{\text{cp}}$  – средняя глубина на данном участке потока, м,

$$h_{\text{cp}} = \frac{(h_{\text{нач}} + h_{\text{кон}})}{2}, \quad (28)$$

$h_{\text{нач}}$  – 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

$$h_{\text{нач}} = (h_0 \pm \Delta h), \quad (29)$$

$$\Delta h = (0,01 \dots 0,02)h_0. \quad (30)$$

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

$$h_{\text{нач}} = h_{\text{кр}}. \quad (31)$$

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 плотиной

$$h_{\text{кон}} = P + H, \quad (32)$$

где  $P$  – высота гребня водосливной стенки, м;

$H$  – напор перед плотиной, м,

$$H = 3 \sqrt{\frac{Q^2}{2gm_{\text{в}}^2 b_{\text{в}}^2}}, \quad (33)$$

$m_{\text{в}}$  – коэффициент расхода водослива;

$b_{\text{в}}$  – ширина водосливного отверстия, м.

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

В конце быстроготока в первом приближении конечная глубина, м,

$$h_{\text{кон}} = h_0 + 0,02. \quad (34)$$

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 [3].

### 3.6 Определение коэффициента пропорциональности $j_{cp}$

Коэффициент пропорциональности

$$j_{cp} = \frac{\alpha i C_{cp}^2}{g} \cdot \frac{B_{cp}}{x_{cp}}, \quad (35)$$

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

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

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

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

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

$$n = \frac{(h_{кон} - h_{нач})}{\Delta h}, \quad (36)$$

где  $\Delta h$  – разница 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 тока.

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

$$j = \frac{\alpha i C^2}{g} \cdot \frac{B}{x}. \quad (37)$$

Результаты расчетов сводят в таблицу 7.

Таблица 7 – Определение коэффициента  $j_{св}$

$h$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\chi$ , м	$R$ , м	$C$ , $\sqrt{m}/c$	$C^2$ , м/с <sup>2</sup>	$B$ , м	$j$
$h_{нач} =$							
...							
$h_{кон} =$							

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

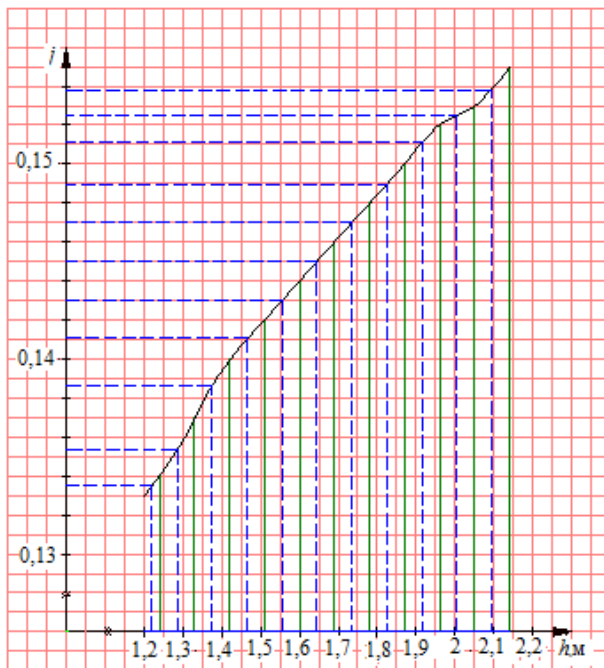


Рисунок 10 – Кривая  $j = f(h)$

### 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 и перепада расчет ведем от сооружения вверх против течения; для быстротока – 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	$j_{\text{ср}}$	$\eta$	$B(\eta)$	$l$ , м
1						
2						
...						
$n$						

Средняя глубина на каждом участке, м,

$$h_{\text{ср}} = \frac{(h_1 + h_2)}{2}, \quad (38)$$

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

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

По полученной величине  $h_{\text{ср}}$  по графику (см. рисунок 10) определяется величина  $j_{\text{ср}}$ .

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

$$\eta_1 = h_1 / h_0, \quad \eta_2 = h_2 / h_0. \quad (39)$$

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

$$l = \frac{h_0}{i} \left( \eta_2 - \eta_1 - (1 - j_{\text{ср}}) [B(\eta_2) - B(\eta_1)] \right), \quad (40)$$

где  $h_0$  – нормальная глубина, м;

$i$  – уклон;

$\eta_1, \eta_2$  – 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  $\eta_1, \eta_2$  и гидравлического показателя русла  $x$ .

Таблица 9 – Значение функции Б ( $\eta$ ) для положительного уклона дна русла  $i > 0$  при различных значениях  $\eta$  и  $x$  [4]

$\eta$	$x$								
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
0,10	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
0,15	0,151	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
0,20	0,203	0,201	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
0,25	0,309	0,252	0,251	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
0,30	0,309	0,304	0,302	0,301	0,301	0,300	0,300	0,300	0,300
0,35	0,365	0,357	0,354	0,352	0,352	0,351	0,351	0,350	0,350
0,40	0,424	0,411	0,407	0,405	0,404	0,403	0,402	0,401	0,401
0,45	0,485	0,468	0,461	0,458	0,456	0,455	0,454	0,452	0,452
0,50	0,549	0,527	0,517	0,513	0,510	0,508	0,507	0,534	0,503
0,55	0,619	0,590	0,575	0,570	0,566	0,563	0,561	0,556	0,555
0,60	0,693	0,657	0,637	0,630	0,625	0,620	0,617	0,611	0,608
0,61	0,709	0,671	0,650	0,642	0,637	0,632	0,628	0,622	0,619
0,62	0,727	0,685	0,663	0,655	0,649	0,644	0,640	0,634	0,630
0,63	0,741	0,699	0,676	0,668	0,661	0,656	0,652	0,645	0,641
0,64	0,758	0,714	0,689	0,681	0,674	0,668	0,664	0,657	0,652
0,65	0,775	0,729	0,703	0,694	0,687	0,681	0,678	0,668	0,664
0,66	0,792	0,744	0,717	0,707	0,700	0,693	0,688	0,680	0,675
0,67	0,810	0,760	0,731	0,721	0,713	0,706	0,700	0,692	0,687
0,68	0,829	0,776	0,746	0,735	0,726	0,719	0,713	0,704	0,694
0,69	0,848	0,792	0,761	0,749	0,740	0,732	0,726	0,716	0,710
0,70	0,867	0,809	0,776	0,763	0,754	0,746	0,739	0,728	0,722
0,71	0,887	0,826	0,791	0,778	0,768	0,759	0,752	0,741	0,734
0,72	0,907	0,844	0,807	0,793	0,782	0,773	0,766	0,754	0,746
0,73	0,929	0,862	0,823	0,808	0,797	0,787	0,780	0,767	0,759
0,74	0,950	0,881	0,840	0,824	0,812	0,802	0,794	0,780	0,772
0,75	0,972	0,900	0,857	0,841	0,828	0,817	0,808	0,794	0,785
0,76	0,996	0,920	0,874	0,857	0,844	0,833	0,823	0,808	0,798
0,77	1,020	0,940	0,892	0,874	0,860	0,849	0,838	0,822	0,811
0,78	1,045	0,961	0,911	0,892	0,877	0,865	0,854	0,837	0,825
0,79	1,071	0,983	0,930	0,911	0,895	0,882	0,870	0,852	0,839
0,80	1,098	1,006	0,950	0,930	0,913	0,899	0,887	0,867	0,854
0,81	1,127	1,030	0,971	0,949	0,932	0,917	0,904	0,883	0,869
0,82	1,156	1,055	0,993	0,970	0,952	0,936	0,922	0,900	0,885
0,83	1,118	1,081	1,016	0,992	0,972	0,955	0,940	0,917	0,901
0,84	1,221	1,109	1,040	1,014	0,993	0,975	0,960	0,935	0,918
0,85	1,256	1,138	1,065	1,038	1,016	0,997	0,980	0,954	0,936
0,86	1,293	1,169	1,092	1,063	1,039	1,020	1,002	0,974	0,954
0,87	1,333	1,202	1,120	1,090	1,064	1,044	1,025	0,995	0,973
0,88	1,375	1,237	1,151	1,118	1,091	1,069	1,049	1,017	0,994
0,89	1,421	1,275	1,183	1,148	1,120	1,096	1,075	1,040	1,016
0,90	1,472	1,316	1,218	1,181	1,151	1,126	1,103	1,066	1,039
0,905	1,499	1,339	1,237	1,199	1,168	1,142	1,118	1,080	1,052
0,910	1,527	1,362	1,257	1,218	1,185	1,158	1,134	1,094	1,065
0,915	1,557	1,386	1,278	1,237	1,204	1,175	1,150	1,109	1,079
0,920	1,589	1,412	1,300	1,257	1,223	1,193	1,167	1,124	1,093

Продолжение таблицы 9

η	x								
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00
0,925	1,622	1,440	1,323	1,279	1,243	1,212	1,185	1,141	1,108
0,930	1,658	1,469	1,348	1,302	1,265	1,232	1,204	1,158	1,124
0,935	1,696	1,500	1,374	1,327	1,288	1,254	1,225	1,177	1,141
0,940	1,738	1,534	1,403	1,354	1,313	1,278	1,247	1,197	1,159
0,945	1,782	1,570	1,434	1,382	1,339	1,304	1,271	1,218	1,179
0,950	1,831	1,610	1,467	1,413	1,368	1,331	1,297	1,241	1,200
0,955	1,885	1,654	1,504	1,447	1,400	1,361	1,325	1,267	1,223
0,960	1,945	1,702	1,545	1,485	1,436	1,394	1,356	1,295	1,248
0,965	2,013	1,758	1,592	1,528	1,476	1,431	1,391	1,327	1,277
0,970	2,092	1,820	1,645	1,577	1,522	1,474	1,431	1,363	1,310
0,975	2,184	1,896	1,708	1,634	1,567	1,524	1,479	1,405	1,349
0,980	2,297	1,985	1,784	1,705	1,642	1,586	1,537	1,457	1,395
0,985	2,442	2,100	1,882	1,795	1,726	1,665	1,611	1,523	1,456
0,990	2,646	2,264	2,019	1,922	1,844	1,776	1,714	1,615	1,539
0,995	3,000	2,544	2,250	2,137	2,043	1,965	1,889	1,771	1,680
1,000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
1,005	2,997	2,139	1,647	1,477	1,329	1,216	1,107	0,954	0,826
1,010	2,652	1,865	1,419	1,265	1,138	1,031	0,936	0,792	0,681
1,015	2,415	1,704	1,291	1,140	1,022	0,922	0,836	0,703	0,602
1,020	2,307	1,591	1,193	1,053	0,940	0,847	0,766	0,641	0,547
1,025	2,197	1,504	1,119	0,986	0,879	0,789	0,712	0,594	0,504
1,030	2,117	1,432	1,061	0,932	0,827	0,742	0,668	0,555	0,469
1,035	2,031	1,372	1,010	0,886	0,785	0,702	0,632	0,522	0,440
1,04	1,966	1,320	0,967	0,846	0,748	0,668	0,600	0,495	0,415
1,045	1,908	1,274	0,929	0,811	0,716	0,638	0,572	0,470	0,393
1,05	1,857	1,234	0,896	0,780	0,688	0,612	0,548	0,448	0,374
1,06	1,768	1,164	0,838	0,727	0,639	0,566	0,506	0,411	0,342
1,07	1,693	1,105	0,790	0,633	0,599	0,529	0,471	0,381	0,315
1,08	1,629	1,053	0,749	0,646	0,564	0,497	0,441	0,355	0,291
1,09	1,573	1,009	0,713	0,613	0,534	0,469	0,415	0,332	0,272
1,10	1,522	0,969	0,680	0,584	0,507	0,444	0,392	0,312	0,254
1,11	1,477	0,933	0,652	0,558	0,488	0,422	0,372	0,294	0,239
1,12	1,436	0,901	0,626	0,534	0,461	0,402	0,354	0,279	0,225
1,13	1,398	0,872	0,602	0,512	0,442	0,384	0,337	0,265	0,212
1,14	1,363	0,846	0,581	0,493	0,424	0,368	0,322	0,252	0,201
1,15	1,331	0,821	0,561	0,475	0,407	0,353	0,308	0,240	0,191
1,16	1,301	0,798	0,542	0,458	0,391	0,339	0,295	0,229	0,181
1,17	1,273	0,776	0,525	0,443	0,377	0,326	0,283	0,218	0,173
1,18	1,247	0,756	0,510	0,428	0,364	0,314	0,272	0,209	0,165
1,19	1,222	0,737	0,495	0,414	0,352	0,302	0,262	0,200	0,157
1,20	1,199	0,719	0,480	0,401	0,341	0,292	0,252	0,192	0,150
1,21	1,177	0,702	0,467	0,389	0,330	0,282	0,243	0,185	0,144
1,22	1,156	0,686	0,454	0,378	0,320	0,272	0,235	0,178	0,138
1,23	1,136	0,671	0,442	0,368	0,310	0,263	0,227	0,171	0,132
1,24	1,117	0,657	0,431	0,358	0,301	0,255	0,219	0,164	0,127
1,25	1,098	0,643	0,420	0,348	0,292	0,247	0,212	0,158	0,122
1,26	1,081	0,630	0,410	0,339	0,284	0,240	0,205	0,153	0,117
1,27	1,065	0,618	0,400	0,330	0,276	0,233	0,199	0,147	0,113
1,28	1,049	0,606	0,391	0,322	0,269	0,226	0,193	0,142	0,108

Окончание таблицы 9

η	x								
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00
1,29	1,033	0,594	0,382	0,314	0,262	0,220	0,187	0,137	0,104
1,30	1,018	0,582	0,373	0,306	0,255	0,214	0,182	0,133	0,100
1,31	1,004	0,571	0,365	0,299	0,248	0,208	0,176	0,129	0,097
1,32	0,990	0,561	0,357	0,292	0,242	0,203	0,171	0,125	0,094
1,33	0,977	0,551	0,349	0,285	0,236	0,197	0,167	0,121	0,090
1,34	0,964	0,542	0,341	0,279	0,230	0,192	0,162	0,117	0,087
1,35	0,952	0,533	0,334	0,273	0,225	0,187	0,158	0,113	0,084
1,36	0,940	0,524	0,328	0,267	0,219	0,183	0,153	0,110	0,081
1,37	0,928	0,516	0,322	0,261	0,214	0,178	0,149	0,107	0,079
1,38	0,917	0,508	0,316	0,255	0,209	0,174	0,145	0,104	0,076
1,39	0,906	0,500	0,310	0,250	0,205	0,169	0,142	0,101	0,074
1,40	0,896	0,492	0,304	0,245	0,200	0,165	0,138	0,098	0,071
1,41	0,886	0,484	0,298	0,240	0,196	0,161	0,135	0,095	0,069
1,42	0,876	0,477	0,293	0,235	0,192	0,158	0,131	0,092	0,067
1,43	0,866	0,470	0,288	0,231	0,188	0,154	0,128	0,090	0,065
1,44	0,856	0,463	0,283	0,226	0,184	0,151	0,125	0,087	0,063
1,45	0,847	0,456	0,278	0,222	0,180	0,147	0,122	0,085	0,061
1,46	0,838	0,450	0,273	0,218	0,176	0,144	0,119	0,083	0,059
1,47	0,829	0,444	0,268	0,214	0,173	0,141	0,116	0,081	0,057
1,48	0,821	0,438	0,263	0,210	0,169	0,138	0,113	0,079	0,056
1,49	0,813	0,432	0,259	0,206	0,166	0,135	0,111	0,077	0,054
1,50	0,805	0,426	0,255	0,202	0,163	0,132	0,109	0,075	0,053
1,55	0,767	0,399	0,235	0,185	0,148	0,119	0,097	0,066	0,046
1,60	0,733	0,376	0,218	0,170	0,135	0,108	0,087	0,058	0,040
1,65	0,703	0,355	0,203	0,157	0,124	0,098	0,079	0,052	0,035
1,70	0,675	0,336	0,189	0,145	0,114	0,090	0,072	0,047	0,0309
1,75	0,650	0,318	0,177	0,135	0,105	0,083	0,066	0,042	0,0274
1,80	0,626	0,303	0,166	0,126	0,097	0,077	0,060	0,038	0,0244
1,85	0,605	0,289	0,156	0,118	0,090	0,070	0,055	0,034	0,0218
1,90	0,585	0,276	0,147	0,111	0,084	0,065	0,050	0,031	0,0195
1,95	0,566	0,264	0,139	0,104	0,079	0,060	0,046	0,028	0,0175
2,0	0,549	0,253	0,132	0,098	0,074	0,056	0,043	0,026	0,0158
2,1	0,518	0,233	0,119	0,087	0,065	0,048	0,037	0,0217	0,0130
2,2	0,490	0,216	0,108	0,078	0,057	0,042	0,032	0,0184	0,0108
2,3	0,466	0,201	0,098	0,070	0,051	0,037	0,0279	0,0157	0,0090
2,4	0,444	0,188	0,090	0,064	0,046	0,033	0,0245	0,0135	0,0076
2,5	0,424	0,176	0,082	0,058	0,041	0,030	0,0216	0,0117	0,0064
2,6	0,405	0,165	0,076	0,053	0,037	0,027	0,0192	0,0102	0,0055
2,7	0,389	0,155	0,070	0,048	0,034	0,024	0,0171	0,0089	0,0047
2,8	0,374	0,149	0,065	0,044	0,031	0,022	0,0153	0,0078	0,0041
2,9	0,360	0,138	0,060	0,041	0,028	0,020	0,0137	0,0069	0,0035
3,0	0,346	0,131	0,056	0,038	0,026	0,0178	0,0123	0,0061	0,0031
3,5	0,294	0,103	0,041	0,027	0,018	0,0117	0,0077	0,0036	0,0016
4,0	0,255	0,084	0,031	0,020	0,012	0,0080	0,0052	0,0022	0,0010
4,5	0,226	0,070	0,025	0,015	0,009	0,0058	0,0037	0,0015	0,0006
5,0	0,203	0,060	0,020	0,012	0,007	0,0043	0,0027	0,0010	0,0004
6,0	0,168	0,046	0,014	0,008	0,004	0,0026	0,0015	0,0005	0,0002
8,0	0,126	0,029	0,009	0,004	0,002	0,0012	0,0007	0,0002	0,0001
10,0	0,100	0,021	0,005	0,002	0,001	0,0006	0,0003	0,0001	0,0000



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

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

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.

Масштабы вертикальных и горизонтальных размеров чертежа линии свободной поверхности необходимо учитывать и при решении задачи методом пошагового интегрирования, например методом Рунге-Кутты. В этом случае необходимо закладывать уклон дна, иначе график, выводимый на печать, будет искажен.

#### **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.

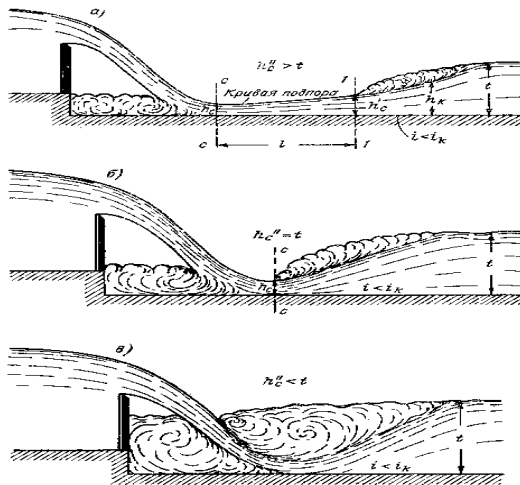


Рисунок 11 – Сопряжение бьефов:

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 (см. 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 (см. рисунок 11, *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, быстроток) гидравлический расчет их аналогичен (используют одни и те же расчетные формулы).

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

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

– для плотины

$$q = \frac{Q}{b_b}; \quad (41)$$

– для перепада и быстротока

$$q = \frac{Q}{B}. \quad (42)$$

Критическая глубина в нижнем бьефе, м,

$$h'_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}. \quad (43)$$

Полный напор  $T_0$ , м,

$$T_0 = T + \frac{v_0^2}{2g}, \quad (44)$$

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

$$T = h_{\text{конт}} + P. \quad (45)$$

Для быстротока

$$T = h_{\text{кон}} + (\nabla_2 - \nabla_{\text{дн}}). \quad (46)$$

Скорость подхода воды к сооружению, м/с,

$$v_0 = Q / \omega_{\text{кон}}. \quad (47)$$

Глубина в сжатом сечении  $h_c$ , м, определяется из уравнения

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{2g \cdot b^2 \cdot h_c^2 \cdot \varphi^2}, \quad (48)$$

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

Так как уравнение (48) 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

$$A = \frac{Q^2}{2g \cdot b^2 \cdot \varphi^2}, \quad (49)$$

то уравнение (49) примет вид

$$T_0 = h_c + \frac{A}{h_c^2}. \quad (50)$$

Задаваясь рядом значений  $h_c$ , в соответствии с условием  $0 < h_c < h'_k$ , по формуле (50) рассчитывают величину  $T_0$ . Результаты расчетов сводят в таблицу 10.

Таблица 10 – Определение полного напора

$h_c$ , м	$h_c^2$ , м <sup>2</sup>	$A / h_c^2$ , м <sup>2</sup>	$T_0$ , м

По результатам таблицы 10 строят график сти  $T_0 = f(h_c)$  (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 (50).

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

$$h'_c = \frac{h_c}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h'_k}{h_c} \right)^3} - 1 \right] \quad (51)$$

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

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 затопляет прыжок;

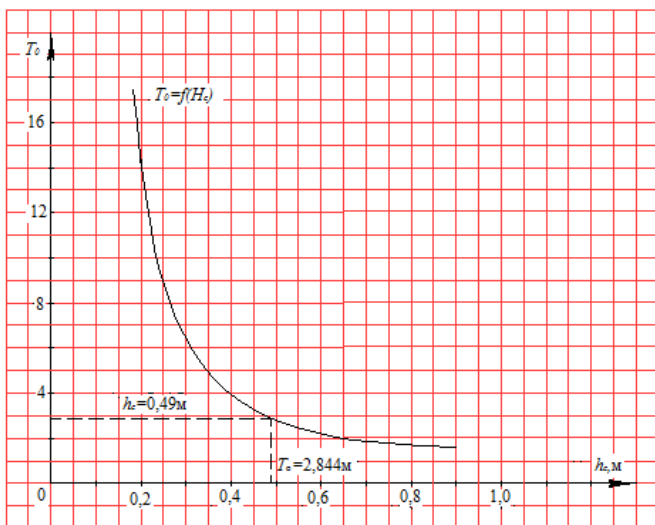


Рисунок 12 – График для определения глубины в сжатом сечении

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) [4].

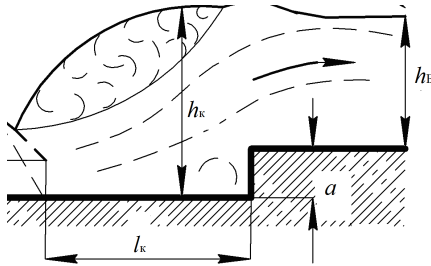


Рисунок 13 – Водобойный колодец

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

$$a + h_{\delta} > h'_c. \quad (52)$$

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

$$a_0 + h_{\delta} = h'_c. \quad (53)$$

Уравнение (53) необходимо решать подбором. Задаваясь различными значениями  $a_0$ , определяются величины

$$T'_0 = T_0 + a_0. \quad (54)$$

По графику (рисунок 12) определяют величины  $h_c$ , по уравнению (51) 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	$(a_0 + h_{\delta})$ , м

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

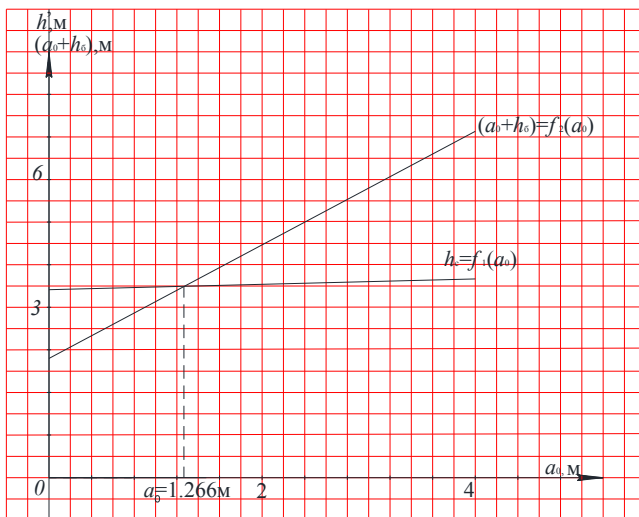


Рисунок 14 – График для определения глубины колодца

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

$$a = (1,05 \dots 1,10)a_0. \quad (55)$$

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

$$L = (0,7 \dots 0,8)l_{\text{п}}, \quad (56)$$

где  $l_{\text{п}}$  – длина гидравлического прыжка, м.

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

$$L = l_1 + (0,7 \dots 0,8)l_{\text{п}}, \quad (57)$$

где  $l_1$  – дальность отлета струи, м.

Длина гидравлического прыжка рассчитывается по эмпирической формуле Сафранца [2]



$$l_{\Pi} = 4,5h'_{\text{ск}}, \quad (58)$$

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

Дальность отлета струи, м,

$$l_1 = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2c + h_{\text{кон}}}{g}}. \quad (59)$$

## 5.2 Расчет водобойной стенки

Водобойная стенка представляет собой преграду в русле нижнего бьефа в виде водослива практического профиля (рисунок 15) [4].

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

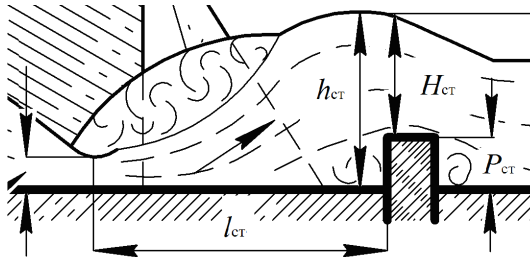


Рисунок 15 – Водобойная стенка

Глубина воды перед стенкой

$$h_{\text{ст}} \geq P_{\text{ст}} + H_{\text{ст}}, \quad (60)$$

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

Тогда

$$\sigma \cdot h_2 = P_{\text{ст}} + H_{\text{ст}}, \quad (61)$$

откуда,

$$P_{\text{ст}} = \sigma \cdot h_2 - H_{\text{ст}} \quad (62)$$

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

$$H_{\text{ст}} = \left( \frac{Q}{m \cdot b \cdot \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{\alpha \cdot v_{\text{ст}}^2}{2g}, \quad (63)$$

где  $Q$  – расход потока, поступающего в нижний бьеф, м<sup>3</sup>/с;

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

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

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

$$v_{\text{ст}} = \frac{Q}{b \cdot h_{\text{ст}}} \quad (64)$$

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 определяется 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 – Кутты).

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

Метод Рунге – Кутты 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

$$Z = rkfixed(y_0, x_0, x_{end}, N, D), \quad (65)$$

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.

$$D(s, h) = \frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{(\omega \cdot C \cdot \sqrt{R})^2}}{1 - \frac{\alpha \cdot Q^2 \cdot B}{g \cdot \omega^3}} \quad (66)$$

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.

## 7 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

**ЗАДАНИЕ С.** Неравномерное движение воды и сопряжение бьефов за быстотоком. Вода из нагорной канавы сбрасывается в русло реки бетонным каналом-быстотоком трапецидального поперечного сечения (рисунок 7.1).

Нагорная канава сопрягается с быстотоком при помощи переходного участка, в конце которого (перед входом на быстроток) устанавливается критическая глубина  $h_k$ .

Данные для расчета приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1– Данные для расчета

$Q$	$b$	$m$	$i$	$L$	$\Delta_2$	$n$	$\Delta_{дн}$	$\Delta_{г.в.}$
40	12	1,0	0,32	68	170,3	0,011	168,2	170,3

$Q$  – расчетный расход воды, м<sup>3</sup>/с;

$b$  – ширина канала по дну, м;

$m$  – коэффициент заложения откоса;

$i$  – продольный уклон дна;

$L$  – длина быстотока, м;

$n$  – коэффициент шероховатости русла;

$\Delta_2$  – геодезическая отметка дна в конце быстротока, м;  
 $\Delta_{\text{дн}}$  – отметка дна отводящего русла, м;  
 $\Delta_{\text{г.в.}}$  – отметка горизонта воды в отводящем русле, м.

## 7.1 Построение кривой свободной поверхности потока в верхнем бьефе

Построение осуществляется согласно методу Б.А.Бахметева.

### 7.1.1 Определение нормальной глубины наполнения потока

Определяем нормальную глубину наполнения  $h_0$  из условия равномерного движения воды в русле. Для этого рассчитываем модуль расхода по формуле

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{40}{\sqrt{0,32}} = 70,71 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (7.1)$$

Согласно уравнению (5) Составляем таблицу 7.2, в которой задаемся рядом значений  $h$  и для каждого  $h$  вычисляем соответствующий модуль расхода  $K$ .

Таблица 7.2 – Расчет модуля расхода

$h$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\chi$ , м	$R$ , м	$C$ , $\frac{\sqrt{M}}{c}$	$K$ , $\frac{M^3}{c}$
0,1	1,21	12,28	0,10	57,19	21,72
0,2	2,44	12,57	0,19	65,50	70,43
0,3	3,69	12,85	0,29	70,83	140,07
0,4	4,96	13,13	0,38	74,82	228,09
0,5	6,25	13,41	0,47	78,03	332,90
0,202	2,46	12,57	0,20	65,63	71,63

Для определения модуля расхода, производим расчет параметров трапецидального русла. Определяем площадь поперечного сечения для русла:

$$\omega = h \cdot (b + m \cdot h),$$

где  $h$  – глубина наполнения канала, м;

$b$  – ширина канала по дну, м;

$m$  – коэффициент заложения откоса, для глины принимаем равным 1 [3].

$$\omega = 0,1 \cdot (12 + 1 \cdot 0,1) = 1,21 \text{ м}^2.$$

Определим длину смоченного периметра:

$$\chi = b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2};$$

$$\chi = 12 + 2 \cdot 0,1 \cdot \sqrt{1 + 1^2} = 12,28 \text{ м.}$$

Определим гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi};$$

$$R = \frac{1,21}{12,28} = 0,10 \text{ м.}$$

Определим коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y,$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости русла;

$y$  – коэффициент, зависящий от шероховатости и гидравлического радиуса русла, определяется по справочнику Киселева (таблица 3.10) [3],  $y \approx 0,2$ .

$$C = \frac{1}{0,011} \cdot 0,10^{0,2} = 57,19 \sqrt{\text{м}}/\text{с}.$$

Определим модуль расхода водослива:

$$K = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R};$$

$$K = 1,21 \cdot 57,19 \cdot \sqrt{0,1} = 21,72 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По данным таблицы строим график  $h = f(K)$ , (рисунок 7.2).

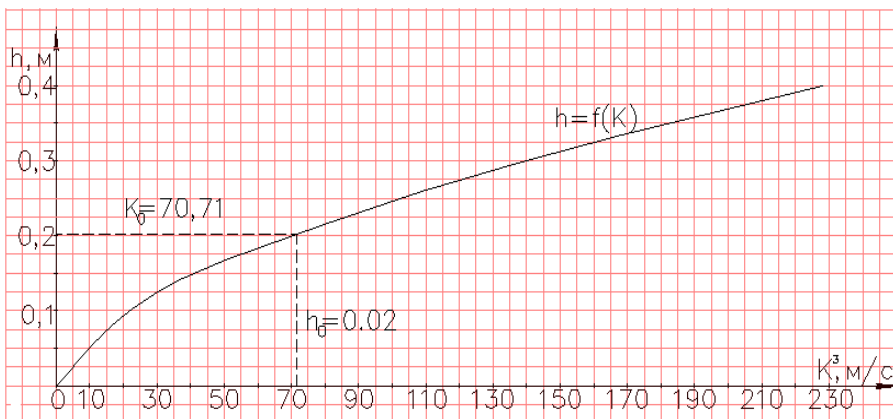


Рисунок 7.2 – График для определения нормальной глубины

По этому графику, зная  $K_0$ , находим искомую глубину. В таблице производим проверку правильности определения нормальной глубины.

$$\Delta = \frac{71,63 - 70,71}{71,63} \cdot 100 = 1,28 \% < 2 \% \Rightarrow h_0 = 0,202 \text{ м.}$$

### 7.1.2 Определение критической глубины

Определим коэффициент Кориолиса по формуле Г.В. Железнякова:

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

где  $g$  – ускорение силы тяжести;

$C$  – коэффициент Шези.

$$\alpha = 1 + 0,88 \cdot \left( 0,34 + \frac{1 + \frac{\sqrt{9,81}}{65,63}}{2,3 + 0,3 \cdot \frac{65,63}{\sqrt{9,81}}} \right)^2 = 1,20.$$

Определим величину

$$\frac{\alpha \cdot Q^2}{g} = \frac{1,20 \cdot 40^2}{9,81} = 195,33 \text{ м}^2.$$

Составляем таблицу 3, задаваясь значениями  $h$ , и вычисляем соответственно им величины  $\frac{\omega^3}{B}$ .

Таблица 7.3 – Определение критической глубины

$h$ , м	$mh$ , м	$(b+mh)$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\omega^3$ , м <sup>6</sup>	$B = b + 2mh$ , м	$\frac{\omega^3}{B}$ , м <sup>6</sup>
0,5	0,5	12,5	6,25	244,14	13,00	18,78
1	1	13	13	2197,00	14,00	156,93
1,5	1,5	13,5	20,25	8303,77	15,00	553,58
2	2	14	28	21952,00	16,00	1372,00
Контроль критической глубины $h_k$						
1,07	1,07	13,07	13,985	2735,13	14,14	193,43

По данным таблицы строим график  $h_k = f\left(\frac{\omega^3}{B}\right)$ , (рисунок 3).

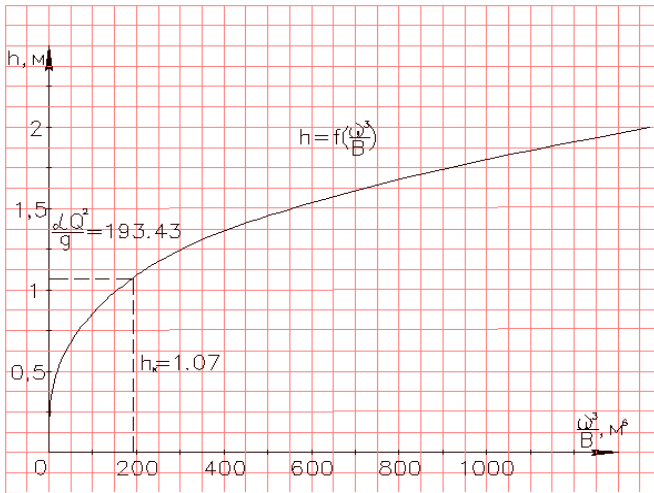


Рисунок 7.3 – График для определения критической глубины

По этому графику, зная  $\frac{\alpha \cdot Q^2}{g}$ , находим искомую глубину. В таблице производим проверку правильности определения критической глубины.

$$\Delta = \frac{195,33 - 193,43}{195,33} \cdot 100 = 0,97 \% < 2 \% \Rightarrow h_k = 193,43 \text{ м.}$$

### 7.1.3 Установление формы свободной поверхности потока

Предварительно определим критический уклон:

$$i_k = \frac{g}{\alpha \cdot C_k^2} \cdot \frac{\chi_k}{B_k},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса;

$C_k$  – коэффициент Шези;

$\chi_k$  – смоченный периметр, м;

$B_k$  – ширина русла по верху, м.

$$\chi_k = b + 2 \cdot h_k \cdot \sqrt{1 + m^2};$$

$$R_k = \frac{\omega_k}{\chi_k};$$

$$C_k = \frac{1}{n} \cdot R_k^y;$$

$$\chi_k = 12 + 2 \cdot 1,07 \cdot \sqrt{1 + 1^2} = 15,03 \text{ м};$$

$$R_k = \frac{13,98}{15,03} = 0,93 \text{ м};$$

$$C_k = \frac{1}{0,011} \cdot 0,93^{0,2} = 89,60, \frac{\sqrt{M}}{c}.$$



Тогда

$$i_k = \frac{9,81}{1,20 \cdot 89,60^2} \cdot \frac{15,03}{14,14} = 0,0012.$$

Так как  $h_0 < h_k$  и  $i > i_k$ , а заданная глубина  $h_3 > h_0$  и  $h_3 < h_k$ , то кривая свободной поверхности является кривой спада типа  $b_2$ .

#### 7.1.4 Определение гидравлического показателя русла $x$

Для определения гидравлического показателя воспользуемся зависимостью

$$x = 2 \cdot \frac{\lg K_{\text{cp}} - \lg K_0}{\lg h_{\text{cp}} - \lg h_0},$$

где  $K_{\text{cp}}$  – модуль расхода, отвечающий средней глубине;

$h_{\text{cp}}$  – средняя глубина на данном участке потока, рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{cp}} = \frac{h_{\text{нач}} + h_{\text{кон}}}{2};$$

$$h_{\text{нач}} = h_k;$$

$$h_{\text{кон}} = h_0 + 0,02;$$

$$h_{\text{cp}} = \frac{1,07 + 0,222}{2} = 0,646 \text{ м};$$

$$h_{\text{нач}} = 1,07 \text{ м};$$

$$h_{\text{кон}} = 0,202 + 0,02 = 0,222 \text{ м}.$$

$$\omega_{\text{cp}} = 0,646 \cdot (12 + 0,646 \cdot 1) = 8,169 \text{ м}^2;$$

$$\chi_{\text{cp}} = 12 + 2 \cdot 0,646 \cdot \sqrt{1 + 1^2} = 13,83 \text{ м};$$

$$R_{cp} = \frac{8,169}{13,83} = 0,59 \text{ м};$$

$$C_{cp} = \frac{1}{0,011} \cdot 0,59^{0,2} = 81,83 \frac{\sqrt{\text{м}}}{\text{с}};$$

$$K_{cp} = 8,169 \cdot 81,83 \cdot \sqrt{0,59} = 513,79 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда

$$x = 2 \cdot \frac{\lg 513,79 - \lg 71,63}{\lg 0,646 - \lg 0,202} = 3,39$$

Округляя полученное значение  $x$  до ближайшего табличного (справочник Киселева), получаем  $x = 3,4$ .

### 7.1.5 Определение величины $j_{cp}$

Данную величину рассчитываем по формуле:

$$j_{cp} = \frac{\alpha \cdot i \cdot C_{cp}^2}{g} \cdot \frac{B_{cp}}{\chi_{cp}},$$

где  $C_{cp}$ ,  $B_{cp}$ ,  $\chi_{cp}$  – соответственно коэффициент Шези, ширина потока по верху и смоченный периметр, вычисленные по средней глубине

$$h_{cp} = \frac{h_1 + h_2}{2}.$$

$$j_{cp} = \frac{1,2 \cdot 0,32 \cdot 81,83^2}{9,81} \cdot \frac{13,292}{13,827} = 251,97.$$

Можно различать два разных способа учета величины  $j_{cp}$  при построении свободной поверхности потока.

Первый способ (менее точный). Здесь предположим, что величина  $j_{cp}$  постоянна по всей длине потока. При этом пол глубиной  $h_1$  и  $h_2$  понимаем глубины в начале и конце заданного русла.

Второй способ (более точный). Согласно этому способу рассматриваемое русло разбиваем на несколько участков, причем принимаем, что  $j_{cp}$  постоянно только в пределах одного участка.

Количество участков зависит от разности глубин в начале  $h_{нач}$  и в конце русла  $h_{кон}$  и определяется по формуле

$$n = \frac{h_{кон} - h_{нач}}{\Delta h},$$

где  $\Delta h$  – разность глубин в начале и в конце каждого участка; принимается равной для перепада и быстрого тока (0,08 – 0,10) м.

$$n = \frac{0,222 - 1,07}{0,09} = 9,42 \text{ м.}$$

Принимаем  $n = 10$ .

Затем, задаваясь значениями  $h$  (в пределах от  $h_{нач}$  до  $h_{кон}$ ), определяем значение  $j$  по формуле

$$j_{cp} = \frac{\alpha \cdot i \cdot C^2}{g} \cdot \frac{B}{\chi}.$$

Все расчеты сводим в таблицу 4.

Таблица 7.4 – Определение  $j$

№ п/п	$h$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\chi$ , м	$R$ , м	$C$ , $\frac{\sqrt{M}}{c}$	$C^2$ , $\frac{M}{c^2}$	$B$ , м	$j$
1	1,07	13,98	15,03	0,93	89,61	8030,38	14,14	295,80
2	0,98	12,72	14,77	0,86	88,23	7784,68	13,96	287,97
3	0,89	11,47	14,52	0,79	86,73	7521,73	13,78	279,48
4	0,80	10,24	14,26	0,72	85,08	7238,58	13,60	270,18
5	0,71	9,02	14,01	0,64	83,26	6931,44	13,42	259,93
6	0,62	7,82	13,75	0,57	81,21	6595,20	13,24	248,52
7	0,53	6,64	13,50	0,49	78,88	6222,77	13,06	235,66
8	0,44	5,47	13,24	0,41	76,18	5803,76	12,88	220,93
9	0,35	4,32	12,99	0,33	72,95	5321,89	12,70	203,67
10	0,26	3,19	12,74	0,25	68,91	4748,92	12,52	182,75
11	0,222	2,71	12,63	0,21	66,84	4467,66	12,44	172,33

По данным таблицы строим график  $j = f(h)$ , (рисунок 4).

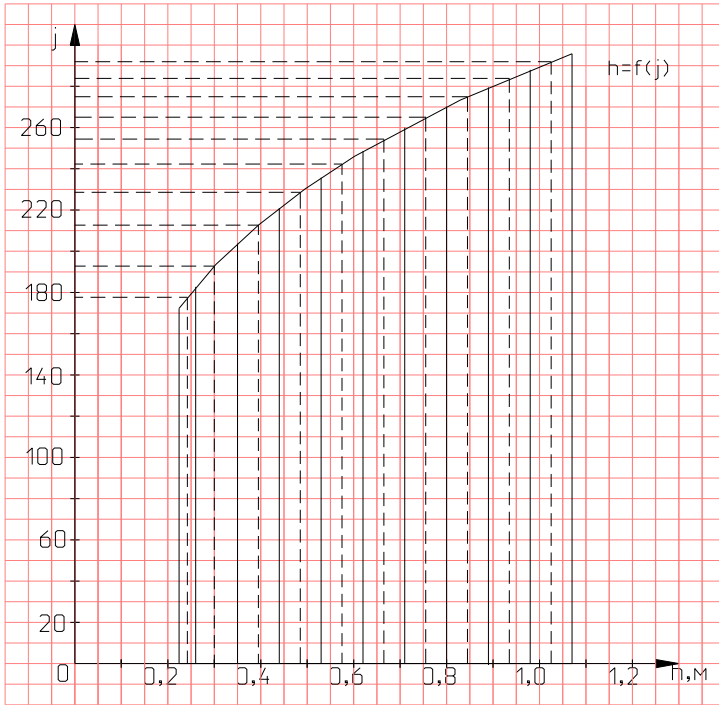


Рисунок 7.4 – Построение кривой  $j = f(h)$

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

При построении свободной поверхности для быстрого тока идем вниз по течению. Русло по длине разбиваем на 10 участков. Длину каждого участка находим из уравнения Бахметева:

$$l = \frac{h_0}{i} \left\{ \eta_2 - \eta_1 - (1 - j_{cp}) \cdot [B(\eta_2) - B(\eta_1)] \right\},$$

где  $\eta_1, \eta_2$  – относительные глубины соответственно в первом и во втором сечениях, определяются выражениями

$$\eta_i = \frac{h_i}{h_0};$$

$B(\eta_1)$ ,  $B(\eta_2)$  – функции Бахметева – находятся по таблицам справочника Киселева в зависимости от относительных глубин  $\eta_1$  или  $\eta_2$  и гидравлического показателя русла  $x$ .

Все вычисления сводим в таблицу 7.5.

Таблица 7.5 – Расчет длин участков

$N$	$h$ , м	$h_{\text{ср}}$ , м	$J_{\text{ср}}$	$\eta$	$B(\eta)$	$l$ , м
1	1,07	1,025	291,94	5,30	0,0076	0,031
	0,98			4,85	0,0093	
2	0,98	0,935	283,82	4,85	0,0093	0,147
	0,89			4,41	0,0117	
3	0,89	0,845	274,94	4,41	0,0117	0,376
	0,8			3,96	0,0155	
4	0,8	0,755	265,00	3,96	0,0155	0,614
	0,71			3,51	0,0209	
5	0,71	0,665	254,00	3,51	0,0209	0,964
	0,62			3,07	0,0287	
6	0,62	0,575	242,30	3,07	0,0287	1,775
	0,53			2,62	0,0422	
7	0,53	0,485	228,58	2,62	0,0422	3,224
	0,44			2,18	0,0666	
8	0,44	0,395	212,64	2,18	0,0666	6,799
	0,35			1,73	0,1196	
9	0,35	0,305	192,78	1,73	0,1196	19,258
	0,26			1,29	0,2810	
10	0,26	0,241	177,66	1,29	0,2810	28,318
	0,222			1,10	0,5360	

61,507

По результатам таблицы строим линию свободной поверхности (рисунок 7.5).

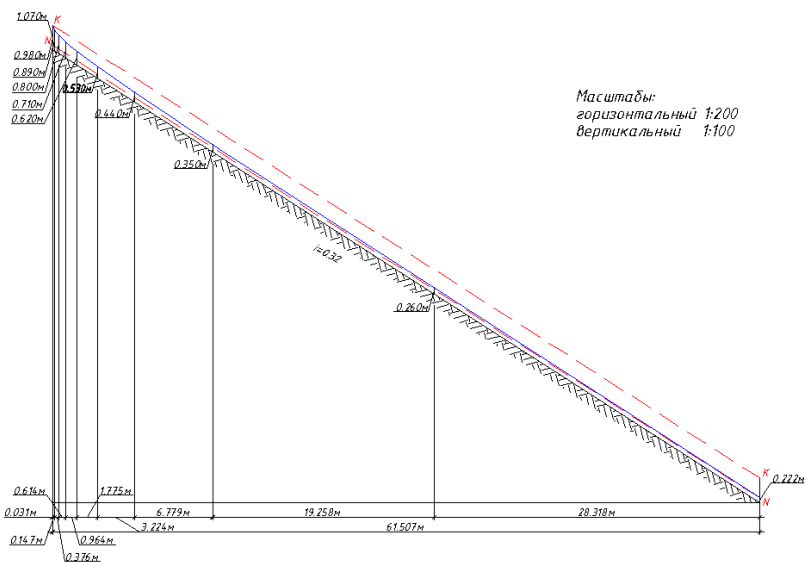


Рисунок 7.5 – Кривая свободной поверхности

## 7.2 Определение характера сопряжения падающей струи с нижним бьефом

Основная задача расчета сопряжения бьефов состоит в том, чтобы установить форму свободной поверхности воды при сопряжении струи, падающей в нижний бьеф, с потоком нижнего бьефа.

Русло в нижнем бьефе считается прямоугольным, ширина его равна ширине потока по верху в конце канала.

Определяем удельный расход воды

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{40}{12,444} = 3,21 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Критическую глубину в нижнем бьефе рассчитываем по формуле

$$h'_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{3,21^2}{9,81}} = 1,016 \text{ м}.$$

Вычисляем сжатую глубину  $h_c$  из уравнения

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot h_c^2 \cdot \varphi_c^2},$$

где  $T_0$  – полный напор в сечении 1–1 (рисунок 7.6);

$$T_0 = T + \frac{v_0^2}{2g};$$

$v_0$  – скорость подхода воды к сооружению, м/с;

$\varphi_c$  – коэффициент скорости, учитывающий потери напора в пределах сооружения от сечения 1–1 до сечения С–С (рисунок 6); ( $\varphi_c = 0,8 - 0,98$ ).

$$T = h_{\text{кон}} + (\nabla_2 - \nabla_{\text{дн}}) = 0,222 + (170,3 - 168,2) = 3,174 \text{ м};$$

$$v_0 = \frac{Q}{\omega_{\text{кон}}} = \frac{40}{2,71} = 14,74 \text{ м/с};$$

$$T_0 = 3,174 + \frac{14,74^2}{2 \cdot 9,81} = 14,248 \text{ м}.$$

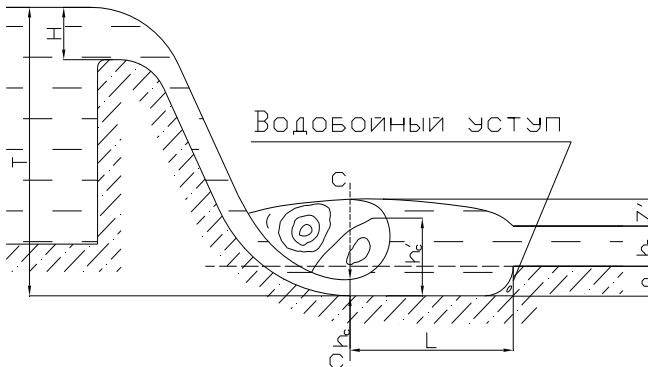


Рисунок 7.6 – Водобойный колодец

Так как данное уравнение является кубическим в отношении  $h_c$ , то решать его приходится 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  $0 < h_c < h_k$ .

Для определения сжатой глубины  $h_c$  данное уравнение удобно переписать в виде

$$T_0 = h_c + \frac{A}{h_c^2},$$

где  $A = \frac{q^2}{2g\varphi_c^2} = \text{const}$ .

Затем, задавая ряд значений  $h_c$ , определить  $T_0$ . Результаты расчетов сводим в таблицу 7.6. По результатам строится график зависимости  $T_0 = f(h_c)$  (рисунок 7.7). Зная  $T_0 = T + \frac{v_0^2}{2g}$ , определяем по графику  $T_0 = f(h_c)$  глубину в сжатом сечении  $h_c$ .

Таблица 7.6 – Определение глубины в сжатом сечении

$h_c$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\frac{A}{h_c^2}$	$T_0$
0,20	0,04	16,21	16,41
0,40	0,16	4,05	4,45
0,60	0,36	1,80	2,40
0,80	0,64	1,01	1,81
1,00	1,00	0,65	1,65

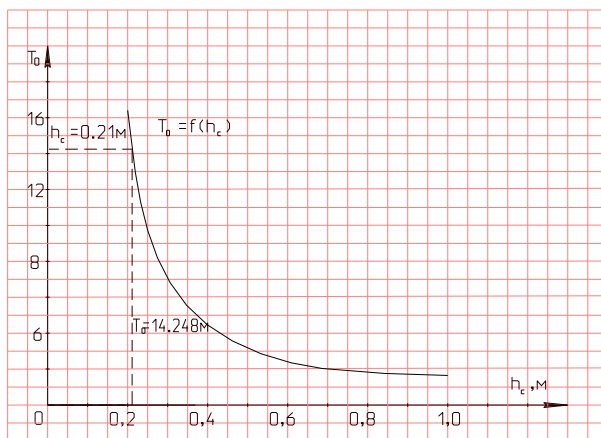


Рисунок 7.7 – График для определения глубины в сжатом сечении



Находим вторую глубину прыжка  $h'_c$ , сопряженную с глубиной  $h_c$ , по уравнению гидравлического прыжка для прямоугольного русла:

$$h'_c = \frac{h_c}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h'_c}{h_c} \right)^3} - 1 \right] = \frac{0,21}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot \left( \frac{1,07}{0,21} \right)^3} - 1 \right] = 3,31 \text{ м.}$$

Сопоставляем полученное значение  $h'_c$  с глубиной воды в нижнем бьефе  $h_6$  (бытовой глубиной) и выбираем один из трех типов сопряжений бьефов.

$$h_6 = \nabla_{гв} - \nabla_{дн} = 170,3 - 168,2 = 2,1 \text{ м.}$$

Так как  $h_6 = 2,1 \text{ м} < h'_c = 3,31 \text{ м}$ , то выбираем первый тип – сопряжение бьефов при помощи отогнанного прыжка. В этом случае прыжок устанавливается на некотором расстоянии от сооружения. Вследствие чего необходимо спроектировать в нижнем бьефе сооружения – водобойный колодец.

### 7.3 Проектирование гасителя энергии в нижнем бьефе

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

Наличие больших скоростей воды за сооружениями заставляет строить в нижнем бьефе мощное, а следовательно, дорогостоящее крепление.

Для того чтобы уменьшить мощность этого крепления и снизить его стоимость, на возможно 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 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 энергии, называются гасителями энергии.

Из всех известных гасителей энергии в данной работе применяем водобойный колодец.

### 7.3.1 Расчет водобойного колодца

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

Гидравлический расчет водобойного колодца состоит в определении глубины колодца  $a$  и его длины  $L$  (рисунок 7.8).

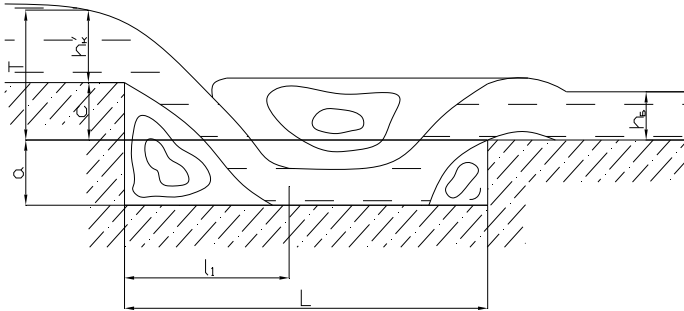


Рисунок 7.8 – Устройство водобойного колодца в случае перепада на быстротоке

### 7.3.2 Определение глубины колодца

Необходимая глубина колодца  $a$ , при которой получается затопленный прыжок, должна удовлетворять условию  $a + h_6 > h'_c$ , при этом перепадом  $Z'$  на водобойном уступе пренебрегаем (рисунок 8).

Предварительно определяется так называемая теоретическая глубина колодца  $a_0$ , которая удовлетворяет условию  $a_0 + h_6 = h'_c$  и при которой прыжок устанавливается в сжатом сечении С–С.

Задаваясь значениями  $a_0$ , находим величины  $T'_0 = T_0 + a_0$  (таблица 7.7).

Таблица 7.7 – Расчет глубины колодца

$a_0$	$T'_0$	$h_c$	$h'_c$	$a_0 + h_6$
0,000	14,248	0,210	3,312	2,100
2,000	16,248	0,200	3,401	4,100
4,000	18,248	0,190	3,497	6,100
1,266	15,514	0,204	3,365	3,366

По данным таблицы строим кривую  $h'_c = f_1(a_0)$  и прямую  $(a_0 + h_0) = f_2(a_0)$ . Тогда пересечение этих линий дает теоретическую глубину колодца  $a_0 = 1,266$  м. Действительная глубина колодца  $a = (1,05..1,10)a_0 = 1,367$  м.

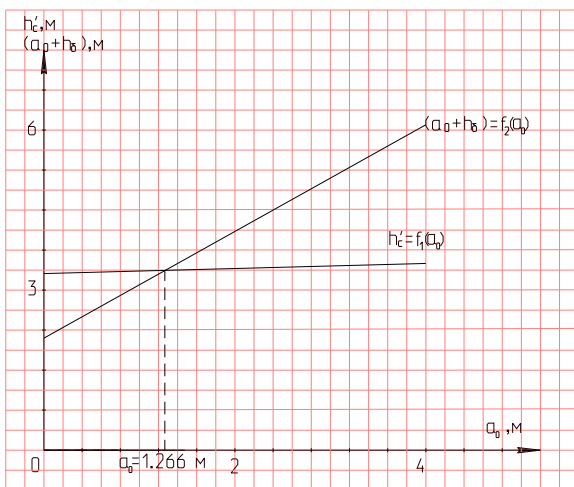


Рисунок 7.9 – График для определения глубины колодца

### 7.3.3 Определение длины водобойного колодца

Для плотины длина  $L$  измеряется от сечения С–С (рисунок 9) и определяется по формуле  $L = (0,7..0,8)l_{\text{п}}$ , где  $l_{\text{п}}$  – длина гидравлического прыжка; рассчитывается по одной из эмпирических формул, например, по формуле Сафранца [1]

$$l_{\text{п}} = 4,5 \cdot h'_{\text{ск}}$$

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

$$l_{\text{п}} = 4,5 \cdot 3,365 = 15,142 \text{ м.}$$

В случае перепада на быстротоке длина колодца

$$L = l_1 + (0,7..0,8) \cdot l_{\text{п}},$$

где  $l_1$  – дальность расчета струи, м.

$$l_1 = v_0 \cdot \sqrt{\frac{2c + h_{\text{КОН}}}{g}} = 17,74 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,1 + 1,07}{9,81}} = 13 \text{ м,}$$

$$c = \nabla_2 - \nabla_{\text{ДН}} = 170,3 - 168,2 = 2,1 \text{ м.}$$

Тогда  $L = 13 + 0,6 \cdot 15,142 = 22,085 \text{ м.}$

### Список литературы

- 1 **Железняков, Г.В.** Гидравлика и гидрология. – М.: Транспорт, 1989. – 375 с.
- 2 **Угинчус, А.А.** Гидравлика / А.А.Угинчус, Е.А. Чугаева. – Л.: Стройиздат, 1971. – 350 с.
- 3 **Киселев П.Г.** Справочник по гидравлическим расчетам. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 426 с.
- 4 **Парахневич, В. Т.** Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков : учеб. пособие / В.Т. Парахневич. – Минск ; М. : Новое знание: ИНФРА-М, 2015. – 367 с.

Учебное издание

*ВОСТРОВА Регина Николаевна  
НОВИКОВА Ольга Константиновна  
РАТНИКОВА Анна Михайловна*

НЕРАВНОМЕРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ  
В ОТКРЫТЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

Учебно-методическое пособие

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

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель