

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФГОУ ВПО КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Е. В. КУЗНЕЦОВ, А. Е. ХАДЖИДИ, С. Ю. ОРЛЕНКО

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОТКРЫТЫХ
РУСЕЛ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ**

**(Учебное пособие для самостоятельной работы
студентов при выполнении дипломных проектов
и курсовых работ)**

Краснодар 2009г

УДК 532 (075.8)

Заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук, профессор Кузнецов Е. В., кандидат техн. наук, доцент Хаджиди А. Е., инженер Орленко С. Ю. 2009г., 74с.

ISBN

Учебное пособие предназначено для студентов инженерных специальностей, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации открытых русел (каналов) и гидротехнических сооружений для самостоятельной работы над курсовыми и дипломными проектами.

Может быть полезно для научных работников и специалистов агропромышленного комплекса в области мелиорации.

Рецензент заведующий кафедрой комплексных систем водоснабжения, доктор техн. наук, профессор Ю. А. Свистунов (Кубанский госагроуниверситет)

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
1 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ	6
1.1 Данные для расчета	6
1.2 Состав расчета	6
1.3 Общие положения	6
1.4 Ход расчета	10
2 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ	16
2.1 Данные для расчета	16
2.2 Состав расчета	16
2.3 Общие положения	16
2.4 Ход расчета	20
2.4.1 Метод Н. Н. Павловского	20
2.4.2 Метод В. И. Чарномского	21
2.4.3 Метод Б. А. Бахметева	23
2.5 Построение кривых свободной поверхности потока	26
3 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОСЛИВОВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ	31
3.1 Данные для расчета	31
3.2 Состав расчета	31
3.3 Общие положения	31
3.4 Ход расчета	34

4	ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОПРЯГАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ	36
4.1	Данные для расчета	36
4.2	Состав расчета	36
4.3	Общие положения	38
4.4	Ход расчета	39
4.4.1	Расчет быстротока	39
4.4.2	Расчет консольного сброса	43
4.4.3	Расчет многоступенчатого перепада	47
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	52
	Приложение 1	53
	Приложение 2	70
	Приложение 3	72
	Приложение 4	73

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии рассматриваются теоретические и прикладные проблемы открытых русел (каналов). Дается систематическое изложение основных вопросов равномерного и неравномерного движения воды в каналах. Приводится методика расчета открытых русел на равномерное и неравномерное движение, а также гидротехнических сооружений. Приводится методика расчета основных сопрягающих сооружений (быстротоков, консольных сбросов и многоступенчатых перепадов). Исследуются вопросы устойчивости русел каналов к размыву в нижнем бьефе за сопрягающими сооружениями.

1 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

1.1 Данные для расчета

Данные для расчета приводятся в таблице 1.1. Заданы расчетный расход Q , который принимается по номеру варианта (например, вариант № 20, расход $20\text{ м}^3/\text{с}$), уклон дна канала i , тип грунта, мутность потока ρ , расчетное удельное сопротивление дна связных грунтов C_v , гранулометрический состав взвешенных наносов и их процентов содержание.

1.2 Состав расчета

Рассчитать канал трапецеидального сечения на равномерное движение. Определить ширину и глубину канала по дну. Проверить канал на размыв и заилиение. Вычертить в масштабе 1:100 поперечный профиль канала (рис. 1.2).

1.3. Общие положения

При расчете каналов на равномерное движение используется формула Шези:

$$V = C\sqrt{R \cdot I} , \quad (1.1)$$

где V - средняя скорость движения воды в канале, м/с;

C - коэффициент Шези $\text{м}^{0.5}/\text{с}$;

R - гидравлический радиус, м.

Расход воды в канале определяется из формулы расхода:

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot I}, \quad (1.2)$$

где Q - расход воды в канале, м³/с;

ω - площадь живого сечения потока в канале, м².

При определении параметров, входящих в формулы (1.1) и (1.2) пользуются следующими зависимостями.

Коэффициент Шези, м^{0,5}/с:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (1.3)$$

где n – показатель шероховатости русла канала (принимается по [1]);

y – показатель степени, принимается $\frac{1}{6}$.

Гидравлический радиус, м:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (1.4)$$

где χ – смоченный периметр, м.

Смоченный периметр для трапецидального канала, м:

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}, \quad (1.5)$$

где b – ширина канала по дну, м;

h – глубина воды в канале, м;

m – коэффициент заложения откосов ($m = \text{ctg} \cdot \alpha$) [1].

Таблица 1.1 – Исходные данные к расчету канала на равномерное движение

Наименование		Вторые цифры варианта										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Тип грунтов, слагающих русло канала		Супесь	Суглинок	Суглинок средний	Суглинок тяжелый	Глина	Глина тяжелый	Песок	Суглинок средний	Глина	Песок	
Расчетное удельное сцепление грунта, г/см^2		0,02	0,12	0,18	0,20	0,23	0,25	-	0,19	0,22	-	
Диаметр фракций, мм	0,5...0,25	Содержание фракций, %	5	8	10	4	5	3	9	4	2	12
	0,25...0,1		10	15	15	12	35	12	11	12	8	13
	0,1...0,05		15	20	25	14	10	15	14	15	10	10
	0,05...0,02		20	25	25	30	20	30	26	34	40	30
	0,02...0,01		50	32	25	40	30	40	40	35	40	35
Мутность потока ρ , кг/м^3		0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	
Уклон i , ‰		0,24	0,23	0,30	0,40	0,35	0,10	0,20	0,27	0,15	0,45	

Примечание: 1. В вариантах с 1 по 9 вторая цифра варианта равна номеру варианта.

2. Уклон, выраженный как 0,24‰, соответствует уклону 0,00024.

или

$$\chi = h(\beta + 2\sqrt{1+m^2}), \quad (1.6)$$

где β – относительная ширина канала по дну ($\beta = \frac{b}{h}$).

Площадь живого сечения трапецеидального канала, м²:

$$\omega = h(b + mh) \quad (1.7)$$

или при неизвестной ширине канала по дну b :

$$\omega = h^2(\beta + m). \quad (1.8)$$

Канал рассчитывается так, чтобы выполнялось условие, при котором не происходит его размыв или заилиение наносами:

$$V_3 \langle V \langle V_p, \quad (1.9)$$

где V_3 - минимальная незаиляющая скорость при
равномерном движении воды, м/с;

V_p - максимально допустимая неразмывающая скорость
при равномерном движении, м/с.

Максимально допустимая неразмывающая скорость определяется по формулам и таблицам в зависимости от материала смоченной поверхности и глубины потока [1,2,3].

Минимальная незаиляющая скорость находится по формуле Е. А. Замарина [1]:

$$V_3 = \left(\frac{\rho \cdot W_0}{0,022} \sqrt{\frac{\bar{W}}{R \cdot i}} \right), \quad (1.10)$$

где W_0 – условная гидравлическая крупность наносов, м/с;

\bar{W} - средневзвешенная гидравлическая крупность наносов, м/с.

$$\bar{W} = \frac{\sum W_i \cdot P_i}{\sum P_i}; \quad (1.11)$$

$$W_i = \frac{W_1 + W_2 + \sqrt{W_1 + W_2}}{3}, \quad (1.12)$$

где W_1, W_2 – гидравлические крупности наносов, соответствующие диаметрам частиц наносов d_1 и d_2 ;

P_i – процентное содержание каждой фракции наносов.

При определении средневзвешенной гидравлической крупности наносов можно пользоваться справочной литературой [1] или данными таблицы 1.2.

Таблица 1.2 – Гидравлическая крупность при температуре 20⁰С

$d, \text{мм}$	0,5	0,25	0,1	0,05	0,02	0,01
$W, \text{мм/с}$	40,20	26,02	6,63	2,27	0,36	0,09

Условная гидравлическая крупность принимается:

$$W_0 = \bar{W}, \text{ если } 0,002 \langle \bar{W} \rangle < 0,008 \text{ м/с}; \quad (1.13)$$

$$W_0 = 0,002 \text{ м/с, если } 0,0004 \langle \bar{W} \rangle < 0,002 \text{ м/с.}$$

В случае, когда $V \rangle V_p$ необходимо крепление русла канала.

В случае, когда $V \langle V_s$ необходимо периодически очищать русло канала от наносов.

1.4 Ход расчета

Гидравлический расчет каналов на равномерное движение производится по трем расходам:

- расчетному (нормальному), для определения гидравлических элементов, соответствующих нормальным условиям его работы;

- форсированному, для определения необходимого превышения дамб над уровнем воды и проверки канала на размываемость;

- минимальному, для проверки условий командования над каналами младшего порядка и на незаиляемость канала.

Нормальный расход принимается по номеру варианта. Форсированный расход определяют по формуле:

$$Q_{\phi} = K_{\phi} \cdot Q, \quad (1.14)$$

где K_{ϕ} - коэффициент форсировки (он принимается равным

$$K_{\phi} = 1,15-1,20 \text{ при } Q = 1-10 \text{ м}^3/\text{с} \text{ и } K_{\phi} = 1,10-1,15 \text{ при } Q > 10 \text{ м}^3/\text{с};$$

Q - нормальный расход, $\text{м}^3/\text{с}$.

Минимальный расход Q_{\min} принимается не менее 40% от величины нормального расхода.

При неизвестных величинах канала - ширине по дну b и нормальной глубине задаются относительной шириной канала β . Для оросительных каналов рекомендуется величину β принимать в диапазоне от 2,2 до 5,0 [4].

Далее расчет по вычислению нормальной глубины в трапецеидальном канале ведется в табличной форме методом подбора.

Приняв β . В пределах от 2,2 до 5,0 и, задаваясь глубинами h , по формулам (1.3), (1.4), (1.6) и (1.8) определяются значения C , R , χ и ω , а также расходная характеристика K по формуле (1.15), которые заносятся в таблицу 1.3.

$$K = \omega \cdot C \sqrt{R}. \quad (1.15)$$

Таблица 1.3 – Определение расходной характеристики канала

$h, \text{м}$	$\omega, \text{м}^2$	$\chi, \text{м}$	$R, \text{м}$	$C, \text{м}^{0,5}/\text{с}$	$K, \text{м}^3/\text{с}$	<i>const</i>
h_1	ω_1	χ_1	R_1	C_1	K_1	
h_n	ω_n	χ_n	R_n	C_n	K_n	

Расходная характеристика K_0 , соответствующая нормальному расходу при данном уклоне вычисляется по формуле:

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (1.16)$$

Для определения h и b удобно пользоваться графоаналитическим способом. По данным таблицы 1.3 строится график $K = f(h)$ (рис.1.1). По оси абсцисс графика откладывается значение K_0 , восстанавливается перпендикуляр к кривой $K = f(h)$. Пересечение кривой и перпендикуляра дает значение искомой (нормальной) глубины h_0 .

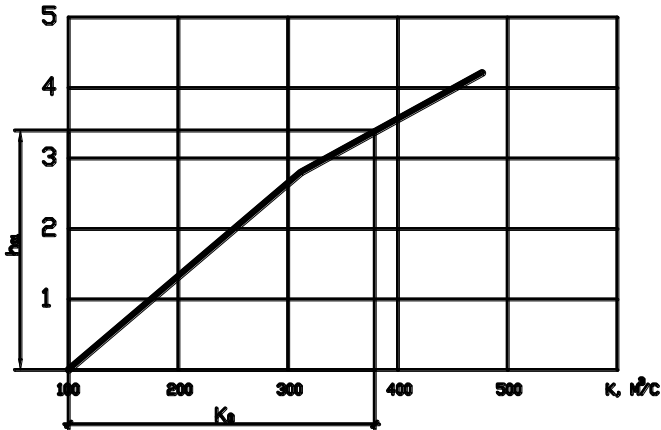


Рисунок 1.1 – Зависимость расходной характеристики от глубины в трапецеидальном канале

Далее находится действительная ширина канала по дну b по формуле:

$$b = \beta \cdot h_0, \quad (1.17)$$

где h_0 - нормальная глубина, найденная по графику (рис.1.1), м.

Вычисленное значение ширины канала округляется до стандартного значения.

При расходах $Q=1-10\text{м}^3/\text{с}$ ширину канала рекомендуется принимать : 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0; 7,0м; при расходах $Q>10\text{м}^3/\text{с}$ значения b принимаются целыми значениями, т.е.: 5,0; 6,0; 7,0; 8,0м и т.д.

Приняв стандартное значение ширины канала по дну, уточняется глубина равномерного движения h_0 . (При уточнении глубины равномерного движения в каналах могут использоваться любые другие способы: И.И. Агроскина [1,3,5], «Последовательные приближения» Н.Н. Павловского, В.Д. Журина и др. [1]).

При уточнении глубины канала можно использовать основной графо-аналитический способ.

Расчет ведется в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Уточнение расходной характеристики канала

$h, \text{м}$	$b, \text{м}$	$\omega, \text{м}^2$	$\chi, \text{м}$	$R, \text{м}$	$C, \text{м}^{0,5}/\text{с}$	$K, \text{м}^3/\text{с}$	$K_0, \text{м}^3/\text{с}$
h_1	$b = \text{const}$	ω_1	χ_1	R_1	C_1	K_1	const
h_n		ω_n	χ_n	R_n	C_n	K_n	

По данным таблицы 1.4 строится график $K = f(h)$ при стандартном значении ширины канала по дну (рис.1.2) . По значению K_0 находится искомая глубина h_0 .

Используя построенный график $K = f(h)$, определяются глубины h_{\max} и h_{\min} , соответствующие расходам Q_{ϕ} и Q_{\min} . Для этого находятся соответствующие расходные характеристики из выражения:

$$K_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{i}}, \quad K_{\min} = \frac{Q_{\min}}{\sqrt{i}} \quad (1.18)$$

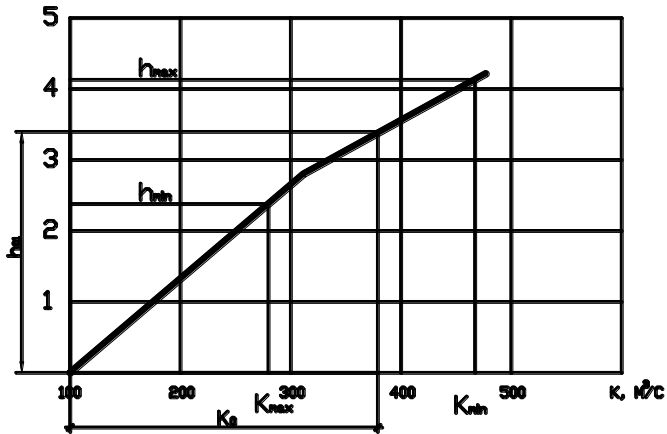


Рисунок 1.2 - Зависимость расходной характеристики от глубины в трапецидальном канале

Далее определяются скорости $V_3 u V_p$.

Вычисляются средние скорости движения воды в канале при соответствующих расходах:

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (1.19)$$

где $\omega = h_0(b + mh_0)$.

$$V_{\max} = \frac{Q_{\phi}}{\omega_{\max}}, \quad (1.20)$$

где $\omega_{\max} = h_{\max}(b + mh_{\max})$.

$$V_{\min} = \frac{Q_{\min}}{\omega_{\min}}, \quad (1.21)$$

где $\omega_{\min} = h_{\min}(b + mh_{\min})$.

Производится сравнение полученных скоростей с допустимыми для данного канала, при этом должно выполняться условие (1.9).

Для построения проектного сечения оросительного канала необходимо назначить превышения гребней дамб над

форсированным уровнем воды, значения которых приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Превышения гребня дамбы над форсированным уровнем воды

Расход, м ³ /с	Превышение Δh , м
До 10	0,3
10...30	0,4
30...50	0,5

Проектное сечение оросительного канала строится в соответствующем масштабе на формате А3.

Примеры расчетов каналов на равномерное движение приводятся в справочной литературе [1,5,6].

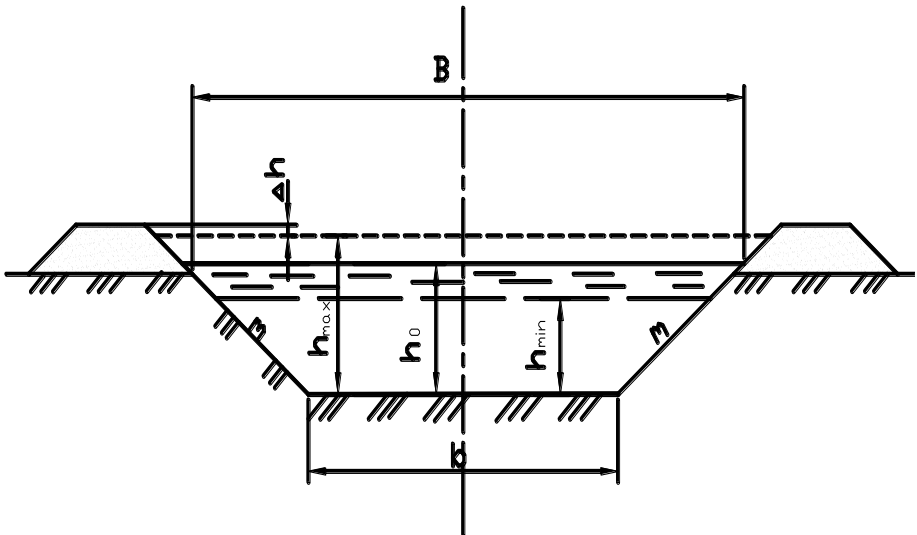


Рисунок 1.3 – Поперечное сечение оросительного канала

2 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО КАНАЛА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ

2.1 Данные для расчета

Расход воды в канале равен номеру варианта. Из предыдущей задачи принимаются значения нормальной глубины h_0 , ширины канала по дну b , коэффициенты m и n , уклон дна канала i . Глубина воды на ПК₀ приводится в исходных данных к задаче в таблице 2.1.

2.2 Состав расчета

Определить тип кривой свободной поверхности на участке канала от ПК₀ до ПК_н при пропуске нормального расхода Q .

Построить продольный профиль трапецеидального канала с участком неравномерного движения в масштабах М_г:1:20000; М_в:1:50 (рис.2.3, 2.4, 2.5).

2.3 Общие положения

Для того чтобы определить тип кривой свободной поверхности потока в русле, необходимо знать уклон русла i , критический уклон русла $i_{кр}$ и следующие глубины: глубину равномерного движения – h_0 , критическую глубину потока – $h_{кр}$ и глубину потока на пикете (ПК₀) – h_1 . Далее из соотношения глубин выбирается тип кривой свободной поверхности потока.

В открытых призматических руслах при неравномерном движении, в зависимости от величины уклона дна и условий протекания потока в начале и в конце рассматриваемого участка, может образовываться ряд форм свободной поверхности потока.

Таблица 2.1 – Исходные данные к расчету канала при неравномерном движении воды

Наименование	Вторые цифры вариантов										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Глубина воды h_1 на ПК ₀ , м	0,7 h_0	1,2 h_0	0,8 h_0	1,3 h_0	0,6 h_0	1,4 h_0	0,65 h_0	1,25 h_0	0,75 h_0	1,35 h_0	
Номер пикета ПК _n	40	45	48	50	53	55	58	60	62	65	
Способ расчета кривой свободной поверхности	Б.А. Бахметев			В.И. Чарномский				Н.Н. Павловский			

При прямом уклоне дна $i > 0$.

1. Первый случай.

Если уклон дна русла i меньше критического уклона $i_{кр}$ ($i < i_{кр}$), т.е. глубина равномерного движения потока h_0 больше критической глубины $h_{кр}$ ($h_0 > h_{кр}$), существуют три вида кривых свободной поверхности: в зоне a - кривая подпора a_1 , в зоне b - кривая спада b_1 , в зоне c - кривая подпора - c_1 (рис. 2.1).

$$\begin{aligned} a_1 - h_1 &> h_0 > h_{кр}; \\ b_1 - h_0 &> h_1 > h_{кр}; \\ c_1 - h_0 &> h_{кр} > h_1. \end{aligned} \quad (2.1)$$

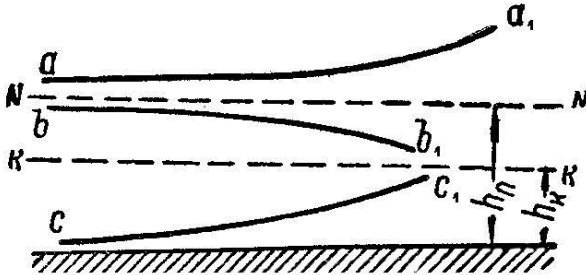


Рисунок 2.1 – Кривые свободной поверхности при $h_0 > h_{кр}$

2. Второй случай.

Если уклон дна русла i больше критического уклона $i_{кр}$ ($i > i_{кр}$), т.е. глубина равномерного движения потока h_0 меньше критической глубины $h_{кр}$ ($h_0 < h_{кр}$), существуют три вида кривых свободной поверхности: в зоне a – выпуклая кривая подпора a_2 , в зоне b – вогнутая кривая спада b_2 , в зоне c - выпуклая кривая подпора – c_2 (рис. 2.2).

$$\begin{aligned} a_2 - h_1 &> h_{кр} > h_0; \\ b_2 - h_{кр} &> h_1 > h_0; \\ c_2 - h_{кр} &> h_0 > h_1. \end{aligned} \quad (2.2)$$

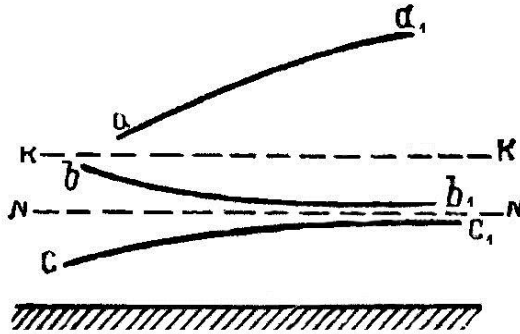


Рисунок 2.2 - Кривые свободной поверхности при $h_0 < h_{кр}$

3. Третий случай.

Если уклон дна русла i равен критическому уклону $i_{кр}$ ($i = i_{кр}$), т.е. глубина равномерного движения потока h_0 равна критической глубине потока ($h_0 = h_{кр}$), существуют следующие виды кривой свободной поверхности: в зоне a – кривая подпора a_3 , в зоне c – прямая подпора (или кривая подпора малой кривизны) c_3 .

$$a_3 - h_1 > h_{кр} = h_0;$$

$$c_3 - h_1 < h_0 = h_{кр}. \quad (2.3)$$

При горизонтальном русле $i=0$ и обратном уклоне дна $i<0$

В зоне b – выпуклая кривая спада типа $b_4 - h_1 > h_{кр}$;

В зоне c – вогнутая кривая подпора типа $c_4 - h_1 < h_{кр}$.

2.4 Ход расчета

В настоящее время при расчете открытых русел на неравномерное движение пользуются интегральными методами (Н.Н. Павловского и Б.А. Бахметева), а также методом конечных разностей – В.И. Чарномского.

2.4.1 Метод Н.Н. Павловского

Расстояние между сечениями с глубинами h_1 и h_2 определяется по зависимости (2.4) для случая $i>0$:

$$l_{1-2} = \frac{a}{i} \left\{ Z_2 - Z_1 - (1 - \bar{Z}) \cdot [\varphi(Z_2) - \varphi(Z_1)] \right\}, \quad (2.4)$$

где l_{1-2} - расстояние между сечениями 1 и 2, м ;

a – вспомогательная величина;

Z_1, Z_2 –расходные характеристики соответственно для глубин потока h_1, h_2 ;

$\varphi(Z_1); \varphi(Z_2)$ - функции Н.Н.Павловского (приложение 1).

Вспомогательная величина a находится из следующих зависимостей:

$$\text{если } h_1 > h_2, \quad a = \frac{Z_1 - Z_2}{h_1 - h_2}, \quad (2.5)$$

$$\text{если } h_1 < h_2, \quad a = \frac{Z_2 - Z_1}{h_2 - h_1}. \quad (2.6)$$

Расчет кривой свободной поверхности потока ведется в табличной формуле (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Расчет кривой свободной поверхности методом Н. Н. Павловского

Расчетные формулы		Глубины					
		$h_{нач}$	h_i	h_i	h_i	h_i	$h_{кон}$
1	$\omega_i = h_i(b + mh_i), \text{ м}^2$						
2	$\chi_i = b + 2h_i\sqrt{1 + m^2}, \text{ м}$						
3	$R_i = \frac{\omega_i}{\chi_i}, \text{ м}$						
4	$C_i = \frac{1}{n} R_i^{1/6}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}$						
5	$K_i = \omega_i C_i \sqrt{R_i}, \text{ м}^3/\text{с}$						
6	$Z_i = \frac{K_i}{K_0}$						
7	$j_i = \frac{\alpha \cdot i \cdot c_i^2 \cdot B_i}{g \cdot \chi_i}$						
8	$B_i = b + 2mh_i, \text{ м}$						
9	$\varphi(Z_i)$						
10	a_i						
11	$l_i, \text{ м}$						

2.4.2 Метод В. И. Чарномского

Расстояние между сечениями с глубинами h_1 и h_2 определяется по зависимости (2.7) для случая $i > 0$:

$$l_{1-2} = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{i - i_{fcp}}, \quad (2.7)$$

где \mathcal{E} – удельная энергия сечения;

i – уклон дна русла;

i_{fcp} – средний уклон трения в пределах рассматриваемого участка.

Применяя способ В.И. Чарномского, следует иметь в виду, что он основан на численном интегрировании основного дифференциального уравнения неравномерного движения. Поэтому для получения надежных результатов необходимо брать на рассматриваемом участке русла большое количество промежуточных сечений.

Тогда длина кривой свободной поверхности между сечениями с глубинами $h_{нач}$ и $h_{кон}$ будет равна сумме расстояний между всеми принятыми сечениями:

$$l_{кр} = l_{1-2} + l_{2-3} + \dots + l_{(n-1)-n}, \quad (2.8)$$

где $l_{2-3}, \dots, l_{(n-1)-n}$ - определяются аналогично расстоянию l_{1-2} ,

причем $h_1 = h_{нач}$; $h_n = h_{кон}$.

Такой подход к построению кривой свободной поверхности одновременно уменьшает погрешность, возникающую при замене действительного уклона трения его осредненным значением между двумя смежными сечениями.

Рассчитывать кривую свободной поверхности по методу В.И. Чарномского легко, пользуясь таблицами 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3 – Расчет кривой свободной поверхности методом В.И. Чарномского

№	Расчетные формулы	Глубины			
		$h_{нач}$	h_i	h_i	$h_{кон}$
1	$\omega_i = h_i(b + mh_i), \text{ м}^2$				
2	$\chi_i = b + 2h_i\sqrt{1 + m^2}, \text{ м}$				
3	$R_i = \frac{\omega_i}{\chi_i}, \text{ м}$				
4	$W_i, \text{ м/с}$ (по таблице приложения 3)				
5	$\omega_i^2, \text{ м}^4$				

6	$\frac{\alpha Q^2}{2g\omega_i^2}, \text{м}$				
7	$\mathcal{E}_i = h_i + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_i^2}, \text{м}$				
8	$\omega_i \cdot W_i, \text{м}^3/\text{с}$				
9	$\frac{Q}{\omega_i W_i}$				
10	$i_{f_i} = \left(\frac{Q}{\omega_i W_i} \right)^2$				

Таблица 2.4 – Расчет длины кривой свободной поверхности методом В. И. Чарномского

№	Расчетные формулы и параметры	Интервал между сечениями с глубинами		
		$h_{нач}$ и h_i	h_i и h_{i+1}	h_{i+1} и $h_{кон}$
1	$i_{fcp(i-1)-i} = \frac{i_{f_i} + i_{f_{i-1}}}{2}$			
2	$i_0 - i_{fcp}$			
3	$\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_{i-1}, \text{м}$			
4	$l_{(i-1)-i}, \text{м}$			

2.4.3 Метод Б.А. Бахметева

Расстояние между сечениями с глубинами h_1 и h_2 определяется по зависимости (2.9) для случая $i > 0$:

$$l_{1-2} = \frac{h_0}{i} \left\{ \eta_2 - \eta_1 - (1-i) \cdot [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \right\}, \quad (2.9)$$

где l_{1-2} - расстояние между сечениями с глубинами h_1 и h_2 , м ;
 h_0 - глубина равномерного движения, м;
 η_1, η_2 - относительные глубины, м:

$$\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}; \quad \eta_2 = \frac{h_2}{h_0}. \quad (2.10)$$

$\varphi(\eta_1); \varphi(\eta_2)$ - функции Б.А. Бахметева.

Функции $\varphi(\eta_1); \varphi(\eta_2)$ определяются по таблицам приложения 1 в зависимости от значения относительной глубины η_i и гидравлического показателя русла X .

Гидравлический показатель русла находится по зависимости:

$$X = \frac{\lg K_1 - \lg K_2}{\lg h_1 - \lg h_2}, \quad (2.11)$$

где K_1 и K_2 - расходные характеристики для первого и второго створов на рассматриваемом участке канала, соответствующие глубинам h_1 и h_2 .

Скоростной коэффициент j находится по формуле:

$$j = \frac{\alpha \cdot i \cdot c^2 \cdot B}{g \cdot \chi}, \quad (2.12)$$

где B - ширина канала по урезу воды, м,

C - коэффициент Шези, м^{0.15}/с;

χ - смоченный периметр, м;

α - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока.

Расчет кривой свободной поверхности методом Б.А. Бахметева удобно вести в табличной форме.

Таблица 2.5 – Расчет кривой свободной поверхности
методом Б. А. Бахметева

№	Расчетные формулы и параметры	Глубины			
		h_l	h_i	h_i	$h_{\text{кон}}$
1	$\eta_i = \frac{h_i}{h_0};$				
2	$\omega_i = h_i(b + mh_i), \text{ м}^2$				
3	$\chi_i = b + 2h_i\sqrt{1 + m^2}, \text{ м}$				
4	$R_i = \frac{\omega_i}{\chi_i}, \text{ м}$				
5	$C_i = \frac{1}{n} R_i^{1/6}, \text{ м}^{0,5}/\text{с}$				
6	$K_i = \omega_i C_i \sqrt{R_i}, \text{ м}^3/\text{с}$				
7	$X_i = \frac{\lg K_i - \lg K_{i-1}}{\lg h_i - \lg h_{i-1}}$				
8	$j_i = \frac{\alpha \cdot i \cdot c_i^2 \cdot B_i}{g \cdot \chi_i} (10^{-3})$				
9	$B_i = b + 2mh_i, \text{ м}$				
10	$\varphi(\eta_i)$				

Таблица 2.6 – Расчет длины кривой свободной поверхности методом Б. А. Бахметева

№	Расчетные формулы и параметры	Интервал между сечениями с глубинами		
		$h_{нач}$ и h_i	h_i и h_{i+1}	h_{i+1} и $h_{кон}$
1	$\bar{j}_i = \frac{1}{2}(j_i + j_{i+1});$			
2	$\eta_{i+1} - \eta_i$			
3	$\varphi(\eta_{i+1}) - \varphi(\eta_i);$			
4	$\frac{h_0}{i}, м$			
5	$1 - \bar{j}_i$			
6	$l_i, м$			

2.5 Построение кривых свободной поверхности потока

После расчета кривых свободной поверхности (подпора или спада), вычисления их длины между каждой парой соседних глубин, на продольном профиле канала наносятся глубины (рисунок 2.3 для построения кривой подпора a_1 , рисунок 2.4 для построения кривой спада b_1 , рисунок 2.5 для построения кривой c_1) $h_1, h_2 \dots h_n$, принятые в таблицах 2.2-2.6, в зависимости от способа расчета.

Глубины $h_1, h_2 \dots h_n$ задаются через шаг Δh (величина шага принимается от 0,05 до 0,1 м).

Для кривой подпора глубины вверх по течению уменьшаются, а для кривой спада – увеличиваются на шаг Δh .

При построении продольных профилей свободной поверхности необходимо пользоваться нормативной литературой[7].

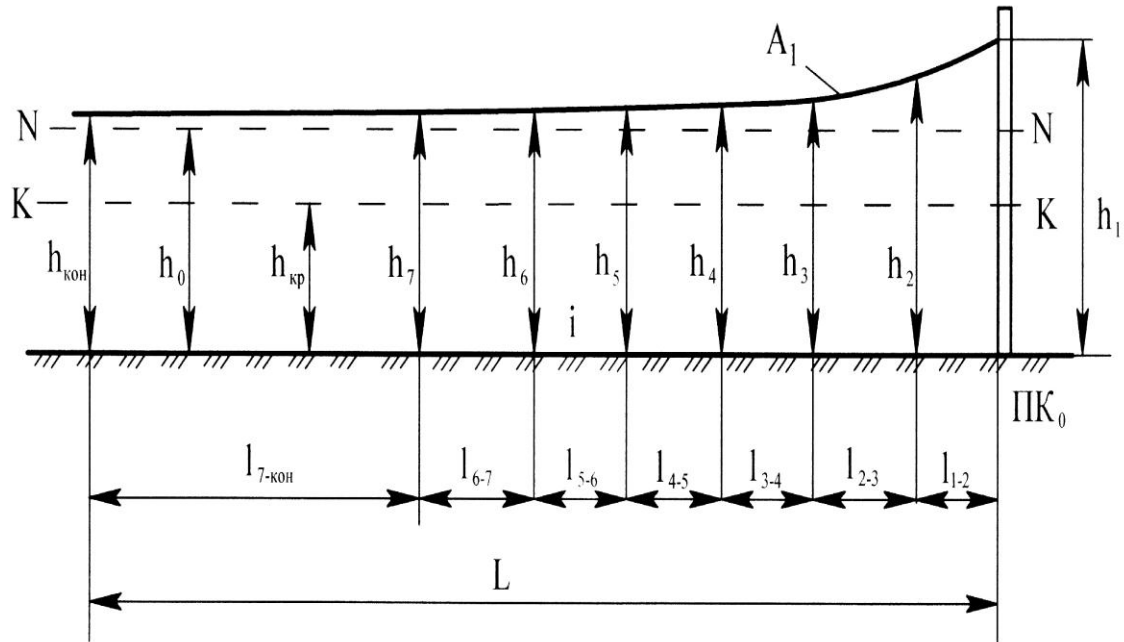


Рисунок 2.3 – Кривая свободной поверхности – кривая подпора типа a_1

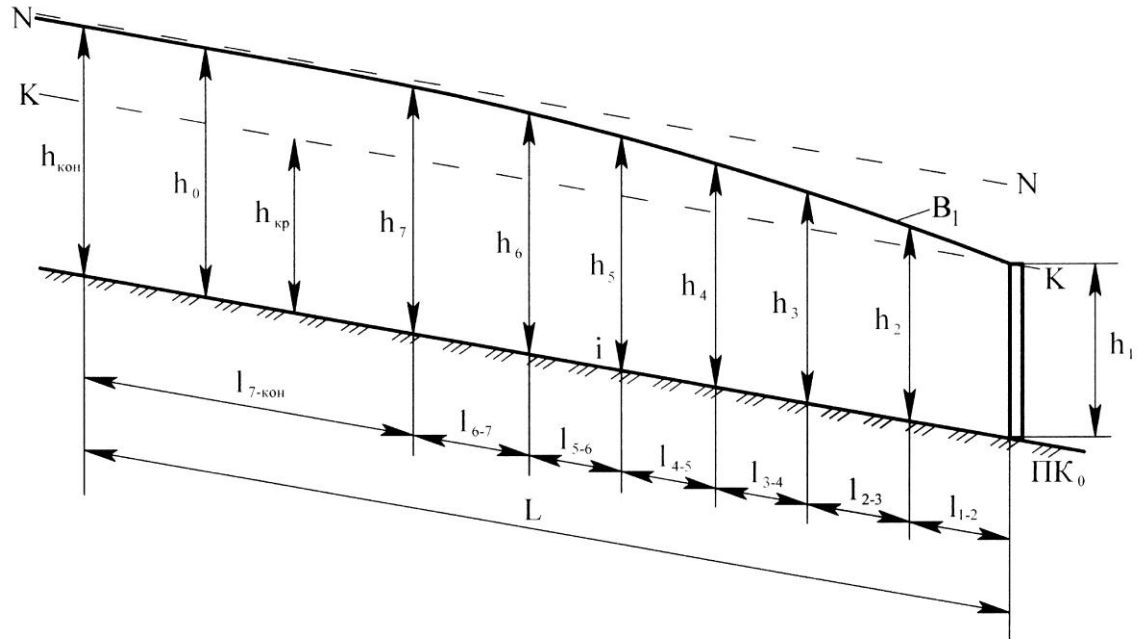


Рисунок 2.4 – Кривая свободной поверхности – кривая спада типа v_1

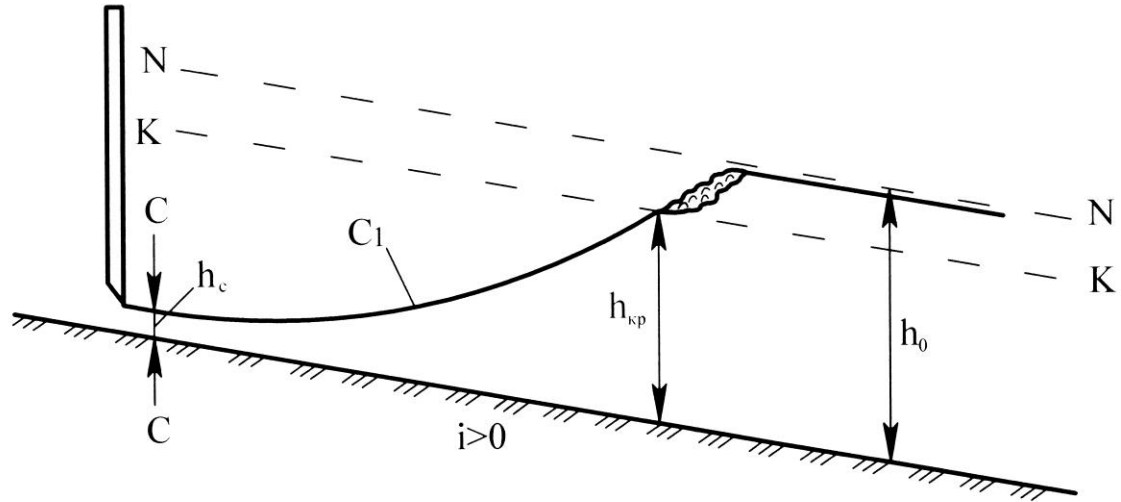


Рисунок 2.5 – Кривая свободной поверхности – кривая подпора типа C_1

Для определения глубины h_n на пикете ПК₀ строится график зависимости $h = f(l)$ (рис. 2.6).

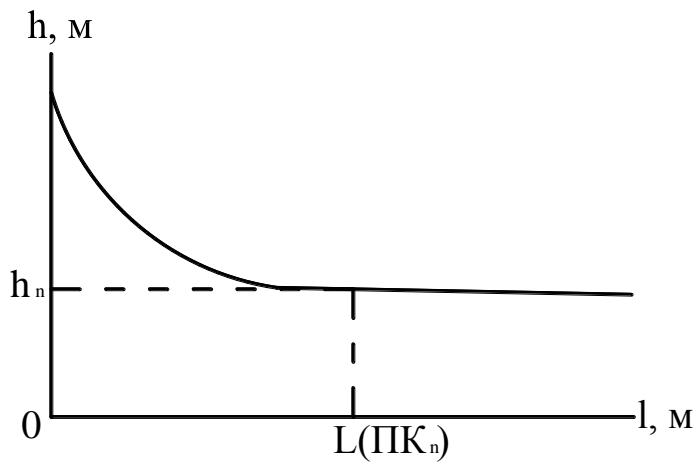


Рисунок 2.6 – График зависимости $h = f(l)$.

3 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОСЛИВОВ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

3.1 Данные для расчета

Расход воды принимается по номеру варианта. Шлюз-регулятор, он же водослив с широким порогом, находится на трапецеидальном канале. Все параметры канала нормальная глубина h_0 , ширина канала по дну b , максимальная глубина h_{\max} , минимальная глубина h_{\min} , коэффициенты m и n , уклон дна канала i принимаются из первой задачи.

Известны глубина перед порогом водослива h_1 , а также отметка порога водослива, дна подводящей и отводящей части канала (табл. 3.1).

3.2 Состав расчета

Определить ширину водосливного фронта водослива с широким порогом из условия пропуска по каналу форсированного расхода $Q_{\text{ф}}$. При расчете водослива необходимо учесть его конструктивные особенности (входная часть, условия входа потока на водослив в плане).

3.3 Общие положения

Расход воды через водослив с широким порогом находится по формуле:

$$Q = m \cdot \varepsilon \cdot \sigma_n \cdot b_g \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}, \quad (3.1)$$

где m – коэффициент расхода водослива с широким порогом;

ε – коэффициент бокового сжатия;

σ_n – коэффициент подтопления водослива;

b_g – ширина водосливного фронта, м;

H_0 – напор на водосливе с учетом скорости подхода, м.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета водослива с широким порогом

Наименование	Вторые цифры вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глубина воды перед водосливом h_1 , м	1,25 h	1,2 h	1,3 h	1,35 h	1,2 h	1,4 h	1,45 h	1,25 h	1,2 h	1,35 h
Отметки Z_1 , м	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z_3 , м	0,3	0,2	0,15	0,25	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,25
Z_5 , м	0	0,1	0	0,05	0,05	0,1	0,2	0	0,1	0,15
Ширина водослива S , м	5Н	6Н	7Н	8Н	2Н	3Н	4Н	2,5Н	3,5Н	4,5Н
Условия входа потока на водослив	плавный					неплавный				

Примечание: 1. Глубина потока h соответствует расходу Q_ϕ .

2. Отметки $Z_2 = Z_1 + h_1$; $Z_4 = Z_5 + h_0$.

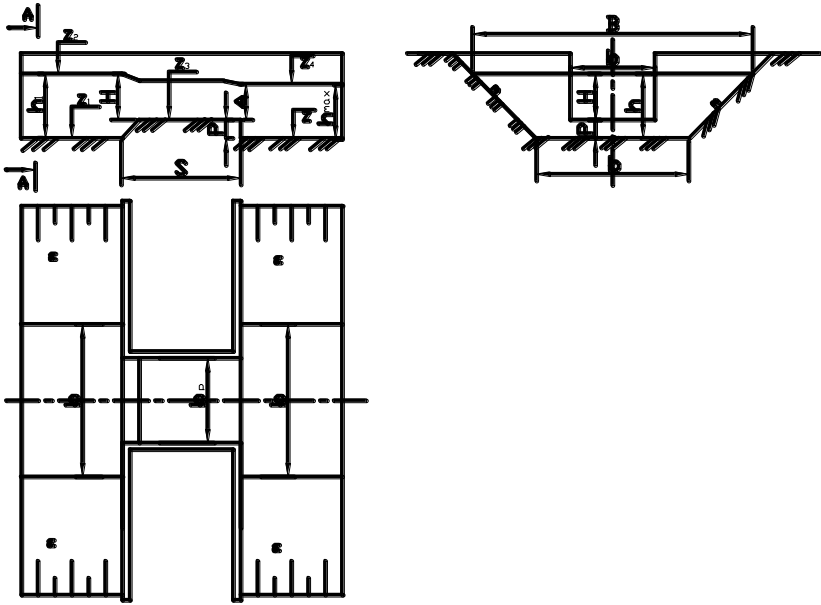


Рисунок 3.1 – Водослив с широким порогом

Коэффициент расхода водосливов с широким порогом находится от 0,32 до 0,385 [1].

Коэффициент бокового сжатия ε зависит от соотношения $\frac{b_e}{b}$ (где b - ширина по дну подводящей части канала).

Если водослив подтоплен, то $\sigma_n < 1$. Водослив считается подтопленным, когда выполняется условие:

$$\frac{\Delta}{H_0} \geq 0.75, \quad (3.2)$$

где $\Delta = h_{\max} - P$ (см. на рис. 3.1), м;

$$H_0 = H + \frac{\alpha \cdot V_{\max}^2}{2 \cdot g}, \text{ м};$$

H – напор на водосливе, м.

На неподтопленном водосливе и при отсутствии бокового сжатия $\sigma_n=1$; $\varepsilon=1$.

Точность расчета водосливов с широким порогом (а также любых водосливов) зависит от правильности выбора коэффициентов m ; σ_n ; ε .

При выборе коэффициентов расхода m , сжатия ε и подтопления σ_n необходимо ознакомиться со справочной литературой [1,3,5,8].

Коэффициент бокового сжатия рекомендуется определять по зависимости Е. А. Замарина:

$$\varepsilon = 1 - 0,2\xi_y \frac{H_0}{b_g}, \quad (3.3)$$

где ξ_y - коэффициент, учитывающий влияние вертикальных ребер устоев на условия входа потока на водослив [8].

3.4 Ход расчета

Устанавливается тип водослива. Если соотношение $\frac{S}{H} = 2 \div 10$ (где $H=Z_2 - Z_1$), то данное сооружение относится к водосливам с широким порогом.

Проектируется конструкция входной части, геометрия которой влияет на величину коэффициента расхода m .

Задача по определению ширины шлюза-регулятора решается методом приближений.

Первое приближение.

Принимается коэффициент бокового сжатия равный 1, т.к. ширина водослива не известна.

Выясняются условия работы водослива. Определяется величина Δ и по зависимости (3.2) дается оценка степени

подтопления водослива. Выбирается коэффициент расхода водослива с широким порогом по справочной литературе.

Вычисляется ширина водосливного фронта водослива в первом приближении:

$$b_{e1} = \frac{Q_{\phi}}{m \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}. \quad (3.4)$$

Второе приближение.

По формуле (3.3) определяется коэффициент бокового сжатия. Из формулы (3.4) с учетом бокового сжатия вычисляется ширина водосливного фронта во втором приближении b_{e2} .

Если результат b_{e2} во втором приближении не отличается от результата b_{e1} первого приближения более чем на 5%, то расчет заканчивается. Ширина водослива принимается равной b_{e2} .

В масштабе вычерчивается чертеж водослива с широким порогом (рис.3.1) на отдельном листе стандартного формата с соблюдением всех требований ГОСТ [9,10,11].

4 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОПРЯГАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ

Сопрягающие сооружения устанавливаются на участках каналов с большим уклоном местности. К сопрягающим сооружениям относятся: быстротоки, консольные сбросы и многоступенчатые перепады.

По условию задачи на канале имеется участок с перепадом местности на относительно малой его длине.

4.1 Данные для расчета

Расход, на который рассчитывается сопрягающие сооружения, принимается по номеру варианта. Исходные данные для расчета приводятся в таблице 4.1. Параметры канала известны из первой задачи, т.е. заданы ширина канала по дну b , коэффициент заложения откосов m , коэффициент шероховатости русла канала n , нормальная глубина h_0 .

4.2 Состав расчета

В зависимости от варианта (табл. 4.1) рассчитать сопрягающее сооружение: быстроток, консольный сброс и многоступенчатый перепад.

Запроектировать и рассчитать гаситель энергии: водобойная стенка, водобойный колодец или воронка размыва.

При расчете сопрягающего сооружения учесть его конструктивные особенности (входная часть).

Таблица 4.1 – Исходные данные к расчету сопрягающих сооружений.

Наименование	Вторые цифры вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип сопрягающего сооружения	быстроток				многоступенчатый перепад				консольный сброс	
Длина участка с перепадом местности $L, м$	50	60	70	80	24	34	40	48	45	55
Перепад участка местности по трассе канала $P, м$	5	12	16	20	6	8	10	12	16	20
Высота $P_k, м$	-	-	-	-	-	-	-	-	7	4
Уклон носка консоли	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,05
Тип гасителя энергии	водобойная стенка		водобойный колодец		водобойная стенка		водобойный колодец		воронка размыва	
Материал сопрягающих сооружений	железобетон									

4.3 Общие положения

Расчет быстротока.

Гидравлический расчет быстротока (рис.4.1) заключается в расчете входной части, лотка быстротока, водобоя и рисбермы. Каждая из перечисленных частей сооружения рассчитывается отдельно. Расчет быстротоков приводится в литературе [1,2,5,8,12].

Расчет консольного сброса.

Гидравлический расчет консольного сброса (рис.4.3) заключается в расчете входной части, лотка быстротока, консоли и воронки размыва. Расчет консольного сброса приводится в литературе [2,5,12].

Расчет многоступенчатого перепада.

Многоступенчатый перепад проектируется колодезного типа (рис.4.4). Гидравлический расчет перепада заключается в расчете входной части, сопрягающей части (ступеней), водобоя и рисбермы. Расчет перепадов колодезного типа приводится в литературе [2,3,4,7].

4.4 Ход расчета

4.4.1 Расчет быстротока

Расчет входной части.

Входная часть быстротока представляет собой водослив и рассчитывается собой водослив с широким порогом или водослив практического профиля прямоугольного сечения, без бокового сжатия.

Расчет входа сводится к определению ширины водосливного фронта. Ширина водосливного фронта быстротока на всем протяжении принимается постоянной и равной ширине лотка b_l и находится по формуле 4.1:

$$b_{\text{вх1}} = \frac{Q}{m \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}} \cdot \quad (4.1)$$

где Q – расчетный расход, заданный по варианту, м³/с;
 m – коэффициент расхода водослива;

$$H_0 = h_0 + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad \text{- напор воды с учетом скорости подхода}$$

на

входе быстротока (V_0 - принимается из первой задачи, м/с, h_0 - нормальная глубина воды в канале).

Расчет лотка быстротока.

Расчет лотка быстротока заключается в расчете и построении в нем кривой свободной поверхности воды.

Поперечное сечение лотка принимаем прямоугольной формы шириной равной ширине входной части. $b_{\text{вх}} = b_l$.

Определяется глубина воды в начале лотка: $h_1 = (0,8-0,9) h_{\text{кр}}$.

Критическая глубина воды на лотке находится из выражения:

$$h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b_l}} \cdot \quad (4.2)$$

Далее определяются размеры лотка быстротока.

Длина быстротока находится по формуле:

$$L_{\bar{\sigma}} = \sqrt{P^2 + L^2}; \quad (4.3)$$

где P - перепад местности по трассе канала, м;

L -длина участка с перепадом местности, м.

Уклон лотка быстротока находится по формуле:

$$i_{л} = \frac{P}{L_{\bar{\sigma}}}, \quad (4.4)$$

где $L_{\bar{\sigma}}$ - длина быстротока, м.

Определяется тип кривой свободной поверхности на быстротоке. Для этого находится нормальная глубина на водоскате h_{01} .

Для определения h_{01} удобно пользоваться графоаналитическим способом. Рассчитывается таблица 4.2.

Таблица 4.2 – Определение расходной характеристики

h , м	$b_{л}$, м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , м ^{0,5} /с	K , м ³ /с	K_0 , м ³ /с
h_1	<i>const</i>	ω_1	χ_1	R_1	C_1	K_1	<i>const</i>
h_n		ω_n	χ_n	R_n	C_n	K_n	

Расходная характеристика K_0 , соответствующая нормальному расходу при данном уклоне вычисляется по формуле:

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_{л}}}. \quad (4.5)$$

По данным таблицы 4.2 строится график $K = f(h)$ (рис.4.2).

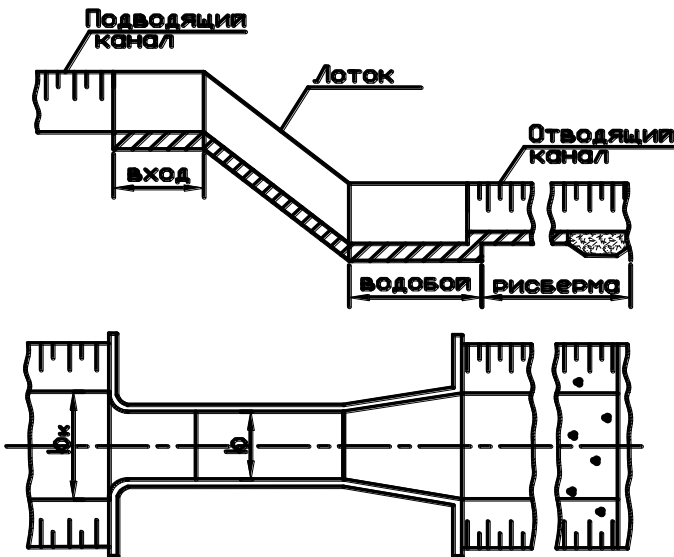
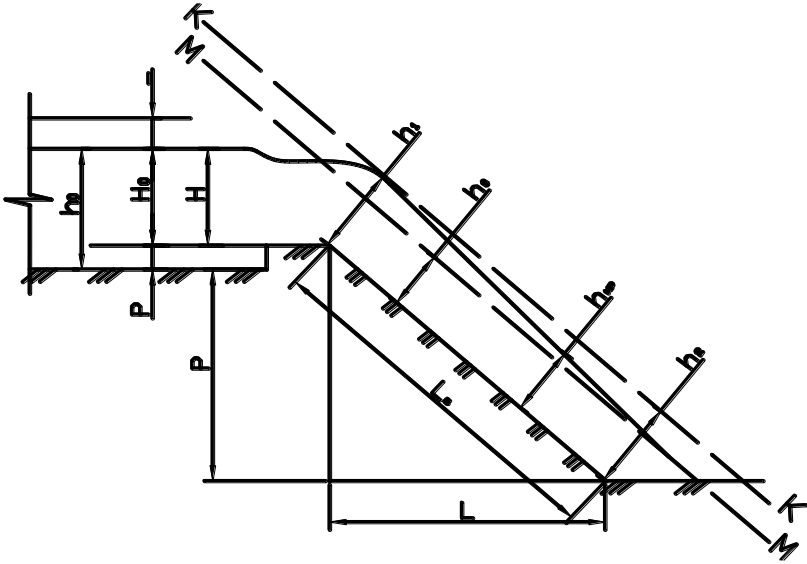


Рисунок 4.1 – Схема быстротока

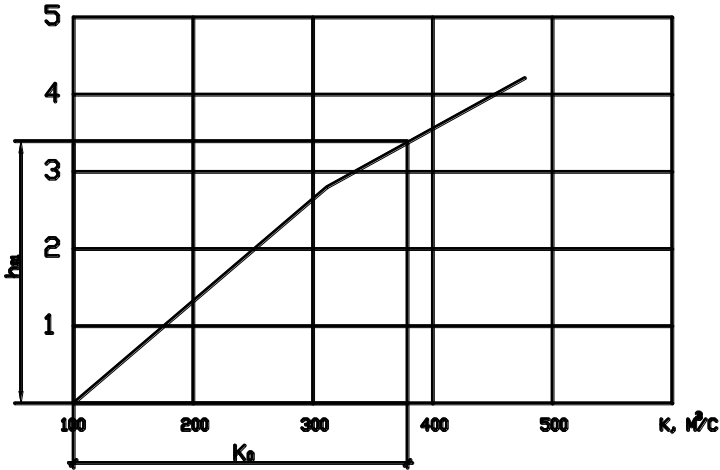


Рисунок 4.2 - График зависимости $K = f(h)$.

По оси абсцисс графика (рис.4.2) откладывается значение K_0 , восстанавливается перпендикуляр к кривой $K = f(h)$. Пересечение кривой и перпендикуляра дает значение искомой (нормальной) глубины h_{01} .

Определяется тип кривой свободной поверхности из выражений (4.6) и (4.7).

$$\left\{ \frac{h_{01} \langle h_1 \rangle h_{кр}}{i_{кр} \langle i_l \rangle} \right\}, \quad (4.6)$$

где $i_{кр}$ - критический уклон в лотке.

$$\left\{ \frac{h_{01} \langle h_1 \rangle h_{кр}}{i_{кр} \langle i_l \rangle} \right\}. \quad (4.7)$$

Критический уклон в лотке равен:

$$i_{кр} = \left(\frac{Q}{\omega_{кр} C_{кр}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_{кр}}, \quad (4.8)$$

где - $\omega_{кр} = b_l h_{кр}$; $\chi_{кр} = b_l + 2h_{кр}$; $C_{кр} = \frac{1}{n_l} \cdot R_{кр}^{1/6}$; $B_{кр} = b_l$.

Если выполняется условие (4.6), то на лотке устанавливается тип кривой свободной поверхности – кривая спада типа b_1 (рис.2.3).

Если выполняется условие (4.7), то на лотке устанавливается тип кривой свободной поверхности – кривая спада типа b_2 (рис.2.4).

Далее по способам Б.А. Бахметева, В.И. Чарномского или Н.Н. Павловского (в зависимости от задания по варианту) рассчитывается кривая свободной поверхности в лотке быстроготока (2.4-2.12).

Расчет гасителя энергии потока в нижнем бьефе сооружения.

Тип гасителя энергии принимается согласно варианта (табл.4.1). Глубина в конце лотка быстроготока принимается за первую сопряженную глубину гидравлического прыжка. Вторая сопряженная глубина определяется из уравнения гидравлического прыжка или по способу Агроскина. Расчет сопряженных глубин приводится в литературе [1,2,5], а гасителей энергии по [1,5,8].

Длина рисбермы принимается равной:

$$L_p = (12 \div 15) \cdot h_0. \quad (4.9)$$

4.4.2 Расчет консольного сброса

Расчет входной части.

Входная часть консольного сброса представляет собой водослив и рассчитывается собой водослив с широким порогом или водослив практического профиля прямоугольного сечения, без бокового сжатия.

Расчет входа сводится к определению ширины водосливногo фронта. Ширина водосливногo фронта сброса на всем протяжении принимается постоянной и равной ширине лотка b_n и находится по формуле 4.10:

$$b_{ex1} = \frac{Q}{m \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}. \quad (4.10)$$

где Q – расчетный расход, заданный по варианту, м³/с;
 m – коэффициент расхода водослива;

$$H_0 = h_0 + \frac{\alpha V_0^2}{2g} - \text{напор воды с учетом скорости подхода на}$$

входе консольного сброса (V_0 - принимается из первой задачи, м/с, h_0 - нормальная глубина воды в канале).

Расчет лотка консольного сброса.

Расчет лотка консольного сброса принимается прямоугольной формы и рассчитывается также как и лоток быстротока, расчет которого приведен в 4.4.1 по формулам (4.2-4.9).

Расчет консоли и дальности отлета струи.

Расчет консоли рассматривается в литературе [12]. Если консоль устраивается шириной, равной ширине лотка консольного сброса, то можно принять глубину в конце консоли равной глубине в начале консоли, т.е.:

$$h_{kk} = h_2, \quad (4.11)$$

где h_{kk} - глубина в конце консоли, м.

Дальность отлета струи без учета аэрации потока и сопротивления воздуха вычисляется по формуле:

$$l_0 = 2H \left(i_k + \sqrt{\frac{2P_k + h_{kk}}{H}} \right), \quad (4.12)$$

где $H = \frac{V^2}{\varphi^2 \cdot 2g}$ - напор воды на консоли, м;

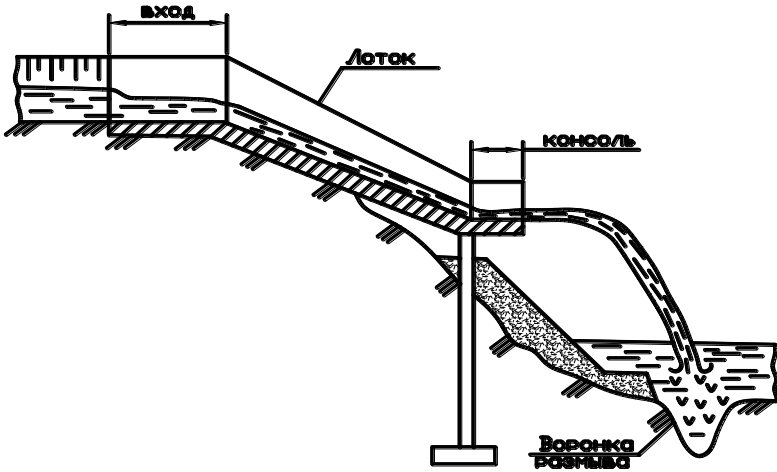
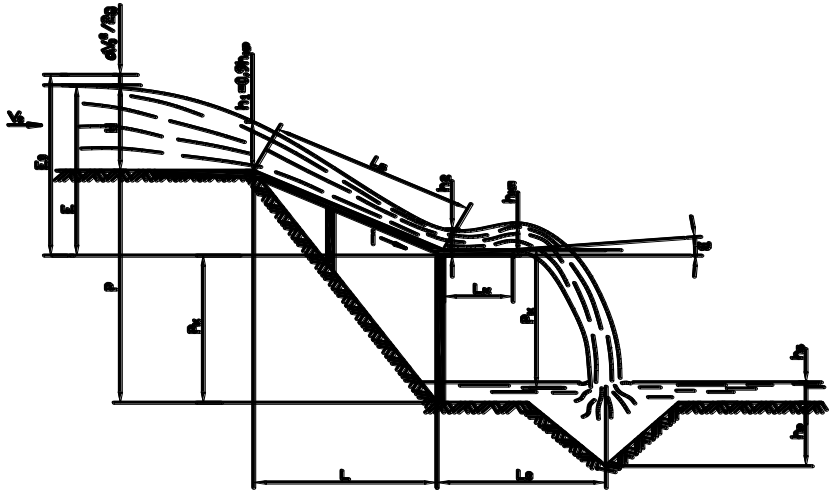


Рисунок 4.3 – Схема консольного сброса

$$V = \frac{Q}{h_{kk} \cdot b_{kk}} - \text{скорость воды на носке консоли, м/с;}$$

φ – скоростной коэффициент, $\varphi=0,95$;

P_k – высота консоли, м;

i_k – уклон носка консоли.

Расчет воронки размыва.

Глубина воронки за консольным сбросом определяется по формуле А. Н. Патрашева:

$$h_p = \sigma_p \left(\frac{Q}{b_{kk}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{Z_0}{d_m} \right)^{0,25} - h_{\sigma} , \quad (4.13)$$

где b_{kk} – ширина поперечного сечения носка консоли, м;

h_{σ} – глубина воды в нижнем бьефе (бытовая глубина), м;

σ_p – коэффициент, принимаемый в зависимости от диаметра зерен грунта (табл.4.5);

Z_0 – напор, определяемый по формуле:

$$Z_0 = P + h + \frac{\alpha V^2}{2g} - h_{\sigma} , \quad (4.14)$$

где d_m – диаметр зерен грунта, мм, принимаемый как диаметр зерен, меньше которых в данном грунте содержится 90%

зерен по массе.

Для несвязных грунтов можно принимать значения d_m по таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения диаметра зерен грунта, d_m , мм

Вид грунта	песок	гравий	щебень
d_m	0,5 - 1	1 - 10	20 - 80

Связные глинистые и суглинистые грунты, по предложению Н. Н. Беляшевского, можно условно привести к несвязным грунтам с эквивалентными диаметрами (табл. 4.4).

Таблица 4.4 – Значения d_m для плотных грунтов

Грунты	d_m , мм
малой плотности	0,7
средней плотности	6,0
плотные	18,0
очень плотные	50,0

Коэффициент σ_p по предложению М. Д. Чертоусова, в зависимости от диаметра зерен грунта имеет следующие значения, приведенные в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения коэффициента σ_p

d_m , мм	0,5 – 4	4 - 8	8 - 12	12 - 15
σ_p , с ^{0,5}	4,25 – 4,10	4,1 – 3,75	3,75 – 3,05	3,05 – 2,25

Диаметр воронки размыва D_p при приближенном заложении ее откосов 1:1 определяется из зависимости:

$$D_p = 2h_p. \quad (4.15)$$

Расчет воронки размыва приводится в литературе [2,3,12].

4.4.3 Расчет многоступенчатого перепада

Расчет входной части.

Назначение входной части перепада – пропустить расчетный расход при заданных условиях подводящего канала.

При постоянном расчетном расходе входная часть рассчитывается как водослив с широким порогом или как водослив практического профиля (см.п.п. 4.4.1 и 4.4.2).

Расчет сопрягающей части.

Составляется расчетная схема перепада с обозначением всех глубин и геометрических размеров (рис.4.4).

Расчет сопрягающей части заключается в определении числа ступеней, высоты стенок падения, длины ступеней и высоты водобойных стенок на ступенях, обеспечивающих затопление гидравлического прыжка на каждой ступени.

Ширина ступеней принимается равной ширине входной части. Количество ступеней n рекомендуется определять из условия, при котором не образуется волнового движения на ступенях перепада:

$$n \leq \frac{P}{1,25 \cdot h_{кр}}, \quad (4.16)$$

где P – перепад участка местности, где проектируется перепад (табл.4.1);

$h_{кр}$ – критическая глубина потока на ступенях перепада (определяется из формулы 4.2).

Если на сопрягающей части перепада более трех ступеней, то рассчитываются первая, вторая и последняя ступени перепада. Третья и последующие ступени перепада принимаются равной второй ступени перепада. На трехступенчатом перепаде рассчитываются все ступени.

Последняя ступень перепада обеспечивает сопряжение потока с нижним бьефом отводящего канала. Поэтому последняя ступень рассчитывается как гаситель энергии (п.п.4.4.1).

При расчете ступеней перепада находится длина ступени и высота водобойной стенки (рис.4.4).

Длина ступени находится по формуле:

$$l_{ст} = l_{отл.} + l_{п.п.} + \delta, \quad (4.17)$$

где $l_{отл.}$ – дальность отлета струи, м;

$l_{п.п.}$ – длина подпертого гидравлического прыжка, м;

δ – толщина водосливной части, м; принимается конструктивно (0,2-0,3) м.

Высота водобойной стенки находится из формулы:

$$P = \eta_3 \cdot h_c'' - H, \quad (4.18)$$

где η_3 – коэффициент запаса, принимается (5-10)%;

h_c'' – вторая сопряженная глубина на ступени, м;

H – геометрический напор на водобойной стенке, м.

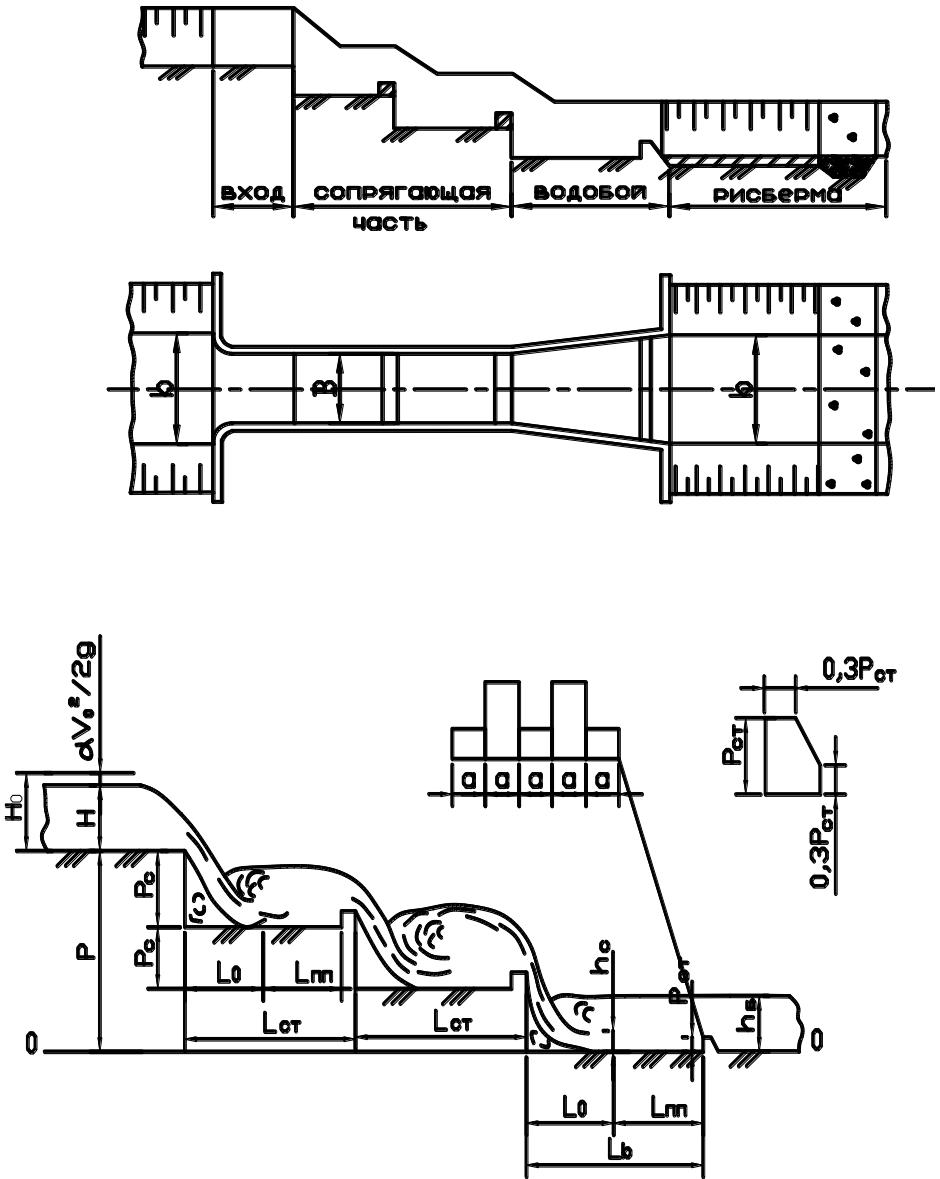


Рисунок 4.4 – Схема многоступенчатого перепада

Длина подпертого гидравлического прыжка вычисляется по формуле:

$$l_{n.n.} = 0,8 \cdot 2,5(1,9h_c'' - h_c'), \quad (4.19)$$

где h_c' - первая сопряженная глубина на ступени, м.

В месте падения струи на ступень перепада первая сопряженная глубина (сжатая глубина) h_c' и с ней сопряженная глубина h_c'' находятся методом Агроскина по функции:

$$\Phi_{(\tau)} = \frac{q}{\varphi \cdot E^{3/2}}, \quad (4.20)$$

где $q = \frac{Q}{b_{cm}}$ - удельный расход, м²/с;

φ - коэффициент скорости, принимается равным 0,85;

E - удельная энергия потока на ступени перепада, м.

Удельная энергия потока находится по формуле:

$$E = P + P_{ex} + H_0, \quad (4.21)$$

где P - высота перепада, м;

H_0 - напор над водобойной стенкой (или на входе, если рассчитывается первая ступень), м;

P_{ex} - высота входа, принимается (0,3-0,5) м.

По функции $\Phi_{(\tau)}$ по справочным таблицам (приложение 4) находятся τ_c' и τ_c'' .

Определяются сопряженные глубины по формулам:

$$h_c' = E \cdot \tau_c' \quad (4.22)$$

$$h_c'' = E \cdot \tau_c'' \quad (4.23)$$

Находится дальность отлета струи:

$$l_{oml} = V \cdot \sqrt{\frac{2y}{g}}, \quad (4.24)$$

где V – скорость на пороге водослива, м/с, равная $V = \frac{q}{h_c^{//}}$;

y – высота падения струи, м, равная $y = P + P_{\text{ex}} + \frac{h_{\text{кр}}}{2}$.

Расчет гасителя энергии.

Если сопряженная глубина $h_c^{//}$ на последней ступени больше бытовой глубины h_6 воды в канале $h_c^{//} > h_6$, то на ступени перепада сопряжение с нижним бьефом образуется в виде отогнанного гидравлического прыжка. Для обеспечения надвинутого гидравлического прыжка на ступени необходимо спроектировать гаситель энергии за перепадом в виде водобойной стенки или водобойного колодца (см. табл.4.1).

Если же сопряженная глубина $h_c^{//}$ меньше бытовой глубины h_6 воды в канале $h_c^{//} < h_6$, то на ступени перепада сопряжение с нижним бьефом образуется в виде надвинутого гидравлического прыжка и дополнительного гасителя энергии не требуется.

Расчет гасителя энергии приведен в п.4.4.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев П. Г. и др. Справочник по гидравлическим расчетам. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.
2. Степанов П. М. и др. Справочник по гидравлике для мелиораторов/ П.М. Степанов, И.Х. Овчаренко, Ю.А. Скобельцин. – М.: Колос, 1984. – 207 с.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2004. – 656 с.
- 4.СНиП 2.06.03-85 Мелиоративные системы и сооружения/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, Госстроя СССР, 1986. – 60 с.
5. Сборник задач по гидравлике./Под ред. В.А. Большакова. – Киев: Вища Школа, 1979. – 336 с.
6. Богомолов Н.М. и др. Примеры гидравлических расчетов. – М.: Транспорт, 1977. – 526 с.
7. Кузнецов Е.В. «Гидравлический расчет каналов и гидротехнических сооружений на них». Краснодар: КГАУ, 2003. – 34 с.
8. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
9. ГОСТ 2.302-68 ЕСКД. Масштабы. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, Госстроя СССР, 1968. – 15 с.
10. ГОСТ 2.307-68 ЕСКД. Нанесение размеров и предельные отклонения. Госстрой СССР. – М.: ЦИТП, Госстроя СССР, 1968. – 20 с.
11. ГОСТ 21.101-97 СПДС. Основные требования к проектной рабочей документации. Госстрой РФ. – М.: ЦИТП, Госстроя РФ, 1997. – 60 с.
12. Богомолов Н.М., Михайлов И.К. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

Приложение 1 - Значения функций Б.А. Бахметева $\varphi(\eta)$ для русел с прямым
уклоном дна ($i>0$)

При гидравлическом показателе $\chi=2,00$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	1,020	0,980	2,297	1,20	1,199	1,49	0,813
0,05	0,050	0,78	1,045	0,985	2,442	1,21	1,177	1,50	0,805
0,10	0,100	0,79	1,071	0,990	2,646	1,22	1,156	1,55	0,767
0,15	0,151	0,80	1,098	0,995	2,000	1,23	1,136	1,60	0,733
0,20	0,203	0,81	1,127	1,000	∞	1,24	1,117	1,65	0,703
0,25	0,309	0,82	1,156	1,005	2,997	1,25	1,098	1,70	0,675
0,30	0,309	0,83	1,178	1,010	2,652	1,26	1,081	1,75	0,650
0,35	0,365	0,84	1,221	1,015	2,415	1,27	1,065	1,80	0,626
0,40	0,424	0,85	1,256	1,020	2,307	1,28	1,049	1,85	0,605
0,45	0,485	0,86	1,293	1,025	2,197	1,29	1,033	1,90	0,585
0,50	0,549	0,87	1,333	1,030	2,117	1,30	1,018	1,95	0,566
0,55	0,619	0,88	1,375	1,035	2,031	1,31	1,004	2,0	0,549
0,60	0,693	0,89	1,421	1,040	1,966	1,32	0,990	2,1	0,518
0,61	0,709	0,90	1,472	1,045	1,908	1,33	0,977	2,2	0,490
0,62	0,727	0,905	1,499	1,05	1,857	1,34	0,964	2,3	0,466
0,63	0,741	0,910	1,527	1,06	1,768	1,35	0,952	2,4	0,444
0,64	0,758	0,915	1,557	1,07	1,693	1,36	0,940	2,5	0,424
0,65	0,775	0,920	1,589	1,08	1,629	1,37	0,928	2,6	0,405
0,66	0,792	0,925	1,622	1,09	1,573	1,38	0,917	2,7	0,389
0,67	0,810	0,930	1,658	1,10	1,522	1,39	0,906	2,8	0,374
0,68	0,829	0,935	1,696	1,11	1,477	1,40	0,896	2,9	0,360
0,69	0,848	0,940	1,738	1,12	1,436	1,41	0,886	3,0	0,346
0,70	0,867	0,945	1,782	1,13	1,398	1,42	0,876	3,5	0,294
0,71	0,887	0,950	1,831	1,14	1,363	1,43	0,866	4,0	0,255
0,72	0,907	0,955	1,885	1,15	1,331	1,44	0,856	4,5	0,226
0,73	0,928	0,960	1,945	1,16	1,301	1,45	0,847	5,0	0,203
0,74	0,950	0,965	2,013	1,17	1,273	1,46	0,838	6,0	0,168
0,75	0,972	0,970	2,092	1,18	1,247	1,47	0,829	8,0	0,126
0,76	0,996	0,975	2,184	1,19	1,222	1,48	0,821	10,0	0,100

При гидравлическом показателе $x=2,50$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,940	0,980	1,985	1,20	0,719	1,49	0,432
0,05	0,050	0,78	0,961	0,985	2,100	1,21	0,702	1,50	0,426
0,10	0,100	0,79	0,983	0,990	2,264	1,22	0,686	1,55	0,399
0,15	0,150	0,80	1,006	0,995	2,544	1,23	0,671	1,60	0,376
0,20	0,201	0,81	1,030	1,000	∞	1,24	0,657	1,65	0,355
0,25	0,252	0,82	1,055	1,005	2,139	1,25	0,643	1,70	0,336
0,30	0,304	0,83	1,081	1,010	1,865	1,26	0,630	1,75	0,318
0,35	0,357	0,84	1,109	1,015	1,704	1,27	0,618	1,80	0,303
0,40	0,411	0,85	1,138	1,020	1,591	1,28	0,606	1,85	0,289
0,45	0,468	0,86	1,169	1,025	1,504	1,29	0,594	1,90	0,276
0,50	0,527	0,87	1,202	1,030	1,432	1,30	0,582	1,95	0,264
0,55	0,590.	0,88	1,237	1,035	1,372	1,31	0,571	2,0	0,253
0,60	0,657	0,89	1,275	1,040	1,320	1,32	0,561	2,1	0,233
0,61	0,671	0,90	1,316	1,045	1,274	1,33	0,551	2,2	0,216
0,62	0,685	0,905	1,339	1,050	1,234	1,34	0,542	2,3	0,201
0,63	0,699	0,910	1,362	1,06	1,164	1,35	0,533	2,4	0,188
0,64	0,714	0,915	1,386	1,07	1,105	1,36	0,524	2,5	0,176
0,65	0,729	0,920	1,412	1,08	1,053	1,37	0,516	2,6	0,165
0,66	0,744	0,925	1,440	1,09	1,009	1,38	0,508	2,7	0,155
0,67	0,760	0,930	1,469	1,10	0,969	1,39	0,500	2,8	0,146
0,68	0,776	0,935	1,500	1,11	0,933	1,40	0,492	2,9	0,138
0,69	0,792	0,940	1,534	1,12	0,901	1,41	0,484	3,0	0,131
0,70	0,809	0,945	1,570	1,13	0,872	1,42	0,477	3,5	0,103
0,71	0,826	0,950	1,610	1,14	0,846	1,43	0,470	4,0	0,084
0,72	0,844	0,955	1,654	1,15	0,821	1,44	0,463	4,5	0,070
0,73	0,862	0,960	1,702	1,16	0,798	1,45	0,456	5,0	0,060
0,74	0,881	0,965	1,758	1,17	0,776	1,46	0,450	6,0	0,046
0,75	0,900	0,970	1,820	1,18	0,756	1,47	0,444	8,0	0,029
0,76	0,920	0,975	1,896	1,19	0,737	1,48	0,438	10,0	0,021

При гидравлическом показателе $\alpha=3,00$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
--------	-----------------	--------	-----------------	--------	-----------------	--------	-----------------	--------	-----------------

0	0	0,40	0,407	0,64	0,689	0,72	0,807	0,80	0,950
0,05	0,050	0,45	0,461	0,65	0,703	0,73	0,823	0,81	0,971
0,10	0,100	0,50	0,517	0,66	0,717	0,74	0,840	0,82	0,993
0,15	0,150	0,55	0,575	0,67	0,731	0,75	0,857	0,83	1,016
0,20	0,200	0,60	0,637	0,68	0,746	0,76	0,874	0,84	1,040
0,25	0,251	0,61	0,650	0,69	0,761	0,77	0,892	0,85	1,065
0,30	0,302	0,62	0,663	0,70	0,776	0,78	0,911	0,86	1,092
0,35	0,354	0,63	0,676	0,71	0,791	0,79	0,930	0,87	1,120
0,88	1,151	0,995	2,250	1,15	0,561	1,36	0,328	1,85	0,156
0,89	1,183	1,000	∞	1,16	0,542	1,37	0,322	1,90	0,147
0,90	1,218	1,005	1,647	1,17	0,525	1,38	0,316	1,95	0,139
0,905	1,237	1,010	1,419	1,18	0,510	1,39	0,310	2,0	0,132
0,910	1,257	1,015	1,291	1,19	0,495	1,40	0,304	2,1	0,119
0,915	1,278	1,020	1,193	1,20	0,480	1,41	0,298	2,2	0,108
0,920	1,300	1,025	1,119	1,21	0,467	1,42	0,293	2,3	0,098
0,925	1,323	1,030	1,061	1,22	0,454	1,43	0,288	2,4	0,090
0,930	1,348	1,035	1,010	1,23	0,442	1,44	0,283	2,5	0,082
0,935	1,374	1,040	0,967	1,24	0,431	1,45	0,278	2,6	0,076
0,940	1,403	1,045	0,929	1,25	0,420	1,46	0,273	2,7	0,070
0,945	1,434	1,05	0,896	1,26	0,410	1,47	0,268	2,8	0,065
0,950	1,467	1,06	0,838	1,27	0,400	1,48	0,263	2,9	0,060
0,955	1,504	1,07	0,790	1,28	0,391	1,49	0,259	3,0	0,056
0,960	1,545	1,08	0,749	1,29	0,382	1,50	0,255	3,5	0,041
0,965	1,592	1,09	0,713	1,30	0,373	1,55	0,235	4,0	0,031
0,970	1,645	1,10	0,680	1,31	0,365	1,60	0,218	4,5	0,025
0,975	1,708	1,11	0,652	1,32	0,357	1,65	0,203	5,0	0,020
0,980	1,784	1,12	0,626	1,33	0,349	1,70	0,189	6,0	0,014
0,985	1,882	1,13	0,602	1,34	0,341	1,75	0,177	8,0	0,009
0,990	2,019	1,14	0,581	1,35	0,334	1,80	0,166	10,0	0,005

При гидравлическом показателе $\alpha=3,10$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,885	0,980	1,750	1,20	0,445	1,49	0,236
0,05	0,050	0,78	0,903	0,985	1,845	1,21	0,432	1,50	0,232
0,10	0,100	0,79	0,922	0,990	1,977	1,22	0,420	1,55	0,213
0,15	0,150	0,80	0,942	0,995	2,203	1,23	0,409	1,60	0,197
0,20	0,200	0,81	0,962	1,000	∞	1,24	0,399	1,65	0,183
0,25	0,250	0,82	0,983	1,005	1,572	1,25	0,389	1,70	0,170
0,30	0,301	0,83	1,005	1,010	1,350	1,26	0,379	1,75	0,159
0,35	0,353	0,84	1,029	1,015	1,221	1,27	0,370	1,80	0,148
0,40	0,406	0,85	1,054	1,020	1,130	1,28	0,362	1,85	0,139
0,45	0,460	0,86	1,080	1,025	1,060	1,29	0,354	1,90	0,130
0,50	0,515	0,87	1,108	1,030	1,004	1,30	0,346	1,95	0,123
0,55	0,573	0,88	1,138	1,035	0,956	1,31	0,338	2,0	0,117
0,60	0,634	0,89	1,169	1,040	0,914	1,32	0,330	2,1	0,104
0,61	0,647	0,90	1,204	1,045	0,876	1,33	0,323	2,2	0,04
0,62	0,660	0,905	1,222	1,050	0,844	1,34	0,316	2,3	0,085
0,63	0,673	0,910	1,241	1,06	0,789	1,35	0,309	2,4	0,077
0,64	0,686	0,915	1,261	1,07	0,743	1,36	0,303	2,5	0,070
0,65	0,700	0,920	1,282	1,08	0,704	1,37	0,297	2,6	0,065
0,66	0,714	0,925	1,305	1,09	0,669	1,38	0,291	2,7	0,060
0,67	0,728	0,930	1,329	1,10	0,638	1,39	0,285	2,8	0,056
0,68	0,742	0,935	1,335	1,11	0,610	1,40	0,280	2,9	0,052
0,69	0,756	0,940	1,383	1,12	0,584	1,41	0,275	3,0	0,048
0,70	0,771	0,945	1,412	1,13	0,562	1,42	0,270	3,5	0,034
0,71	0,786	0,950	1,443	1,14	0,542	1,43	0,265	4,0	0,026
0,72	0,801	0,955	1,479	1,15	0,523	1,44	0,260	4,5	0,021
0,73	0,817	0,960	1,519	1,16	0,505	1,45	0,255	5,0	0,016
0,74	0,834	0,965	1,564	1,17	0,489	1,46	0,250	6,0	0,011
0,75	0,851	0,970	1,616	1,18	0,474	1,47	0,245	8,0	0,006
0,76	0,868	0,975	1,677	1,19	0,459	1,48	0,240	10,0	0,004

При гидравлическом показателе $\alpha=3,20$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,60	0,631	0,72	0,793	0,84	1,019	0,930	1,311
0,05	0,050	0,61	0,644	0,73	0,812	0,85	1,043	0,935	1,366
0,10	0,100	0,62	0,657	0,74	0,828	0,86	1,068	0,940	1,363
0,15	0,150	0,63	0,670	0,75	0,844	0,87	1,095	0,945	1,392
0,20	0,200	0,64	0,683	0,76	0,861	0,88	1,124	0,950	1,423
0,25	0,250	0,65	0,696	0,77	0,878	0,89	1,155	0,955	1,458
0,30	0,301	0,66	0,709	0,78'	0,896	0,90	1,189	0,960	1,497
0,35	0,353	0,67	0,723	0,79	0,915	0,905	1,206	0,965	1,540
0,40.	0,405	0,68	0,737	0,80	0,934	0,910	1,225	0,970	1,590
0,45	0,459	0,69	0,751	0,81	0,954	0,915	1,245	0,975	1,649
0,50	0,514	0,70	0,766	0,82	0,975	0,920	1,266	0,980	1,720
0,55	0,571	0,71	0,781	0,83	0,986	0,925	1,283	0,985	1,812
0,990	1,940	1,10	0,601	1,27	0,343	1,44	0,236	2,1	0,092
0,995	2,159	1,11	0,575	1,28	0,335	1,45	0,231	2,2	0,083
1,000	∞	1,12	0,551	1,29	0,327	1,46	0,227	2,3	0,075
1,005	1,506	1,13	0,529	1,30	0,319	1,47	0,223	2,4	0,068
1,010	1,291	1,14	0,509	1,31	0,311	1,48	0,219	2,5	0,062
1,015	1,166	1,15	0,490	1,32	0,304	1,49	0,215	2,6	0,057
1,020	1,079	1,16	0,473	1,33	0,297	1,50	0,211	2,7	0,052
1,025	1,011	1,17	0,458	1,34	0,290	1,55	0,194	2,8	0,048
1,030	0,955	1,18	0,443	1,35	0,284	1,60	0,179	2,9	0,044
1,035	0,910	1,19	0,429	1,36	0,278	1,65	0,166	3,0	0,041
1,040	0,858	1,20	0,416	1,37	0,272	1,70	0,154	3,5	0,029
1,045	0,831	1,21	0,403	1,38	0,266	1,75	0,143	4,0	0,022
1,050	0,801	1,22	0,392	1,39	0,261	1,80	0,133	4,5	0,017
1,060	0,778	1,23	0,381	1,40	0,256	1,85	0,126	5,0	0,013
1,07	0,703	1,24	0,371	1,41	0,251	1,90	0,117	6,0	0,009
1,08	0,665	1,25	0,361	1,42	0,246	1,95	0,110	8,0	0,005
1,09	0,631	1,26	0,352	1,43	0,241	2,0	0,104	10,0	0,0025

При гидравлическом показателе $\alpha=3,25$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,78	0,892	0,990	1,922	1,23	0,368	1,65	0,157
0,05	0,050	0,79	0,911	0,995	2,137	1,24	0,358	1,70	0,145
0,10	0,100	0,80	0,930	1,000	∞	1,25	0,348	1,75	0,135
0,15	0,150	0,81	0,949	1,005	1,477	1,26	0,339	1,80	0,126
0,20	0,200	0,82	0,970	1,010	1,265	1,27	0,330	1,85	0,118
0,25	0,250	0,83	0,992	1,015	1,140	1,28	0,322	1,90	0,111
0,30	0,301	0,84	1,014	1,020	1,053	1,29	0,314	1,95	0,104
0,35	0,352	0,85	1,038	1,025	0,986	1,30	0,306	2,0	0,098
0,40	0,405	0,86	1,063	1,030	0,932	1,31	0,299	2,1	0,087
0,45	0,458	0,87	1,090	1,035	0,886	1,32	0,292	2,2	0,078
0,50	0,513	0,88	1,118	1,040	0,846	1,33	0,285	2,3	0,070
0,55	0,570	0,89	1,148	1,045	0,811	1,34	0,279	2,4	0,064
0,60,	0,630	0,90	1,181	1,05	0,780	1,35	0,273	2,5	0,058
0,61	0,642	0,905	1,199	1,06	0,727	1,36	0,267	2,6	0,053
0,62	0,655	0,910	1,218	1,07	0,683	1,37	0,261	2,7	0,048
0,63	0,668	0,915	1,237	1,08	0,646	1,38	0,255	2,8	0,044
0,64	0,681	0,920	1,257	1,09	0,613	1,39	0,250	2,9	0,041
0,65	0,694	0,925	1,279	1,10	0,584	1,40	0,245	3,0	0,038
0,66	0,707	0,930	1,302	1,11	0,558	1,41	0,240	3,5	0,027
0,67	0,721	0,935	1,327	1,12	0,534	1,42	0,235	4,0	0,020
0,68	0,735	0,940	1,354	1,13	0,512	1,43	0,231	4,5	0,015
0,69	0,749	0,945	1,382	1,14	0,493	1,44	0,226	5,0	0,012
0,70	0,763	0,950	1,413	1,15	0,476	1,45	0,222	6,0	0,008
0,71	0,778	0,955	1,447	1,16	0,458	1,46	0,218	7,0	0,005
0,72	0,793	0,960	1,485	1,17	0,443	1,47	0,214	8,0	0,004
0,73	0,808	0,965	1,528	1,18	0,428	1,48	0,210	9,0	0,003
0,74	0,824	0,970	1,577	1,19	0,414	1,49	0,206	10,0	0,002
0,75	0,841	0,975	1,634	1,20	0,401	1,50	0,202		
0,76	0,857	0,980	1,705	1,21	0,389	1,55	0,185		
0,77	0,874	0,985	1,795	1,22	0,378	1,6	0,170		

При гидравлическом показателе $\alpha=3,30$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,64	0,679	0,80	0,926	0,930	1,295	1,010	1,237
0,50	0,050	0,65	0,692	0,81	0,945	0,935	1,319	1,015	1,115
0,10	0,100	0,66	0,705	0,82	0,965	0,940	1,345	1,020	1,029
0,15	0,150	0,67	0,719	0,83	0,986	0,945	1,374	1,025	0,964
0,20	0,200	0,68	0,733	0,84	1,008	0,950	1,404	1,030	0,910
0,25	0,250	0,69	0,747	0,85	1,032	0,955	1,438	1,035	0,866
0,30	0,301	0,70	0,761	0,86	1,056	0,960	1,476	1,040	0,826
0,35	0,352	0,71	0,776	0,87	1,082	0,965	1,518	1,045	0,791
0,40	0,404	0,72	0,791	0,88	1,111	0,970	1,566	1,050	0,762
0,45	0,458	0,73	0,806	0,89	1,141	0,975	1,623	1,060	0,710
0,50	0,512	0,74	0,822	0,90	1,174	0,980	1,692	1,07	0,666
0,55	0,569	0,75	0,838	0,905	1,191	0,985	1,782	1,08	0,628
0,60	0,629	0,76	0,854	0,910	1,209	0,990	1,906	1,09	0,596
0,61	0,641	0,77	0,871	0,915	1,229	0,995	2,118	1,10	0,568
0,62	0,653	0,78	0,889	0,920	1,250	1,000	∞	1,11	0,542
0,63	0,666	0,79	0,907	0,925	1,272	1,005	1,445	1,12	0,519
1,13	0,498	1,26	0,326	1,39	0,242	1,60	0,164	2,5	0,054
1,14	0,479	1,27	0,318	1,40	0,237	1,65	0,151	2,6	0,049
1,15	0,461	1,28	0,310	1,41	0,232	1,70	0,139	2,7	0,045
1,16	0,445	1,29	0,302	1,42	0,227	1,75	0,129	2,8	0,041
1,17	0,430	1,30	0,295	1,43	0,222	1,80	0,120	2,9	0,038
1,18	0,416	1,31	0,288	1,44	0,218	1,85	0,112	3,0	0,035
1,19	0,402	1,32	0,281	1,45	0,214	1,90	0,105	3,5	0,025
1,20	0,389	1,33	0,275	1,46	0,210	1,95	0,098	4,0	0,018
1,21	0,376	1,34	0,269	1,47	0,206	2,0	0,092	4,5	0,014
1,22	0,365	1,35	0,263	1,48	0,202	2,1	0,082	5,0	0,0107
1,23	0,354	1,36	0,257	1,49	0,198	2,2	0,073	6,0	0,0070
1,24	0,344	1,37	0,252	1,50	0,194	2,3	0,066	8,0	0,0035
1,25	0,335	1,38	0,247	1,55	0,178	2,4	0,059	10,0	0,0018

При гидравлическом показателе $\alpha=3,40$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,866	0,980	1,664	1,20	0,363	1,49	0,180
0,05	0,050	0,78	0,884	0,985	1,752	1,21	0,351	1,50	0,177
0,10	0,100	0,79	0,902	0,990	1,873	1,22	0,341	1,55	0,161
0,15	0,150	0,80	0,921	0,995	2,079	1,23	0,331	1,60	0,148
0,20	0,200	0,81	0,940	1,000	∞	1,24	0,321	1,65	0,137
0,25	0,250	0,82	0,960	1,005	1,384	1,25	0,312	1,70	0,125
0,30	0,301	0,83	0,980	1,010	1,184	1,26	0,304	1,75	0,116
0,35	0,352	0,84	1,001	1,015	1,065	1,27	0,296	1,80	0,107
0,40	0,404	0,85	1,024	1,020	0,982	1,28	0,288	1,85	0,100
0,45	0,457	0,86	1,048	1,025	0,919	1,29	0,281	1,90	0,094
0,50	0,511	0,87	1,074	1,030	0,866	1,30	0,274	1,95	0,088
0,55	0,567	0,88	1,102	1,035	0,823	1,31	0,267	2,0	0,082
0,60	0,627	0,89	1,132	1,040	0,785	1,32	0,260	2,1	0,073
0,61	0,639	0,90	1,163	1,045	0,752	1,33	0,254	2,2	0,065
0,62	0,651	0,905	1,180	1,05	0,723	1,34	0,248	2,3	0,058
0,63	0,664	0,910	1,198	1,06	0,672	1,35	0,242	2,4	0,052
0,64	0,677	0,915	1,217	1,07	0,630	1,36	0,236	2,5	0,047
0,65	0,690	0,920	1,237	1,08	0,595	1,37	0,231	2,6	0,043
0,66	0,703	0,925	1,258	1,09	0,563	1,38	0,226	2,7	0,039
0,67	0,716	0,930	1,280	1,10	0,536	1,39	0,221	2,8	0,036
0,68	0,729	0,935	1,303	1,11	0,511	1,40	0,216	2,9	0,033
0,69	0,743	0,940	1,328	1,12	0,488	1,41	0,211	3,0	0,030
0,70	0,757	0,945	1,356	1,13	0,468	1,42	0,207	3,5	0,021
0,71	0,772	0,950	1,385	1,14	0,449	1,43	0,203	4,0	0,015
0,72	0,787	0,955	1,418	1,15	0,432	1,44	0,199	4,5	0,011
0,73	0,802	0,930	1,455	1,16	0,416	1,45	0,195	5,0	0,0086
0,74	0,817	0,965	1,496	1,17	0,402	1,46	0,191	6,0	0,0052
0,75	0,833	0,970	1,542	1,18	0,388	1,47	0,187	8,0	0,0027
0,76	0,849	0,975	1,597	1,19	0,375	1,48	0,183	10,0	0,0010

При гидравлическом показателе $x=3,50$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,64	0,674	0,80	0,913	0,930	1,265	1,010	1,138
0,05	0,050	0,65	0,687	0,81	0,932	0,935	1,288	1,015	1,022
0,10	0,100	0,66	0,700	0,82	0,952	0,940	1,313	1,020	0,940
0,15	0,150	0,67	0,713	0,83	0,972	0,945	1,339	1,025	0,879
0,20	0,200	0,68	0,726	0,84	0,993	0,950	1,368	1,030	0,827
0,25	0,250	0,69	0,740	0,85	1,016	0,955	1,400	1,035	0,785
0,30	0,301	0,70	0,754	0,86	1,039	0,960	1,446	1,040	0,748
0,35	0,352	0,71	0,768	0,87	1,064	0,965	1,476	1,045	0,716
0,40	0,404	0,72	0,782	0,88	1,091	0,970	1,522	1,050	0,688
0,45	0,456	0,73	0,797	0,89	1,120	0,975	1,576	1,06	0,639
0,50	0,510	0,74	0,812	0,90	1,151	0,980	1,642	1,07	0,599
0,55	0,566	0,75	0,828	0,905	1,168	0,985	1,726	1,08	0,564
0,60	0,625	0,76	0,844	0,910	1,185	0,990	1,844	1,09	0,534
0,61	0,637	0,77	0,860	0,915	1,204	0,995	2,043	1,10	0,507
0,62	0,649	0,78	0,877	0,920	1,223	1,000	∞	1,11	0,488
0,63	0,661	0,79	0,895	0,925	1,243	1,005	1,329	1,12	0,461
1,13	0,442	1,26	0,284	1,39	0,205	1,60	0,135	2,5	0,041
1,14	0,424	1,27	0,276	1,40	0,200	1,65	0,124	2,6	0,037
1,15	0,407	1,28	0,269	1,41	0,196	1,70	0,114	2,7	0,034
1,16	0,391	1,29	0,262	1,42	0,192	1,75	0,105	2,8	0,031
1,17	0,377	1,30	0,255	1,43	0,188	1,80	0,097	2,9	0,028
1,18	6,364	1,31	0,248	1,44	0,184	1,85	0,090	3,0	0,026
1,19	0,352	1,32	0,242	1,45	0,180	1,90	0,084	3,5	0,018
1,20	0,341	1,33	0,236	1,46	0,176	1,95	0,079	4,0	0,012
1,21	0,330	1,34	0,230	1,47	0,173	2,00	0,074	4,5	0,009
1,22	0,320	1,35	0,225	1,48	0,169	2,1	0,065	5,0	0,007
1,23	0,310	1,36	0,219	1,49	0,166	2,2	0,057	6,0	0,004
1,24	0,301	1,37	0,214	1,50	0,163	2,3	0,051	8,0	0,002
1,25	0,292	1,38	0,209	1,55	0,148	2,4	0,046	10,0	0,001

При гидравлическом показателе $\alpha=3,60$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,855	0,980	1,1616	1,20	0,320	1,49	0,153
0,05	0,050	0,78	0,872	0,985	1,699	1,21	0,310	1,50	0,150
0,10	0,150	0,79	0,889	0,990	1,814	1,22	0,300	1,55	0,135
0,15	0,100	0,80	0,907	0,995	2,008	1,23	0,290	1,60	0,123
0,20	0,200	0,81	0,926	1,000	∞	1,24	0,281	1,65	0,113
0,25	0,250	0,82	0,945	1,005	1,279	1,25	0,273	1,70	0,103
0,30	0,3001	0,83	0,965	1,010	1,089	1,26	0,265	1,75	0,095
0,35	0,351	0,84	0,985	1,015	0,978	1,27	0,257	1,80	0,088
0,40	0,403	0,85	1,007	1,020	0,900	1,28	0,250	1,85	0,082
0,45	0,456	0,86	1,030	1,025	0,841	1,29	0,243	1,90	0,076
0,50	0,509	0,87	1,055	1,030	0,790	1,30	0,237	1,95	0,071
0,55	0,565	0,88	1,082	1,035	0,749	1,31	0,231	2,0	0,066
0,60	0,623	0,89	1,111	1,040	0,714	1,32	0,225	2,1	0,058
0,61	0,635	0,90	1,140	1,045	0,684	1,33	0,219	2,2	0,051
0,62	0,647	0,905	1,156	1,050	0,656	1,34	0,214	2,3	0,045
0,63	0,659	0,910	1,173	1,06	0,609	1,35	0,209	2,4	0,040
0,64	0,671	0,915	1,191	1,07	0,569	1,36	0,204	2,5	0,036
0,65	0,684	0,920	1,210	1,08	0,535	1,37	0,199	2,6	0,033
0,66	0,697	0,925	1,230	1,09	0,505	1,38	0,194	2,7	0,030
0,67	0,710	0,930	1,251	1,10	0,480	1,39	0,189	2,8	0,027
0,68	0,723	0,935	1,273	1,11	0,457	1,40	0,185	2,9	0,024
0,69	0,737	0,940	1,297	1,12	0,436	1,41	0,181	3,0	0,0224
0,70	0,751	0,945	1,324	1,13	0,418	1,42	0,177	3,5	0,0150
0,71	0,765	0,950	1,352	1,14	0,400	1,43	0,173	4,0	0,0100
0,72	0,779	0,955	1,383	1,15	0,384	1,44	0,169	4,5	0,0075
0,73	0,793	0,960	1,419	1,16	0,369	1,45	0,165	5,0	0,0057
0,74	0,807	0,965	1,456	1,17	0,356	1,46	0,162	6,0	0,0030
0,75	0,822	0,970	1,501	1,18	0,343	1,47	0,159	8,0	0,0016
0,76	0,838	0,975	1,553	1,19	0,331	1,48	0,156	10,0	0,0008

При гидравлическом показателе $x=3,70$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,66	0,695	0,84	0,979	0,960	1,400	1,050	0,625
0,05	0,050	0,67	0,708	0,85	1,000	0,965	1,437	1,060	0,580
0,10	0,100	0,68	0,721	0,86	1,022	0,970	0,482	1,070	0,542
0,15	0,150	0,69	0,734	0,87	1,047	0,975	1,533	1,08	0,510
0,20	0,200	0,70	0,748	0,88	1,073	0,980	1,595	1,09	0,481
0,25	0,250	0,71	0,762	0,89	1,101	0,985	1,676	1,10	0,456
0,30	0,300	0,72	0,776	0,90	1,130	0,990	1,788	1,11	0,433
0,35	0,351	0,73	0,790	0,905	1,146	0,995	1,975	1,12	0,412
0,40	0,403	0,74	0,804	0,910	1,163	1,000	∞	1,13	0,394
0,45	0,455	0,75	0,819	0,915	1,181	1,005	1,231	1,14	0,377
0,50	0,508	0,76	0,834	0,920	1,199	1,010	1,046	1,15	0,361
0,55	0,563	0,77	0,850	0,925	1,218	1,015	0,938	1,16	0,348
0,60	0,621	0,78	0,867	0,930	1,238	1,020	0,862	1,17	0,335
0,61	0,633	0,79	0,884	0,935	1,259	1,025	0,806	1,18	0,323
0,62	0,645	0,80	0,902	0,940	1,282	1,030	0,756	1,19	0,312
0,63	0,657	0,81	0,920	0,945	1,308	1,035	0,716	1,20	0,301
0,64	0,659	0,82	0,939	0,950	1,336	1,040	0,682	1,21	0,291
0,65	0,682	0,83	0,959	0,950	1,365	1,040	0,652	1,22	0,281
1,23	0,272	1,34	0,199	1,45	0,153	1,80	0,079	2,7	0,026
1,24	0,264	1,35	0,194	1,46	0,150	1,85	0,073	2,8	0,024
1,25	0,256	1,36	0,189	1,47	0,147	1,90	0,068	2,9	0,022
1,26	0,248	1,37	0,184	1,48	0,144	1,95	0,063	3,0	0,0193
1,27	0,240	1,38	0,180	1,49	0,141	2,0	0,058	3,5	0,0127
1,28	0,233	1,39	0,176	1,50	0,138	2,1	0,051	4,0	0,0086
1,29	0,227	1,40	0,172	1,55	0,124	2,2	0,045	4,5	0,0063
1,30	0,221	1,41	0,168	1,60	0,113	2,3	0,040	5,0	0,0047
1,31	0,215	1,42	0,164	1,65	0,103	2,4	0,036	6,0	0,0028
1,32	0,209	1,43	0,160	1,70	0,094	2,5	0,032	8,0	0,0013
1,33	0,204	1,44	0,156	1,75	0,086	2,6	0,029	10,0	0,0017

При гидравлическом показателе $\alpha=3,75$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,849	0,980	1,586	1,20	0,292	1,49	0,135
0,05	0,050	0,78	0,855	0,985	1,665	1,21	0,282	1,50	0,132
0,10	0,100	0,79	0,882	0,990	1,776	1,22	0,272	1,55	0,119
0,15	0,150	0,80	0,899	0,995	1,965	1,23	0,263	1,60	0,108
0,20	0,200	0,81	0,917	1,000	∞	1,24	0,255	1,65	0,098
0,25	0,250	0,82	0,936	1,005	1,216	1,25	0,247	1,70	0,090
0,30	0,300	0,83	0,955	1,010	1,031	1,26	0,240	1,75	0,083
0,35	0,351	0,84	0,975	1,015	0,922	1,27	0,233	1,80	0,076
0,40	0,403	0,85	0,997	1,020	0,847	1,28	0,226	1,85	0,070
0,45	0,456	0,86	1,020	1,025	0,789	1,29	0,220	1,90	0,065
0,50	0,508	0,87	1,044	1,030	0,742	1,30	0,214	1,95	0,060
0,55	0,563	0,88	1,069	1,035	0,702	1,31	0,208	2,0	0,056
0,60	0,620	0,89	1,096	1,040	0,668	1,32	0,203	2,1	0,048
0,61	0,632	0,90	1,126	1,045	0,638	1,33	0,197	2,2	0,042
0,62	0,644	0,905	1,142	1,050	0,612	1,34	0,192	2,3	0,037
0,63	0,656	0,910	1,158	1,06	0,566	1,35	0,187	2,4	0,033
0,64	0,668	0,915	1,175	1,07	0,529	1,36	0,183	2,5	0,030
0,65	0,681	0,920	1,193	1,08	0,497	1,37	0,178	2,6	0,027
0,66	0,693	0,925	1,212	1,09	0,469	1,38	0,174	2,7	0,024
0,67	0,706	0,930	1,232	1,10	0,444	1,39	0,169	2,8	0,022
0,68	0,719	0,935	1,254	1,11	0,422	1,40	0,165	2,9	0,020
0,69	0,732	0,940	1,278	1,12	0,402	1,41	0,161	3,0	0,0178
0,70	0,746	0,945	1,304	1,13	0,384	1,42	0,158	3,5	0,0117
0,71	0,759	0,950	1,331	1,14	0,368	1,43	0,154	4,0	0,0080
0,72	0,773	0,955	1,361	1,15	0,353	1,44	0,151	4,5	0,0058
0,73	0,787	0,960	1,394	1,16	0,339	1,45	0,147	5,0	0,0043
0,74	0,802	0,965	1,431	1,17	0,326	1,46	0,144	6,0	0,0026
0,75	0,817	0,970	1,474	1,18	0,314	1,47	0,141	8,0	0,0012
0,76	0,833	0,975	1,524	1,19	0,302	1,48	0,138	10,0	0,0006

При гидравлическом показателе $x=3,80$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,68	0,718	0,88	1,064	0,990	1,761	1,13	0,374
0,05	0,050	0,69	0,731	0,89	1,091	0,995	1,965	1,14	0,358
0,10	0,100	0,70	0,744	0,90	1,120	1,000	∞	1,15	0,343
0,15	0,150	0,71	0,758	0,905	1,136	1,005	1,188	1,16	0,329
0,20	0,200	0,72	0,772	0,910	1,152	1,010	1,007	1,17	0,317
0,25	0,250	0,73	0,786	0,915	1,160	1,015	0,902	1,18	0,305
0,30	0,300	0,74	0,800	0,920	1,187	1,020	0,828	1,19	0,294
0,35	0,351	0,75	0,815	0,925	1,206	1,025	0,773	1,20	0,283
0,40	0,402	0,76	0,830	0,930	1,226	1,030	0,725	1,21	0,273
0,45	0,454	0,77	0,846	0,935	1,247	1,035	0,686	1,22	0,264
0,50	0,507	0,78	0,862	0,940	1,270	1,040	0,653	1,23	0,256
0,55	0,562	0,79	0,879	0,945	1,295	1,045	0,623	1,24	0,248
0,60	0,620	0,80	0,896	0,950	1,322	1,05	0,597	1,25	0,240
0,61	0,631	0,81	0,914	0,955	1,350	1,06	0,553	1,26	0,233
0,62	0,643	0,82	0,932	0,960	1,385	1,07	0,516	1,27	0,226
0,63	0,655	0,83	0,952	0,965	1,422	1,08	0,485	1,28	0,219
0,64	0,667	0,84	0,972	0,970	1,464	1,09	0,457	1,29	0,213
0,65	0,679	0,85	0,993	0,975	1,514	1,10	0,433	1,30	0,207
0,66	0,692	0,86	1,015	0,980	1,574	1,11	0,411	1,31	0,201
0,67	0,705	0,87	1,039	0,985	1,652	1,12	0,392	1,32	0,196
1,33	0,191	1,42	0,152	1,55	0,114	2,0	0,053	2,9	0,018
1,34	0,186	1,43	0,149	1,60	0,103	2,1	0,046	3,0	0,012
1,35	0,181	1,44	0,145	1,65	0,094	2,2	0,040	3,5	0,0107
1,36	0,176	1,45	0,142	1,70	0,086	2,3	0,035	4,0	0,0072
1,37	0,172	1,46	0,139	1,75	0,079	2,4	0,031	4,5	0,0053
1,38	0,168	1,47	0,136	1,80	0,072	2,5	0,028	5,0	0,0040
1,39	0,164	1,48	0,133	1,85	0,067	2,6	0,025	6,0	0,0022
1,40	0,160	1,49	0,130	1,90	0,062	2,7	0,022	8,0	0,0011
1,41	0,156	1,50	0,127	1,95	0,057	2,8	0,020	10,0	0,0005

При гидравлическом показателе $\alpha=3,90$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,842	0,980	1,555	1,20	0,267	1,49	0,119
0,05	0,050	0,78	0,858	0,985	1,631	1,21	0,257	1,50	0,117
0,10	0,100	0,79	0,874	0,990	1,737	1,22	0,248	1,55	0,104
0,15	0,150	0,80	0,891	0,995	1,916	1,23	0,240	1,60	0,094
0,20	0,200	0,81	0,908	1,000	∞	1,24	0,232	1,65	0,085
0,25	0,250	0,82	0,926	1,005	1,146	1,25	0,225	1,70	0,077
0,30	0,300	0,83	0,945	1,010	0,970	1,26	0,218	1,75	0,070
0,35	0,351	0,84	0,965	1,015	0,868	1,27	0,212	1,80	0,064
0,40	0,402	0,85	0,985	1,020	0,796	1,28	0,206	1,85	0,059
0,45	0,454	0,86	1,007	1,025	0,742	1,29	0,200	1,90	0,054
0,50	0,507	0,87	1,030	1,030	0,696	1,30	0,194	1,95	0,050
0,55	0,562	0,88	1,065	1,035	0,658	1,31	0,189	2,0	0,047
0,60	0,619	0,89	1,082	1,040	0,626	1,32	0,184	2,1	0,040
0,61	0,630	0,90	1,111	1,045	0,598	1,33	0,179	2,2	0,035
0,62	0,642	0,905	1,126	1,050	0,573	1,34	0,174	2,3	0,031
0,63	0,654	0,910	1,142	1,06	0,530	1,35	0,169	2,4	0,027
0,64	0,666	0,915	1,159	1,07	0,494	1,36	0,164	2,5	0,024
0,65	0,678	0,920	1,177	1,08	0,463	1,37	0,160	2,6	0,021
0,66	0,690	0,925	1,196	1,09	0,436	1,38	0,156	2,7	0,019
0,67	0,703	0,930	1,215	1,10	0,412	1,39	0,152	2,8	0,017
0,68	0,716	0,935	1,236	1,11	0,392	1,40	0,148	2,9	0,015
0,69	0,729	0,940	1,258	1,12	0,373	1,41	0,144	3,0	0,0143
0,70	0,742	0,945	1,282	1,13	0,356	1,42	0,140	3,5	0,0099
0,71	0,756	0,950	1,309	1,14	0,340	1,43	0,137	4,0	0,0060
0,72	0,770	0,955	1,337	1,15	0,325	1,44	0,134	4,5	0,0045
3,73	0,784	0,960	1,370	1,16	0,312	1,45	0,131	5,0	0,0033
0,74	0,798	0,965	1,406	1,17	0,299	1,46	0,128	6,0	0,0019
0,75	0,812	0,970	1,447	1,18	0,288	1,47	0,125	8,0	0,0009
0,76	0,827	0,975	1,496	1,19	0,277	1,48	0,122	10,0	0,0004

При гидравлическом показателе $\chi=4,000$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,72	0,766	0,930	1,204	1,050	0,548	1,29	0,187
0,05	0,050	0,73	0,780	0,935	1,225	1,06	0,506	1,30	0,182
0,10	0,100	0,74	0,794	0,940	1,247	1,07	0,471	1,31	0,176
0,15	0,150	0,75	0,808	0,945	1,271	1,08	0,441	1,32	0,171
0,20	0,200	0,76	0,823	0,950	1,297	1,09	0,415	1,33	0,167
0,25	0,250	0,77	0,838	0,955	1,325	1,10	0,392	1,34	0,162
0,30	0,300	0,78	0,854	0,960	1,356	1,11	0,372	1,35	0,158
0,35	0,351	0,79	0,870	0,965	1,391	1,12	0,354	1,36	0,153
0,40	0,402	0,80	0,887	0,970	1,431	1,13	0,337	1,37	0,149
0,45	0,454	0,81	0,904	0,975	1,479	1,14	0,322	1,38	0,145
0,50	0,507	0,82	0,922	0,980	1,537	1,15	0,308	1,39	0,142
0,55	0,561	0,83	0,940	0,985	1,611	1,16	0,295	1,40	0,138
0,60	0,617	0,84	0,960	0,990	1,714	1,17	0,283	1,41	0,135
0,61	0,628	0,85	0,980	0,995	1,889	1,18	0,272	1,42	0,131
0,62	0,640	0,86	1,002	1,000	∞	1,19	0,262	1,43	0,128
0,63	0,652	0,87	1,025	1,005	1,107	1,20	0,252	1,44	0,125
0,64	0,664	0,88	1,049	1,010	0,936	1,21	0,243	1,45	0,122
0,65	0,678	0,89	1,075	1,015	0,836	1,22	0,235	1,46	0,119
0,66	0,688	0,90	1,103	1,020	0,766	1,23	0,227	1,47	0,116
0,67	0,700	0,905	1,118	1,025	0,712	1,24	0,219	1,48	0,113
0,68	0,713	0,910	1,134	1,030	0,668	1,25	0,212	1,49	0,111
0,69	0,726	0,915	1,150	1,035	0,632	1,26	0,205	1,50	0,109
0,70	0,739	0,920	1,167	1,040	0,600	1,27	0,199	1,55	0,097
0,71	0,752	0,925	1,185	1,045	0,572	1,28	0,193	1,60	0,087
1,65	0,079	1,90	0,050	2,3	0,0279	2,8	0,0153	4,5	0,0037
1,70	0,072	1,95	0,046	2,4	0,0246	2,9	0,0137	5,0	0,0027
1,75	0,066	2,00	0,043	2,5	0,0216	3,0	0,0123	6,0	0,0015
1,80	0,060	2,1	0,037	2,6	0,0192	3,5	0,0077	8,0	0,0007
1,85	0,055	2,2	0,032	2,7	0,0171	4,0	0,0052	10,0	0,0003

При гидравлическом показателе $\alpha=4,50$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,72	0,766	0,930	1,204	1,050	0,548	1,29	0,187
0,05	0,050	0,73	0,780	0,935	1,225	1,06	0,506	1,30	0,182
0,10	0,100	0,74	0,794	0,940	1,247	1,07	0,471	1,31	0,176
0,15	0,150	0,75	0,808	0,945	1,271	1,08	0,441	1,32	0,171
0,20	0,200	0,76	0,823	0,950	1,297	1,09	0,415	1,33	0,167
0,25	0,250	0,77	0,838	0,955	1,325	1,10	0,392	1,34	0,162
0,30	0,300	0,78	0,854	0,960	1,356	1,11	0,372	1,35	0,158
0,35	0,351	0,79	0,870	0,965	1,391	1,12	0,354	1,36	0,153
0,40	0,402	0,80	0,887	0,970	1,431	1,13	0,337	1,37	0,149
0,45	0,454	0,81	0,904	0,975	1,479	1,14	0,322	1,38	0,145
0,50	0,507	0,82	0,922	0,980	1,537	1,15	0,308	1,39	0,142
0,55	0,561	0,83	0,940	0,985	1,611	1,16	0,295	1,40	0,138
0,60	0,617	0,84	0,960	0,990	1,714	1,17	0,283	1,41	0,135
0,61	0,628	0,85	0,980	0,995	1,889	1,18	0,272	1,42	0,131
0,62	0,640	0,86	1,002	1,000	∞	1,19	0,262	1,43	0,128
0,63	0,652	0,87	1,025	1,005	1,107	1,20	0,252	1,44	0,125
0,64	0,664	0,88	1,049	1,010	0,936	1,21	0,243	1,45	0,122
0,65	0,678	0,89	1,075	1,015	0,836	1,22	0,235	1,46	0,119
0,66	0,688	0,90	1,103	1,020	0,766	1,23	0,227	1,47	0,116
0,67	0,700	0,905	1,118	1,025	0,712	1,24	0,219	1,48	0,113
0,68	0,713	0,910	1,134	1,030	0,668	1,25	0,212	1,49	0,111
0,69	0,726	0,915	1,150	1,035	0,632	1,26	0,205	1,50	0,109
0,70	0,739	0,920	1,167	1,040	0,600	1,27	0,199	1,55	0,097
0,71	0,752	0,925	1,185	1,045	0,572	1,28	0,193	1,60	0,087
1,65	0,079	1,90	0,050	2,3	0,0279	2,8	0,0153	4,5	0,0037
1,70	0,072	1,95	0,046	2,4	0,0246	2,9	0,0137	5,0	0,0027
1,75	0,066	2,00	0,043	2,5	0,0216	3,0	0,0123	6,0	0,0015
1,80	0,060	2,1	0,037	2,6	0,0192	3,5	0,0077	8,0	0,0007
1,85	0,055	2,2	0,032	2,7	0,0171	4,0	0,0052	10,0	0,0003

При гидравлическом показателе $\chi=5,000$

η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$	η	$\varphi(\eta)$
0	0	0,77	0,822	0,980	1,457	1,20	0,192	1,49	0,077
0,05	0,050	0,78	0,837	0,985	1,523	1,21	0,182	1,50	0,075
0,10	0,100	0,79	0,852	0,990	1,615	1,22	0,178	1,55	0,066
0,15	0,150	0,80	0,867	0,995	1,771	1,23	0,171	1,60	0,058
0,20	0,200	0,81	0,883	1,000	∞	1,24	0,164	1,65	0,052
0,25	0,250	0,82	0,900	1,005	0,954	1,25	0,158	1,70	0,047
0,30	0,300	0,83	0,917	1,010	0,792	1,26	0,153	1,75	0,042
0,35	0,350	0,84	0,935	1,015	0,703	1,27	0,147	1,80	0,038
0,40	0,401	0,85	0,954	1,020	0,641	1,28	0,142	1,85	0,034
0,45	0,452	0,86	0,974	1,025	0,594	1,29	0,137	1,90	0,031
0,50	0,534	0,87	0,995	1,030	0,555	1,30	0,133	1,95	0,028
0,55	0,556	0,88	1,017	1,035	0,522	1,31	0,149	2,00	0,026
0,60	0,611	0,89	1,040	1,040	0,495	1,32	0,125	2,1	0,0217
0,61	0,622	0,90	1,066	1,045	0,470	1,33	0,121	2,2	0,0184
0,62	0,634	0,905	1,080	1,050	0,448	1,34	0,117	2,3	0,0157
0,63	0,645	0,910	1,094	1,06	0,411	1,35	0,113	2,4	0,0135
0,64	0,657	0,915	1,109	1,07	0,381	1,36	0,110	2,5	0,0117
0,65	0,668	0,920	1,124	1,08	0,355	1,37	0,107	2,6	0,0102
0,66	0,680	0,925	1,141	1,09	0,332	1,38	0,104	2,7	0,0089
0,67	0,692	0,930	1,158	1,10	0,312	1,39	0,101	2,8	0,0078
0,68	0,704	0,935	1,177	1,11	0,294	1,40	0,098	2,9	0,0069
0,69	0,716	0,940	1,197	1,12	0,279	1,41	0,095	3,0	0,0061
0,70	0,728	0,945	1,218	1,13	0,265	1,42	0,092	3,5	0,0036
0,71	0,741	0,950	1,241	1,14	0,252	1,43	0,090	4,0	0,0022
0,72	0,754	0,955	1,267	1,15	0,240	1,44	0,087	4,5	0,0015
0,73	0,767	0,960	1,295	1,16	0,229	1,45	0,085	5,0	0,0010
0,74	0,780	0,965	1,327	1,17	0,218	1,46	0,083	6,0	0,0005
0,75	0,794	0,970	1,363	1,18	0,209	1,47	0,081	8,0	0,0002
0,76	0,808	0,975	1,405	1,19	0,200	1,48	0,079	10,0	0,0001

для русел с прямым уклоном дна ($i > 0$)

Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$
0,01	0,010	0,60	0,528	1,65	0,153	2,60	—3,20
0,02	0,020	0,65	0,558	1,70	0,062	2,65	—3,55
0,03	0,030	0,70	0,586	1,71	0,043	2,70	—3,86
0,04	0,040	0,75	0,609	1,72	0,024	2,75	—4,18
0,05	0,050	0,80	0,629	1,73	0,004	2,80	—4,52
0,06	0,060	0,85	0,645	1,74	—0,016	2,85	—4,87
0,07	0,070	0,90	0,657	1,75	—0,036	2,90	—5,23
0,08	0,080	0,95	0,664	1,80	—0,144	2,95	—5,61
0,09	0,090	0,99	0,667	1,85	—0,260	3,00	—6,00
0,10	0,100	1,00	0,667	1,90	—0,386	3,50	—10,8
0,12	0,120	1,01	0,667	1,95	—0,522	4,00	—17,80
0,14	0,139	1,05	0,664	2,00	—0,667	4,50	—25,80
0,16	0,159	1,10	0,656	2,05	—0,822	5,00	—36,70
0,18	0,178	1,15	0,643	2,10	—0,987	5,50	—46,00
0,20	0,197	1,20	0,624	2,15	—1,160	6,00	—66,00
0,22	0,216	1,25	0,599	2,20	—1,350	6,50	—85,00
0,24	0,235	1,30	0,568	2,25	—1,550	7,00	—107,0
0,30	0,291	1,35	0,530	2,30	—1,760	7,50	—133,0
0,35	0,336	1,40	0,485	2,35	—1,980	8,00	—163,0
0,40	0,379	1,45	0,434	2,40	—2,210	8,50	—196,0
0,45	0,419	1,50	0,375	2,45	—2,450	9,00	—234,0
0,50	0,458	1,55	0,309	2,50	—2,710	9,50	—276,0
0,55	0,494	1,60	0,23	2,55	—2,980	10,00	—323,0

Значения функций Н. Н. Павловского
для горизонтальных русел ($i = 0$)

Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$	Z	$\varphi(Z)$
0,001	0,001	0,950	1,83	1,0015	3,60	1,35	0,952
0,01	0,010	0,955	1,89	1,0020	3,45	1,40	0,896
0,05	0,051	0,960	1,95	1,0025	3,34	1,45	0,847
0,10	0,100	0,965	2,01	1,003	3,25	1,50	0,805
0,15	0,151	0,970	2,09	1,004	3,11	1,60	0,733
0,20	0,203	0,975	2,18	1,005	3,00	1,70	0,675
0,25	0,255	0,980	2,30	1,006	2,91	1,80	0,626
0,30	0,309	0,982	2,35	1,007	2,83	1,90	0,585
0,35	0,365	0,984	2,41	1,008	2,76	2,00	0,549
0,40	0,424	0,986	2,48	1,009	2,70	2,20	0,490
0,45	0,485	0,988	2,55	1,010	2,65	2,40	0,444
0,50	0,549	0,990	2,65	1,015	2,45	2,60	0,405
0,55	0,618	0,991	2,70	1,020	2,31	2,80	0,374
0,60	0,693	0,992	2,76	1,025	2,20	3,00	0,347
0,65	0,775	0,993	2,83	1,030	2,11	3,50	0,294
0,70	0,867	0,994	2,90	1,035	2,03	4,00	0,255
0,75	0,973	0,995	2,99	1,04	1,97	4,50	0,226
0,80	1,10	0,996	3,11	1,05	1,86	5,00	0,203
0,82	1,16	0,997	3,25	1,06	1,77	6,00	0,168
0,84	1,22	0,9975	3,34	1,07	1,69	7,00	0,144
0,86	1,29	0,9980	3,45	1,08	1,63	8,00	0,126
0,88	1,38	0,9985	3,60	1,09	1,57	9,00	0,112
0,90	1,47	0,9990	3,80	1,10	1,52	10,00	0,100
0,91	1,53	0,9995	4,15	1,15	1,32	15,00	0,067
0,92	1,59	1,0000	∞	1,20	1,20	25,00	0,040
0,93	1,66	1,0005	4,15	1,25	1,10	50,00	0,020
0,94	1,74	1,0010	3,80	1,30	1,02	100,00	0,010

Приложение 3 – Скоростные характеристики W , м/с, при различных значениях коэффициента шероховатости

R, м	Коэффициент шероховатости n													
	0,011	0,012	0,013	0,014	0,015	0,017	0,018	0,02	0,0225	0,025	0,0275	0,03	0,035	0,04
0,10	21,3	19,0	17,2	15,6	14,2	12,0	11,2	9,67	8,22	7,09	6,19	5,46	4,35	3,56
0,12	23,9	21,4	19,3	17,6	16,1	13,7	12,7	11,0	9,41	8,15	7,14	6,32	5,07	4,18
0,14	26,3	23,6	21,4	19,5	17,9	15,2	14,1	12,3	10,6	9,17	8,06	7,16	5,77	4,78
0,16	28,6	25,7	23,3	21,3	19,5	16,7	15,5	13,6	11,7	10,2	8,95	7,97	6,45	5,36
0,18	30,8	27,8	25,2	23,0	21,2	18,1	16,9	14,8	12,7	11,1	9,81	8,75	7,12	5,94
0,20	33,0	29,7	27,0	24,7	22,7	19,5	18,2	16,0	13,8	12,0	10,7	9,52	7,78	6,50
0,22	35,0	31,6	28,7	26,3	24,2	20,8	19,4	17,1	14,8	12,9	11,5	10,3	8,42	7,06
0,24	37,0	33,4	30,4	27,5	25,7	22,1	20,7	18,2	15,8	13,8	12,3	11,0	9,05	7,61
0,26	38,9	35,2	32,1	29,4	27,1	23,4	21,9	19,3	16,7	14,7	13,1	11,7	9,67	8,15
0,28	40,8	36,9	33,7	30,9	28,5	24,6	23,0	20,3	17,7	15,6	13,8	12,4	10,3	8,69
0,30	42,6	38,6	35,2	32,3	29,9	25,8	24,2	21,4	18,6	16,4	14,6	13,1	10,9	9,22
0,32	43,5	39,4	36,0	33,1	30,5	26,4	24,7	21,9	19,0	16,8	15,0	13,5	11,2	9,48
0,34	46,1	41,8	38,2	35,1	32,5	28,1	26,4	23,4	20,4	18,0	16,1	14,5	12,1	10,3
0,36	47,8	43,4	39,6	36,5	33,8	29,3	27,5	24,3	21,2	18,8	16,8	15,2	12,6	10,8
0,38	49,4	44,9	41,1	37,8	35,0	30,4	28,5	25,3	22,1	19,6	17,5	15,8	13,2	11,3
0,40	51,1	46,4	42,5	39,1	36,2	31,5	29,5	26,2	22,9	20,3	18,2	16,5	13,8	11,8
0,45	55,0	50,0	45,9	42,3	39,2	34,1	32,1	28,5	25,0	22,2	20,0	18,1	15,2	13,0
0,50	58,8	53,5	49,1	45,3	42,1	36,7	34,5	30,7	27,0	24,0	21,6	19,6	16,5	14,2
0,55	62,4	58,9	52,2	48,3	44,8	39,2	36,9	32,9	28,9	25,8	23,2	21,1	17,8	15,4
0,60	65,9	60,2	55,3	51,1	47,5	41,6	39,1	35,0	30,8	27,5	24,8	22,6	19,1	16,5
0,65	69,3	63,3	58,2	53,9	50,1	43,9	41,4	37,0	32,7	29,2	26,4	24,0	20,4	17,6
0,70	72,6	66,4	61,1	56,6	52,6	46,2	43,5	39,0	34,5	30,8	27,9	25,4	21,6	18,7
0,75	75,8	69,4	63,9	59,2	55,1	48,4	45,0	40,9	36,2	32,4	29,4	26,8	22,8	19,8
0,80	79,0	72,3	66,6	61,7	57,5	50,6	47,7	42,8	37,9	34,8	30,8	28,2	24,0	20,9
0,85	82,1	75,1	69,3	64,2	59,9	52,7	49,7	44,7	39,6	35,6	32,2	29,5	25,2	21,9
0,90	85,1	77,9	71,9	66,7	62,2	54,8	51,7	46,5	41,2	37,1	33,6	30,8	26,3	23,0
0,95	88,0	80,6	74,4	69,1	64,4	56,8	53,7	48,3	42,9	38,5	35,0	32,1	27,5	24,0
1,0	90,9	83,3	76,9	71,4	66,7	58,8	55,6	50,0	44,4	40,0	36,4	33,3	28,6	25,0
1,1	96,5	88,5	81,8	76,0	71,0	62,7	59,3	53,4	47,5	42,8	39,0	35,8	30,7	27,0
1,2	102	93,6	86,5	80,4	75,2	66,5	62,9	56,7	50,5	45,6	41,5	38,2	32,9	28,9
1,3	107	98,5	91,1	84,7	79,2	70,1	66,3	59,9	53,4	48,3	44,0	40,5	34,9	30,7
1,4	112	103	95,5	88,9	83,1	73,7	69,7	60,3	56,3	50,9	46,4	42,7	36,9	32,5
1,5	117	108	99,8	92,9	87,0	77,1	73,0	66,0	59,0	53,4	48,8	44,9	38,8	34,3
1,6	122	112	104	96,9	90,7	80,5	76,2	69,0	61,7	55,9	51,1	47,1	40,7	36,0
1,7	127	117	108	101	94,3	83,8	79,4	71,8	64,3	58,3	53,3	49,1	42,6	37,7
1,8	131	121	112	105	97,9	87,0	82,4	74,6	66,9	60,6	55,5	51,2	44,4	39,3
1,9	136	125	116	108	101	90,1	85,4	77,4	69,3	62,9	57,6	53,2	46,2	40,9
2,0	140	129	120	112	105	93,2	88,4	80,1	71,8	65,1	59,7	55,1	47,9	42,5
2,2	149	137	127	119	111	99,1	94,0	85,3	76,5	69,5	63,7	58,9	51,2	45,5
2,4	157	145	135	126	118	105	99,5	90,3	81,1	73,7	67,6	62,5	54,4	48,4
2,6	165	152	142	132	124	110	105	95,2	85,5	77,7	71,3	66,0	57,5	51,1
2,8	173	160	148	138	130	116	110	99,8	89,7	81,6	74,9	69,3	60,5	53,8
3,0	181	167	155	145	136	121	115	104	93,8	85,3	78,4	72,5	63,3	56,4

Приложение 4 - Таблица для определения величин τ'_c и τ''_c по вычисленной $\Phi(\tau_c)$ (по способу И.И. Агроскина)

$\Phi(\tau_c)$	τ'_c	τ''_c				
		$\varphi=0,80$	$\varphi=0,85$	$\varphi=0,90$	$\varphi=95$	$\varphi=1,00$
0,0044	0,001	0,0501	0,0532	0,0564	0,0696	0,0627
0,0089	0,002	0,0705	0,0740	0,0794	0,0839	0,0884
0,0133	0,003	0,0861	0,0916	0,0971	0,1026	0,1081
0,0177	0,004	0,0990	0,1053	0,1116	0,1179	0,1242
0,0221	0,005	0,1104	0,1174	0,1245	0,1315	0,1386
0,0265	0,006	0,1206	0,1283	0,1360	0,1438	0,1535
0,0309	0,007	0,1299	0,1383	0,1466	0,1549	0,1633
0,0353	0,008	0,1386	0,1475	0,1564	0,1653	0,1742
0,0397	0,009	0,1467	0,1541	0,1636	0,1750	0,1844
0,0441	0,010	0,1543	0,1642	0,1742	0,1841	0,1941
0,0550	0,0125	0,1716	0,1827	0,1938	0,2049	0,2160
0,0660	0,0150	0,1871	0,1993	0,2114	0,2236	0,2357
0,0877	0,0200	0,2142	0,2282	0,2422	0,2562	0,2702
0,0985	0,0225	0,2263	0,2411	0,2559	0,2707	0,2856
0,1094	0,0250	0,2376	0,2532	0,2688	0,2844	0,3000
0,1309	0,030	0,2584	0,2754	0,2924	0,3095	0,3265
0,1736	0,040	0,2942	0,3137	0,3334	0,3529	0,3724
0,2159	0,050	0,3246	0,3464	0,3681	0,3899	0,4116
0,2577	0,060	0,3511	0,3748	0,3985	0,4222	0,4459
0,2991	0,070	0,3747	0,4002	0,4256	0,4510	0,4765
0,3399	0,080	0,3959	0,4229	0,4500	0,4770	0,5041
0,3804	0,090	0,4151	0,4436	0,4721	0,5006	0,5291
0,4203	0,100	0,4326	0,4625	0,4923	0,5222	0,5521
0,4597	0,110	0,4486	0,4798	0,5109	0,5420	0,5732
0,4987	0,120	0,4634	0,4957	0,5280	0,5603	0,5927
0,5371	0,130	0,4770	0,5104	0,5438	0,5773	0,6107
0,5752	0,140	0,4896	0,5240	0,5585	0,5930	0,6275
0,6127	0,150	0,5012	0,5366	0,5721	0,6076	0,6431
0,6496	0,160	0,5120	0,5484	0,5847	0,6211	0,6576
0,6861	0,170	0,5220	0,5592	0,5965	0,6337	0,6710

Продолжение приложения 4

$\Phi(\tau_c)$	τ'_c	τ''_c				
		$\varphi=0,80$	$\varphi=0,85$	$\varphi=0,90$	$\varphi=95$	$\varphi=1,00$
0,7220	0,180	0,5312	0,5693	0,6074	0,6455	0,6836
0,7575	0,190	0,5398	0,5786	0,6175	0,6564	0,6953
0,7924	0,200	0,5478	0,5873	0,6269	0,6666	0,7062
0,8608	0,220	0,5619	0,6028	0,6437	0,6847	0,7258
0,9269	0,240	0,5738	0,6159	0,6581	0,7003	0,7446
0,9908	0,260	0,5838	0,6270	0,6702	0,7135	0,7569
1,0525	0,280	0,5919	0,6360	0,6802	0,7245	0,7689
1,1120	0,300	0,5984	0,6434	0,6884	0,7335	0,7787
1,1690	0,320	0,6033	0,6490	0,6948	0,7406	0,7866
1,2236	0,340	0,6068	0,6530	0,6994	0,7460	0,7926
1,2758	0,360	0,6088	0,6556	0,7025	0,7496	0,7967
1,3255	0,380	0,6095	0,6568	0,7041	0,7516	0,7992
1,3493	0,390	0,6094	0,6568	0,7043	0,7520	0,7998
1,3726	0,400	0,6090	0,6565	0,7042	0,7520	0,8000
1,4170	0,420	0,6072	0,6549	0,7029	0,7510	0,7992
1,4586	0,440	0,6041	0,6521	0,7002	0,7484	0,7968
1,4974	0,460	0,5999	0,6479	0,6961	0,7445	0,7930
1,5333	0,480	0,5946	0,6426	0,6908	0,7391	0,7876
1,5662	0,500	0,5882	0,6360	0,6841	0,7324	0,7808
1,5959	0,520	0,5806	0,6282	0,6771	0,7242	0,7725
1,6224	0,540	0,5719	0,6193	0,6668	0,7147	0,7627
1,6455	0,560	0,5621	0,6091	0,6563	0,7038	0,7515