П.М. СТЕПАНОВ
И.Х. ОВЧАРЕНКО
Ю.А. СКОБЕЛЬЦЫН

СПРАВОЧНИК ПО ГИДРАВЛИКЕ ДЛЯ МЕЛИОРАТОРОВ

П.М. СТЕПАНОВ
И.Х. ОВЧАРЕНКО
Ю.А. СКОБЕЛЬЦЫН

СПРАВОЧНИК ПО ГИДРАВЛИКЕ ДЛЯ МЕЛИОРАТОРОВ

МОСКВА «КОЛОС» 1984

ББК 40.6
С79
УДК 631.6:626.8(031)

Глава 7 написана кандидатом технических наук *П. М. Степановым*, глава 8—кандидатом технических наук *И. Х. Овчаренко*, глава 5—кандидатом технических наук *Ю. А. Скобельцыным*, остальные главы написаны авторами совместно.

Рецензенты: академик ВАСХНИЛ *Б. Б. Шумаков*; доктор технических наук, профессор *Д. В. Штеренлихт* (МГМИ)

Степанов П. М. и др.

С 79 Справочник по гидравлике для мелиораторов /П. М. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын — М.: Колос, 1984.— 207 с., ил.

В справочнике систематизированы материалы по гидравлическому расчету мелиоративных систем. Он окажет практическую помощь при решении различных гидравлических задач, возникающих в процессе проектирования, строительства и эксплуатации этих систем.
Для мелиораторов, гидротехников.

С $\frac{3802030000-032}{035(01)-84}$ 162—83

ББК 40.6
631.6

© Издательство «Колос», 1984

Глава 1
ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ

Плотность—это масса жидкости в единице объема (табл. 1.1). В условиях работы гидротехнических сооружений температура воды обычно колеблется в пределах 0...35° С, следовательно значение ρ в расчетах можно принимать равным 1000 кг/м³.

1.1. Плотность ρ пресной воды в зависимости от температуры *t*

t, °С	ρ, кг/м³	*t*, °С	ρ, кг/м³	*t*, °С	ρ, кг/м³	*t*, °С	ρ, кг/м³
0	999,87	28	996,26	56	985,25	84	969,30
4	1000,00	32	995,05	60	983,24	88	966,68
8	999,88	36	993,71	64	981,13	92	963,99
12	999,52	40	992,24	68	978,94	96	961,22
16	998,97	44	990,66	72	976,66	100	958,38
20	998,23	48	988,96	76	974,29		
24	997,32	52	987,15	80	971,83		

Вязкость—свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению ее слоев относительно друг друга. Различают кинематическую (ν) и динамическую (μ) вязкость (табл. 1.2). Соотношение между ними $\nu = \mu/\rho$.

1.2. Кинематическая и динамическая вязкость воды в зависимости от температуры

t, °С	μ, Па·с	ν·10⁶, м²/с
0	0,00179	1,79
4	0,00156	1,56
8	0,00139	1,39
12	0,00124	1,241
16	0,00111	1,111
20	0,00101	1,012
24	0,00091	0,920
28	0,000836	0,839
32	0,000768	0,772
36	0,000709	0,713
40	0,000656	0,661
44	0,00061	0,616
48	0,000568	0,574
52	0,000532	0,539

Сжимаемость — свойство жидкости изменять плотность при изменении силы давления, характеризуется коэффициентом объемного сжатия (табл. 1.3) $\beta_W = -\Delta W/(W\Delta p)$, где W — первоначальный объем; ΔW — изменение W при увеличении давления на Δp.

Величину, обратную коэффициенту объемного сжатия, называют модулем объемной упругости жидкости E (Па).

1.3. Коэффициент объемного сжатия $\beta_W \cdot 10^{10}$ (Па$^{-1}$) в зависимости от температуры t и давления p

t, °C	p, МПа				
	0,5	1,0	2,0	3,9	7,8
0	5,40	5,37	5,31	5,23	5,15
5	5,29	5,23	5,18	5,08	4,93
10	5,23	5,18	5,08	4,98	4,81
15	5,18	5,10	5,03	4,88	4,70
20	5,15	5,05	4,95	4,81	4,60

Температурное расширение — свойство жидкости изменять объем при изменении температуры, характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения (табл. 1.4) $\beta_t = \Delta W/(W\Delta t)$, где ΔW — изменение W при увеличении температуры на Δt.

1.4. Температурный коэффициент объемного расширения $\beta_t \cdot 10^6$ (1/град)

p, МПа	t, °C		
	1...10	10...20	40...50
0,1	14	150	422
9,8	43	165	422
19,6	72	183	426

Поверхностное натяжение характеризует силы взаимного притяжения молекул поверхностного слоя, увеличивающие или уменьшающие давление жидкости на $\Delta p = \sigma(1/r_1 + 1/r_2)$, где $\sigma = \sigma_0 - \beta t$ — поверхностное натяжение, при $t = 0$ °C $\sigma = 75{,}6 \cdot 10^3$ Н/м, 5 — $74{,}9 \cdot 10^3$, 10 — $74{,}2 \cdot 10^3$, 15 — $73{,}5 \cdot 10^3$, 20 — $72{,}8 \cdot 10^3$, 30 — $71{,}2 \cdot 10^3$, 40 — $69{,}6 \cdot 10^3$; σ_0 — поверхностное натяжение при $t = 0$° C; β — коэффициент, для воды $\beta = 0{,}00015$ Н/(м·с); r_1, r_2 — радиусы кривизны рассматриваемой поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для трубок диаметром менее 8 мм $\Delta p = 2\sigma/r_0$ или $h = 2\sigma/(\rho g r_0)$, где r_0 — радиус трубки; h — высота капиллярного поднятия; g — ускорение свободного падения тела.

Глава 2
ГИДРОСТАТИКА

Гидростатическое давление перпендикулярно воспринимающей поверхности и действует внутрь жидкости. При действии только силы тяжести давление в точке, находящейся на глубине h, равно:

$$p_{абс} = p_0 + \rho g h, \tag{2.1}$$

где p_0 — давление на свободной поверхности жидкости (внешнее давление).

Абсолютное давление $p_{абс}$ связано с избыточным $p_и$ и вакуумметрическим $p_{вак}$ следующим образом:

$$p_{абс} = p_{ат} + p_и; \tag{2.2}$$

$$p_{абс} = p_{ат} - p_{вак}, \tag{2.3}$$

где $p_{ат}$ — атмосферное давление (табл. 2.1).

2.1. Значение $p_{ат}$ в зависимости от отметки местности

Высота над уровнем моря, м	0	100	250	500	1000	1500	2000
$p_{ат}$, кПа	103,3	102,0	100,0	97,0	92,0	86,0	81,0

Сила давления на плоские поверхности. Сила давления на горизонтальную поверхность на глубине h равна:

$$p_{абс} = (p_0 + \rho g h)\,\omega, \tag{2.4}$$

где ω — площадь фигуры.

При наклоне плоской поверхности к горизонту:

$$P_{абс} = (p_0 + \rho g h_C)\,\omega; \tag{2.5}$$

$$P_и = \rho g h_C \omega; \tag{2.6}$$

$$l_д = I_{AA}/(l_C\omega);\ l_д = l_C + I_C/(l_C\omega),$$

где h_C — расстояние от центра тяжести фигуры до плоскости свободной поверхности по вертикали (рис. 2.1, *а*); l_C — то же, в плоскости фигуры (рис. 2.1, *а*); $l_д$ — расстояние от точки приложения силы давления до свободной поверхности в плоскости фигуры; I_{AA} — момент инерции фигуры относительно оси АА (рис. 2.1, *а*); I_C — момент инерции фигуры относительно оси, проходящей через ее центр тяжести (табл. 2.2).

Сила давления на криволинейные поверхности. Силу давления на произвольную криволинейную поверхность площадью ω определяют по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}; \tag{2.7}$$

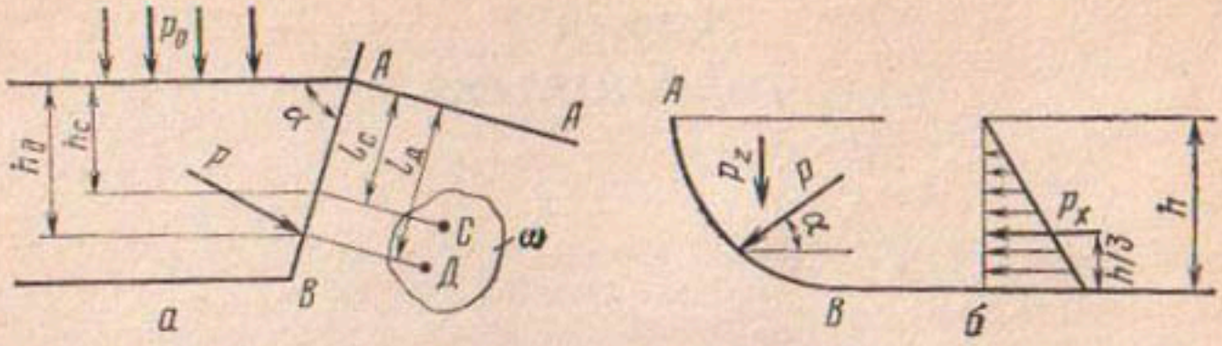


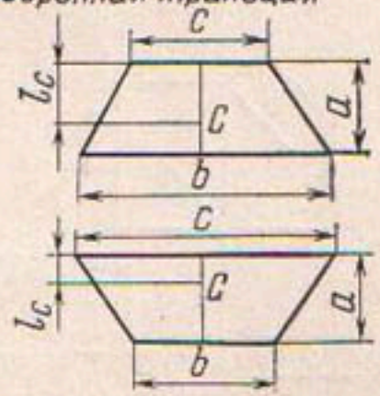
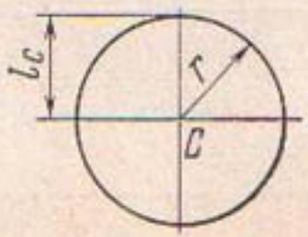
Рис. 2.1. Давление на поверхности:
а — плоские; *б* — цилиндрические.

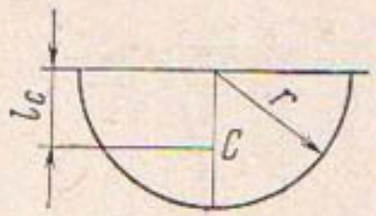
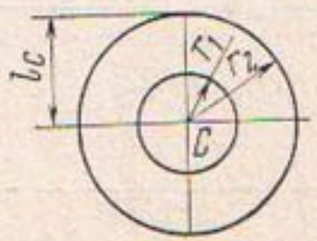
$P_x = \rho g h_{C_1} \omega_{yoz}$, $P_y = \rho g h_{C_2} \omega_{xoz}$, $P_z = \rho g V$ — соответственно проекции P на оси ox, oy, oz; ω_{yoz}, ω_{xoz} — площадь вертикальных проекций фигуры соответственно на оси yoz и xoz; h_{C_1}, h_{C_2} — глубины погружения центра тяжести вертикальных проекций фигуры; V — объем вертикального столба жидкости, опирающегося на заданную криволинейную поверхность и ограниченного сверху плоскостью свободной поверхности.

Сила давления на цилиндрическую поверхность AB (рис. 2.1, *б*) $P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$ ($P_x = \rho g h_C \omega_{yoz}$, $P_z = \rho g V$ — горизонтальная и вертикальная составляющие P). Направление P определяется углом α — $\operatorname{tg} \alpha = P_z / P_x$.

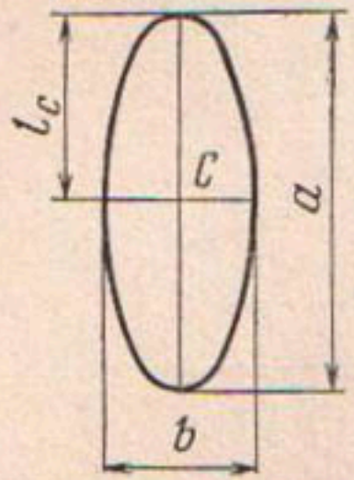
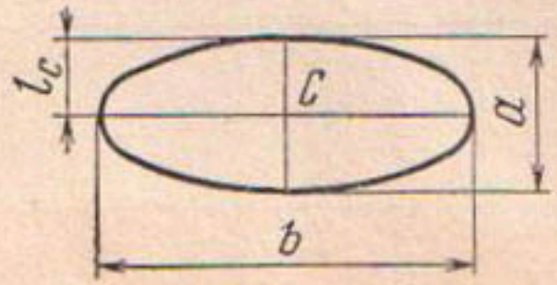
2.2. Значения l_C, $P_я$ для плоских фигур, наклоненных к горизонту

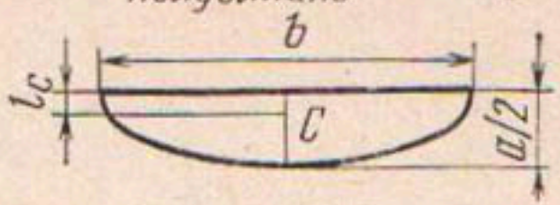
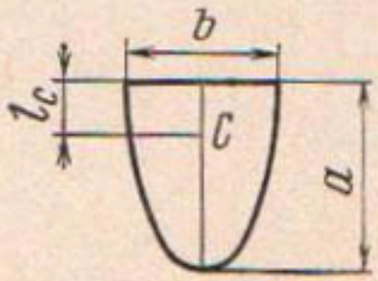
Фигура	Площадь фигуры	Расстояние от верха фигуры до центра тяжести, l_C	I_C	$P_я$
Прямоугольники	ab	$0{,}5a$	$a^3b/12$	$0{,}5\rho g a^2 \sin\alpha$
Квадрат	b^2	$0{,}5a = 0{,}5b\sqrt{2}$	$b^4/12$	$0{,}5\rho g b^3 \sqrt{2} \sin\alpha$
Равнобедренный треугольник	$0{,}5ab$	$2a/3$	$a^3b/36$	$\rho g a^2 b/3 \sin\alpha$
		$a/3$		$\frac{1}{6}\rho g a^2 b \sin\alpha/6$

Фигура	Площадь фигуры	Расстояние от верха фигуры до центра тяжести, l_C	I_C	$P_и$
Равнобедренная трапеция 	$0{,}5a\,(b+c)$	$\frac{a\,(b+2c)}{3\,(b+c)}$ $\frac{a\,(2b+c)}{3\,(b+c)}$	$\frac{a^2\,(b^2+4bc+c^2)}{36\,(b+c)}$	$\rho g a^2\,(b+2c)\sin\alpha/6$ $\rho g a^2\,(2b+c)\sin\alpha/6$
Круг 	πr^2	r	$0{,}25\pi r^4=0{,}785r^4$	$\rho g\pi r^3\sin\alpha$

Фигура	Площадь фигуры	Расстояние от верха фигуры до центра тяжести, l_C	I_C	$P_и$
Полукруг				
	$0{,}5\pi r^2$	$\frac{4r}{3\pi}=0{,}424r$	$(\pi/8-8\pi/9)\,r^4\approx 0{,}11r^4$	$2\rho g r^3 \sin\alpha/3$
Кольцо				
	$\pi\,(r_2^2-r_1^2)$	r_2	$0{,}25\pi\,(r_2^4-r_1^4)=$ $=0{,}785\,(r_2^4-r_1^4)$	$\rho g\pi r_2(r_2^2-r_1^2)\sin\alpha$

Продолжение

Фигура	Площадь фигуры	Расстояние от верха фигуры до центра тяжести, l_C	I_C	$P_и$
Эллипс 	$0{,}25\pi ab$	$0{,}5a$	$\pi a^3 b/64$	$\rho g \pi a^2 b \sin\alpha/8$
	$0{,}25\pi ab$	$0{,}5a$	$\pi ab^3/64$	$\rho g \pi a^2 b \sin\alpha/8$

Фигура	Площадь фигуры	Расстояние от верха фигуры до центра тяжести, l_C	I_C	$P_и$
Полуэллипс 	$\pi ab/8$	$2a/(3\pi)$	$\frac{a^3b}{16}(\pi/8-8\pi/9)$	$\rho g a^2 b \sin\alpha/12$
Параболический сегмент 	$2ab/3$	$2a/5$	$8a^3b^2/175$	$4\rho g a^2 b \sin\alpha/15$

Глава 3
МЕСТНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Общие положения. Потери напора в местных сопротивлениях определяют по формуле Вейсбаха:

$$h_м = \zeta v^2/(2g), \tag{3.1}$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления; v — средняя скорость движения жидкости за местным сопротивлением (или перед ним).

Иногда потери напора в местном сопротивлении рассматривают как потери на эквивалентной длине $l_э$ прямого трубопровода, которую определяют из соотношения $l_э/d = \zeta/\lambda$ (λ — коэффициент сопротивления трения по длине трубопровода.)

В зависимости от зоны сопротивлений коэффициент местного сопротивления определяют по соответствующим формулам [100].

Первая зона ($Re \leqslant 500$). В трубопроводе и местном сопротивлении режим движения потока ламинарный:

$$\zeta = A/Re, \tag{3.2}$$

где A — коэффициент, зависящий от типа местного сопротивления (табл. 3.1); $Re = vd/\nu$ — число Рейнольдса; d — внутренний диаметр трубопровода.

Вторая зона ($500 < Re < 1850$). Местное сопротивление нарушает ламинарный режим движения потока в трубопроводе. В этой зоне ζ определяют приближенно по формуле:

$$\zeta = B/Re^x, \tag{3.3}$$

где B, x — коэффициент и показатель степени, зависящие от типа местного сопротивления (табл. 3.1, 3.2).

Третья зона. При нарушении ламинарного движения в трубопроводе и без местного сопротивления:

$$\zeta = C/Re^{0,53}, \tag{3.4}$$

где C — коэффициент, зависящий от типа местного сопротивления (табл. 3.1).

Четвертая зона. Движение турбулентное, влияние Re на ζ незначительно, поэтому эту зону можно рассматривать как квадратичную.

Пятая зона (квадратичная). Движение развитое турбулентное, ζ не зависит от Re.

Для определения ζ во второй и третьей зонах можно использовать формулу [5]:

$$\zeta = A_1/Re + \xi_{кв}, \tag{3.5}$$

где A_1 — коэффициент, зависящий от типа местного сопротивления (табл. 3.1, 3.2); $\zeta_{кв}$ — коэффициент данного местного сопротивления в квадратичной области (табл. 3.1). Согласно рекомендациям [30], в формулу (3.5) можно вместо $\zeta_{кв}$ ввести коэффициент C_1 (табл. 3.2).

3.1. Значения коэффициентов A, B, C, A_1 для различных местных сопротивлений [5,100]

Местное сопротивление	Расчетный диаметр, мм	A	B	C	A_1	$\zeta_{кв}$
Вентиль обыкновенный	27	3 580...4 950	69...88	442...565	—	—
То же	41	2 700...3 020	55...84	337...524	—	—
То же	53	1 778	50	369	—	—
Вентиль с косым затвором	53	889	—	136	—	—
То же	75	960	—	—	—	—
Задвижка	53	400	—	59	—	—
То же	106	347	—	—	—	—
Пробковый кран	53	177	—	55	150	0,4
Внезапное расширение трубопровода	—	—	—	—	30	1,0
Вентиль обыкновенный	—	—	—	—	3 000...5 000	2,5...3
Угловой вентиль	—	—	—	—	400	0,8
Шаровой клапан	—	—	—	—	5 000	45
Угольник 90°	—	—	—	—	400	1,4
Угольник 135°	—	—	—	—	600	0,4
Колено 90°	—	—	—	—	130	0,2
Тройник	—	—	—	—	150	0,3
Задвижка (полное открытие)	—	—	—	—	75	0,15
То же (открытие 0,75)	—	—	—	—	350	0,2
То же (открытие 0,5)	—	—	—	—	1 300	2
То же (открытие 0,25)	—	—	—	—	3 000	20
Конусный вентиль со смещенными осями подводящей и отводящей частей при степени открытия						

Продолжение

Местное сопротивление	Расчетный диаметр, мм	A	B	C	A_1	$\zeta_{кв}$
$h/d=1$	—	—	—	—	250	4
$h/d=2/3$	—	—	—	—	400	6
$h/d=1/3$	—	—	—	—	1 600	12
Конусный вентиль с резким поворотом на 90° при степени открытия						
$h/d=1$	—	—	—	—	100	1,8
$h/d=2/3$	—	—	—	—	160	2,5
$h/d=1/3$	—	—	—	—	1 200	9
Пробковый кран при степени открытия						
$\alpha=10°$	—	—	—	—	318	3,2
$\alpha=20°$	—	—	—	—	430	6,8
$\alpha=30°$	—	—	—	—	695	18,5
$\alpha=40°$	—	—	—	—	1 680	49
$\alpha=45°$	—	—	—	—	4 500	12
Вход из бака в трубу	—	—	—	—	30	0,5

3.2. Значения коэффициентов B, A_1, C_1, x

Местное сопротивление	Re	B	C_1	A_1	x	ζ (приближенные значения)
Регулирующий клапан двухседельный типа «ВО» $d_у=50$ и 80 мм	20...2 000	4,9	—	—	1,22	—
	2 000...10 000	—	1,8	11 000	—	—
Задвижка параллельная 30Ч6бк $h/d=1$	100...400	7,665	—	—	3,16	—
То же, $h/d=0,5$	2 000...10 000	—	—	—	—	0,65
	20...400	3,719	—	—	1,12	—
	4 000...10 000	—	—	—	—	6,1
Вентиль запорный фланцевый 15КЧ16бт $d_у=25$ мм, $h/d=1$	20...2 000	3,814	—	—	1,08	—
	3 000...10 000	—	2	2 700	—	—
То же, $d_у=50$ мм, $h/d=1$	20...400	3,814	—	—	1,03	—
	10 000...10 000	—	3,7	9 300	—	—
Кран проходной типа КППС	20...1 800	3,611	—	—	0,92	—
	1 800...5 000	6,243	—	—	1,54	—
	$\geqslant$ 9 000	—	—	—	—	0,5
Обратный клапан подъемный	20...400	4,350	—	—	1,27	—
	400...1 000	—	1,65	2 300	—	—
	3 000...10 000	—	—	—	—	5,5

Продолжение

Местное сопротивление	Re	B	C_1	A_1	x	ζ (приближенные значения)
Колено фланцевое $\alpha=90°$, $r/d=2{,}6$	10...2 000	20 000	—	—	1,3	—
	2 000...10 000	—	0,5	800	—	—
То же, $r/d=1{,}8$	10...1 200	4,67	—	—	1,59	—
	1 200...10 000	—	0,15	540	—	—
Колено фланцевое $\alpha=180°$, $r/d=2$	10...140	4,3	—	—	1,344	—
	200...10 000	—	1,7	3 000	—	—
То же, $r/d=1{,}5$	10...1 150	5,37	—	—	1,95	—
	200...10 000	—	0,4	1 800	—	—
Колено на сварке $\alpha=90°$, $d_у=50$ и 100 мм	10...2 000	4,42	—	—	1,26	—
	2000...10 000	—	0,03	3 470	—	—
Компенсатор	10...1 400	4,46	—	—	1,13	—
П-образный, $d_у=50$ мм	1 600...10 000	—	1,28	6 930	—	—
Компенсатор П-образный, $d_у=100$ мм	10...250	4,67	—	—	1,58	—
	250...10 000	—	0,79	4 840	—	—

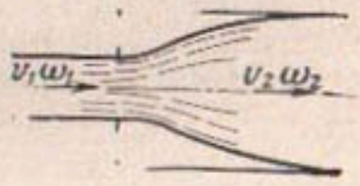
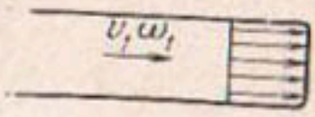
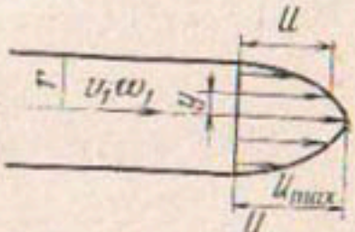
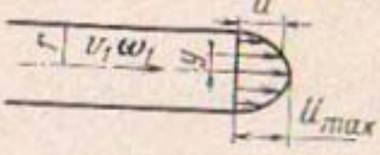
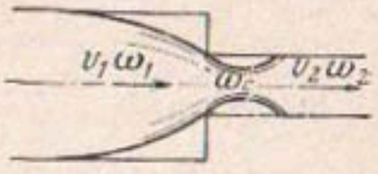
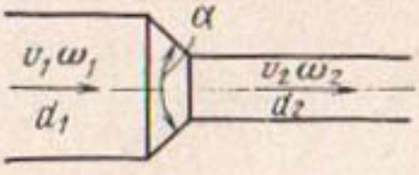
Изменение сечения трубопровода. *Внезапное расширение* (табл. 3.3) Потери напора рекомендуется определять по формулам Ю. А. Скобельцына и П. В. Хомутова:

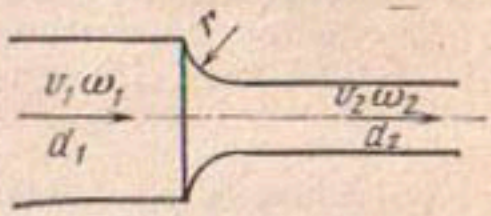
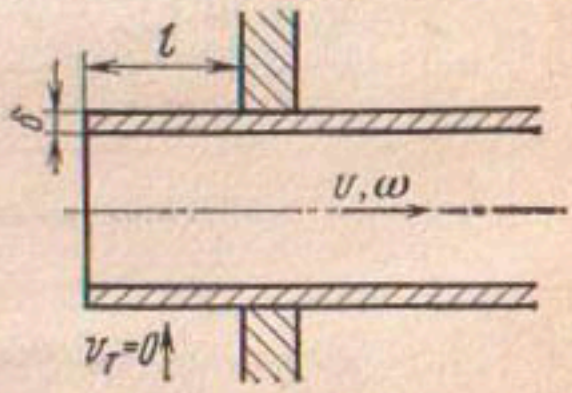
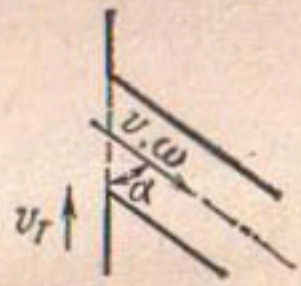
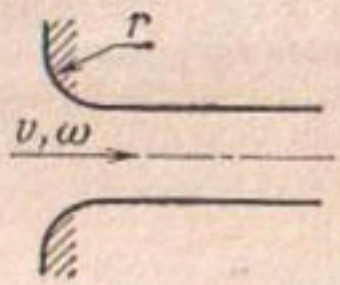
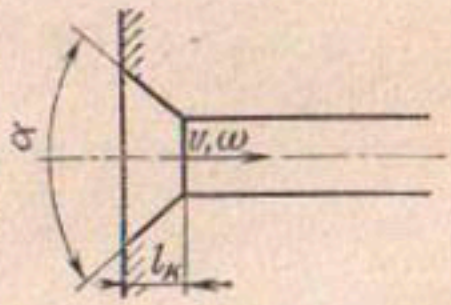
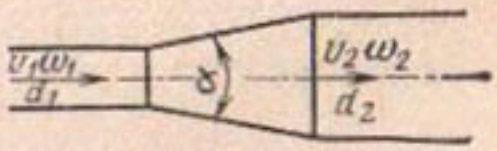
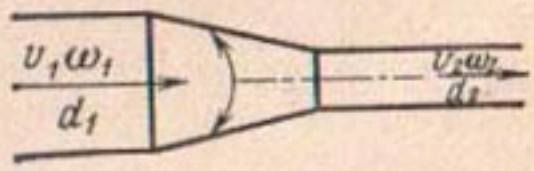
$$h_{в.\,р} = \alpha_1 (v_1 - v_2)^2/(2g), \qquad (3.6)$$

где α_1 — коэффициент кинетической энергии в сечении трубопровода до расширения. При $Re < 2 \cdot 10^3$ $\alpha_1 = 2$; $2 \cdot 10^3 \leqslant Re \leqslant 3 \cdot 10^3$ $\alpha_1 = 3{,}5 - 0{,}0008\,Re$; $3 \cdot 10^3 \leqslant Re \leqslant 5 \cdot 10^4$ $\alpha_1 = 1{,}11 - 2 \cdot 10^{-6}\,Re$; $Re > 5 \cdot 10^4$ $\alpha_1 = 1$.

Коэффициент местного сопротивления $\zeta_{в.\,р_1}$, отнесенный к скорости в сечении перед ним, можно определить по зависимостям: при $2 \cdot 10^3 \leqslant Re \leqslant 3 \cdot 10^3$ $\zeta_{в.\,р_1} = (3{,}5 - 0{,}0008\,Re)(1-n)^2$; $3 \cdot 10^3 \leqslant Re \leqslant 5 \cdot 10^4$ $\zeta_{в.\,р_1} = (1{,}11 - 2 \cdot 10^{-6}\,Re)(1-n)^2$; $Re < 12 \ldots 20$ (в зависимости от

3.3. Типы изменения сечения трубопровода

Местное сопротивление	Графическое изображение
1. Внезапное расширение	
2. Выход из трубы в емкость или пространство, площадь сечения которого значительно больше площади сечения трубы. Распределение скоростей в выходном сечении:	
2.1. равномерное	
2.2. по степенному закону $u/u_{max} = (1 - y/r)^{1/m}$	
2.3. по параболе $u/u_{max} = (1 - y/r)^2$	
3. Сужение:	
3.1. внезапное	
3.2. постепенное	

Местное сопротивление	Графическое изображение
3.3. плавное	
4. Вход в трубу постоянного поперечного сечения:	
4.1. под прямым углом с различной заделкой в стенки при острых входных кромках	
4.2. под углом α к стенкам	
4.3. вход с закругленными кромками	
4.4. вход конический	
5. Диффузор	
6. Конфузор	

отношения ω_1/ω_2) [5] $\zeta_{в.\,p_1} = A/\mathrm{Re}$, где $n = \omega_1/\omega_2$ — степень расширения; $A = f(\omega_1/\omega_2)$, $A = 20 \ldots 40$.

Значения $\zeta_{в.\,p_1}$ можно найти по таблице 3.4.

3.4. Значения $\zeta_{в.\,p_1}$ в зависимости от ω_1/ω_2 и Re [35]

ω_1/ω_2	Re										
	10	20	30	50	100	200	500	10^3	$2\cdot10^3$	$3\cdot10^3$	$1\cdot10^4$
0,1	3,1	3,00	2,40	1,95	1,7	1,65	1,70	2,00	1,60	1,00	0,81
0,2	3,1	2,80	2,20	1,65	1,4	1,30	1,30	1,60	1,25	0,70	0,64
0,3	3,1	2,60	2,00	1,40	1,2	1,10	1,10	1,30	0,95	0,60	0,50
0,4	3,1	2,40	1,80	1,30	1,1	1,00	0,85	1,05	0,80	0,40	0,36
0,5	3,1	2,30	1,65	1,15	0,9	0,75	0,65	0,90	0,65	0,30	0,25
0,6	3,1	2,15	1,55	1,05	0,8	0,60	0,40	0,60	0,50	0,20	0,16
0,7	3,1	1,75	1,25	0,85	0,5	0,40	0,35	0,30	0,22	0,15	0,09
0,8	3,1	1,55	1,05	0,65	0,3	0,25	0,25	0,20	0,12	0,08	0,04
0,9	3,1	1,35	0,85	0,50	0,2	0,15	0,16	0,10	0,06	0,04	0,01

Для случая выхода жидкости из трубы $\zeta_{в.\,p} = 1$ (табл. 3.3, тип. 2.1), $\zeta_{в.\,p} = 2$ (тип. 2.3), а для типа 2.2 значения $\zeta_{в.\,p}$ приведены в таблице 3.5 [35].

3.5. Значения $\zeta_{в.\,p}$ в зависимости от m

m	1,00	1,35	2,00	3,00	4,00	7,00
$\zeta_{в.\,p}$	2,70	2,00	1,50	1,25	1,15	1,06

Внезапное сужение (табл. 3.3.). Коэффициент сопротивления в общем случае можно определить по формуле Ю. А. Скобельцына, П. В. Хомутова:

$$\zeta_{в.\,c} = \alpha_2 \eta (1 - n), \tag{3.7}$$

где α_2 — коэффициент кинетической энергии в сечении за сужением; η — коэффициент; $n = \omega_2/\omega_1$ — степень сужения. Коэффициент η равен: при $40 \leqslant \mathrm{Re} \leqslant 2\cdot10^3$ $\eta = 4{,}5/\mathrm{Re}^{0{,}368}$; $3\cdot10^3 \leqslant \mathrm{Re} \leqslant 5\cdot10^4$ $\eta = 1{,}09/\mathrm{Re}^{0{,}071}$.

Подставляя в формулу (3.7) приведенные значения η, можно вычислить ζ для соответствующих зон. При $\mathrm{Re} < 40$ [5] $\zeta_{в.\,c} = 25{,}2/\mathrm{Re}$.

Значения $\zeta_{в.\,c}$ в зависимости от Re приведены в таблице 3.6.

Коэффициент сопротивления при внезапном сужении трубопровода можно определить и по формуле [5]:

$$\zeta_{в.\,c} = (1/\varepsilon - 1)^2, \tag{3.8}$$

где $\varepsilon = \omega_c/\omega_2$ — коэффициент сжатия струи. Значения ε, подсчитанные по формуле Н. Е. Жуковского $\varepsilon = \pi/(\pi + 4\theta/\mathrm{tg}\,2\theta)$, приведены в таблице 3.7. Угол θ определяют из выражения: $\mathrm{tg}\,\theta\,[1 + 4\theta/(\pi\,\mathrm{tg}\,2\theta)] = \omega_2/\omega_1$.

3.6. Значения $\zeta_{в.с}$ в зависимости от Re и ω_2/ω_1 [35]

ω_2/ω_1	Re										
	10	20	30	50	10^2	$2\cdot10^2$	$5\cdot10^2$	10^3	$2\cdot10^3$	$5\cdot10^3$	10^4
0,1	5	3,2	2,40	1,80	1,30	1,04	0,82	0,64	0,50	0,75	0,50
0,2	5	3,1	2,30	1,62	1,20	0,95	0,70	0,50	0,40	0,60	0,40
0,3	5	2,9	2,15	1,50	1,10	0,85	0,60	0,44	0,30	0,55	0,35
0,4	5	2,8	2,00	1,40	1,00	0,78	0,50	0,35	0,25	0,50	0,30
0,5	5	2,7	1,80	1,30	0,90	0,65	0,42	0,30	0,20	0,42	0,27
0,6	5	2,6	1,70	1,20	0,80	0,56	0,35	0,24	0,15	0,35	0,25
0,7	5	2,4	1,50	0,95	0,65	0,43	0,25	0,18	0,14	0,25	0,23
0,8	5	2,1	1,20	0,70	0,45	0,30	0,18	0,12	0,10	0,18	0,18
0,9	5	1,4	0,70	0,40	0,24	0,17	0,09	0,06	0,04	0,09	0,10

3.7. Значения ε

ω_2/ω_1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ε	0,611	0,612	0,616	0,622	0,633	0,644	0,662	0,687	0,722	0,781	1

В том случае, если сужение происходит постепенно или плавно (табл. 3.3, тип 3.2, 3.3), $\zeta_{п.с} k_c \zeta_{в.с}$ (k_c коэффициент смягчения, определяют по таблицам 3.8, 3.9 [35]).

3.8. Значения k_c для постепенного сужения при $Re > 10^4$ [35]

$l_к/d_2$	α, °							
	20	40	60	80	100	120	140	160
0,025	0,45	0,41	0,4	0,41	0,42	0,43	0,46	0,47
0,050	0,4	0,33	0,3	0,32	0,34	0,37	0,42	0,46
0,075	0,35	0,27	0,24	0,26	0,3	0,35	0,4	0,45
0,100	0,31	0,22	0,19	0,22	0,27	0,32	0,38	0,44
0,150	0,48	0,15	0,15	0,2	0,24	0,3	0,36	0,43
0,600	0,2	0,1	0,12	0,17	0,28	0,28	0,35	0,42

3.9. Значения k_c для плавного сужения при $Re > 10^4$

r/d_2	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
k_c	0,34	0,25	0,19	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03	0,03

Значения $\zeta_{в.с}$ для случая входа в трубу постоянного поперечного сечения (табл. 3.3, тип 4.1) приведены в таблице 3.10.

Для входа в трубу под углом (табл. 3.3, тип 4.2) $\zeta_{в.\,с}$ при $v_п = 0$ и $Re > 10^4$ определяют по формуле Вейсбаха:

$$\zeta_{в.\,с} = 0{,}5 + 0{,}3 \cos \alpha + 0{,}2 \cos^2 \alpha. \qquad (3.9)$$

Значения $\zeta_{в.\,с}$ при $v_п \neq 0$ даны в таблице 3.11.

3.10. Значения $\zeta_{в.с}$ в зависимости от l/d и δ/d при $Re > 10^4$ [35]

δ/d	l/d										
	0	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	∞
0	0,5	0,57	0,63	0,68	0,73	0,80	0,86	0,92	0,97	1,00	1,00
0,004	0,5	0,54	0,58	0,63	0,67	0,74	0,80	0,86	0,90	0,94	0,94
0,008	0,5	0,53	0,55	0,58	0,62	0,68	0,74	0,81	0,85	0,88	0,88
0,012	0,5	0,52	0,53	0,55	0,58	0,63	0,68	0,75	0,79	0,83	0,83
0,016	0,5	0,51	0,51	0,53	0,55	0,58	0,64	0,70	0,74	0,77	0,77
0,020	0,5	0,51	0,51	0,52	0,53	0,55	0,60	0,66	0,69	0,72	0,72
0,024	0,5	0,50	0,50	0,51	0,52	0,53	0,58	0,62	0,65	0,68	0,68
0,030	0,5	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,54	0,57	0,59	0,61	0,61
0,040	0,5	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,54	0,54
0,050	0,5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

3.11. Значения $\zeta_{в.\,с}$ в зависимости от α, $v_п/v$ и $Re > 10^4$ [58]

α,°	$v_п/v$					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
30	0,90	1,55	2,18	2,85	3,5	4,00
45	0,80	1,30	1,72	2,08	2,3	2,60
60	0,65	1,04	1,35	1,58	1,7	1,86
90	0,50	0,56	0,62	0,66	0,7	0,70
120	0,65	0,15	—	—	—	—
150	0,85	0,15	—	—	—	—

Для входа с закругленными кромками (табл. 3.3, тип 4.3) или конического (табл. 3.3, тип 4.4) коэффициенты сопротивлений меньше, чем для входа с острыми входными кромками (табл. 3.12, 3.13).

3.12. Значения $\zeta_{в.\,с}$ в зависимости от r/d при $Re > 10^4$ [35]

r/d	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,12	0,16	⩾ 0,2
$\zeta_{в.\,с}$	0,5	0,43	0,36	0,31	0,26	0,22	0,2	0,15	0,09	0,06	0,03

3.13. Значения $\zeta_{в.с}$ в зависимости от $l_к/d$ и α при $Re > 10^4$ [35]

$l_к/d$	α, °								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
0,025	0,5	0,47	0,45	0,43	0,41	0,40	0,42	0,45	0,5
0,050	0,5	0,45	0,41	0,36	0,33	0,30	0,35	0,42	0,5
0,075	0,5	0,42	0,35	0,30	0,26	0,23	0,30	0,40	0,5
0,100	0,5	0,39	0,32	0,25	0,22	0,18	0,27	0,38	0,5
0,150	0,5	0,37	0,27	0,20	0,16	0,15	0,25	0,37	0,5
0,600	0,5	0,27	0,18	0,13	0,11	0,12	0,23	0,36	0,5

Диффузор (табл. 3.3, тип 5). Общий коэффициент сопротивления диффузора условно можно разделить на два коэффициента: постепенного расширения и сопротивления по длине $\zeta_д = \zeta_{п.р} + \zeta_{дл}$.

Для определения коэффициента постепенного расширения можно использовать формулы:

$$\zeta_{п.р} = k_{п.р}\,(d_2^2/d_1^2 - 1)^2, \qquad (3.10)$$

где $k_{п.р}$ — коэффициент смягчения при постепенном расширении (табл. 3.14);

$$\zeta_{п.р} = 3{,}2\,\mathrm{tg}\,0{,}5\alpha\,\sqrt[4]{\mathrm{tg}\,0{,}5\alpha}\,(1 - 1/n)^2, \qquad (3.11)$$

где $n = \omega_2/\omega_1$ — степень расширения.

Коэффициент сопротивления по длине равен [41]:

$$\zeta_{дл} = \lambda_{ср}\,[(\omega_2/\omega_1)^2 - 1]/(8\,\mathrm{tg}\,0{,}5\alpha), \qquad (3.12)$$

где $\lambda_{ср} = 0{,}5\,(\lambda_1 + \lambda_2)$ — среднее значение коэффициентов сопротивления трения по длине соответственно для узкой и широкой трубы.

3.14. Значения $k_{п.р}$ в зависимости от α при $Re > 10^4$ [13]

α, °	2	4	6	8	10	12	15	20	25	30	40
$k_{п.р}$	0,02	0,05	0,10	0,14	0,16	0,22	0,30	0,42	0,62	0,72	0,85

В таблице 3.15 приведены значения $\zeta_{дл}/\lambda_{ср}$.

3.15. Значения $\zeta_{дл}/\lambda_{ср}$ в зависимости от α и d_2/d_1 при $Re > 10^4$ [13]

d_2/d_1	$\alpha°$					
	2	4	8	15	30	45
0,9	3,8	1,8	0,9	0,50	0,3	0,2
0,8	10,2	5,1	2,7	1,5	0,7	0,5
0,7	22,5	11,3	5,8	2,9	1,7	0,8
0,6	47,9	23,9	12,4	6,2	3,1	2,3
0,5	107,2	54,3	27,2	14,4	8,0	4,8
0,4	269,0	136	66,2	35,1	19,5	11,7
0,3	870,0	441	221	110,0	61,3	36,8

Для расчета $\zeta_д$ можно использовать формулы Г. К. Артюшкиной (3.13) и Р. Е. Везиряна (3.14 и 3.15):

при $\alpha \leqslant 40°$, $\mathrm{Re}\,(1/h)^{0,33}(\mathrm{tg}\,\alpha)^{0,75} \leqslant 15,5$

$$\zeta_д = 20n^{0,33}/(\mathrm{tg}\,\alpha)^{0,75}\,\mathrm{Re}; \qquad (3.13)$$

при $\mathrm{Re} \leqslant 50$

$$\zeta_д = \frac{1}{\mathrm{Re}_1}\left\{\frac{10,67}{\sin 0,5\alpha}\,[1-(r_1/r_2)^3] + 25,2\sqrt[4]{\sin\alpha}\right\}; \qquad (3.14)$$

$$50 \leqslant \mathrm{Re}_1 \leqslant 2\cdot 10^3$$

$$\zeta_д = \frac{1}{\mathrm{Re}_1}\left\{\frac{10,67}{\sin 0,5\alpha}\,[1-(r_1/r_2)^3] + 25,2\sqrt[4]{\sin\alpha}\right\} +$$

$$+\sqrt{\sin\alpha}\,(1-50/\mathrm{Re}_1)\,[2-2,66\,(r_1/r_2)^2+0,66\,(r_1/r_2)^4]; \qquad (3.15)$$

$$2\cdot 10 \leqslant \mathrm{Re}_1 \leqslant 10^4$$

$$\zeta_д = \sqrt{\sin\alpha}\,(2\,000/\mathrm{Re}_1)^2\,[2-2,66\,(r_1/r_2)^2+0,66\,(r_1/r_2)^4] +$$

$$+\zeta_{д.\,кв}\,[1-(2\,000/\mathrm{Re}_1)^2], \qquad (3.16)$$

где Re_1 — число Рейнольдса, подсчитанное по скорости v; r_1, r_2 — радиусы трубопровода перед расширением и за ним; $\zeta_{д.\,кв}$ — коэффициент сопротивления диффузора в области квадратичного сопротивления, определяют как сумму $\zeta_{п.\,р}$ и $\zeta_{дл}$, значения которых рассчитывают по формулам (3.10)...(3.12).

Конфузор (табл. 3.3, тип 6). Коэффициент сопротивления конфузора условно делят аналогично $\zeta_д$: $\zeta_к = \zeta_{п.\,с} + \zeta_{дл}$.

При $\mathrm{Re} > 10^4$

$$\zeta_{п.\,с} = (-0,0125n^4 + 0,0224n^3 - 0,00723n^2 +$$

$$+0,00444n - 0,00745)\,(\alpha_р^3 - 2\pi\alpha_р^2 - 10\alpha_р)\ [116], \qquad (3.17)$$

где $\alpha_р = 0,01745\alpha$; $n = \omega_2/\omega_1$ — степень сужения;

$$\zeta_{п.\,с} = k_{п.\,с}\,(1/\varepsilon - 1)^2\ [5], \qquad (3.18)$$

где $k_{п.\,с}$ — коэффициент смягчения (табл. 3.16); ε — коэффициент сжатия (табл. 3.7).

Коэффициент сопротивления по длине можно определить по формуле:

$$\zeta_{дл} = \lambda_{ср}\,(1-1/n_1^2)/(8\sin 0,5\alpha), \qquad (3.19)$$

$$n_1 = \omega_1/\omega_2$$

или по данным таблицы 3.17.

3.16. Значения $k_{п.\,с}$ в зависимости от α при $\mathrm{Re} > 10^4$

α, °	10	20	40	60	80	100	140
$k_{п.\,с}$	0,4	0,25	0,2	0,2	0,3	0,4	0,

3.17. Значения $\zeta_{дл}/\lambda_{ср}$ в зависимости от α и d_2/d_1 при $Re > 10^4$ [13]

d_2/d_1	α,°					
	2	4	8	15	30	45
0,9	2,5	1,2	0,6	0,3	0,2	0,1
0,8	4,2	2,1	1,1	0,6	0,3	0,2
0,7	5,4	2,7	1,4	0,7	0,4	0,2
0,6	6,2	3,1	1,6	0,8	0,4	0,3
0,5	6,7	3,4	1,7	0,9	0,5	0,3
0,4	6,9	3,5	1,7	0,9	0,5	0,3
0,3	7,1	3,6	1,8	0,9	0,5	0,3

Согласно Г. К. Артюшкиной, при $5° \leqslant \alpha \leqslant 40°$ и $Re\,(1/n)^{0,5} \times (\mathrm{tg}\,\alpha)^{0,75} \leqslant 10$

$$\zeta_к = 19\sqrt{n}/[(\mathrm{tg}\,\alpha)^{0,75}\,Re]; \qquad (3.20)$$

согласно Р. Е. Везиряну, при $Re < 600$

$$\zeta_к = \frac{1}{Re_2}\left\{\frac{10,67}{\sin 0,5\alpha}[1-(r_2/r_1)^3] + 25,2\sqrt[4]{\sin\alpha}\right\}. \qquad (3.21)$$

Отводы. Коэффициент сопротивлений отводов равен сумме коэффициентов сопротивления на поворот $\zeta_п$ и по длине $\zeta_{дл}$: $\zeta_о = \zeta_п + \zeta_{дл}$.

Коэффициент $\zeta_п$ для отводов с гладкими стенками определяют по формуле Г. Н. Абрамовича:

$$\zeta_п = A_1 B_1 C_1, \qquad (3.22)$$

где A_1 — коэффициент, учитывающий влияние угла поворота α; B_1 — коэффициент, учитывающий влияние относительного радиуса закругления отвода R_o/d (R_o — радиус закругления отвода, d — его диаметр) или R_o/b (b — ширина отвода квадратного или прямоугольного сечения); C_1 — коэффициент, учитывающий вытянутость отвода a/b (a — высота сечения), для отвода круглого или квадратного сечения $C_1 = 1$.

По данным Б. Б. Некрасова, при $\alpha = 90°$ $A_1 = 1$; $\alpha < 70°$ — $A_1 = 0,9 \sin\alpha$; $\alpha > 100°$ $A_1 = 0,7 + 0,35\,\alpha/90$. При $R_o/d < 1$ [35] $B_1 = 0,21/(R_o/d)^{0,25}$, при $R_o/d \geqslant 1$ $B_1 = 0,21/\sqrt{R_o/d}$.

При определении B_1 для отвода прямоугольного сечения вместо R_o/d в соответствующие формулы подставляют R_o/b.

Значения A_1, B_1, C_1 приведены в таблицах 3.18...3.20.

3.18. Значения A_1 в зависимости от α [35]

α,°	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
A_1	0,31	0,45	0,6	0,78	0,9	1	1,13	1,2	1,28	1,4

3.19 Значения B_1 в зависимости от R_0/d (R_0/b) [35]

$R_0/d/(R_0/b)$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,25	1,5
B_1	1,18	0,77	0,51	0,37	0,28	0,21	0,19	0,17

3.20. Значения C_1 в зависимости от a/b [35]

a/b	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	7
C_1	1,3	1,17	1,09	1	0,9	0,85	0,85	0,9	0,95	0,98	1

Коэффициент $\zeta_{дл}$ определяют по формуле:

$$\zeta_{дл} = 0{,}0175 R_0 \alpha \lambda / d. \qquad (3.23)$$

В выражении (3.23) коэффициент λ вычисляют по формулам для трубопроводов.

Для отводов с шероховатыми стенками:

$$\zeta_{п.ш} = k_{\Delta} k_{Re} \zeta_п, \qquad (3.24)$$

где k_{Δ}, k_{Re} — коэффициенты, учитывающие соответственно шероховатость стенок отвода (табл. 3.21) и число Рейнольдса (табл. 3.22); $\zeta_п$ — коэффициент сопротивления отвода с гладкими стенками.

3.21. Значения k_{Δ} в зависимости от Re и Δ [35]

$R_0/d = 0{,}5 \ldots 0{,}55$			$R_0/d > 0{,}55$		
Δ	$Re = 3 \cdot 10^3 \ldots 4 \cdot 10^4$	$Re = 4 \cdot 10^4$	$Re = 3 \cdot 10^3 \ldots 4 \cdot 10^4$	$Re = 4 \cdot 10^4 \ldots 2 \cdot 10^5$	$Re > 2 \cdot 10^5$
$< 0{,}001$	1	$1 + 0{,}5 \cdot 10^3$	1	$\lambda_{\Delta}/\lambda_{гл}$	$1 + \Delta \cdot 10^3$
$> 0{,}001$	1	1	1	2	2

3.22. Значения k_{Re} в зависимости от Re и R_0/d [35]

R_0/d	$Re \cdot 10^{-5}$					
	0,1	0,14	0,2	0,3	0,4	0,6
0,50...0,55	1,40	1,33	1,26	1,19	1,14	1,09
0,55...0,70	1,67	1,58	1,49	1,40	1,34	1,26
0,70	2,00	1,89	1,77	1,64	1,56	1,46

R_0/d	$Re \cdot 10^{-5}$					
	0,8	1,0	1,4	2	3	4
0,50...0,55	1,06	1,04	1,00	1,00	1,00	1,00
0,55...0,70	1,21	1,19	1,17	1,14	1,06	1,00
0,70	1,38	1,30	1,15	1,02	1,00	1,00

Коэффициент сопротивления отвода при $3 \cdot 10^3 < \mathrm{Re} < 10^4$ равен

$$\zeta_0 = A_2/\mathrm{Re} + \zeta_п + \zeta_{дл}, \qquad (3.25)$$

где A_2 — коэффициент (табл. 3.23); $\zeta_п$, $\zeta_{дл}$ — коэффициенты сопротивлений на поворот и по длине.

3.23. Значения A_2 в зависимости от R_0/d [35]

R_0/d	0,50...0,55	0,55...0,70	> 0,70
$A_2 \cdot 10^{-3}$	4	6,5	2

Для плавно изогнутых отводов ($R_0/d \geqslant 3$) [35]:

$$\zeta_0 = 0{,}0175 \lambda_0 R_0 \alpha / d. \qquad (3.26)$$

При $50 < \mathrm{Re}\sqrt{0{,}5d/R_0} < 600$ $\lambda_0 = 20\,(0{,}5d/R_0)^{0,175}/\mathrm{Re}^{0,65}$; при $600 < \mathrm{Re}\sqrt{0{,}5d/R_0} < 1{,}4 \cdot 10^2$ $\lambda = 10{,}4\,(0{,}5\,d/R_0)^{0,225}/\mathrm{Re}^{0,55}$; при $1{,}4 \cdot 10^2 < \mathrm{Re}\sqrt{0{,}5d/R_0} < 5 \cdot 10^3$ $\lambda_0 = 5\,(0{,}5d/R_0)^{0,275}/\mathrm{Re}^{0,45}$.

Для труб круглого сечения коэффициент сопротивления плавного поворота определяют по формуле [13]:

$$\zeta_0 = a\zeta_{90}, \qquad (3.27)$$

где a — коэффициент, зависящий от угла поворота α (табл. 3.24); ζ_{90} — коэффициент сопротивления при $\alpha = 90°$. Для расчета ζ_{90} используют формулы: $\zeta_{90} = 0{,}02\,(100\lambda_0)^{2,5} + 0{,}106\,(d/R_0)^{2,5}$ или $\zeta_{90} = [0{,}2 + 0{,}001\,(100\lambda)^8]\sqrt{d/R}$.

При прямоугольном поперечном сечении $\zeta_{90} = 0{,}124 + 3{,}1 \times (0{,}5bR_0)^{3,5}$.

Для чугунных отводов на резьбе значения ζ_0 приведены в таблице 3.25.

3.24. Значения a в зависимости от α

α, °	20	30	40	50	60	70	80
a	0,40	0,55	0,65	0,75	0,83	0,88	0,95

α, °	90	100	120	140	160	180
a	1,00	1,05	1,13	1,20	1,27	1,33

Тройники, крестовины. Потери напора $h_б$ для отделяющегося потока в ответвление или для поступающего из ответвления можно выразить через коэффициент $\zeta_б$ и среднюю скорость $v_с$ общего потока (рис. 3.1) [58]:

$$h_б = \zeta_б v_с^2/(2g). \qquad (3.28)$$

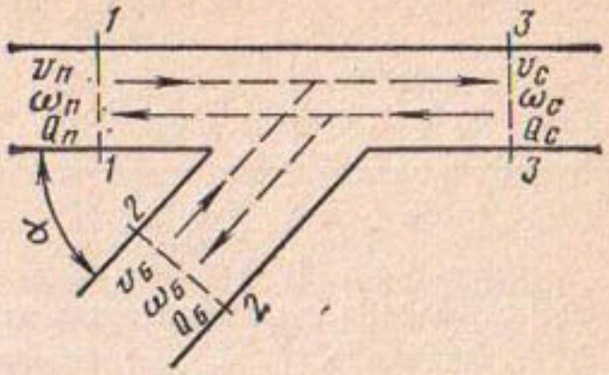


Рис. 3.1. Схема потоков в тройнике.

Для транзитного потока при разделении или слиянии потока потери $h_п$ равны:

$$h_п = \zeta_п v_с^2/(2g). \qquad (3.29)$$

3.25. Значения $\zeta_о$ для чугунных отводов на резьбе [35]

Угол поворота, град.	$d_у$, мм			
	15	25	32	50
30	0,81	0,52	0,32	0,19
45	0,73	0,38	0,27	0,23
90, угольник	2,19	1,98	1,60	1,07
90, $R_о/d = 1,36...1,67$	1,20	0,80	0,81	0,58
90, $R_о/d = 2...2,13$	0,82	0,53	0,53	0,35
180	1,23	0,70	0,65	0,58

При соединении потоков, согласно исследованиям В. П. Зубова,

$$\zeta_п = (2 - Q_б/Q_с)\, Q_б/Q_с - (1,4 - Q_б/Q_с) Q_б^2 \sin\alpha/Q_с^2 - \\ - 2c_п Q_б \omega_с \cos\alpha/Q_с \omega_б, \qquad (3.30)$$

где $c_п = 0,5$ при $Q_б/Q_с \leqslant 0,6$ и $\omega_б/\omega_с > 0,35$; в других случаях $c_п = 0,8 Q_б/Q_с$;

$$\zeta_б = \tau_{б.\,с}\, [2\,(2 - Q_б/Q_с)\, Q_б/Q_с - 1 + Q_б^2\,(\omega_с/\omega_б - 2\cos\alpha)\, \omega_с/Q_с^2 \omega_б)], \qquad (3.31)$$

где $\tau_{б.\,с}$ — коэффициент (табл. 3.26).

3.26. Значения коэффициентов $\tau_{б.\,с}$

$\omega_б/\omega_с \leqslant 0,35$	$\omega_б/\omega_с > 0,35$; $a_б/Q_с \geqslant 0,4$	$\omega_б/\omega_с > 0,35$; $Q_б/Q_с \leqslant 0,4$
1	0,55	0,9

При делении потоков

$$\zeta_п = 0,35 Q_б^2/Q_с, \qquad (3.32)$$

$$\zeta_б = \tau_{б.\,д}\, \{1 + [Q_б \omega_с/(Q_с \omega_б) - 2\cos\alpha]\, Q_б \omega_с/(Q_с \omega_б)\}, \qquad (3.33)$$

где $\tau_{б.\,д}$ — коэффициент (табл. 3.27).

3.27. Значения $\tau_{б.\,д}$

$\omega_б/\omega_с \leqslant 0,35$; $Q_б/Q_с \geqslant 0,4$	$\omega_б/\omega_с \leqslant 0,35$; $Q_б/Q_с \leqslant 0,4$	$\omega_б/\omega_с > 0,35$; $Q_б/Q_с > 0,6$	$\omega_б/\omega_с > 0,35$; $Q_б/Q_с \leqslant 0,6$
0,85	$\tau_{б.\,д}=1,1-0,7Q_б/Q_с$	0,6	$\tau_{б.\,д}=1-0,65Q_б/Q_с$

Арматура. В таблице 3.28 приведены значения коэффициентов сопротивлений для некоторых типов запорных устройств.

3.28. Значения $\zeta_{з.\,у}$ для различных типов запорных устройств при $Re > 10^4$

Тип запорного устройства	Расчетный диаметр, мм	Степень открытия	$\zeta_{з.\,д}$
Вентиль запорный муфтовый бронзовый тарельчатый без нижних направляющих	25,4		6,95...9,5
То же, с нижними направляющими	38,1		5,03...5,4
Вентиль угловой типа Косва чугунный фланцевый	38,1		1
То же	76,2		0,604
Задвижка типа Лудло, полностью открытая	101,6		0,107
Вентиль 15ч18бк, ГОСТ 6691—56	13	1	61
То же	27	1	81
Вентиль 15Б1ТУ07—53 МНП СССР	13	1	21,9
То же	27	1	26,2
Вентиль ВВДМ-15-160, ГОСТ 5761—56	13	1	28,4
То же	13	0,75	29,3
»	13	0,5	30,0
»	13	0,25	32,2
»	27	1	17,5
»	27	0,75	19,0
»	27	0,5	23,8
»	27	0,25	37,0
Кран проходной пробковый, ГОСТ 6681—56	13	1	1,5
То же	13	0,25	122
»	27	1	2,85
»	27	0,25	131
Клапан обратный 16Б1, ГОСТ 6681—56	13	—	18,6
Дроссельный клапан	13	1	2,75
Вентиль 15Б3К	13	1	22,4
То же	27	1	27,1
Кран проходной пробковый 11Ч6БК	13	1	1,9
То же	27	1	29,5
Вентиль ВИ-160, ГОСТ 5761—65	15	1	20,2
Задвижка 30Ч6БР	200...400	1	0,15
То же, 30Ч915бр	600...1000	1	0,10
То же, 30с964нж	500...800	1	0,12

В таблицах 3.29...3.33 приведены значения коэффициентов сопротивлений для некоторых типов запорных устройств при $Re > 10^4$.

3.29. Значения $\zeta_з$ для задвижки «Лудло»

h/d	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\zeta_з$	30,00	22,00	12,00	5,30	2,80	1,50	0,80	0,30	0,15

3.30. Значения $\zeta_з$ для задвижки с симметричным сужением в зависимости от l/d, d_c/d (l — длина задвижки; d_c — диаметр суженной части)

d	300	300	250	200
d_c/d	0,67	0,67	0,80	0,75
l/d	2,50	1,68	1,50	1,33
$\zeta_з$	1,45	1,80	0,39	0,60

3.31. Значения $\zeta_{п.к}$ пробкового крана

α, °	5	10	20	30	40	50	60	65
$\zeta_{п.к}$	0,05	0,29	1,56	5,47	17,30	52,60	206,00	486,00

3.32. Значения $\zeta_з$ для задвижек «Москва» при $h/d = 1$ (по данным ВНИИ ВОДГЕО)

d, мм	50	100	200	300	500...700	700...1000
$\zeta_з$	0,79	0,50	0,20	0,05	0,03	0,025

3.33. Значения $\zeta_з$ для задвижек «Москва» в зависимости от степени открытия h/d (по данным ВНИИ ВОДГЕО)

d, мм	h/d										
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
150	850	215	47	16	7,0	3,3	1,7	1,05	0,68	0,46	0,33
300	680	165	35	12	5,5	2,7	1,3	0,65	0,29	0,15	0,05
900	—	—	28	9	4,0	1,8	—	—	—	—	—

В таблице 3.34 даны значения $\zeta_{о.к}$ коэффициентов сопротивлений обратных клапанов с внецентренной осью [8].

3.34. Зависимость $\zeta_{о.к}$ от скорости движения потока v

Обратный клапан	v, м/с				
	1	2	3	4	5
С выгнуто-сферической тарелью, $d_у = 1\,000$ мм	6,0/30	1,8/8	0,7/3	0,7/3	0,7/3
ПТ 44007, $d_у = 800$ мм	12,0/60	2,2/12	0,7/3	0,6/2,8	0,6/2,8
ПФ 44025, $d_у = 1\,000$ мм	11/55	4/20	1,6/8	0,7/4	0,5/2
ПФ 44025, $d_у = 800$ мм	19,0/95	7/35	2/10	0,7/3	0,4/2

Примечание. В числителе $\zeta_{о.к}$; в знаменателе угол поворота тарели в градусах.

Для дисковых затворов с уплотнением по корпусу или диску значения коэффициентов местных сопротивлений $\zeta_{д.з}$ приведены в таблице 3.35 [8].

3.35. Значения $\zeta_{д.з}$ в зависимости от диаметра

Затвор	$d_у$, мм							
	50	100	150	200	300	500	600	1400
Дисковые затворы: с уплотнением по корпусу	—	0,45	0,40	0,36	0,30	—	0,09	—
с уплотнением по диску	0,95	0,50	—	—	0,35	0,30	—	0,175

Коэффициенты сопротивлений задвижек при $1{,}5 \cdot 10^4 < \mathrm{Re} < 3{,}5 \cdot 10^5$ можно определить по формуле [96]:

$$\zeta_з = \zeta_0 - c\mathrm{Re}, \tag{3.34}$$

где ζ_0 — условный коэффициент сопротивлений (табл. 3.36); c — коэффициент (табл. 3.36).

3.36. Значения ζ_0 и c для задвижек

d, мм	Степень открытия	ζ_0	c
50	0,25	17,5284	310,80
50	0,5	2,4509	114,75
50	0,75	0,6328	52,981
50	1,00	0,1599	24,91
100	0,25	16,6030	452,29
100	0,50	1,8137	155,22
100	0,75	0,9822	49,562
100	1,00	0,5345	19,022

Для расчета коэффициентов сопротивлений регулирующих клапанов можно использовать формулы Э. С. Арзуманова:

для угловых клапанов при $1{,}7 \leqslant h/D_г \leqslant 30$

$Re_{пр} = v_{пр} R_г/\nu \leqslant 10$

$$\zeta_{к.\,р} = (4{,}1h/D_г + 23)/Re_{пр}; \qquad (3.35)$$

$10 \leqslant Re_{пр} \leqslant 10^4$

$$\zeta_{к.\,р} = (25 + 4{,}7h/D_г)/Re_{пр} + 1; \qquad (3.36)$$

$Re_{пр} > 10^4$

$$\zeta_{к.\,р} = 0{,}18 + (1 - \omega_{пр}/\omega_{ус})^2; \qquad (3.37)$$

для двухседельных клапанов при $4 \leqslant h/D_г \leqslant 60$, $\omega_{пр}/\omega_{ус} \leqslant 0{,}2$

$Re_{пр} \leqslant 10$

$$\zeta_{к.\,р} = (0{,}5h/D_г + 26{,}9)/Re_{пр}; \qquad (3.38)$$

$10 \leqslant Re_{пр} \leqslant 500$

$$\zeta_{к.\,р} = (1{,}73 + 1{,}6h/D_г)/Re_{пр}; \qquad (3.39)$$

$Re_{пр} \geqslant 10^4$

$$\zeta_{к.\,р} = (1 - \omega_{пр}/\omega_{ус})^2 + 4{,}7\omega_{пр}/\omega_{ус}, \qquad (3.40)$$

где h — глубина погружения плунжера; $D_г = 4R_г$ — гидравлический диаметр проходного сечения дроссельного устройства; $R_г = \omega_{пр}/[\pi (D_с + d_{пл})]$ — гидравлический радиус; $\omega_{пр}$, $v_{пр}$ — площадь проходного сечения и скорость потока в нем; $D_с$ — диаметр седла дроссельного устройства, м; $d_{пл}$ — диаметр плунжера в плоскости, перпендикулярной проходному сечению.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления углового регулирующего клапана при кавитационном течении (в жидкости появляются области, заполненные парами и газами, выделяющимися из нее) можно использовать формулу А. И. Казеева:

$$\zeta_{к.\,р}^{кав} = \zeta_{к.\,р}\chi/\chi_{к.\,р}, \qquad (3.41)$$

где $\zeta_{к.\,р}$ — коэффициент гидравлического сопротивления клапана при бескавитационном течении; $\chi = (p_1 - p_2)/(p_1 - p_п)$ — значение коэффициента кавитации; p_1, p_2 — давление соответственно перед и за клапаном; $p_п$ — давление упругих паров жидкости при температуре потока; $\chi_{кр}$ — критическое значение коэффициента, при котором начинается кавитация в клапане.

Давление упругих паров (пары, насыщающие пространство, в котором они находятся) при температуре воды —30° С, —20, —10, 0, +10, 20, 30, 40° С соответственно равно 50,5 Па; 125,6; 279,6; 613; 1179; 2335; 4240; 7360 Па.

Для двухседельных регулирующих клапанов $\zeta_{к.р}^{кав}$ равен:

$$\zeta_{к.\,р}^{кав} = \zeta_1\zeta_2\chi/[\chi_{кр}(\sqrt{\zeta_2\chi/\chi_{кр}} + \sqrt{\zeta_1})^2], \qquad (3.42)$$

где ζ_1, ζ_2 — коэффициенты верхнего и нижнего седла.

Величину $\chi_{кр}$ можно рассчитать по данным Э. С. Арзуманова:

для угловых и двухседельных регулирующих клапанов при направлении потока на плунжер

$$\chi_{кр} = 0{,}39(\sqrt{(\zeta_{кр} - 1)/(0{,}117} + 1); \qquad (3.43)$$

для угловых регулирующих клапанов при направлении потока под плунжер

$$\chi_{кр} = (\sqrt{\zeta_{кр} - 0{,}39} + 0{,}625)^2 - 1. \qquad (3.44)$$

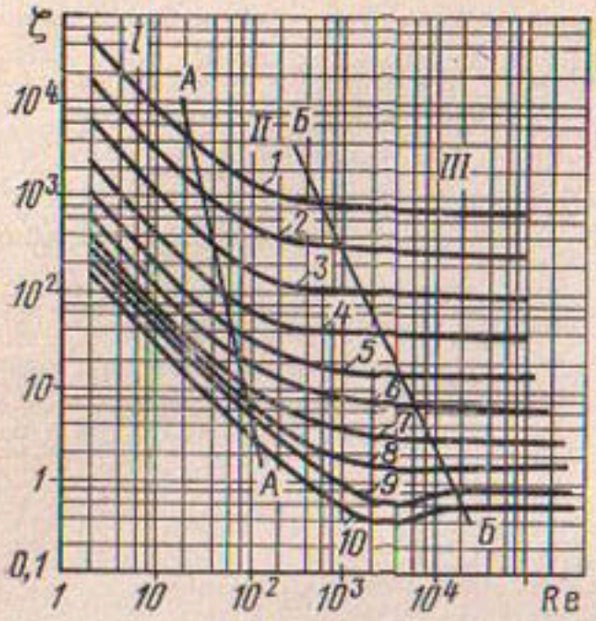


Рис. 3.2. Зависимость коэффициентов сопротивлений заслонки от Re (I, II, III — зоны различных значений Re) при угле открытия α: *1* — 9°; *2* — 18°; *3* — 27°; *4* — 36°; *5* — 45°; *6* — 54°; *7* — 63°; *8* — 72°; *9* — 81°; *10* — 90°.

Коэффициенты сопротивлений дисковых затворов можно определить по графикам (рис. 3.2) или по формуле:

$$\zeta_{д.з} = \frac{120\,[1+0{,}5\delta\,(1+\cos\alpha)]}{\mathrm{Re}_у\,(1-\delta^2\cos\alpha)^2} + (1-50/\mathrm{Re}_у),\,[1{,}56/(1-\delta^2\cos\alpha)-1]^2, \tag{3.45}$$

$\mathrm{Re}_у = 4Q/(\pi\nu d_у)$, $\delta = d_з/d_у$, где Q — объемный расход жидкости, м³/с; $d_у$ — внутренний диаметр трубопровода, м; ν — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; $d_з$ — наружный диаметр затвора; α — угол поворота затвора.

Формула (3.45) справедлива для $\alpha = 1 \ldots 60°$. Для I зоны (рис. 3.2) величина $(1-50/\mathrm{Re}_у) = 0$, а для III зоны равно нулю первое слагаемое.

Для гидранта ДКШ-64 «Волжанка» по Н. Г. Зубковой:

$$\zeta_г = 10^{2,454-1,608n} - \alpha, \tag{3.46}$$

где $n = h/d$ — степень открытия; h — подъем шпинделя; d — диаметр прохода; $\alpha \cong 1{,}05$ — коэффициент Кориолиса.

Для параллельных задвижек ($d = 200$ и 300) $\zeta_з$ при $\mathrm{Re} > 10^4$ можно определить по формуле В. А. Гурина:

$$\lg \zeta_з = 0{,}185d/h + 0{,}4\sqrt{4/d} + 0{,}77. \tag{3.47}$$

Для промежуточных открытий вентилей $\zeta_в$ ориентировочно [35] равен:

$d_у = 75$ мм

$$\zeta_в = 0{,}3 + 0{,}22\,d^7/h^7; \tag{3.48}$$

$d_у = 100$ мм

$$\zeta_в = 4 + 0{,}107d^5/h^5; \tag{3.49}$$

$d_у = 150$ мм

$$\zeta_в = 1{,}7 + 0{,}75d^2/h^2 \tag{3.50}$$

Значения коэффициентов сопротивлений кранов ζ и A_1 (формула (3.5) [5]) приведены в таблице 3.37 [109].

3.37. Значения ζ для кранов и A_1

α, °	A_1	Re							
		5	10	30	50	100	200	500	$27\cdot10^3...76\cdot10^3$
0	150	30	16,5	8	5	3	2,1	1,7	1,68
5	220	45	25,5	10,5	7	4,5	3,4	3,1	2,48
10	318	60	35	13,5	9	6	4,5	4,0	3,2
15	370	77	42	17	11,5	7,5	5,8	5,4	5,2
20	430	95	50	20	14,5	9	7,2	6,8	7,0
25	560	133	65	29	21	15	13,5	12,5	13,0
30	695	160	88	38	27,5	21	19,5	18,5	19,6
35	910	216	125	64,3	52,2	43,7	38,55	35,82	34
40	1680	380	217	105	83	72	68	65	49
45	4500	875	575	295	235	180	155	145	126

Примечание. Степень прикрытия крана выражена через α, при $\alpha=0$ кран полностью открыт.

Значения коэффициентов сопротивлений обратных клапанов с односторонней подвеской в зависимости от угла открытия диска α даны в таблице 3.38 [15,110].

3.38. Значения $\zeta_{о.к}$ в зависимости от α при $Re > 10^4$

$d_у$, мм	α, °									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
50...150	—	8,00	3,00	2,40	2,10	2,00	1,87	1,80	1,70	1,50
При прямом движении жидкости										
150	16	5	3,2	2,5	2,1	2	1,9	1,8	1,4	1
При обратном движении жидкости										
150	35	9	4,5	3,3	2,9	2,5	2,1	1,9	1,6	1,3

Примечание. При $Re > 10^4$, $15° < \alpha < 45°$, $d_у = 100$ и 150 мм $\zeta_{о.к} = 1{,}62 + 0{,}112/\alpha^{1,94}$ [110] (α — угол открытия диска, рад); при $Re < 250$ $\lg \zeta_{о.к} = A - 1{,}44 \lg Re$ (значения A приведены в таблице 3.39 [1]).

3.39. Значения A в зависимости от ν

ν, см²/с	1,6	1,25	0,9	0,55	0,18
A	5,05	5,14	5,23	5,33	5,54

Сварные стыки, соединения. При $Re > 2300$ коэффициенты сопротивлений сварных стыков (с подкладными кольцами) стальных труб можно определять по формуле:

$$\zeta_{ст} = 2\delta/d + 16\delta^2/d^2,$$
$$\delta = \delta_к + 1, \qquad (3.51)$$

где $\delta_к$ — толщина кольца; d — внутренний диаметр трубопровода.

Для стыков без накладных колец:

$$\zeta_{ст} = 1{,}2\delta/d + 16\delta^2/d^2, \qquad (3.52)$$

где δ — высота грата (при высоком качестве сварки ориентировочно $\delta = 3$ мм, в остальных случаях $\delta = 6$ мм).

Коэффициенты сопротивлений в стыках полиэтиленовых труб в зависимости от их длины и наружного диаметра при контактной сварке можно принять по данным таблицы 3.40 [54].

3.40. Коэффициенты сопротивлений в стыках полиэтиленовых труб

Наружный диаметр труб, мм	Высота выступа, мм					
	2,5			4,7		
	длина труб, м			длина труб, м		
	6	8	12	6	8	12
25	1,21	1,16	1,10	2,71	2,28	1,86
32	1,16	1,12	1,08	1,87	1,65	1,43
40	1,13	1,10	1,06	1,57	1,42	1,28
50	1,11	1,08	1,05	1,41	1,31	1,20
63	1,09	1,07	1,04	1,30	1,24	1,15
75	1,08	1,06	1,04	1,27	1,23	1,13
90	1,08	1,06	1,04	1,23	1,17	1,12
110	1,07	1,05	1,04	1,20	1,15	1,10
140	1,07	1,05	1,03	1,18	1,14	1,09
160	1,06	1,05	1,03	1,17	1,12	1,08
225	1,06	1,05	1,03	1,15	1,11	1,07
280	1,06	1,05	1,03	1,14	1,10	1,07
315	1,06	1,05	1,03	1,13	1,10	1,07

Значение коэффициентов сопротивлений для различных соединений пластмассовых труб можно рассчитать по данным таблицы 3.41.

3.41. Значения $\zeta_{соед}$ для соединений полиэтиленовых и винипластовых труб при $Re > 10^4$ [63]

Соединение	Расчетные формулы	Re
Фланцевое	$\zeta_{соед} = 0{,}148 - 0{,}344d$	$2{,}8 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$
Сварное	$\zeta_{соед} = 0{,}0046/d^{1{,}75}$	$1{,}8 \cdot 10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$
Раструбное	$\zeta_{соед} = 0{,}133 - 0{,}225d$	$2{,}4 \cdot 10^5 < Re < 5{,}6 \cdot 10^5$
Муфтовое	$\zeta_{соед} = 0{,}045 - 0{,}156d$	$1{,}8 \cdot 10^5 < Re < 6 \cdot 10^5$

Сетки, решетки. Для определения коэффициентов сопротивлений сеток в общем случае целесообразно использовать формулу [5]:

$$\zeta_c = 16\pi m^{3/2}/(Re_a \lg \cos 0{,}5\pi m) + \zeta_{кв}; \qquad (3.53)$$

$$Re = va/\nu,$$

где $m = a/t$ — коэффициент живого сечения; a — ширина щели; t — шаг расположения щелей; v — средняя скорость в ячейках сетки.

Для расчета ζ_c для сеток, наиболее часто применяемых

$(0{,}3 < m < 0{,}85)$, в зависимости от Re можно использовать формулы:

$$\mathrm{Re}_a < 5\,(1{,}18-m)/(1{,}05-m)$$
$$\zeta_c = (92-78m)/\mathrm{Re}_a; \qquad (3.54)$$
$$5\,(1{,}18-m)/(1{,}05-m) < \mathrm{Re}_a < 2200\,(1{,}18-m)/(1{,}05-m)$$
$$\zeta_c = (92-78m)/\mathrm{Re}_a + 0{,}7\,(1{,}05-m); \qquad (3.55)$$
$$\mathrm{Re}_a > 2200\,(1{,}18-m)/(1{,}05-m)$$
$$\zeta_c = 0{,}7\,(1{,}05-m); \qquad (3.56)$$
$$\zeta_c = [(1{,}1-m)/(1{,}2-1{,}56m+0{,}46m^2)-m]^2 \text{ (для любых значений } m). \qquad (3.57)$$

При пропуске через сетку естественно загрязненной речной воды правомерна зависимость (3.56) при условии, если площадь участка сетки, через который вода не проходит, к концу фильтрации не превышает 10...15% общей площади сетки. Для учета частичного загрязнения сетки в формулу (3.56) следует вводить коэффициент, равный 1,2 ... 1,3.

Потери напора в сетке при фильтрации загрязненной жидкости равны:

$$h_c = \frac{[46-39m\,(1-k)]\,\nu v_1}{agm\,(1-k)} + 0{,}35\,[1{,}05-m\,(1-k)]\,\frac{v_1^2}{g\,(1-k)^2\,m^2}, \qquad (3.58)$$

где $v_1 = vm$; $k = 0{,}8cQ\tau/(m\gamma aF)$ — коэффициент загрязнения сетки; c — концентрация (по массе) твердой фазы размером более a; Q — расход воды через сетку; τ — время фильтрации; γ — плотность твердой фазы; F — площадь участка сетки, свободного от загрязнения в начале фильтрации.

Коэффициенты сопротивления всасывающего клапана с сеткой приведены в таблице 3.42.

3.42. Значения $\zeta_{кл}$ для всасывающего клапана с сеткой

d, мм	40	70	100	150	200	300	500	750
$\zeta_{кл}$	12	8,5	7,0	6,0	4,7	3,7	2,5	1,6

Для определения значений сопротивления решеток при фронтальном подходе потока к ним используют формулу А. Р. Березинского с поправкой В. Б. Дульнева:

$$\zeta_р = c\beta\,[S/(S+b)]^{1,6}\,[2{,}3l/b+8+2{,}4b/l]\sin\alpha; \qquad (3.59)$$
$$c = 1/(1-h_э/L)^2,$$

где $h_э = a_1n_1 + dn_2$ — суммарная высота поперечных элементов; a, n_1 — высота и число промежуточных опорных балок; d, n_2 — диаметр и число распорносвязных элементов; L — высота решетки в свету (рис. 3.3, *а*); β — коэффициент формы стержня (табл. 3.43); S — толщина стержня решетки (рис. 3.3, *б*); b — ширина просвета между стержнями; l — ширина стержня; α — угол наклона решетки к линии горизонта.

3.43. Значения коэффициента формы стержня β

Стержень	1	2	3	4	5	6	7
β	0,5	0,37	0,32	0,21	0,18	0,15	0,36

Примечание. 1...7 — обозначения стержней разной формы на рисунке 3.3, *в*.

Значения коэффициента сопротивления вертикально поставленной решетки ζ_δ с прямоугольными стержнями, расположенными под углом (90—δ) к направлению потока, приведены в таблице 3.44.

При косом расположении решетки в плане (рис. 3.3, *г*) ζ'_p равен:

$$\zeta'_p = 2c\zeta_\delta\beta \sin \alpha. \qquad (3.60)$$

3.44. Значения коэффициента сопротивления ζ_δ

ζ_{90}	δ,°					
	10	20	30	40	50	60
0,50	2,40	2,68	3,00	3,40	4,0	5,0
0,55	1,78	2,00	2,25	2,75	3,5	4,7
0,60	1,30	1,50	1,80	2,30	3,0	4,5
0,65	1,10	1,23	1,50	1,90	2,9	4,3
0,70	0,80	1,00	1,20	1,50	2,7	4,0
0,75	0,70	0,73	1,00	1,40	2,3	3,7
0,80	0,40	0,60	0,80	1,20	1,9	3,3
0,85	0,25	0,40	0,70	1,00	1,5	3,0

Стабилизация потока за местным сопротивлением. Длину прямого участка, на котором стабилизируется поток после внезапного расширения, по данным В. Н. Карева, можно определить из соотношения:

при $\mathrm{Re} = v_1 d_1/\nu \leqslant 15$

$$l_c/d_2 = -1{,}156 + 0{,}774 \lg \mathrm{Re}, \qquad (3.61)$$

где d_2 — диаметр трубопровода в расширенной части; v_1 — средняя скорость до расширения; d_1 — диаметр трубопровода в суженной части;

при $15 < \mathrm{Re} < 2 \cdot 10^4$

$$\lg (l_c/d_2) = -0{,}276 + b (\lg \mathrm{Re} - 1{,}176), \qquad (3.62)$$

$$b = 0{,}26 + 0{,}305\omega_1/\omega_2,$$

где ω_1, ω_2 — площадь сечений трубопровода до и после внезапного расширения.

Приведем соотношение для определения l_c для некоторых запорных устройств (по Р. Е. Везиряну):

задвижка ($d_y = 15$ мм) — $l_c/d = 0{,}84\,\mathrm{Re}^{0,56}$ при $\mathrm{Re} < 10^3$, $l_c/d = 44{,}6 \lg \mathrm{Re} - 151$ при $\mathrm{Re} > 10^4$;

заслонка ($d_y = 15$ мм) малого сопротивления — $l_c/d = 0{,}553\mathrm{Re}^{0,73}$ при $\mathrm{Re} < 10^3$, $l_c/d = 34 \lg \mathrm{Re} - 100$ при $\mathrm{Re} > 10^4$;

вентиль ($d_y = 15$ мм) типа 15Б1 бр — $l_c/d = 44{,}6 \lg \mathrm{Re} - 153{,}5$ при $\mathrm{Re} > 10^4$;

регулирующий клапан ($d_y = 15$ мм) — $l_c/d = 44{,}6 \lg \mathrm{Re} - 149$ при $\mathrm{Re} > 10^4$.

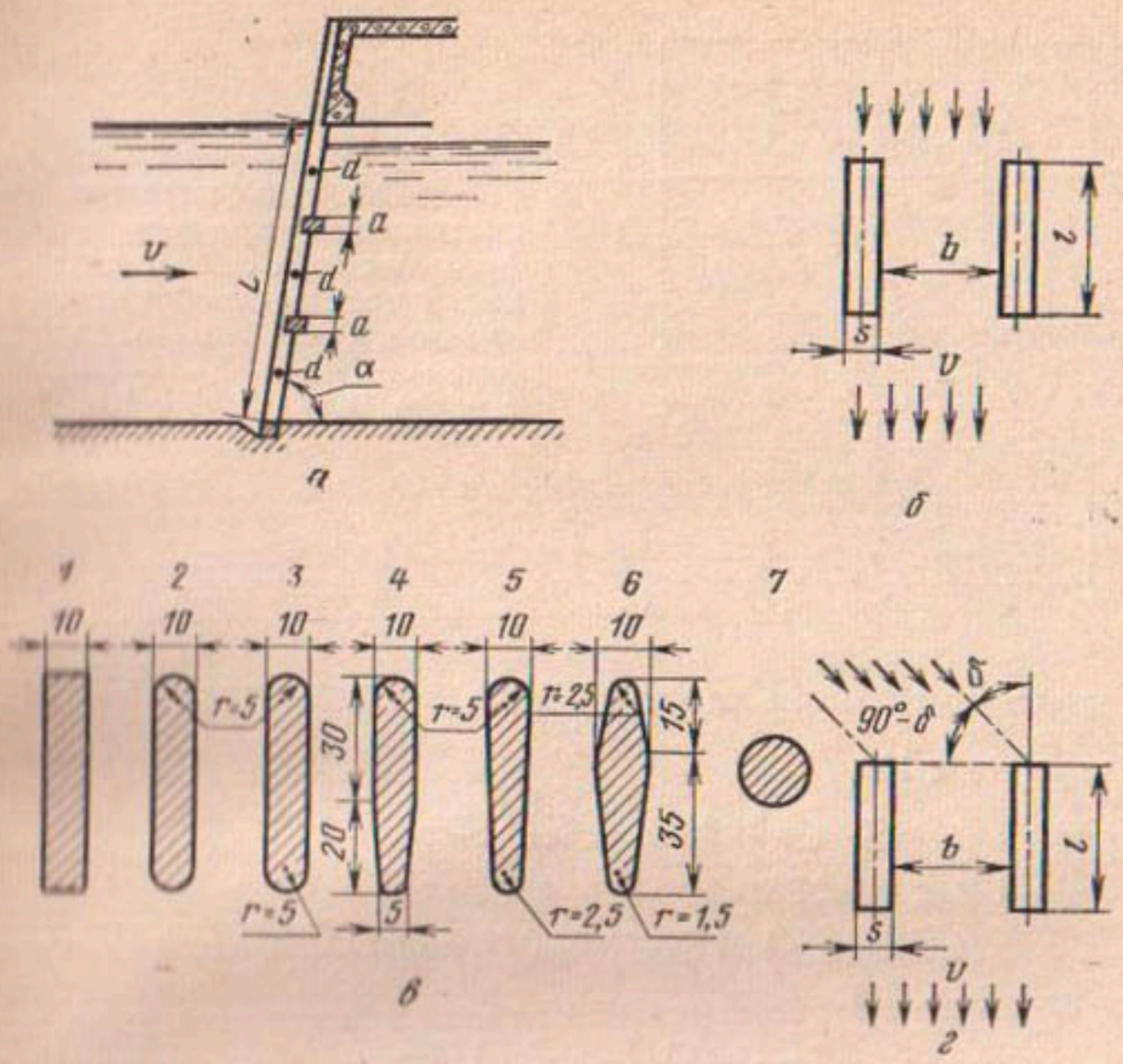


Рис. 3.3. Расчетные схемы для определения потерь напора в решетках.

Стабилизация потока за шаровым краном (затвором) наступает на длине $l_c = (10-35)\,d$ (табл. 3.45) [112].

3.45. Значения l_c для шарового крана (затвора) в зависимости от угла закрытия φ

φ, °	10	20	30	40	50	60
l_c/d	10...19	19...20	28...35	28...35	19...28	20

Взаимное влияние местных сопротивлений. Длина участка $l_в$ между местными сопротивлениями, на которой проявляется эффект взаимного их влияния, ориентировочно равна [5]:

для турбулентного режима движения

$$l_в/d = 1{,}2/\sqrt{\lambda} - 50; \qquad (3.63)$$

ламинарного

$$l_в/d = 1{,}25\sqrt{\mathrm{Re}}. \qquad (3.64)$$

Для запорных устройств при их взаимном влиянии (приближенно $l_в/d \leq 60$) суммарные коэффициенты местных сопротивлений реко-

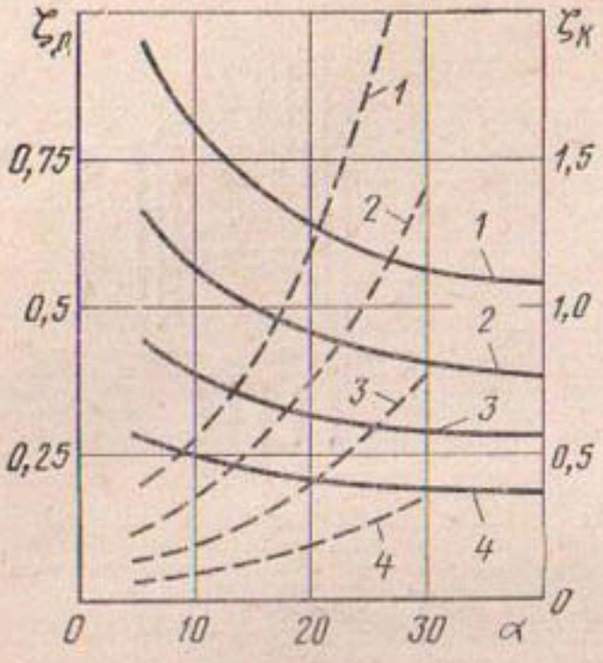


Рис. 3.4. Номограмма для определения коэффициентов сопротивлений конфузорно-диффузорных переходов с задвижками (сплошные линии для конфузоров, пунктирные — для диффузоров): *1*, *2*, *3*, *4* — соответственно для $d_т/d_с = 1{,}5$; 1,4; 1,3; 1,2.

мендуется подсчитывать по формулам Ю. А. Скобельцына, П. В. Хомутова:

при $Re < 160$

$$\zeta_{1+2} = 31{,}2/(\zeta_{кв_1} + \zeta_{кв_2})\,(2-\beta)/Re^{0,785}; \qquad (3.65)$$

при $160 \leqslant Re \leqslant 500$

$$\zeta_{1+2} = 1{,}31\,(\zeta_{кв_1} + \zeta_{кв_2})\,(2-\beta)/Re^{0,159}; \qquad (3.66)$$

при $Re > 500$

$$\zeta_{1+2} = 0{,}5\,(\zeta_{кв_1} + \zeta_{кв_2})\,(2-\beta), \qquad (3.67)$$

где $\zeta_{кв_1}$, $\zeta_{кв_2}$ — коэффициенты единичных местных сопротивлений в квадратичной зоне; Re — число Рейнольдса, отнесенное к средней скорости и внутреннему диаметру трубопровода. Для прямоточной по проходу запорной арматуры $\beta = 22{,}2 \cdot 10^{-5} l_в^2/d^2 - 26{,}7 \cdot 10^{-3} l_в/d + 0{,}8$; для остальных видов $\beta = 4{,}17 \cdot 10^{-5} l_в^2/d^2 - 5 \cdot 10^{-3} l_в/d + 0{,}15$.

Формулы (3.65) ... (3.67) можно использовать для ориентировочного расчета потерь напоров и в других видах местных сопротивлений при их взаимном влиянии.

Степень взаимного влияния местных сопротивлений узла установки регулирующих устройств оценивают коэффициентом интерференции (приращение суммарного коэффициента сопротивления двух запорных устройств и регулирующего устройства к их арифметической сумме):

$$\beta = [\zeta_{з.у_1+ро+з.у_2} - (\zeta_{з.у_1} + \zeta_{ро} + \zeta_{з.у_2})]/(\zeta_{з.у_1} + \zeta_{ро} + \zeta_{з.у_2}). \qquad (3.68)$$

Для сочетания вентиль — двухседельный регулирующий орган — вентиль (степень открытия вентилей 0,23) при $Re > 10^4$ (по Р. Е. Везиряну): $\beta = -5{,}1\, l d_у^{-0,01} (l/d_у)^2/h_д l$ ($h_д$ — степень открытия двухседельного регулирующего устройства; l — расстояние между вентилями и регулирующим устройством; $d_у$ — диаметр трубопровода). При степени открытия вентилей 1 $\beta = -3{,}8\, e^{0,015} (l/d_у)^{1,5}$.

Для системы задвижка — двухседельное регулирующее устройство — задвижка при степени открытия задвижки: 0,5 — $\beta = -6\, e^{-0,004 (l/d_у)^2}$; 0,31 — $\beta = 18\, (l/d_у)^{-1,4}$; 0,125 — $\beta = 92/[(l/d_у)^2 + 7]$.

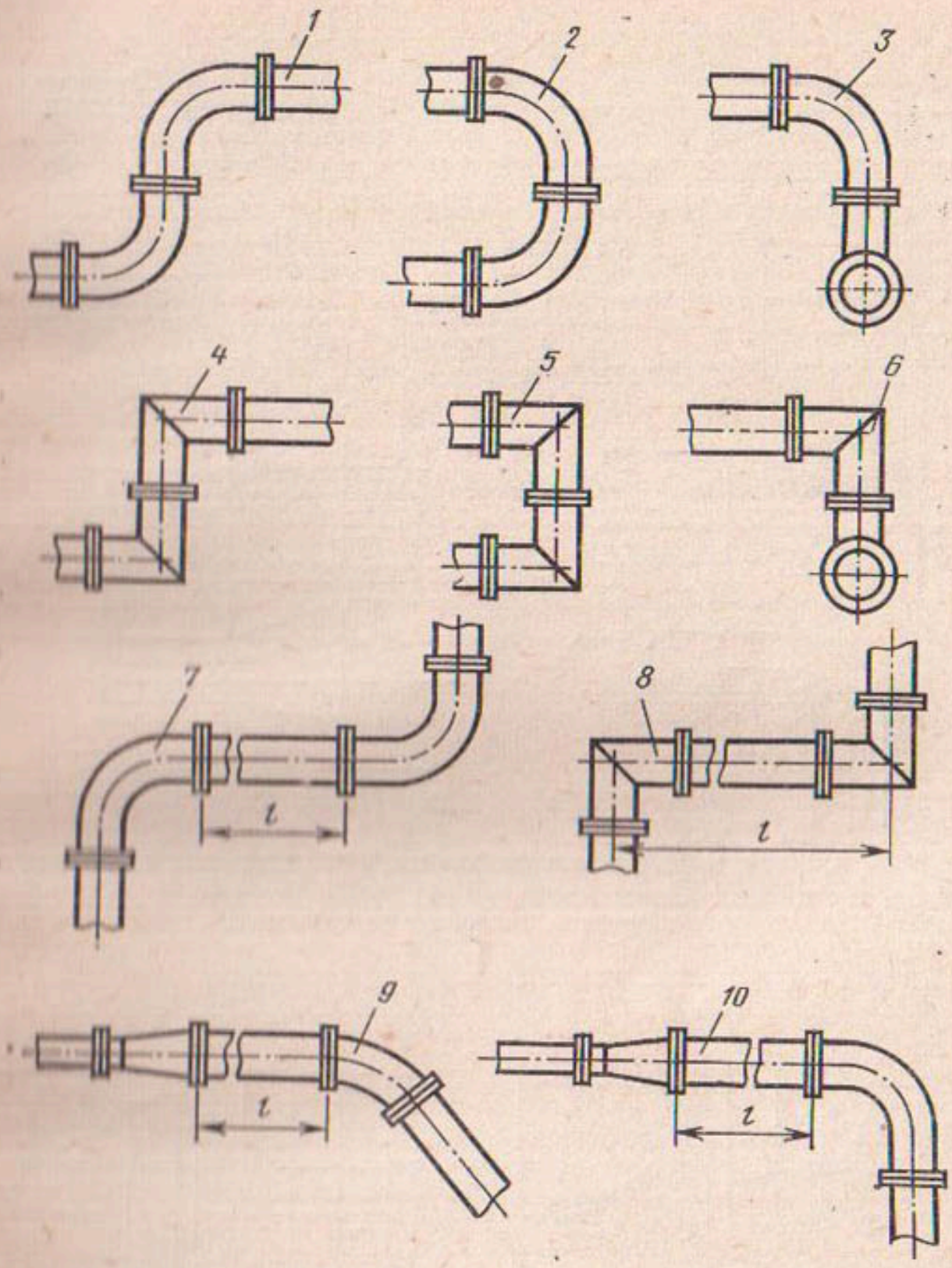


Рис. 3.5. Схема соединения отводов.

Коэффициенты сопротивлений узла, состоящего из конфузорно-диффузорного перехода с задвижкой, при $Re > 10^4$ можно определить по формуле [114]: $\zeta_{к.з.д.} = \zeta_1 + \zeta_д$ ($\zeta_1 = \zeta_к + \zeta_з$ — суммарный коэффициент местного сопротивления конфузора и задвижки; $\zeta_д$ — коэффициент местного сопротивления диффузора (рис. 3.4).

Для отводов типа «Утка» при $Re \geq 10^4$ (по И. З. Гольденбергу):

$$l_{max}/d = 0{,}93\,\alpha r\varphi/(\delta d\sqrt{2\cos\varphi}), \qquad (3.69)$$

$$l_{min}/d = 0{,}76\,\alpha r\,(\pi+\varphi)/(\delta d\sqrt{2\cos\varphi}), \qquad (3.70)$$

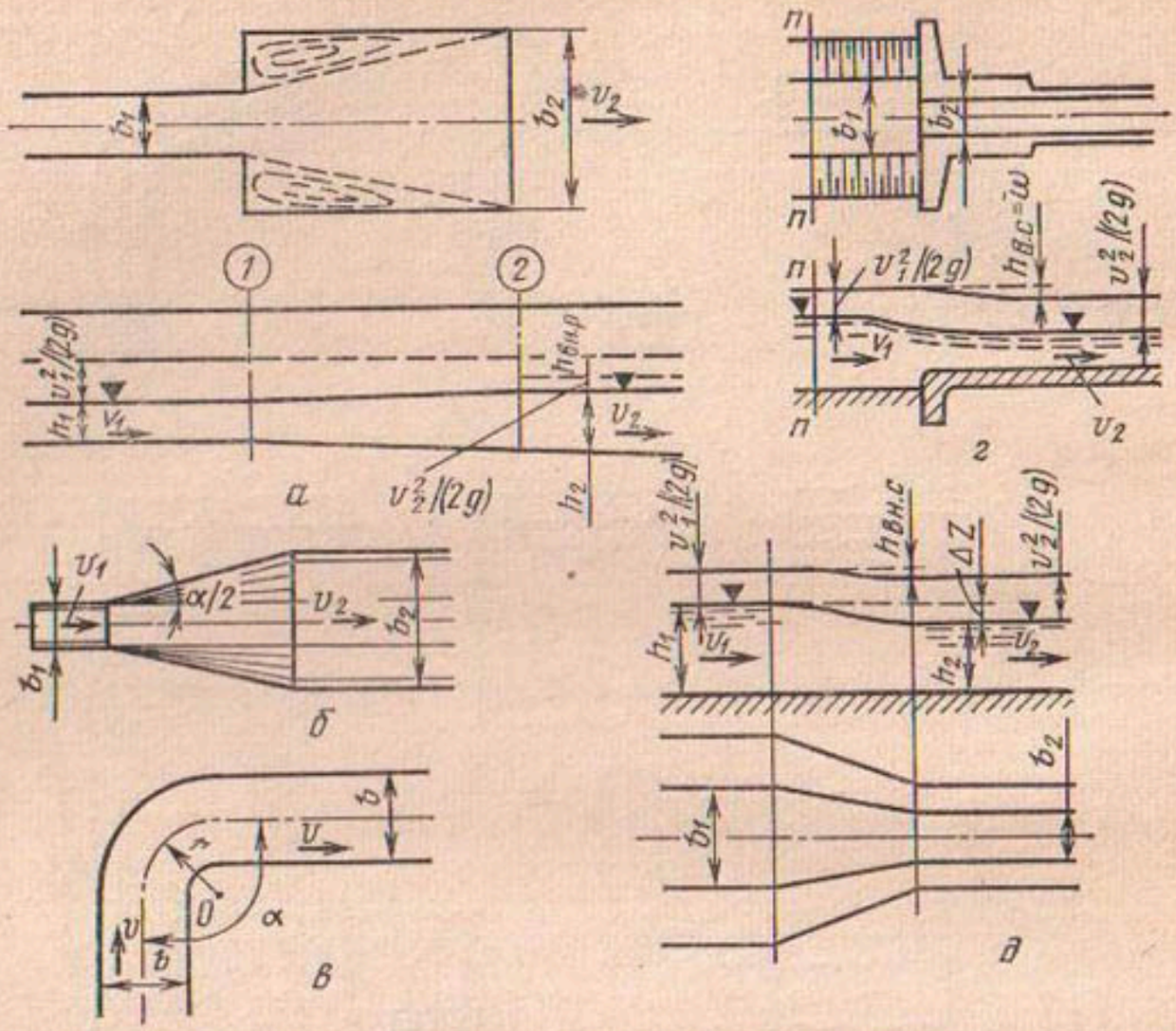


Рис. 3.6. Местные сопротивления в открытых руслах: *а*, *б* — внезапное и постепенное расширение канала; *в* — поворот; *г*, *д* — внезапное и постепенное сужение.

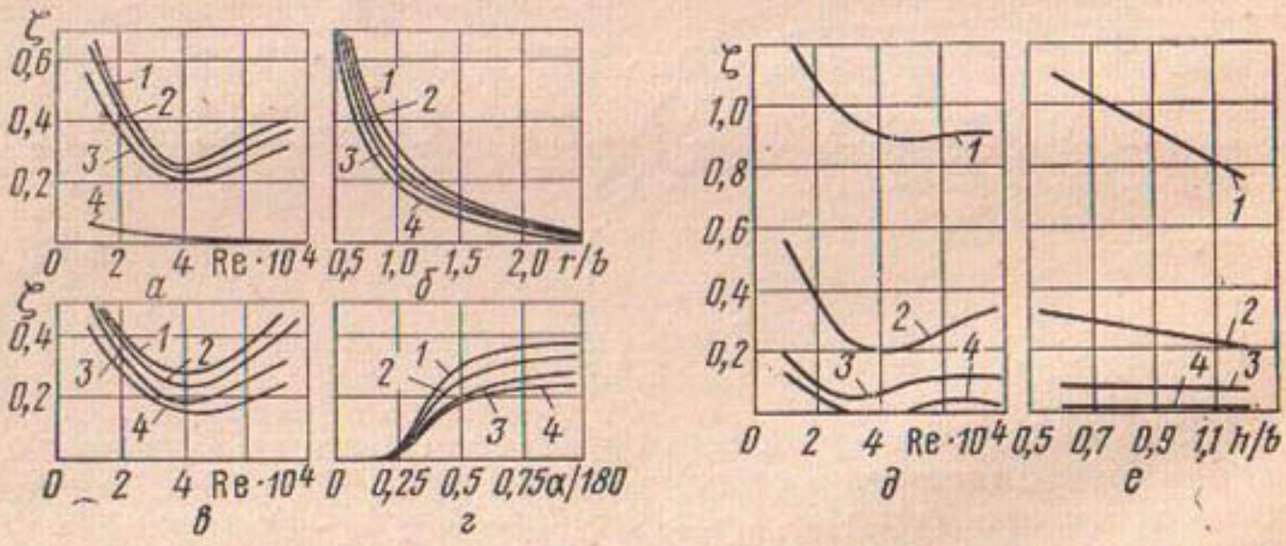


Рис. 3.7. Коэффициенты сопротивления при повороте открытого канала: *а* — $h/b=1$; $r/b=1$; 1...4 — соответственно $\alpha/180°=1$; 0,75; 0,5; 0,25; *б* — Re = 31 500, $\alpha/180°=0{,}5$; *в* — $r/b=1$, $\alpha/180°=0{,}5$; *г* — Re = 31 500, $r/b=1$; 1...4 (для *б*, *в*, *г*) — $h/b=0{,}6$; 0,8; 1; 1,2; *д* — $h/b=1$, $\alpha/180°=0{,}5$; *е* — Re = 31 500, $\alpha/180°=0{,}5$; 1...4 — $r/b=0{,}5$; 1, 2, 3.

где l_{max}, l_{min} — максимальное и минимальное расстояние между отводами, при которых коэффициенты местных сопротивлений системы имеют экстремальные значения; α — угол отводов, рад; r — радиус кривизны отводов; d — внутренний диаметр трубопровода $\delta = 1{,}48\,\alpha\sqrt{r/d}/\sqrt{1+1{,}24/c_n}$; $\varphi = 1{,}65\cos\delta - 0{,}08\cos^3\delta$; $c_n = 3\,(1-2k-0{,}88k^2)$; $k = 0{,}24^{n+1}\,(0{,}76n+1{,}76)$; n — показатель степени в формуле для турбулентного профиля скорости, $n \cong 0{,}9\sqrt{\lambda}$.

Экстремальные значения местных сопротивлений ориентировочно равны: $\zeta_{y_{max}} = 0{,}0045\,\alpha\sqrt{d/r}$; $\zeta_{y_{min}} = 0{,}0035\,\alpha\sqrt{d/r}$, где α — угол отвода, град.

При последовательном соединении колен в напорных трубопроводах коэффициенты местных сопротивлений можно определять по данным таблиц 3.46, 3.47 [76].

3.46. Суммарные коэффициенты местных сопротивлений

Узел (рис. 3.5)	Относительное расстояние между местными сопротивлениями в трубопроводе	ζ_c	Узел (рис. 3.5)	Относительное расстояние между местными сопротивлениями в трубопроводе	ζ_c
1	0,00	0,588	8	3,2	2,88
2	0,00	0,395	8	6,4	2,58
3	0,00	0,462	8	10,8	2,38
4	0,00	0,588	8	17,2	2,33
4	3,2	0,505	9	0,0	1,142
4	6,4	0,451	9	3,2	1,108
4	10,8	0,411	9	10,8	1,1002
4	17,2	0,398	9	17,2	0,956
5	0,00	3,200	10	0	1,243
6	0,00	2,130	10	3,2	1,218
7	0,00	2,880	10	10,8	1,135
8	0,00	3,200	10	17,2	1,046

3.47. Суммарные коэффициенты местных сопротивлений на участке между входом в первый отвод и входом во второе сопротивление

Элементы	Последний элемент	ζ_c
Отвод $\alpha = 55°$, $R = 2{,}1\,d$ и труба $l = 1\,d$	Отвод $\alpha = 90°$	0,089
То же, $l = 1{,}7\,d$	То же	0,089
» , $l = 3\,d$	» »	0,152
Отвод $\alpha = 55°$, $R = 3\,d$ и труба $l = 0{,}6\,d$	Тройник	0,082
Отвод $\alpha = 55°$, $R = 2\,d$	Спиральная камера	0,12
То же и труба $l = 1{,}03\,d$	То же	0,13
Отвод $\alpha = 55°$, $R = 4\,d$	» »	0,12

Местные сопротивления в открытых руслах [41]. Для каналов прямоугольного поперечного сечения потери напора определяют по формулам:

внезапное расширение (рис. 3.6, *а*)

$$h_{в.\,р} = (v_1 - v_2)^2/2g - (h_2 - h_1)/(2h_2); \qquad (3.71)$$

постепенное расширение (рис. 3.6, *б*)

$$h_{п.\,р} = \eta\,(v_1 - v_2)^2/(2g), \qquad (3.72)$$

где η — коэффициент смягчения, при угле расширения 20°, 40 и $\geqslant$ $\geqslant 60°$ $\eta = 0{,}45$; 0,9; 1;

внезапное сужение (рис. 3.6, *г*)

$$h_{в.\,с} = k_{в.\,с}\,(v_2^2 - v_1^2)/2g, \qquad (3.73)$$

где $k_{в.\,с}$ — коэффициент, при $b_2/b_1 = 0{,}1 \ldots 0{,}5$ $k_{в.\,с} = 0{,}5 \ldots 0{,}6$;

постепенное сужение (рис. 3.6, *д*)

$$h_{п.\,с} = (1 + k_{п.\,с})\,(v_2^2 - v_1^2)/2g, \qquad (3.74)$$

где $k_{п.\,с}$ — коэффициент, $k_{п.\,с} = 0{,}15$, для очень плавных сопряжений $k_{п.\,с} = 0{,}05$.

При повороте (рис. 3.6, *в*) канала коэффициент сопротивления $\zeta_п$ определяют по графикам (рис. 3.7).

Глава 4

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ И БЕЗНАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Общие положения. Потери напора по длине в общем случае определяют по формуле:

$$h_{дл} = \lambda l v^2/(d_э 2g), \tag{4.1}$$

где λ — коэффициент гидравлического трения; l — длина участка трубопровода, на котором определяют потери напора, м; $d_э$ — эквивалентный диаметр, $d_э = d_{тр}$ — для труб круглого сечения при напорном режиме движения потока, в остальных случаях $d_э = 4R = 4w/\chi$, м; R — гидравлический радиус, м; ω, χ — площадь поперечного сечения потока (м²) и его смоченный периметр (м); v — средняя скорость потока, м/с; g — ускорение свободного падения тела, м/с².

Для расчета $h_{дл}$ при турбулентном режиме движения потока можно использовать формулы:

$$h_{дл} = k_п A l Q^2; \tag{4.2}$$

$$h_{дл} = sQ^2; \tag{4.3}$$

$$h_{дл} = lG^2/K^2, \tag{4.4}$$

где $k_п$ — поправочный коэффициент, учитывающий скорость движения (табл. 4.1); A — сопротивление на единицу длины трубопровода; Q — расход жидкости через данное поперечное сечение потока; S — сопротивление трубопровода длиной l; $K = \omega C \sqrt{R}$ — модуль расхода; $C = R^y/n$ — коэффициент Шези; n — коэффициент шероховатости (табл. 4.2), по В. Г. Лобачеву $n = 0{,}0395 \sqrt[6]{\Delta}$ (Δ — абсолютная шероховатость); $y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}1)$ — показатель степени, приближенно при $R < 1$ м $y = 1{,}5\sqrt{n}$; $R > 1$ м $y = 1{,}3\sqrt{n}$.

4.1. Значения коэффициента $k_п$ для эксплуатируемых стальных и чугунных труб

v, м/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,10	1,20
$k_п$	1,408	1,281	1,204	1,152	1,085	1,043	1,027	1,014	1

4.2. Значения коэффициента шероховатости n (по Н. Н. Павловскому)

Материал труб и их состояние	n
Весьма гладкие поверхности труб, например эмалированные, стеклянные	0,009
Новые чугунные трубы	0,011
Новые стальные водопроводные трубы, бетонные трубы	0,012
Несколько загрязненные водопроводные трубы	0,013
Загрязненные водопроводные трубы	0,014

4.3. Предельные экономические расходы (л/с) для асбестоцементных трубопроводов (ГОСТ 539—73 и ГОСТ 5990—71)

$d_у$, мм	ВТ6	ВТ9	ВТ12
100	До 8,9	До 8,2	До 7,4
150	8,9...19,0	8,2...17,5	7,4...15,8
200	19,0...35,1	17,5...32,2	15,8...29,5
250	35,1...55,7	32,2...51,1	29,5...47,5
300	55,7...80,7	51,1...74,2	47,5...68,8
350	80,7...111,8	74,2...102,8	68,8...95,3
400	111,8...166,5	102,8...153,2	95,3...141,7
500	166,5...282,8	153,2...269,3	141,7...257,4

4.4. Предельные экономические расходы (л/с) для чугунных (ГОСТ 9583—75) и эксплуатируемых стальных трубопроводов (ГОСТ 10704—63 и ГОСТ 8696—74)

$d_у$, мм	Чугунные			Стальные
	ЛА	А	В	
100	5,4...8,9	5,2...8,6	5,1...8,3	До 8,1
125	8,9...14,1	8,6...13,7	8,3...13,4	8,1...12,8
150	14,1...23,6	13,7...23,0	13,4...22,5	12,8...22,7
200	23,6...42,4	23...41,6	22,5...40,8	22,7...44,1
250	42,4...67,8	41,6...66,6	40,8...65,5	44,1...70,9
300	67,8...99,9	66,6...98,4	65,5...96,9	70,9...104,1
350	99,9...138,2	98,4...136,3	96,9...134,3	104,1...143,2
400	138...203,9	136,3...201,1	134,3...198,5	143,2...189,6
500	203,9	201,1	198,5	246,1...335,8

Пределы значений экономически наивыгоднейшего диаметра (обеспечивает минимум капиталовложений и эксплуатационных затрат) определяют по формуле:

$$d = (0{,}75 - 1{,}2)\sqrt{Q}. \qquad (4.5)$$

Полученные значения d_{min} и d_{max} округляют до стандартных.

Вычислив для d_{min}, d_{max} и еще двух-трех стандартных значений между ними приведенные затраты $K_{пр}$ (на 1 м трубопровода), принимают диаметр, обеспечивающий минимум $K_{пр}$,

$$K_{пр} = K_т + (P_т K_т + Э)\, T_н, \qquad (4.6)$$

где $K_т$ — стоимость 1 м трубопровода, р.; $P_т$ — норма амортизационных отчислений, р.; $T_н$ — нормативный срок окупаемости, лет; $Э$ — стоимость электроэнергии, р.

Для систем водоснабжения экономически наивыгоднейший диаметр трубопровода приближенно равен $d = Э^{0,15}\, Q^{0,43}$ ($Э_1 = M\sigma\gamma$ — экономический фактор, учитывающий гидравлические свойства труб и экономические параметры, влияющие на стоимость строительства и эксплуатацию трубопровода; M — коэффициент, для стальных труб — 0,92, чугунных — 0,43, асбестоцементных — 0,25 ... 0,3); σ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; γ — коэффициент, учитывающий неравномерность подачи воды (для сельскохозяйственного водоснабжения $\gamma = 0{,}3 \ldots 0{,}6$).

Экономически наивыгоднейшие диаметры (подробный расчет приведен в [11]) трубопроводов можно определять, исходя из предельных экономических расходов (табл. 4.3, 4.4) [11].

На потери напора в трубопроводе шероховатость стенок Δ влияет, если она больше толщины вязкого подслоя δ. Шероховатость стенок обычно выражают в виде Δ/d, $\Delta_э/d$, где $\Delta_э$ (табл. 4.5) — высота выступов равномернозернистой шероховатости, при которой сопротивление равно реальному. Пропускную способность трубопроводов в системах водоснабжения в зависимости от срока эксплуатации t можно рассчитать по формуле [5]:

$$Q_t = Q\,(1 - 0{,}01\, n t^m), \qquad (4.7)$$

где Q — расчетная пропускная способность трубопровода; n, m — параметры, зависящие от физико-химических свойств воды (табл. 4.6).

4.5. Эквивалентная шероховатость труб

Трубы	Состояние поверхности и срок эксплуатации	$\Delta_э$, мм
Цельнотянутые стальные	Новые	0,02...0,1
	Бывшие в эксплуатации	0,15...0,3
		до 0,04
	Битумизированные. Битумное покрытие, выполненное в заводских условиях	0,014...0,018
	То же, в полевых условиях	0,2...0,6
	Незначительная коррозия	0,1...0,3
	Умеренная коррозия	0,3...0,7
	Значительная коррозия	0,8...1,5

Трубы	Состояние поверхности и срок эксплуатации	$\Delta_э$, мм
	Очень сильная коррозия, толщина отложений 1,5... 9 мм	3...5
	То же, толщина отложений 3...25 мм	6...6,5
	До 2 лет эксплуатации, без отложений	0,12...0,24
	То же, до 20 лет	0,6...5
Стальные сварные	Новые	0,04...0,1
	Бывшие в эксплуатации	0,1...0,15
	Новые битумизированные	0,05
	Бывшие в эксплуатации, битум частично растворен со следами коррозии	0,1
	Средняя коррозия	0,3...0,7
	Сильная коррозия	0,8...1,5
	Сильная коррозия с большими отложениями	2...4
Стальные оцинкованные	Новые	0,07...0,1
	После нескольких лет эксплуатации	0,4...0,7
Железобетонные	Новые ТНС-28-II	0,08...0,23
	Новые, предварительно напряженные	0,01...0,05
	Новые, изготовленные методом центрифугирования	0,15...0,3
	Бывшие в эксплуатации	0,3...0,8
	Из необработанного бетона	1...3
Асбестоцементные	Новые	0,05...1
	Бывшие в эксплуатации	0,6
Цементные	Сглаженные	0,3...0,8
	Необработанные	1...2
Стеклянные трубы	Новые	0,0015...0,01
Полиэтиленовые	То же	0,065
Винипластовые	»	0,06
Фаолитовые	»	0,075
Стеклопластиковые	»	0,265
Рукава и шланги резиновые	»	0,03

4.6. Значения параметров α, m, n [5]

Состав воды	$d_{тр}$, мм	α, мм/год	m	n
Слабоминерализованные, некоррозионные, с незначительным содержанием органических веществ, растворенного железа, показатель стабильности —0,2...+0,2	150...300 400...600	0,005...0,055	0,5 0,5	4,4 3,3
Слабоминерализованные, коррозионные, содержащие органические вещества, растворенное железо менее 3 мг/л, показатель стабильности до —1	150...300 400...600	0,055...0,18	0,5 0,5	6,4 2,3
Коррозионные, содержание хлоридов, сульфатов менее 100...150 мг/л, железа более 3 мг/л, показатель стабильности —1...—2,5	150...300 400...600	0,18...0,4	0,4 0,5	11,6 6,4
Коррозионные, содержание хлоридов, сульфатов больше 500...700 мг/л; имеются органические вещества, показатель стабильности отрицательный	150...300 400...600	0,4...0,6	0,35 0,4	18 11,6
Значительная карбонатная и малая постоянная жесткость, сильноминерализованные и коррозионные, остаток более 2 000 мг/л, показатель стабильности более 0,8	150...300 400...600	0,6...3	0,25 0,35	32 18

Режимы движения жидкостей и зоны сопротивлений. Переход от одного режима движения потока к другому происходит при критических значениях Re. При увеличении Re (начальное $Re_{кр_1}$) в потоке, движение которого было ламинарным, возникают отдельные области турбулентного режима, которые разрастаются, исчезают и появляются снова. При конечном $Re_{кр_2}$ во всем потоке установится турбулентный режим движения [48], то есть при $Re < Re_{кр_1}$ — ламинарный режим движения, $Re > Re_{кр_2}$ — турбулентный, $Re_{кр_1} < Re < Re_{кр_2}$ — переходный. В трубах круглого сечения $Re_{кр_1} \approx 900 \ldots 1{,}6 \cdot 10^3$, $Re_{кр_2} \approx 2{,}6 \cdot 10^3 \ldots 3{,}6 \cdot 10^3$. Значение Re, при превышении которого сопротивление трубопроводов существенно отклоняется от закономерностей ламинарного движения, называют критическим $Re_{кр} = \sqrt{Re_{кр_1} Re_{кр_2}}$.

Зоны сопротивлений разделяют на ламинарную — 1, переходную — 2, гладкостенного сопротивления — 3, доквадратичного сопротивления — 4, квадратичного сопротивления — 5.

Для труб круглого сечения при $Re < Re_{кр}$ ($Re_{кр} = 2 \cdot 10^3 \ldots 2{,}3 \cdot 10^3$) зона сопротивления соответствует ламинарной, при $2 \cdot 10^3 \ldots 2{,}3 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^3$ — переходной. Турбулентному движению соответствуют 3, 4 и 5 зоны. Для определения границ зон в трубах с равномернозернистой шероховатостью применимы расчетные зависимости И. И. Агроскина:

зона гидравлически гладких труб

$$Re \leqslant 27\,(d/\Delta)^{8/7}, \tag{4.8}$$

где Δ — высота выступов шероховатости;

зона доквадратичного сопротивления

$$27\,(d/\Delta)^{8/7} < Re < (191d/(\sqrt{\lambda}\Delta); \tag{4.9}$$

зона квадратичного сопротивления

$$Re > 191d/(\sqrt{\lambda}\Delta). \tag{4.10}$$

Границы зон сопротивления можно определять по графикам (рис. 4.1) [5].

Ламинарный режим движения жидкостей. Напряжение силы трения между любыми движущимися слоями жидкости равно:

$$\tau = 0{,}5\rho g I\,(r - y), \tag{4.11}$$

где ρ — плотность жидкости при температуре потока в движении; $I = h_{дл}/l$ — гидравлический уклон, то есть потери напора на единицу длины трубопровода; r — радиус трубы; y — расстояние от стенки трубы до рассматриваемого слоя жидкости.

Скорости при ламинарном режиме движения определяют по формулам:

скорость в данном сечении

$$u = \rho g I\,(r^2 - y^2)/(4\mu), \tag{4.12}$$

где μ — динамическая вязкость жидкости при температуре потока в движении; y — расстояние от оси трубы до рассматриваемой точки;

максимальная скорость

$$u_{max} = \rho g I r^2/(4\mu); \tag{4.13}$$

средняя скорость в поперечном сечении

$$v = \rho g I r^2/(8\mu); \tag{4.14}$$

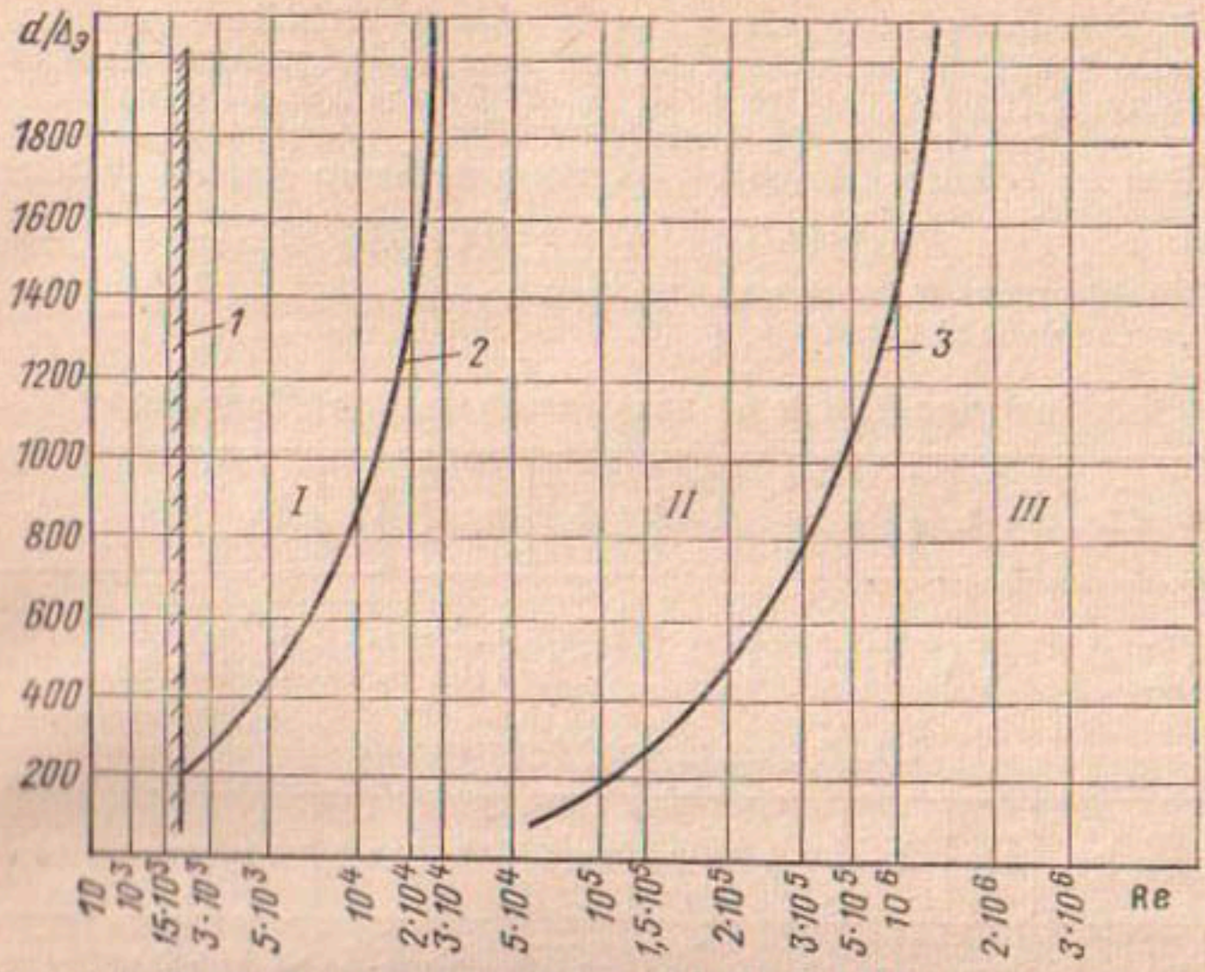


Рис. 4.1. Границы зон сопротивлений: I, II, III — зоны соответственно гладкостенного сопротивления, доквадратичного, квадратичного; *1* — переход от ламинарного движения к турбулентному; *2*, *3* — от зоны гладкостенного сопротивления к доквадратичной и от последней к квадратичной.

соотношение скоростей

$$u/u_{max} = y\,(2 - y/r)/r. \qquad (4.15)$$

Коэффициент кинетической энергии α в поперечном сечении равен 2, расход жидкости равен:

$$Q = \pi\rho g I r^4/(8\mu). \qquad (4.16)$$

Потери напора определяют по формуле (4.1) при $\lambda = B/\mathrm{Re}$ (B находят по табл. 4.7) или $h_{дл} = 32\nu l v/(g d^2)$.

4.7. Значения *B*

Сечение	$d_э$	B
Круглое диаметром d	d	64
Квадратное стороной a	a	57
Кольцевое шириной a	$2a$	96
Прямоугольное, соотношение сторон a/b		
0,1	$1{,}81a$	85
0,2	$1{,}67a$	76
0,25	$1{,}6a$	73
0,33	$1{,}5a$	69
0,5	$1{,}3a$	62

Потери напора на участке $l < l_н$ ($l_н = 0{,}02875 d\,\mathrm{Re}$ — длина начального участка) определяют по формуле (4.1), увеличивая λ на величину $k_н$ (табл. 4.8). При $l = l_н$, $k_н = 1{,}09$ или $\lambda = A/\mathrm{Re}$ (по Н. З. Френкелю), где A — коэффициент (табл. 4.9).

При $l > l_н$ потери напора с учетом начального участка равны:

$$h_{дл} = (0{,}167 + 64l/(\mathrm{Re}\,d))\,v^2/(2g). \qquad (4.17)$$

Коэффициент α на начальном участке изменяется от 1 (во входном сечении) до 2 при $l = l_н$ (табл. 4.8).

4.8. Значения $k_н$ и α на начальном участке трубопровода

$l \cdot 10^3/(d\,\mathrm{Re})$	2	4	6	10	14	18	22	26	29
$k_н$	—	1,70	1,57	1,38	1,27	1,2	1,14	1,1	1,09
α	1,3	1,47	1,57	1,72	1,83	1,89	1,94	1,98	2

4.9. Значения коэффициента A

$l \cdot 10^3/(d\,\mathrm{Re})$	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
A	122	105	96,66	88	82,4	76,16	76,41	74,38	72,77	71,5

Турбулентный режим движения жидкости. Скорости и их соотношения в различных точках поперечного сечения определяют для равномернозернистой шероховатости по Л. Прандтлю:

в зоне гидравлически гладких труб

$$u/u_* = 5{,}75 \lg (u_* y/\nu) + 5{,}5, \qquad (4.18)$$

где u — скорость на расстоянии y от стенки трубы; $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRI}$ — динамическая скорость; τ_0 — касательное напряжение около стенки;

в зоне гидравлически шероховатых труб

$$u/u_* = 5{,}75 \lg (y/\Delta) + 8{,}48; \qquad (4.19)$$

соотношение максимальной и средней скоростей

$$u_{max}/v = 1 + D\sqrt{\lambda}/\sqrt{8}, \qquad (4.20)$$

где $D = (v - u_{max})/u_*$ — относительный дефицит скорости.

Коэффициент Кориолиса можно найти по формуле:

$$\alpha = 1 + 2{,}65\lambda, \qquad (4.21)$$

где значение коэффициента при λ, согласно данным различных авторов, 2,68...3.

Скорость потока, при которой твердые частицы находятся в нем полностью во взвешенном состоянии, называют критической. Для ее определения В. С. Кнорозом рекомендуется формула:

$$v_{кр} = W_{ср} \sqrt[6]{P_1 (d/d_c)^{3,5}}, \qquad (4.22)$$

где $W_{ср}$ — средневзвешенная гидравлическая крупность наносов, мм/с; P_1 — содержание по массе твердого материала, отнесенное к массе

воды в рассматриваемом объеме, %; d_c — средняя крупность транспортируемых частиц, мм.

Для потоков с наносами крупностью до 0,1 мм, при $W_{ср}$ до 2 мм/с и мутности ρ до 5 г/л $v_{кр} = \sqrt{0{,}16 W_{ср}^{0,25} \rho g/\lambda}$ [31].

Транспортирующая способность потока при мутности до 10 кг/м³, крупности частиц 0,25...0,5 мм равна [31]:

$$\rho = v^2\lambda/(0{,}0001856 W^{0,25} g). \qquad (4.23)$$

Приближенное значение размывающей скорости для мелкопесчаных наносов крупностью 0,5...0,25 мм с примесью частиц крупностью менее 0,05 мм в асбестоцементных трубопроводах равно [31]:

$$v_р = 1{,}5\,[0{,}94 - 1/(0{,}027 T^{1,2} + 1{,}3)]\, d^{0,114}, \qquad (4.24)$$

где T — время нахождения наносов в трубопроводе, сут.

Толщина вязкого подслоя равна $\delta = 32{,}8d/(\mathrm{Re}\sqrt{\lambda})$.

Длина начального участка для зоны гладкостенного сопротивления $l_н = 0{,}639d\,\mathrm{Re}^{0,25}$; квадратичного сопротивления (по Г. В. Филлипову) $l_н = 2{,}45d/\sqrt{\lambda}$. Для трубопроводов с равномернозернистой шероховатостью λ можно определить по графикам (рис. 4.2) или по формулам: для переходной зоны (по Н. З. Френкелю) $\lambda = 2{,}7/\mathrm{Re}^{0,53}$; зоны гладкостенного сопротивления (по Блазиусу) $\lambda = 0{,}3164/\mathrm{Re}^{0,25}$.

Коэффициенты трения для труб с неравномерной шероховатостью рекомендуется определять в зоне доквадратичного сопротивления: по формуле Кольбрука — Уайта — $1/\sqrt{\lambda} = -2\lg(2{,}5/(\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}) + \Delta_э/(3{,}7d)$; А. Д. Альтшуля — $\lambda = 0{,}11\,(\Delta_э/d + 68/\mathrm{Re})^{0,25}$.

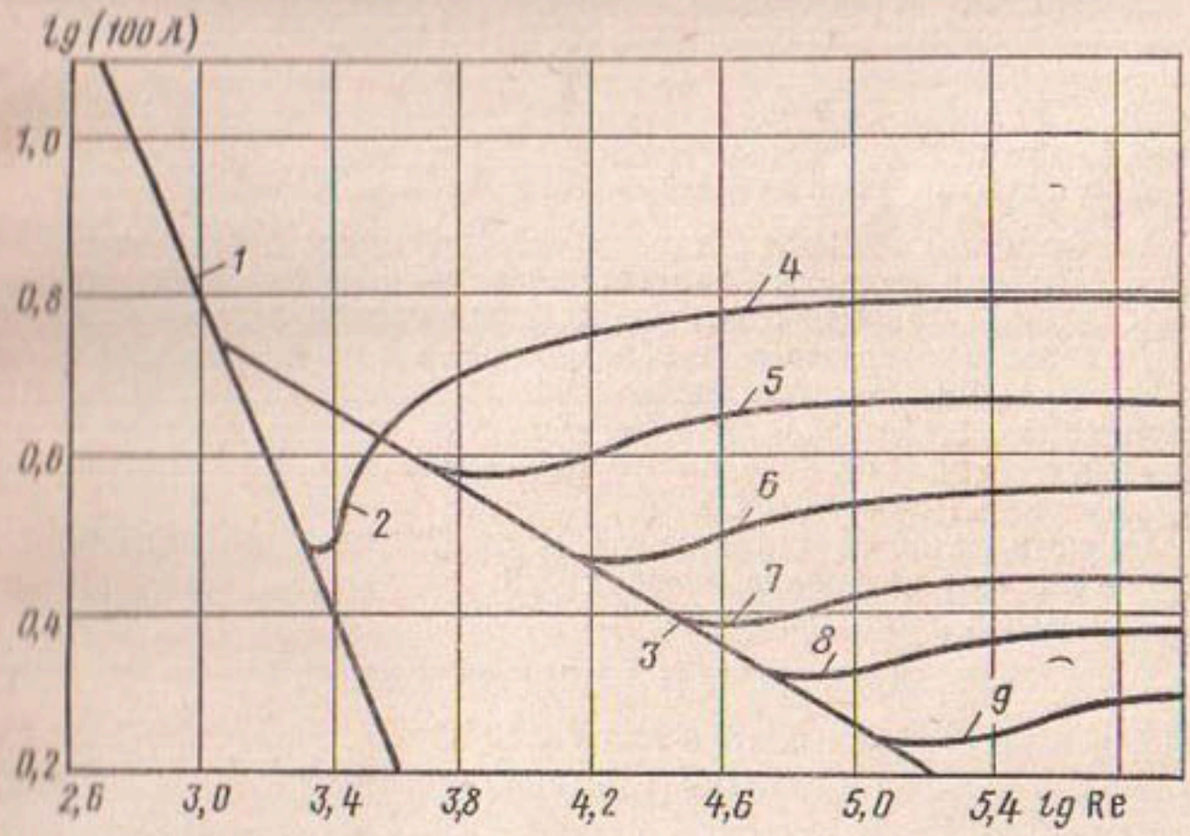


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента сопротивления λ от Re для труб с равномернозернистой шероховатостью: *1...3* — $\lambda = 64/\mathrm{Re}$; $2{,}7/\mathrm{Re}^{0,53}$; $0{,}3164/\mathrm{Re}^{0,25}$; 4...9 — $\Delta/d = 0{,}0333$; 0,0163; 0,00833; 0,00396; 0,00198; 0,000398.

На основе формулы Кольбрука—Уайта составлена диаграмма для определения λ [119, 123]. При $\Delta_э \mathrm{Re}/d > 500$ эта формула приводится к виду формулы Прандтля—Никурадзе $-1/\sqrt{\lambda} = 2\lg d/\Delta_э + 1{,}74$, а формула А. Д. Альтшуля—к формуле Б. Л. Шифринсона—$\lambda = 0{,}11\,(\Delta_э/d)^{0{,}25}$. При $\Delta_э/d < 10$ формула Кольбрука—Уайта приводится к формуле Прандтля—Никурадзе—$1/\sqrt{\lambda} = 2\lg \mathrm{Re}\sqrt{\lambda} - 0{,}8$, а формула А. Д. Альтшуля—к формуле Блазиуса.

Для стальных и чугунных водопроводных труб λ определяют по формулам [106]:

в зоне гладкостенного сопротивления соответственно для новых стальных и чугунных труб—$\lambda = 0{,}25/\mathrm{Re}^{0{,}226}$, $\lambda = 0{,}77/\mathrm{Re}^{0{,}284}$;

в зонах доквадратичного и квадратичного сопротивлений—$\lambda = a\,(c + \nu/v)^{d_1}/d^b$ [a, b, c, d_1—коэффициенты (табл. 4.10)].

4.10. Значения коэффициентов a, b, c, d

Трубы	a		c	d
Новые стальные	0,3120	0,226	$1{,}9\cdot10^{-6}$	0,226
Новые чугунные	0,8630	0,284	0,55	0,284
Стальные и чугунные трубы не новые:				
$v/\nu \geqslant 9{,}2\cdot10^5$ м$^{-1}$	0,0210	0,300	—	—
$v/\nu < 9{,}2\cdot10^5$ м$^{-1}$	1,0000	0,300	$1{,}5\cdot10^{-6}$	0,300

Для расчета λ для новых стальных трубопроводов В. П. Ермоленко предложены формулы: при $\mathrm{Re} > 147\,(r/\Delta_э)^{1{,}15}$, $r/\Delta_э = 15...750$ (без сварных стыков) $\lambda = 0{,}152/(r/\Delta_э)^{0{,}34}$; $\mathrm{Re} > 10\,(r/\Delta_э)^{1{,}5}$, $r/\Delta_э = 320...750$ и $5 < l_{св}/r < 75$ ($l_{св}$—расстояние между сварными стыками) $\lambda = 1{,}84/[(r/\Delta_э)^{0{,}64}\,(l_{ср}/r)^{0{,}13}]$.

Для трубопроводов диаметром менее 4 м $\lambda = 8gn^2\,(4/d)^{3\sqrt{n}}$, более 4 м $\lambda = 8gn^2\,(4/d)^{2{,}6\sqrt{n}}$ [2], где n—коэффициент шероховатости (табл. 4.2); для стальных тонкостенных труб, внутренняя поверхность которых покрыта цементно-песчаным раствором, $n = 0{,}013$.

Для эксплуатируемых трубопроводов λ можно определить по формулам А. Д. Альтшуля, внеся в них поправку на шероховатость, например $\lambda = 0{,}11\,(\Delta_э/d + k_\Delta 68/\mathrm{Re})^{0{,}25}$. Для новых трубопроводов, сваренных встык, поправка на шероховатость $k_\Delta = 1{,}3...1{,}5$, покрытых внутри битумом $k_\Delta = 1{,}3$.

Сопротивление на единицу длины трубопровода A, необходимое для расчета потерь напора, равно [106]:

для новых стальных труб при $t = 10$ °С

$$A = 0{,}001314\,(1 + 0{,}684/v)^{0{,}226}/d^{5{,}226}; \qquad (4.25)$$

для новых чугунных труб при $t = 10$ °С

$$A = 0{,}001190\,(1 + 2{,}36/v)^{0{,}284}/d^{5{,}284}; \qquad (4.26)$$

для эксплуатируемых стальных и чугунных труб при $v > 1{,}2$ м/с

$$A = 0{,}001735/d^{5{,}3}; \qquad (4.27)$$

в зоне доквадратичного сопротивления [108]

$$A = 9{,}096\cdot10^{-4}\,(\Delta_э + 6{,}8\nu/v)^{0{,}25}/d^{5{,}25}. \qquad (4.28)$$

Согласно СНиП-II-31—74, потери напора на единицу длины трубопровода следует определять по формулам:

при $v < 1{,}2$ м/с

$$I = 0{,}00148Q^2 (1 + 0{,}867/v)^{0,3}/d^{5,3}, \quad (4.29)$$

$v \geqslant 1{,}2$ м/с

$$I = 0{,}001735Q^2/d^{5,3}. \quad (4.30)$$

Для гидравлических расчетов асбестоцементных труб можно использовать следующие формулы:

$$v = 132R^{0,65}I^{0,54}; \quad (4.31)$$

Н. Г. Малишевского, Н. А. Гехмана

$$v = 118R^{0,63}I^{0,54}; \quad (4.32)$$

$$\lambda = 0{,}184\,(0{,}37 \cdot 10^{-6} + \nu/v)^{0,19}/d^{0,19} \text{ (приближенно) [106]}; \quad (4.33)$$

при $\nu = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ м²/с

$$\nu = 0{,}11\,(1 + 3{,}51/v)^{0,19}/d^{0,19}. \quad (4.34)$$

С учетом формулы (4.34)

$$I = 0{,}000561v^2\,(1 + 3{,}51/v)^{0,19}/d^{1,19}, \quad (4.35)$$

$$A = 0{,}000910\,(1 + 3{,}51/v)^{0,19}/d^{5,19}. \quad (4.36)$$

При $v = 1$ м/с $A = 0{,}001212/d^{5,19}$ (табл. 4.11).

4.11. Значения A (с²/м⁶) для асбестоцементных труб (ГОСТ 539—73, ГОСТ 5990—70) при $v = 1$ м/с [11]

$d_у$, мм	ВТ 6		ВТ 9		ВТ 12	
	$d_р$, мм	A	$d_р$, мм	A	$d_р$, мм	A
100	104	153,144	100	187,717	96	232,014
150	146	26,334	141	31,554	135	39,543
200	196	5,71076	189	6,89709	181	8,63279
300	289	0,76110	279	0,913729	270	1,08324
400	381	0,181344	368	0,217146	356	0,257916

Примечание. Для $v < 1$ м/с и $v > 1$ м/с табличное значение A следует умножить на поправочный коэффициент $k_п$ (табл. 4.12).

4.12. Значения поправочного коэффициента $k_п$ для асбестоцементных труб [106]

v, м/с	$k_п$	v, м/с	$k_п$	v, м/с	$k_п$
0,20	1,308	0,85	1,025	2,10	0,905
0,25	1,257	0,90	1,016	2,20	0,900
0,30	1,217	1,00	1,000	2,30	0,895
0,35	1,185	1,10	0,986	2,40	0,891
0,40	1,158	1,20	0,974	2,50	0,887
0,45	1,135	1,30	0,963	2,60	0,883
0,50	1,115	1,40	0,953	2,70	0,880
0,55	1,098	1,50	0,944	2,80	0,876
0,60	1,082	1,60	0,936	2,90	0,873
0,65	1,069	1,70	0,928	3,00	0,870
0,70	1,056	1,80	0,922	3,20	0,864
0,75	1,045	1,90	0,916	3,40	0,859
0,80	1,034	2,00	0,910	3,60	0,855

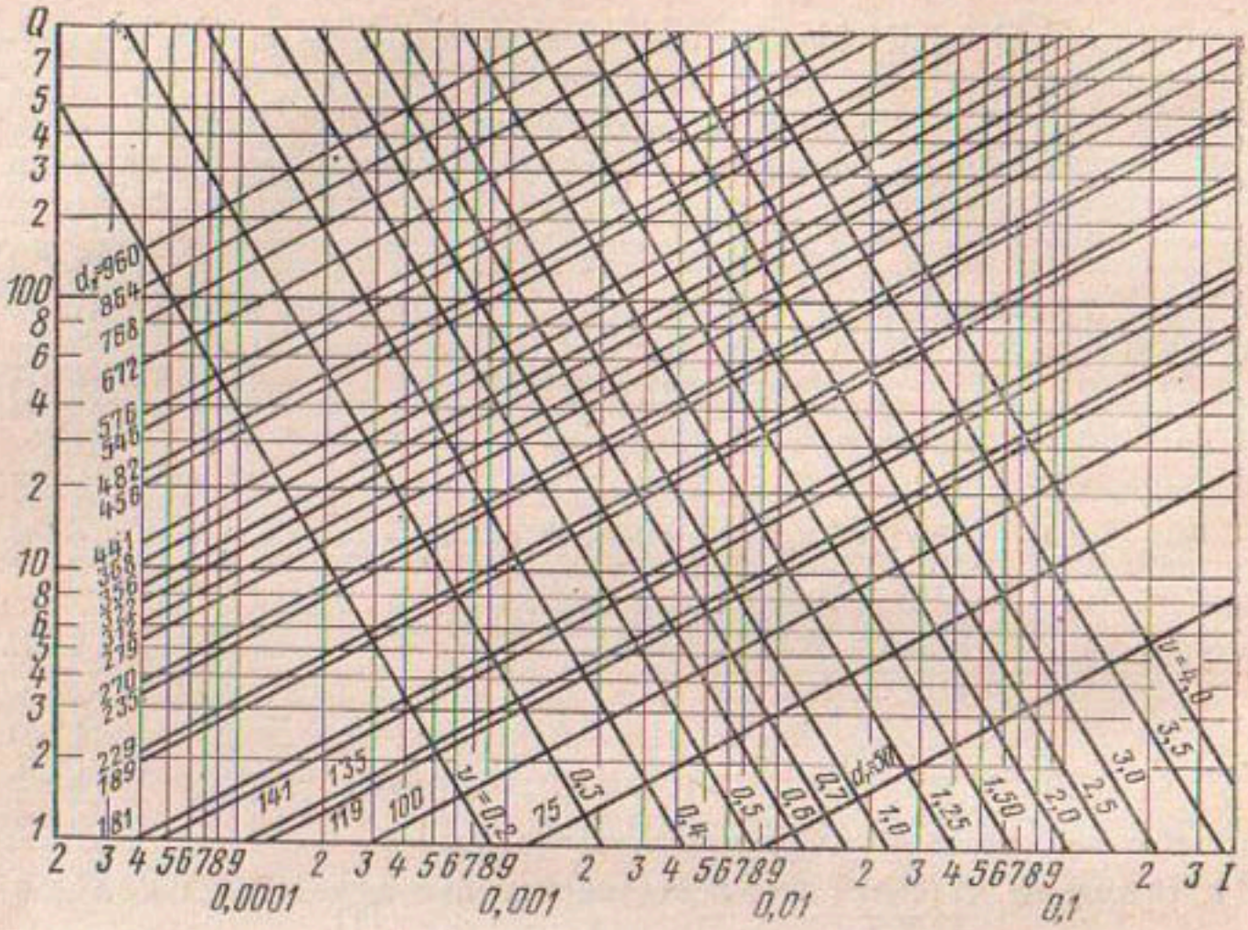


Рис. 4.3. Номограмма для гидравлических расчетов асбестоцементных трубопроводов.

Для упрощения гидравлических расчетов асбестоцементных трубопроводов можно пользоваться номограммой (рис. 4.3) [31]. Потери напора по длине можно рассчитывать согласно инструкции [107].

Для железобетонных напорных трубопроводов λ следует рассчитывать по формуле А. Д. Альтшуля, определяя поправку на шероховатость k_Δ по таблице 4.13 [6].

Зная среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости от средней линии, характеризующее высоту неровностей (R_a), шаг между неровностями (s_m) можно найти λ по формуле [26]:

$$\lambda = 0{,}326\,(R_a \cdot 10^3/s_m + 1)^{0{,}172}\,(2R_a \cdot 10^3/d + 1)^{0{,}475}/\mathrm{Re}^{0{,}25}. \quad (4.37)$$

Гидравлический уклон для железобетонных труб [согласно СНиП II-31—74 определяют по формулам (4.29), (4.30). Можно использовать и следующие формулы [9]: при $v = 1{,}23$ м/с $I = 0{,}00109v^2/d^{1{,}254}$; при $v = 1{,}23$ м/с $I = 0{,}0008v^2/(1+2/v)^{0{,}254}/d^{1{,}254}$. [ ].

Потери на единицу длины допустимо рассчитывать и по другим формулам, в частности $I = k_v v^{1{,}85}/d^{1{,}19}$; $I = k_Q Q^{1{,}85}/d^{4{,}89}$; $I = \varphi k_{Q_c} Q^{1{,}85}/d^{4{,}89}$, где k_v, k_Q, k_{Q_c} — коэффициенты, зависящие от качества внутренней поверхности труб; значения k_v, k_Q приведены в таблице 4.14[26]; $k_{Q_c} = 0{,}001688$ — для труб, изготовленных в соответствии с СН 324—72; φ — коэффициент изменения шероховатости стенок труб (табл. 4.15).

4.13. Значения k_Δ для бетонных трубопроводов

Характеристика поверхности	k_Δ
Трубы новые, поверхность гладкая, качество работ первоклассное, секции состыкованы и загрунтованы, стыки гладкие (формы для изготовления стальные)	1
Трубы новые или бывшие в эксплуатации до 1 года, поверхностный слой тщательно заглажен камнем или щеткой (формы стальные или резиновая оболочка)	1
Трубы, бывшие в эксплуатации сроком до 5 лет, монолитные, поверхность гладкая цементная, стыки сглажены (опалубка стальная)	$1 < \alpha \leqslant 1{,}5$
Трубы, бывшие в эксплуатации, поверхность чистая, биологических отложений нет, стыки шероховатые и несглаженные (формы стальные или деревянные)	$1{,}5 < \alpha \leqslant 2{,}5$
Трубы, бывшие в эксплуатации, заводского изготовления или монолитные со следами деревянных форм, стыки шероховатые, поверхность за время эксплуатации корродирована, имеются отложения	$2{,}5 < \alpha \leqslant 3$
Трубы в процессе эксплуатации сильно обросли, поверхность очень шероховатая, сильноволнистая (формы деревянные)	3

4. 14. Значения коэффициентов k_v и k_Q

Способ изготовления труб	k_v	k_Q
Виброгидропрессование в соответствии с требованиями СН 324—72	0,001078	0,001688
Изготовление на улучшенном резиновом чехле	0,000998	0,001643
Изготовление на улучшенном резиновом чехле с применением суперпластификатора С=3	0,000907	0,001473

4.15. Значения коэффициента

R_a мкм	$d_у$, мм			
	600	700	800	1000
150	1,163555	1,155147	1,148407	1,138271
130	1,112140	1,106541	1,102061	1,095342
100	1,029496	1,028105	1,026997	1,025342
90	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
80	0,969224	0,970600	0,971694	0,973322
70	0,936891	0,939620	0,941786	0,945007
60	0,902607	0,906657	0,909866	0,914630
50	0,865793	0,871116	0,875327	0,881566
40	0,825544	0,832068	0,837221	0,844842

Продолжение

R_a, мкм	$d_у$, мм		
	1200	1400	1600
150	1,131012	1,125557	1,121308
130	1,090543	1,086944	1,084144
100	1,024165	1,023285	1,022602
90	1,000000	1,000000	1,000000
80	0,974476	0,975338	0,976005
70	0,947286	0,948985	0,950299
60	0,917996	0,920501	0,922438
50	0,885968	0,889239	0,891767
40	0,850209	0,854192	0,857266

Для полиэтиленовых трубопроводов λ можно определить по формуле З. Р. Маланчука:

при $d = 0{,}016 \ldots 0{,}032$ м

$$\lambda = 0{,}2017 \mid \mathrm{Re}^{0{,}2}, \tag{4.38}$$

при $d = 0{,}04 \ldots 0{,}3$ м, $8\,000 < \mathrm{Re} < 750\,000$ [63]

$$\lambda = (0{,}29 - 0{,}000236d)/\mathrm{Re}^{0{,}22}. \tag{4.39}$$

Потери напора на единицу длины полиэтиленовых трубопроводов равны:

при $t = 10$ °С [106]

$$I = 0{,}000685v^{1{,}774}/d^{1{,}226}; \tag{4.40}$$

согласно СНиП II-31—74

$$I = 0{,}00105Q^{1{,}774}/d^{4{,}774}. \tag{4.41}$$

Сопротивление на единицу длину [106]

$$A = k_п\, 0{,}00111/d^{5{,}226}, \tag{4.42}$$

где $k_п$ — поправочный коэффициент (табл. 4.16).

4.16. Значения коэффициента $k_п$

v, м/с	$k_п$	v, м/с	$k_п$
0,20	1,439	0,8	1,052
0,25	1,368	0,85	1,043
0,30	1,313	0,9	1,024
0,35	1,268	1,0	1,000
0,40	1,230	1,1	0,991
0,45	1,198	1,2	0,960
0,50	1,170	1,3	0,943
0,55	1,146	1,4	0,926
0,60	1,123	1,5	0,912
0,65	1,102	1,6	0,899
0,70	1,084	1,7	0,887
0,75	1,067	1,8	0,876

Для винипластовых труб согласно МН 1427—61

$$\lambda = 0{,}36 d^{0{,}01}/\mathrm{Re}^{0{,}25}, \tag{4.43}$$

$$I = 0{,}00032 Q^{1{,}15}/d^{4{,}65}. \tag{4.44}$$

Трубы из стеклопластика рассчитывают по формулам [63]:

при $100 < d < 150$, $10^4 < \mathrm{Re} < 3 \cdot 10^5$, $t = 10\,°\mathrm{C}$

$$\lambda = (0{,}0492 - 0{,}0096d)\,(d/Q)^{0{,}19}; \tag{4.45}$$

при $50 < d < 100$, $10^4 < \mathrm{Re} < 10^5$, $t = 10\,°\mathrm{C}$

$$I = 0{,}001\,(0{,}41 - 0{,}08d)\,Q^{1{,}81}/d^{4{,}81}; \tag{4.46}$$

для любых значений t

$$\lambda = (0{,}282 - 0{,}000544d)/\mathrm{Re}^{0{,}19}. \tag{4.47}$$

Для гибких капроновых трубопроводов I можно определить по таблице 4.17.

Для расчета труб из других материалов применяют формулы: стеклянные трубопроводы [13]

$$\lambda = (1 + 0{,}235/v)\,0{,}0085/d^{0{,}25} \tag{4.48}$$

или

$$\lambda = 0{,}1461/(d^{0{,}226} v^{0{,}226}); \tag{4.49}$$

$$I = 0{,}000745 - v^{1{,}774}/d^{1{,}226}; \tag{4.50}$$

алюминиевые трубопроводы [32]:
в зоне доквадратичного сопротивления

$$\lambda = 66{,}5/\mathrm{Re}^{0{,}647}, \tag{4.51}$$

$$I = 0{,}000492 v^{1{,}353}/d^{1{,}647}; \tag{4.52}$$

при $t = 15\,°\mathrm{C}$ и $\nu = 11{,}463 \cdot 10^{-7}$ м/с^2 $\lambda = 0{,}00965/v^{0{,}647} d^{0{,}647}$; для новых труб $\lambda = 0{,}1\,(0{,}037/d + 100/\mathrm{Re})^{0{,}25}$,

$$I = 0{,}000492 v^{1{,}353}/d^{1{,}267}; \tag{4.53}$$

4.17. Значения $l \cdot 10^3$ м на 1 км гибкого капронового трубопровода (по данным А. И. Петрухно)

Q, л/с	$d_у$, мм			
	200	250	300	350
10	0,55	—	—	—
20	2,10	0,6	0,24	—
30	4,40	1,4	0,50	0,25
40	8,60	2,4	0,90	0,45
50	13,00	3,8	1,40	0,70
60	19,00	5,4	2,10	0,95
70	25,00	7,3	2,80	1,25
80	32,00	9,4	3,50	1,60
90	39,00	11,7	4,40	2,00
100	—	14,2	5,30	2,40
120	—	19,9	7,30	3,30
140	—	26,0	9,60	4,30
160	—	33,0	12,10	5,40
180	—	41,0	15,00	6,70
200	—	50,0	18,00	8,00
300	—	—	37,00	16,00

керамические трубы (формулы А. С. Цейтлина):
при $v = 2{,}7$ м/с

$$\lambda = (0{,}95 + 0{,}15/v)\ 0{,}11/d^{0{,}25}; \qquad (4.54)$$

при $v > 2{,}7$ м/с

$$\lambda = 0{,}011/d^{0{,}25}; \qquad (4.55)$$

плоскосворачиваемые алюминиевые и стальные трубопроводы (по В. И. Марону и Г. А. Роеву):
при $4 \cdot 10^3 < \mathrm{Re} < 4 \cdot 10^4$

$$\lambda = A_1/\mathrm{Re}^{0{,}25}; \qquad (4.56)$$

при $4 \cdot 10^4 < \mathrm{Re} < 2 \cdot 10^5$

$$\lambda = A_2/\mathrm{Re}^{0{,}12}, \qquad (4.57)$$

где A_1 и A_2 — коэффициенты, зависящие от соотношения a и b — полуосей труб (табл. 4.18).

4.18. Значения коэффициентов A_1 и A_2

a/b	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
A_1	0,250	0,275	0,300	0,310	0,316
A_2	0,165	0,170	0,180	0,185	0,185

4.19. Значения расчетного диаметра рукавов

Давление, МПа	Диаметр гладкого резинового рукава, мм					Диаметр армированного резинового рукава, мм				
	25	32	38	50	65	25	32	38	50	65
0,05	25,0	31,2	39,0	50,5	67	24,5	32,0	39,6	54,5	66,8
0,10	25,4	32,0	39,9	51,5	69	24,8	32,1	40,0	54,8	67,2
0,15	25,8	32,8	40,7	52,2	70	24,9	32,3	40,2	55,0	67,7
0,20	26,0	33,0	41,4	52,6	71,8	25,0	32,4	40,3	55,1	67,9
0,25	26,4	33,5	41,8	53,0	72,3	25,1	32,5	40,4	55,2	68,0
0,30	26,6	33,7	42,2	53,4	72,9	25,2	32,6	40,5	55,3	68,1

4.20. Значения λ для армированных рукавов

$d_у$, мм	λ
25	0,051...0,057
32	0,053...0,066
38	0,072...0,090
50	0,083...0,094
65	0,085...0,1

4.21. Значения коэффициента *k* для гибких рукавов

Рукав	*k*
Очень гладкий резиновый	0,00086
Обыкновенный резиновый	0,000899
Очень гладкий прорезиненный	0,000884
Очень шероховатый, внутри прорезиненный	0,00163
Обыкновенный непрорезиненный	0,00213

Для расчета рукавов используют формулу (4.1), подставляя в нее в качестве расчетного диаметра условный, зависящий от внутреннего давления (табл. 4.19). Коэффициент λ для армированных рукавов при давлении до 0,3 МПа можно принимать по таблице 4.20. Для гладких рукавов при $Re = 5 \cdot 10^3 \ldots 1{,}2 \cdot 10^4$ $\lambda = a/Re^{0,265}$ (a — коэффициент, $a = 0{,}38 \ldots 0{,}52$).

Коэффициент λ для гибких рукавов можно определить также по формулам: $\lambda = 0{,}0113 + 0{,}9170\, Re^{-0,41}$ (по В. М. Прокофьеву) и $\lambda = 19{,}62\, k$, где k — коэффициент, учитывающий материал рукава (табл. 4.21).

Движение жидкости в безнапорных трубопроводах. Расчетные формулы следующие: расход $Q = \omega C \sqrt{Ri}$; расходная характеристика, или модуль расхода, $R = Q/\sqrt{i}$ (i-уклон трубы); скоростная характеристи-

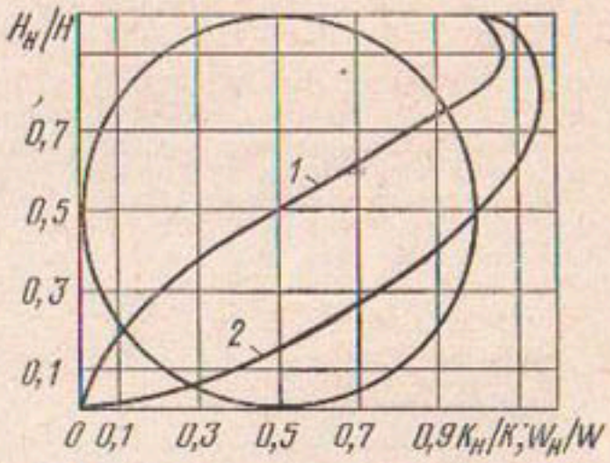


Рис. 4.4. Зависимость $K_н/K$ и $W_н/w$ от степени заполнения трубопровода.

ка, или модуль скорости, $W = C\sqrt{R} = v/\sqrt{i}$. Расчеты частично заполненных трубопроводов выполняют с помощью графиков и таблиц, составленных для отношений $K_н/K$; $W_н/W$; $\omega_н/\omega$; $R_н/R$ в зависимости от степени наполнения трубопровода $a = H_н/H$ ($K_н$, $W_н$, $\omega_н$, $R_н$ — характеристики при некоторой глубине воды в частично заполненном трубопроводе; $H_н$, K, W, ω, R — характеристики при полностью заполненном трубопроводе, то есть при $H = d$). Расход и скоростная характеристика частично заполненного трубопровода равны: $K_н = Ka_1$, $W_н = Wa_2$, где a_1, a_2 — коэффициенты, зависящие от степени наполнения (рис. 4.4).

Глава 5
ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

Общие положения. Расход жидкости при истечении через отверстия или насадки определяют в общем случае по формуле:

$$Q = \varepsilon\varphi\omega\sqrt{2gH_и} = \mu\omega\sqrt{2gH_и}, \qquad (5.1)$$

где $\varepsilon = \omega_{сж}/\omega$ — коэффициент сжатия; $\omega_{сж}$ — площадь в сжатом сечении на выходе из отверстия, насадка (для краткости слово «насадок» далее везде опущено); ω — площадь выходного сечения отверстия; $\varphi = v/v_т$ — коэффициент скорости; v — действительная скорость истечения; $v_т = \sqrt{2gH_и}$ -теоретическая скорость истечения; $\mu = \varepsilon\varphi$ — коэффициент расхода; $H_и = \Delta p/(\rho g) + v_c^2/(2g) + H_1 - H_2 + l$ — напор, при котором происходит истечение жидкости; $\Delta p = p_1 - p_2$ — перепад давлений; p_1 и p_2 — абсолютное давление на свободной поверхности жидкости соответственно в емкости, в которой установлено отверстие, и в пространстве, куда вытекает жидкость; ρ — плотность жидкости при температуре жидкости при истечении; H_1 — расстояние по вертикали от свободной поверхности жидкости в емкости, где установлено отверстие, до входного его сечения (отверстие установлено в дне) или до его оси (отверстие установлено на боковой поверхности емкости); H_2 — расстояние по вертикали от свободной поверхности жидкости в емкости (пространстве), куда вытекает жидкость, до выходного сечения отверстия или до его оси; l — длина отверстия.

При определении $H_и$ возможны следующие случаи истечения:

давление на свободной поверхности жидкости в емкости, куда происходит истечение, атмосферное, тогда $\Delta p = (p_1 - p_{ат})/(\rho g)$;

давление на свободной поверхности жидкости в обоих емкостях атмосферное — $\Delta p = 0$;

площадь поперечного сечения емкости, в которой установлено отверстие, значительно больше площади его поперечного сечения на входе; следовательно, $v_c^2/2g \cong 0$;

выходное сечение насадка не затоплено — $H_2 = 0$;

отверстие расположено на боковой поверхности емкости или жидкость вытекает, не касаясь его боковой поверхности — $l = 0$;

отверстие расположено в дне сосуда и жидкость вытекает, касаясь его боковой поверхности, — l следует учитывать при расчете $H_и$.

5.1. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ

Истечение из малого (диаметр выходного сечения $d < 01\ H_1$) круглого отверстия при полном совершенном сжатии в атмосферу. При $Re_т$ ($Re_т = \sqrt{2gH_и}\,d/\nu$, равном 2...300, $H_и < H_{ср}$, где $H_{ср}$ — напор, при котором происходит отрыв жидкости от боковых стенок (табл. 5.1), острых входных кромках коэффициенты расхода можно найти по графикам (рис. 5.1) или по формулам [80]:

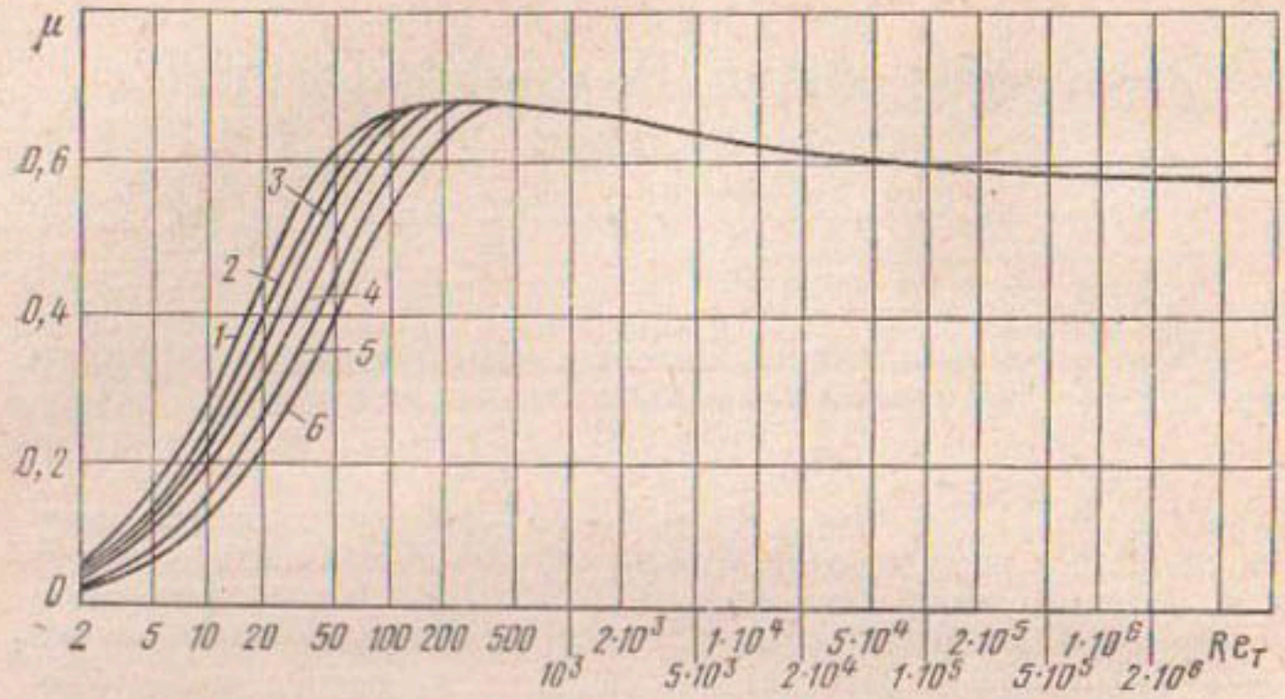


Рис. 5.1. Зависимость μ от $Re_т$ для круглых отверстий: 1...6 — $l/d = 0{,}1$; 0,2; 0,28; 0,43; 0,73; 1,00.

при $Re_т \leqslant 100\, l/d$

$$\mu = \sqrt{[14{,}82 l/(Re_т d) + 5{,}83/Re_т]^2 + 0{,}463} - 14{,}82 l/(Re_т d) - 5{,}83/Re_т; \quad (5.2)$$

при $3\,000\, l/d \geqslant Re_т \geqslant 100\, l/d$

$$\mu = \sqrt{[25 l/(Re_т d) + 7{,}41/Re_т]^2 + 0{,}588} - 25 l/(Re_т d) - 7{,}41/Re_т. \quad (5.3)$$

Формулу (5.2) следует применять для определения μ при $Re_т \leqslant 10$, $l/d = 0{,}1$; $Re_т \leqslant 20$, $l/d = 0{,}2$; $Re_т \leqslant 28$, $l/d = 0{,}28$; $Re_т \leqslant 43$, $l/d = 0{,}43$; $Re_т \leqslant 73$, $l/d = 0{,}73$; $Re_т \leqslant 100$, $l/d = 1$. В остальных случаях в указанных диапазонах $Re_т$ следует применять формулу (5.3). При $H_н > H_{ср}$ для расчета μ необходимо в качестве расчетного значения l/d принимать 0,1.

5.1. Значения $H_{ср}$ в зависимости от l/d

l/d	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$H_{ср}$, м	3	6	8	10	12	14	15	16	17	18

При $Re_т > 300$ относительная длина l/d практически не влияет на μ, если она меньше единицы, тогда μ равен:

при $300 < Re_т < 10^4$ [80]

$$\mu = 1/(12 \cdot 10^{-6}\, Re_т + 1{,}48); \quad (5.4)$$

при $10^4 < Re_т < 10^7$ [80]

$$\mu = 1/(1{,}66 - 900/Re_т); \quad (5.5)$$

при $l/d \leqslant 0{,}1\mu$ рассчитывают по формулам А. Д. Альтшуля:

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} \leqslant 10\mu = \mathrm{Re}_{\text{т}}/25{,}2;$$
$$\mathrm{Re}_{\text{ш}} < 25\mu = \mathrm{Re}_{\text{т}}/48;$$
$$25 < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 300\mu = \mathrm{Re}_{\text{т}}/(1{,}5 + 1{,}4\,\mathrm{Re}_{\text{т}});$$
$$300 < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 10^4\mu = 0{,}592 + 0{,}27/\mathrm{Re}_{\text{т}}^{1/6};$$
$$\mathrm{Re}_{\text{т}} > 10^4\,\mu = 0{,}592 + 5{,}5/\sqrt{\mathrm{Re}_{\text{т}}}.$$

Если выходные кромки выполнены под углом или по радиусу, μ следует определять по графикам [80]. Максимум μ будет обеспечен при соблюдении следующих условий: $r/d \geqslant 0{,}2$; $l_{\text{к}}/d \geqslant 0{,}15$; $\beta = 40\ldots60°$ (r — радиус закругления входных кромок; l_k — длина конусной части; β — угол конуса).

Для расчета коэффициента сжатия можно использовать имеющиеся в литературе данные [5, 80]; при $\mathrm{Re}_{\text{т}} = 30{,}8\ldots108$ — формулу $\varepsilon = 1{,}0318 - 0{,}001378\,\mathrm{Re}_{\text{т}}$. Коэффициенты скорости отверстий приведены в [5].

Формулами (5.1)...(5.5) можно пользоваться при $H_{\text{и}} > H_{\text{кр}}$ ($H_{\text{кр}}$ — критический напор, при котором происходит прорыв воздушного ядра воронки в донное отверстие). Определить $H_{\text{кр}}$ можно, пользуясь формулой Р. Г. Перельмана:

$$H_{\text{кр}}/d = 0{,}5\,(v_{\text{сж}}/\sqrt{gd})^{0{,}55},$$

где $v_{\text{сж}}$ — скорость в сжатом сечении струи.

При $H_{\text{и}} > H_{\text{кр}}$ μ определяют и по опытным данным [5].

Для тангенциальных отверстий при $0{,}2 \leqslant l/d < 1{,}5$ μ по формуле И. М. Миркиса равен $\mu = 0{,}84 - 0{,}2\,l/d$.

Для определения μ квадратных и прямоугольных отверстий с острыми входными кромками при полном совершенном сжатии истечении в атмосферу и отсутствии транзитного потока используют следующие формулы [80]:

для квадратных при $2\,500 \leqslant \mathrm{Re}_{\text{т}R} = \sqrt{2gH_{\text{и}}}R/\nu \leqslant 2\cdot10^6$

$$\mu = 1/(1{,}666 - 450/\mathrm{Re}_{\text{т}R}); \tag{5.6}$$

для прямоугольных при $5\cdot10^3 \leqslant \mathrm{Re}_{\text{т}R} \leqslant 10^6$, $b/a = 2\ldots30$ (a, b — ширина и высота отверстия) [80]

$$\mu = 1/(1{,}62 - 630/\mathrm{Re}_{\text{т}R}). \tag{5.7}$$

Истечение жидкости через затопленные отверстия. Коэффициенты расхода определяют по формулам [5]:

$$\mu_{\text{з}} = \varepsilon/\sqrt{2\varepsilon^2m^2 - \varepsilon^2n^2 + 1 - 2\varepsilon m + \zeta_0}, \tag{5.8}$$

где $m = \omega/\omega_{c_2}$, $n = \omega/\omega_{c_1}$ — степень соответственно расширения и сжатия потока; ω — площадь отверстия; $\omega_{c_1}, \omega_{c_2}$ — площадь живого сечения потока соответственно перед и за отверстием; ζ_0 — коэффициент сопротивления незатопленного отверстия;

При истечении из большой емкости в емкость, размеры которой соизмеримы с размерами отверстия, то есть $n = 0$, $m > 0$,

$$\mu_{\text{з}} = \varepsilon/\sqrt{2\varepsilon^2m^2 - 2\varepsilon m + 1 + \zeta_0}. \tag{5.9}$$

Если размеры отверстий значительно меньше размеров емкостей, то есть $n = 0$, $m = 0$,

$$\mu_{\text{з}} = \varepsilon/\sqrt{1 + \zeta_0}. \tag{5.10}$$

Коэффициенты сопротивлений затопленных отверстий в трубах можно определить по формулам [80]:

$$\zeta_з = 1{,}92n - 4{,}8n + 2{,}88; \quad (5.11)$$

$$\zeta_з = 1{,}92\,[0{,}5\,(1-n) + (1-m)^2]. \quad (5.12)$$

При $Re = (0{,}3\ldots2{,}1)\cdot10^4$, $0{,}2 \leqslant l/d \leqslant 1$ μ определяют по формуле Н. М. Беляева, Т. И. Ильина:

$$\mu_з = 0{,}54 + 0{,}27 l/d. \quad (5.13)$$

Значения $\mu_з$ можно выбрать по данным Н. П. Сточек (табл. 5.2).

5.2. Значения μ для затопленных отверстий

Δp, МПа	$d=2{,}01$ мм; $l/d=0{,}25$	$d=1{,}51$ мм, $l/d=0{,}32$, $p=2$ МПа	$d=1{,}51$ мм, $l/d=0{,}7$, $p=2$ МПа
0,02	0,647	0,677	0,743
0,03	0,655	0,716	0,720
0,05	0,656	0,772	0,753
0,10	0,658	0,638	0,711
0,15	0,634	0,635	0,725
0,2	0,630	0,637	0,745
0,5	0,624*	0,663	0,677
1,0	0,625*	0,717	0,671
1,5	0,625*	0,626	0,671
2,0	0,624*	0,629	0,689

*Значения μ при $p_з=4$ МПа, предыдущие—при $p_з=2$ МПа.

Истечение через отверстия при несовершенном и неполном сжатии. При неполном сжатии коэффициент расхода равен:

$$\mu_{неп} = \mu\,(1 + k\chi_{неп}/\chi), \quad (5.14)$$

где μ—коэффициент расхода при полном совершенном сжатии потока; χ, $\chi_{неп}$—периметр соответственно всего отверстия и той его части, на которой нет сжатия, то есть искривления линий тока нет; k—коэффициент; для круглого отверстия $k=0{,}128$, для прямоугольного—$k=0{,}152$. При несовершенном полном сжатии μ рассчитывают по формуле:

$$\mu_{нес} = \mu\,[1 + 0{,}64\,(\omega/\omega_{ст})^2], \quad (5.15)$$

где $\omega_{ст}$—площадь стенки (дна) емкости, в которой установлено отверстие.

Для отверстия, установленного в торцовой стенке патрубка:

$$\mu_{нес} = \mu\,[1 + a\,(b\omega/\omega_c - 1)], \quad (5.16)$$

где $a=0{,}0456$; $b=14{,}821$—для круглых отверстий; $a=0{,}076$; $b=9$—для прямоугольных.

Для расчета коэффициента сжатия ε можно использовать формулы:

$$\varepsilon_{нес} = 0{,}57 + 0{,}043/(1{,}1 - n)\ [5]; \qquad (5.17)$$

В. Н. Карева

$$\mathrm{Re} = 10 \ldots 40$$

$$\varepsilon = 1 - b\,(\mathrm{Re} - 10), \qquad (5.18)$$

где $b = 0{,}0023 \ldots 0{,}0013\ \omega/\omega_c$;

$$\mathrm{Re} = 40 \ldots 20\,000$$

$$\varepsilon = a + b/\lg \mathrm{Re}, \qquad (5.19)$$

где $a = 0{,}447 + 0{,}078\ \omega/\omega_c$; $b = 0{,}799 + 0{,}052\ \omega/\omega_c$.

Истечение через большие отверстия. Расход жидкости из больших незатопленных отверстий равен:

для круглых

$$Q = \mu_б \omega \sqrt{2gH_и}\,[1 - (d/H_и)^2/128]; \qquad (5.20)$$

для прямоугольных

$$Q = \mu_б ab \sqrt{2gH_и}\,[1 - (a/H_и)^2/96]; \qquad (5.21)$$

при $a/H = 1 \ldots 1{,}5$ $Q = \mu_б ab \sqrt{2gH_и}$ или при $p_1 = p_2 = p_{ат}$, $H_2 = 0$

$$Q = \mu_б b \sqrt{2g}\left(H_2^{3/2} - H_1^{3/2}\right), \qquad (5.22)$$

где $\mu_б$ — коэффициент расхода (табл. 5.3); H_1, H_2 — расстояния от свободной поверхности соответственно до верхней и нижней кромок отверстия.

5.3. Значения $\mu_б$ по Н. Н. Павловскому

Отверстие	$\mu_б$
Средних размеров со сжатием струи со всех сторон при отсутствии направляющих стенок	0,65
Большое отверстие с несовершенным полным всесторонним сжатием	0,7
Донное отверстие (без сжатия по дну):	
со значительным влиянием бокового сжатия	0,65...0,7
с умеренным влиянием бокового сжатия	0,7 ...0,75
с плавными боковыми подходами	0,8 ...0,85
с весьма плавными со всех сторон подходами жидкости к отверстию	0,9

Коэффициенты расхода при несовершенном сжатии, вызванном наличием колец перед входом, можно найти по данным, представленным на рисунке 5.2.

Истечение из-под затворов. Расход при свободном истечении из-под вертикального плоского затвора прямоугольного поперечного сечения равен:

$$Q = \mu ab \sqrt{2g\,(H_и - \varepsilon a)}, \qquad (5.23)$$

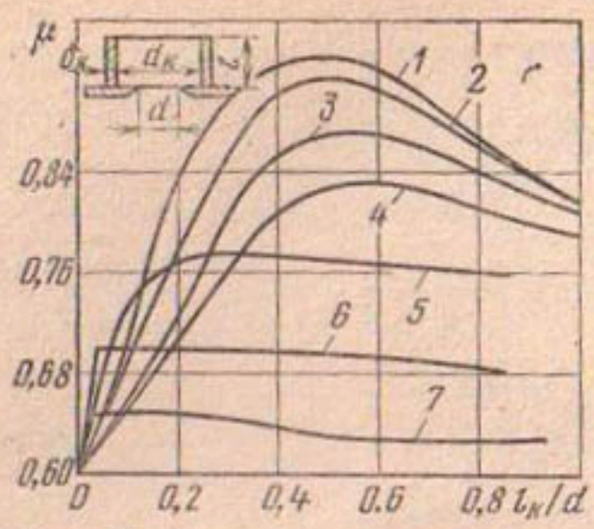


Рис. 5.2. Зависимость μ для круглых отверстий от $l_к/d$ и $d_к/d$: 1...7 — $d_к/d$ = 1,226; 1,254; 1,306; 1,386; 1,117; 1,057; 1,008.

где $\mu\varepsilon\varphi$ — коэффициент расхода; ε — коэффициент вертикального сжатия (значения ε, вычисленные по формулам Н. Е. Жуковского, приведены в таблице 5.4); φ — коэффициент скорости; a, b — высота и ширина отверстия; $H_и = H + \alpha v_п^2/(2g)$ — напор (глубина перед отверстием) с учетом скорости подхода; $v_п$ — скорость подхода.

По рекомендациям Н. Н. Павловского в зависимости от вида затвора коэффициент скорости равен: без порога — 0,95...1; с широким порогом или на гребне порога практического профиля — 0,85...0,95. Коэффициент вертикального сжатия, согласно данным А. С. Лугового, при угле наклона затвора β (рад) > 90° равен:

$$\varepsilon = 0{,}753 - 0{,}09\beta + (0{,}2\beta - 0{,}151)\, a/H_и^{2{,}58 - 0{,}5\beta}. \qquad (5.24)$$

5.4. Значения ε

$a/H_и$	ε	$a/H_и$	ε	$a/H_и$	ε
0,00	0,611	0,25	0,622	0,45	0,638
0,10	0,615	0,30	0,625	0,50	0,645
0,15	0,618	0,35	0,628	0,55	0,650
0,20	0,620	0,40	0,630	0,60	0,660

5.5. Значения μ и ε в зависимости от угла наклона затвора

a/H	β°							
	115		135		145		155	
	ε	μ	ε	μ	ε	μ	ε	μ
0,10	0,568	0,551	0,562	0,526	0,548	0,514	0,525	0,510
0,15	0,576	0,555	0,572	0,534	0,561	0,520	0,535	0,515
0,20	0,582	0,561	0,583	0,540	0,576	0,530	0,550	0,525
0,25	0,592	0,567	0,593	0,550	0,592	0,540	0,568	0,533
0,30	0,602	0,576	0,605	0,558	0,608	0,551	0,586	0,544
0,35	0,612	0,585	0,620	0,570	0,624	0,564	0,606	0,558
0,40	0,624	0,596	0,633	0,581	0,638	0,577	0,627	0,576
0,45	0,634	0,606	0,647	0,596	0,652	0,592	0,649	0,596
0,50	0,650	0,620	0,662	0,612	0,667	0,609	0,670	0,616
0,55	0,664	0,634	0,678	0,628	0,682	0,626	0,695	0,639
0,60	0,678	0,650	0,696	0,646	0,700	0,645	0,718	0,662

В таблице 5.5 приведены значения μ и ε в зависимости от угла наклона затвора.

Для расчета μ при несвободном истечении из-под плоского затвора прямоугольного сечения можно воспользоваться формулами В. В. Смыслова:

для прямоугольного русла

$$\mu = 0{,}53 + 0{,}98 a/h_{н.б} - 0{,}69\,(a/h_{н.б})^2; \qquad (5.25)$$

для трапецеидального русла при $m = 1{,}5$, $b/H_н = 1{,}6$

$$\mu = 0{,}579 + 0{,}416\, a/h_{н.б} - 0{,}231\,(a/h_{н.б})^2. \qquad (5.26)$$

Истечение из отверстий при наличии транзитного расхода. Коэффициенты расхода для малых отверстий можно рассчитать по формулам Г. М. Долгих, А. Г. Большакова, Ф. В. Козака:

при $0 < \mathrm{Re}_{тр} \leqslant 5 \cdot 10^3$, $0{,}467 \leqslant l/d \leqslant 1{,}22$, $4{,}67 \leqslant d_{тр}/d \leqslant 12{,}2$

$$\mu_v = [1 - 0{,}135 \mathrm{Re}_{тр}^{0{,}08} (l/d)^{-0{,}62}]\,\{1 - \exp[-2{,}5\,(v/v_{тр})^{-0{,}473} (d_{тр}/d)^{-0{,}155}]\}, \qquad (5.27)$$

где $v_{тр}$, $d_{тр}$ — скорость потока в трубе и ее диаметр; v, d — скорость в отверстии и его диаметр;

при $4 < \mathrm{Re} < 200$, $0{,}77 \leqslant l/d \leqslant 1{,}54$ [45]

$$\mu_v = A \lg \mathrm{Re} + B, \qquad (5.28)$$

или

$$\mu_v = C \lg \mathrm{Re}_{тр} + D, \qquad (5.29)$$

где A, B, C, D — коэффициенты (табл. 5.6).

5.6. Значения коэффициента A, B, C, D в зависимости от l/d

l/d	0,8	0,9	1,0	1,3	1,5
A	0,31	0,310	0,31	0,31	0,31
B	0,017	0,015	0,01	−0,03	−0,06
C	0,28	0,260	0,25	0,245	0,252
D	0,16	0,172	0,175	0,09	0,04

Для отверстий в стенках лотков и труб в зависимости от параметра кв[illegible]четичности потока $Q_к$ при больших Re μ следует определять по фор[illegible]улам Г. А. Паршиной:

отверстие с ос[illegible]рыми входными кромками, истечение в атмосферу

$$\mu_v = \mu/(1 + 0{,}34 П_{к.л}); \qquad (5.30)$$

$$П_{к.л} = v_л^2/(gH_л),$$

где μ — коэффициент расхода отверс[illegible]ны в лотке и напор перед [illegible]чя при транзитной скорости, равной 0; $v_л$, $H_л$ — средняя скорость во[illegible] отверстием;

истечение в атмосферу при $30° \leqslant \beta \leqslant 90°$ (β — угол скоса входных кромок отверстия)

$$\mu_{v\beta} = 64/[10 + (1{,}65 + 1{,}11\beta)\, П_{к.л}]; \qquad (5.31)$$

Истечение при $45° \leqslant \theta \leqslant 100°$ (θ — угол между направлением движения жидкости в лотке и осью отверстия)

$$\mu_{v0} = (11{,}3 - 3{,}10\theta)/[10 + (0{,}36 + 1{,}89\theta)\,\Pi_{к.л}]; \qquad (5.32)$$

затопленное истечение, $\mathrm{Re} \geqslant 34\,600$

$$\mu_{vз} = \mu/(1 + 0{,}555\,\Pi_{к.т});$$
$$\Pi_{к.т} = v_{тр}^2/(gH_{тр}), \qquad (5.33)$$

где $v_{тр}$, $H_{тр}$ — средняя скорость воды в трубе и напор перед отверстием;

истечение в сносящий поток

$$\mu'_{vз} = \mu_{vз}/(1 - 0{,}12\Pi_{к.л}). \qquad (5.34)$$

Коэффициенты расхода отверстий в трубах определяют по формуле В. А. Сурина:

асбестоцементные

$$\mu_v = 2{,}1\mu/(2{,}1 + \mathrm{Fr}); \qquad (5.35)$$

полиэтиленовые

$$\mu_v = 95\mu/(9{,}5 + \mathrm{Fr}), \qquad (5.36)$$

где $\mathrm{Fr} = v_{тр}^2/(gH_{тр})$ — число Фруда; $H_{тр}$ — пьезометрический напор.

Для расчета μ щелевых отверстий в трубах используют формулы Н. А. Горкина:

$$\mu_v = 1 - 0{,}005\mathrm{Re}' - 0{,}115\sqrt{\theta'}, \qquad (5.37)$$
$$\mathrm{Re}' = (v'd_{тр})\,(a/\delta) + e/\delta)\,\delta/(2al), \quad v' = v_{тр.к}/v_{вх},$$

где $v_{тр.к}$ — средняя скорость потока в конце трубопровода; $v_{вх}$ — скорость входа струи в щель; $d_{тр}$, δ — диаметр трубы и толщина ее стенок; a, l — ширина и длина щели; θ' — угол наклона щели к оси трубы;

при $\theta' = 0$

$$\mu_v = 1 - (0{,}005 - 0{,}0004\omega^1)\,\mathrm{Re}' - 0{,}125\sqrt{\omega'}, \qquad (5.38)$$
$$\omega' = 4nal/\pi d_{тр}^2,$$

где n — число щелей на 1 м трубопровода.

5.2. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВНЕШНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ НАСАДКИ

Истечение при полном совершенном сжатии. *Острые входные кромки.* При $\mathrm{Re}_г > 10^3$ на коэффициент расхода насадка влияет его диаметр ($d \geqslant 2$ мм). Так, для насадков диаметром 2 и 12 мм значения μ при $\mathrm{Re}_г = 10^4$ отличаются на 15%, для насадков диаметром 6 и 10 мм при $\mathrm{Re}_г = 7 \cdot 10^4$ — на 3,9%. Следовательно, для того чтобы исключить влияние диаметра, его значения при $\mathrm{Re}_г < 10^3$ должны быть не менее 4 мм, при $\mathrm{Re}_г > 10^3$ — $\geqslant 8$ мм. При $\mathrm{Fr} < 10$ и $\mathrm{We} < 200$ ($\mathrm{Fr} = 2H_н/d$ — число Фруда, $\mathrm{We} = 2gH_н d\rho/\sigma$ — число Вебера) следует учитывать влияние гравитационных и поверхностных сил на процесс истечения [17], при этом μ можно определять по формулам:

$\mathrm{Re}_г = 30\ldots70$, $\mathrm{Fr} < 10$, $\mathrm{We} > 200$

$$\mu = 1/[73{,}6l/(\mathrm{Re}_г d) + 5\,(l/d)^{-3}] + 3{,}25/(\mathrm{Re}_г \mathrm{Fr}); \qquad (5.39)$$

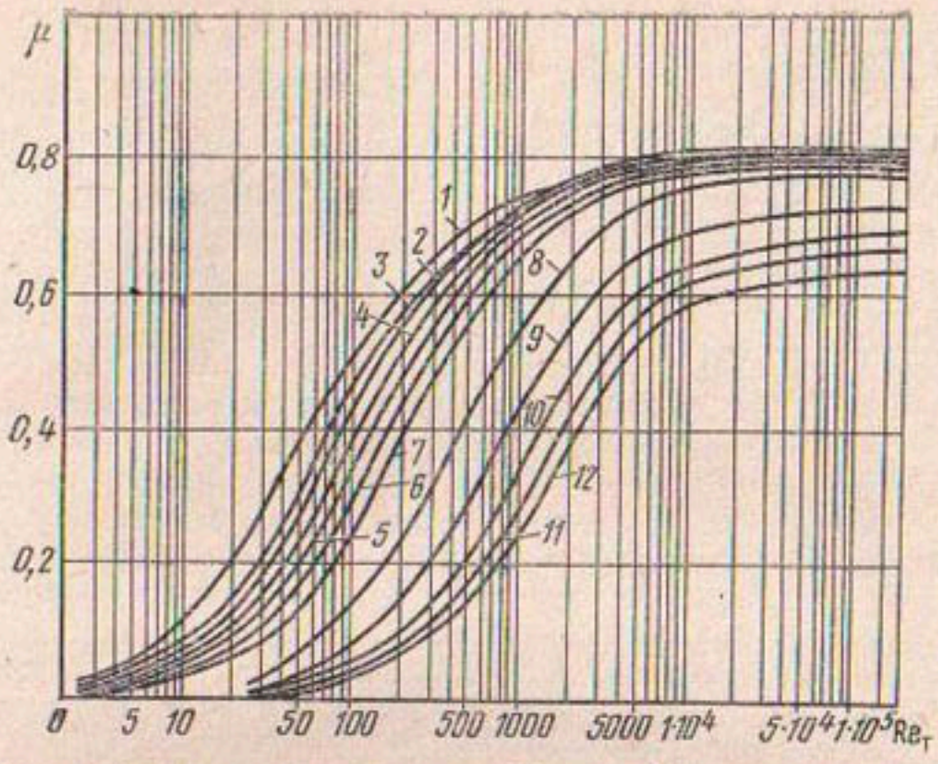


Рис. 5.3. Зависимость μ от $Re_г$ и l/d для внешних цилиндрических насадков при истечении в атмосферу: *1...12* — $l/d = 1{,}0$; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 10; 20; 30; 40; 50.

$Re_г = 70...10^4$, $Fr < 10$, $We > 200$

$$\mu = 1/[1{,}23 + 58l/(Re_г d)] + 15/(Re_г Fr); \quad (5.40)$$

$Re_г = 30...70$, $Fr > 10$, $We < 200$

$$\mu = 1/[73{,}6l/(Re_г d) + 5\,(l/d)^{-3}] + 72/(Re_г We); \quad (5.41)$$

$Re_г = 70...10^4$, $Fr > 10$, $We < 200$

$$\mu = 1/[1{,}23 + 58l/(Re_г d) + 350/(Re_г We). \quad (5.42)$$

При $Fr > 10$, $We > 200$, совершенном полном сжатии и острых входных кромках μ можно рассчитать в зависимости от $Re_г$ и l/d по графикам (рис. 5.3) или по эмпирическим формулам по данным З. И. Геллера, Ю. А. Скобельцына

$l/d = 1...1{,}5$, $Re_г = 16...100$

$$\mu = 1/[1{,}14 + 72l/(Re_г d)]; \quad (5.43)$$

$l/d = 2...5$, $Re_г = 30...50$

$$\mu = 1/[73{,}6l/(Re_г d) + 5\,(l/d)^{-3}; \quad (5.44)$$

$l/d = 1...1{,}5$, $Re_г = 10^2 ...10^3$

$$\mu = 1/[1{,}29 + 64l/(Re_г d)); \quad (5.45)$$

$l/d = 1...1{,}5$; $2...5$; $10...50$ и соответственно $Re = 10^3... 10^5$; $Re_г = 50...15 \cdot 10^4$; $Re_г = 80...15 \cdot 20^4$

$$\mu = 1/[1{,}23 + 58l/(Re_г d); \quad (5.46)$$

$l/d = 10...50$; $5 \cdot 10^3 \leqslant Re_г \leqslant 1{,}5 \cdot 10^5$

$$\mu = 1/\sqrt{1{,}5 + (l/d - 4)/(1{,}8 \lg Re_г - 1{,}5)^2}; \quad (5.47)$$

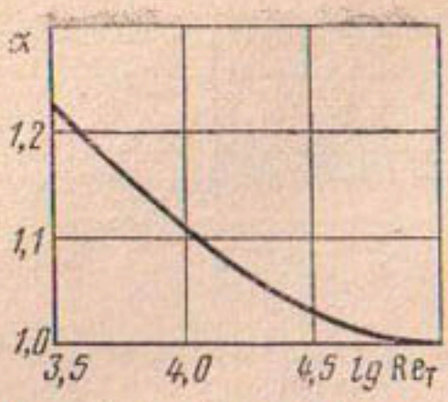


Рис. 5.4. Зависимость α от $Re_т$.

$l/d = 2 \ldots 10$; $Re_т \geqslant 2 \cdot 10^4$ [117]

$$\mu' = 0{,}827 - 0{,}0085 l/d; \qquad (5.48)$$

$l/d = 2 \ldots 10$, $Re_т = 10 \ldots 2 \cdot 10^4$

$$1/\mu = 1/\mu' + 20\,(1 + 2{,}25 l/d)/Re_т - \frac{0{,}005 l/d}{1 + 7{,}5\,(\lg 0{,}00015\,Re_т)^2}; \qquad (5.49)$$

$l/d = 1{,}5 \ldots 17$, $Re_т = 550 \ldots 7 \cdot 10^3$ [120]

$$\mu = Re_т/(17{,}11 l/d + 1{,}65\,Re_т^{0{,}8}). \qquad (5.50)$$

Радиальный и конусный вход. Скругление входных кромок позволяет увеличить расход внешних цилиндрических насадков. При изменении r/d (r — радиус закругления входных кромок) от 0 до 0,25 коэффициенты расхода быстро возрастают, а затем практически остаются постоянными; особенно это проявляется при $Re_т > 10^3$.

Коэффициенты расхода насадков с радиальным входом рекомендуется определять по формулам [88]:

при $Re_т \leqslant 10\,l/d$ и любых значениях $l_ц/d$ ($l_ц$ — длина цилиндрической части насадка)

$10 l/d < Re_т < 100\,l/d$, $l_ц/d > 0{,}5$

$$\mu = \sqrt{[16\,(0{,}25 r/d + l_ц/d)/Re_т + 6{,}3/Re_т]^2 + 0{,}5} - 16\,(0{,}25 r/d + l_ц/d)/Re_т - 6{,}3/Re_т; \qquad (5.51)$$

$10 l/d < Re_т < 100\,l/d$, $l_ц/d < 0{,}5$; $100 l/d < Re_т < 10^3\,l/d$

и любых $l_ц/d$

$$\mu = \sqrt{[30{,}36\,(0{,}25 r/d + l_ц/d)/Re_т + 9/Re_т]^2 + 0{,}714} - 30{,}36\,(0{,}25 r/d + l_ц/d)/Re_т - 9/Re_т; \qquad (5.52)$$

$Re_т > 1\,000\,l/d$

$$\mu = 1/\sqrt{\alpha + \zeta_r + 0{,}33\,(0{,}25 r/d + l_ц/d)/Re_т}, \qquad (5.53)$$

где α — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей во входном сечении (рис. 5.4); ζ_r — коэффициент сопротивления входа (гл. 3).

При выполнении входных кромок внешних цилиндрических насадков под углом к входящему потоку расход их также увеличивается. Коэффициенты расхода при изменении $l_к/d$ ($l_к$ — длина конусной части) от 0 до 0,15 возрастают, а затем практически не меняются. Для их определения можно использовать формулы [88]:

$Re_т \leqslant 10\,l/d$, форма входа любая $10\,l/d < Re_т < 60\,l/d$, $l_ц/d > 0{,}5\,l/d$

$$\mu = \sqrt{[15{,}24\,(l_ц/d + n l_к/d)/Re_т + 6/Re_т]^2 + 0{,}476} - 15{,}24\,(l_ц/d + n l_к/d)/Re_т - 6/Re_т; \qquad (5.54)$$

$10\,l/d < Re_т < 60\,l/d$ и $l_ц/d < 0{,}5\,l/d$; $60 l/d < Re_т < 10^3\,l/d$

$$\mu = \sqrt{[42{,}5\,(l_ц/d + n l_к/d)/(c\,Re_т + 12{,}6/(c\,Re_т)]^2 + 1/c} - 42{,}5\,(l_ц/d + n l_к/d)/(c\,Re_т) - 12{,}6/(c\,Re_т), \qquad (5.55)$$

где n, c — коэффициенты (рис. 5.5);

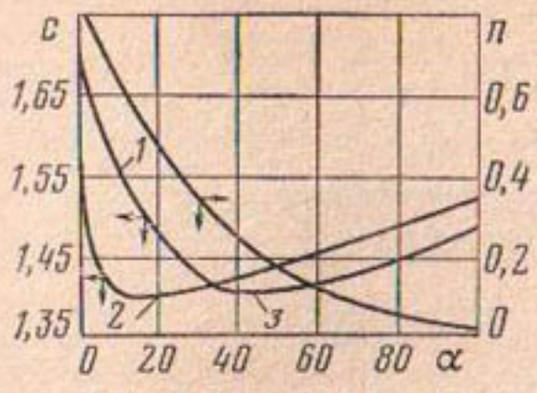


Рис. 5.5. Зависимость c и n от α: $1 - l_ц/d > 0{,}05$; $2 - l_ц \leqslant 0{,}5$; $3 - \alpha = f(n)$.

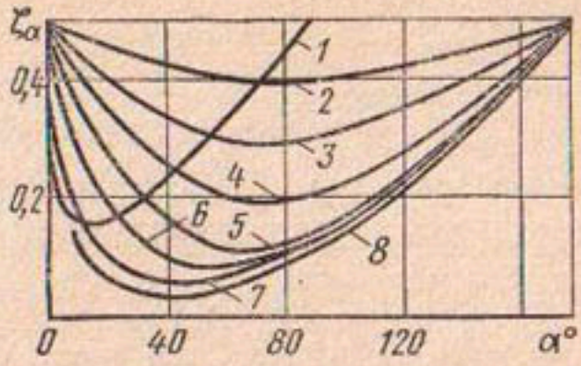


Рис. 5.6. Зависимость ζ_α от α: $1 - l_ц/d \leqslant 0{,}05$; $2 \ldots 8 - l_к/d = 0{,}025$; $0{,}05$; $0{,}075$; $0{,}1$; $0{,}15$; $0{,}2 \ldots 1{,}5$; $2 \ldots 2{,}5$.

$\mathrm{Re}_т > 10^3\, l/d$

$$\mu = 1/\sqrt{\alpha + \zeta_\alpha + 0{,}33/\mathrm{Re}_т^{0{,}25}\,(l_ц/d + n\, l_к/d)}, \qquad (5.56)$$

где ζ_α — коэффициент сопротивления входа (рис. 5.6).

Истечение из насадков квадратного, прямоугольного и треугольного сечений при полном совершенном сжатии. Коэффициенты расхода при острых входных кромках можно определять по формулам:

квадратное поперечное сечение стороной a, $10^3 < \mathrm{Re}_т < 10^6$

$$\mu = 1/(1{,}23 + 58 l/(\mathrm{Re}_R a); \qquad (5.57)$$

прямоугольное поперечное сечение высотой a_1, $10^4 < \mathrm{Re}_R < 10^6$

$$\mu = 1/(1{,}23 + 58\, l/(\mathrm{Re}_R a_1); \qquad (5.58)$$

треугольное

$$\mu = 1/(1{,}23 + 58 l/\mathrm{Re}_R b), \qquad (5.59)$$

где b — бóльшая сторона отверстия.

Истечение из внешних цилиндрических насадков при несовершенном сжатии. Несовершенное сжатие обусловливается стенками емкостей при $l_1 < 3L$ (l_1 — расстояние от входного сечения насадка до дна (стенки) емкости; L — характерный линейный размер, для насадка круглого сечения $L = d$). При этом соотношение Re в системе емкость — насадок следующее:

$\mathrm{Re}_1 = \sqrt{n}\,\mathrm{Re}_2$ (Re_1, Re_2 — соответственно для емкости и насадка; $n = d^2/d_е^2$ — степень сжатия потока; d, $d_е$ — диаметр насадка и емкости). При $\mathrm{Re}_т < 30{,}8$ степень несовершенства сжатия потока на входе в насадок практически не влияет на коэффициент расхода.

Для расчета μ при несовершенном сжатии можно использовать

формулы [61]:

$$30{,}8 < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 108 \tag{5.60}$$

$$\mu_{\text{е}} = \sqrt{A_1^2 + B_1} - A_1,$$

$$A_1 = \frac{12{,}6/[\mathrm{Re}_{\text{т}}(a - b\,\mathrm{Re}_{\text{т}})] + 64l/(\mathrm{Re}_{\text{т}}d)}{2(1-n^2) + [1 - 1/(a - b\,\mathrm{Re}_{\text{т}})]^2},$$

$$B_1 = \frac{1}{2(1-n^2) + [1 - 1/(a - b\,\mathrm{Re}_{\text{т}})]^2};$$

$$2\cdot 10^3 < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 3\cdot 10^3$$

$$\mu_{\text{е}} = \left[\sqrt{\left(\frac{111}{\mathrm{Re}_{\text{т}}}\frac{l}{d} + \frac{157}{\mathrm{Re}_{\text{т}}}\right)^2 + 6{,}172} - \left(\frac{111}{\mathrm{Re}_{\text{т}}}\frac{l}{d} + \frac{157}{\mathrm{Re}_{\text{т}}}\right)\right] \Big/ 3{,}086; \tag{5.61}$$

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} > 3\cdot 10^3$$

$$\mu_{\text{е}} = 1/\sqrt{1 + 0{,}3295l/(\mathrm{Re}_{\text{т}}^{0,25}d) + 0{,}5(1-n)}; \tag{5.62}$$

в общем случае

$$\mu_{\text{е}} = \mu/\sqrt{1 - \alpha_1 n^2 \mu^2}, \tag{5.63}$$

или

$$\mu_{\text{е}} = \mu/\sqrt{1 - \alpha_2 \beta \mu^2}. \tag{5.64}$$

Значения коэффициентов α_1, α_2, $\beta = \alpha_1 n/\alpha_2$ для различных условий истечения приведены в [61].

Для увеличения пропускной способности внешних цилиндрических насадков перед ними устанавливают кольца. При ламинарном движении жидкости влияние геометрических размеров колец весьма незначительно, при турбулентном оно проявляется сильно.

Коэффициенты расхода системы кольцо-насадок находят по формулам [85]:

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} \leqslant 10^2\, l/d \text{ и } 10^2\, l/d < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 3\cdot 10^3\, l/d$$

$$\mu = \sqrt{[bl/(2c\mathrm{Re}_{\text{т}}d) + 12{,}6/(c\,\mathrm{Re}_{\text{т}})]^2 + 1/c} - bl/(2c\,\mathrm{Re}_{\text{т}}d) - 12{,}6/(c\mathrm{Re}_{\text{т}}), \tag{5.65}$$

где $b = 64$, $c = 2{,}16$ при $\mathrm{Re}_{\text{т}} < 10^2\, l/d$; $b = 85$ при $10^2\, l/d < \mathrm{Re}_{\text{т}} < 3\cdot 10^3\, l/d$, $c = 1{,}6$ при $d_{\text{к}}/d \leqslant 2{,}6$ и $l_{\text{к}}/d > 0{,}2$; в остальных случаях $c = 1{,}7$;

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} > 3\cdot 10^3\, l/d$$

$$\mu = 1/\sqrt{\alpha + \zeta_{\text{к}} + 0{,}336l/(\mathrm{Re}^{0,25}d)}, \tag{5.66}$$

где α — коэффициент неравномерности скоростей во входном сечении (рис. 5.4); $\zeta_{\text{к}}$ — коэффициент сопротивления входного участка системы (рис. 5.7).

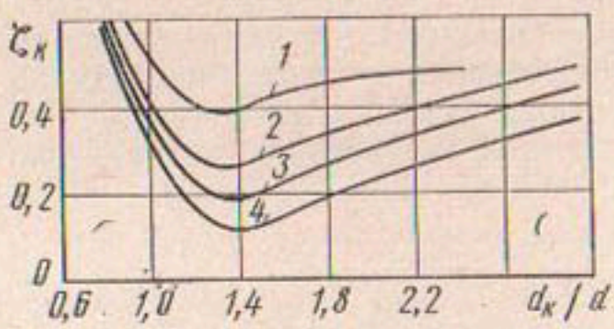


Рис. 5.7. Зависимость $\zeta_{\text{к}}$ от $d_{\text{кол}}/d$: 1...4 — $l_{\text{з}}/d = 0{,}1$; 0,2; 0,5 (2...4); 1 и 1,5.

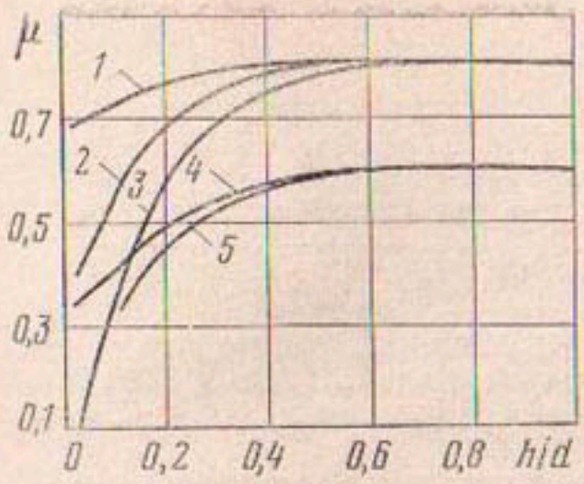


Рис. 5.8. Зависимость μ от h/d: при $\zeta_{вых}=1$ (*1...3*—$d_э/d=0,5$; 0,75; 1; во всех случаях $Re_г=2,2\cdot10^4$); при $\zeta_{вых}<1$ (*4,5*—$d_э/d=0,75$; 1).

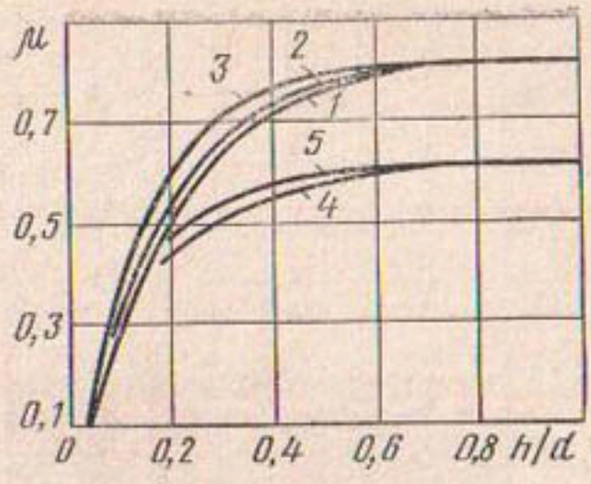


Рис. 5.9. Зависимость μ от h/d при $\zeta_{вых}=1$ (*1...3*—$d_э/d=1,25$; 1,5; 2; $Re=2,2\cdot10^4$); при $\zeta_{вых}<1$ (*4,5*—$d_э/d=1,5$; 2).

Коэффициенты расхода системы насадок—экран можно найти по графикам (рис. 5.8, 5.9) [85, 89].

Характеристики кавитации и срыва вакуума во внешних цилиндрических насадках. Явление кавитации в насадках обусловлено в жидкости областей, занятых парами и газами, выделяющимися из нее при пониженном давлении. В результате кавитации изменяются расходные характеристики насадков.

Кавитацию в насадках при $l/d<10$ следует учитывать при $1/k>1/k_{кр}$ и $Re>10^4$: $1/k=(p_1-p_2)/(p_2-p_{сж})$, $1/k_{кр}=1,18\,(1+0,006l/d)/(1-0,038l/d)$, где p_1, p_2—давление соответственно перед входом в насадок и за ним; $p_{сж}$—давление в сжатом сечении [81].

Коэффициент расхода равен:

$$\mu=\varepsilon_{вх}\,(1+k)^{0,5}, \tag{5.67}$$

где $\varepsilon_{вх}$—коэффициент сжатия.

Для насадков при $l/d>10$ и $Re>10^4$ напор, при котором начинается кавитация, зависит от l/d и $(p_{ат}-p_п)/(\rho ga)$ [81] ($p_п$—давление насыщенных паров) (рис. 5.10).

$$(p_{ат}-p_п)(\rho gd)\leqslant 1\,450$$
$$H_к/d=(0,75+0,053l/d)\,(p_{ат}-p_п)/(\rho gd); \tag{5.68}$$
$$(p_{ат}-p_п)/(\rho gd)>1\,450$$
$$H_к/d=A_1e^{B_1\,(P_{ат}-p_п)/(\rho gd)}, \tag{5.69}$$

где A_1, B_1—коэффициенты (рис. 5.11).

Коэффициент расхода при $l/d>10$ рекомендуется определять по формуле:

$$\mu_к=C_1-D_1\,(\lg\sqrt{H_п/H_к})^{0,88}, \tag{5.70}$$

где C_1, D_1—коэффициенты (рис. 5.11).

При срыве вакуума в насадке, то есть когда жидкость вытекает из него, не касаясь боковых стенок, μ определяют по тем же зависимостям, что и для отверстий в тонкой стенке. Напор, при кото-

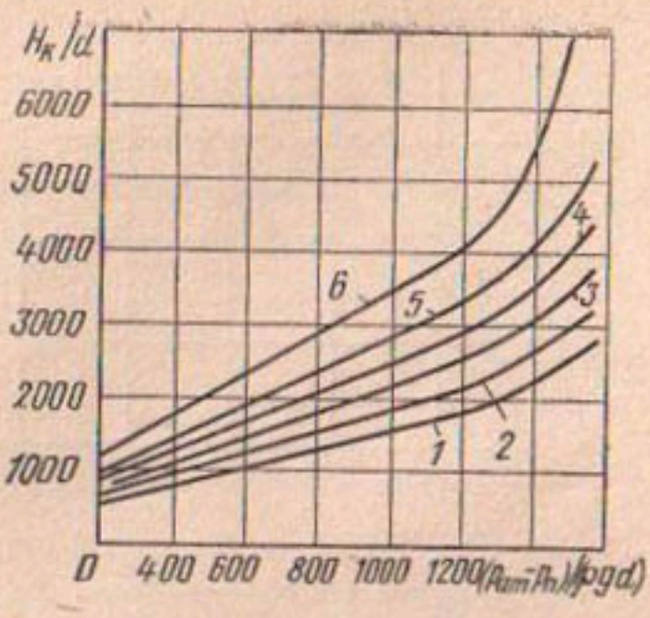


Рис. 5.10. Зависимость $H_к/d$ от $(p_{ат}-p_п)/(\rho gd)$: 1...6 — $l/d=10$; 15; 20; 25; 30; 40.

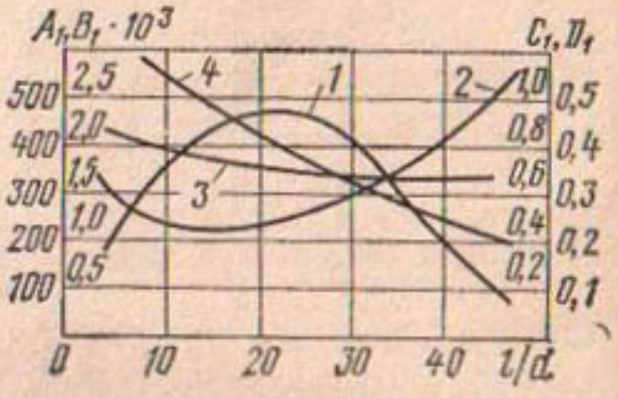


Рис. 5.11. Зависимость A_1, B_1, C_1, D_1 от l/d: 1 — A_1; 2 — B_1; 3 — C_1; 4 — D_1.

ром происходит срыв вакуума, можно определить по графику (рис. 5.12) или по формуле $H_{ср}/d=1{,}55\,(p_{ат}-p_п)/(\rho gd)$, которая правомерна при $l/d=2\ldots5$ и $Re_{ср}>6\cdot10^4$ ($Re_{ср}$ определяют по напору срыва вакуума). При радиальном и конусном входе напоры (табл. 5.7, 5.8), при которых происходят кавитация внутри насадков и срыв вакуума, всегда больше, чем при острых входных кромках [81].

5.7. Значения $H_{ср}$ и μ после срыва вакуума для радиальных насадков при $Re_{ср}\geqslant10^5$

l/d	r/d	t, °C	$H_{ср}$, м	μ
1	0,1	11,8	18,95	0,761
1	0,2	11,8	31,85	0,865
3	0,1	16,5	18,85	0,756
3	0,15	16,3	23,68	0,800
7	0,1	11,6	27,38	0,805

5.8. Значения $H_{ср}$ для насадков с конусным входом при $Re_{ср}\geqslant10^5$

l/d	$l_к/d$	α, °	t, °C	$H_{ср}$, м
1	0,1	10	15,5	16
1	0,1	30	16	17
3	0,1	63	17	16
3	0,3	63	17	30
3	0,5	10	17,5	18
3	0,5	20	17,5	28
7	0,1	30	18,0	18
7	0,2	90	17,6	22

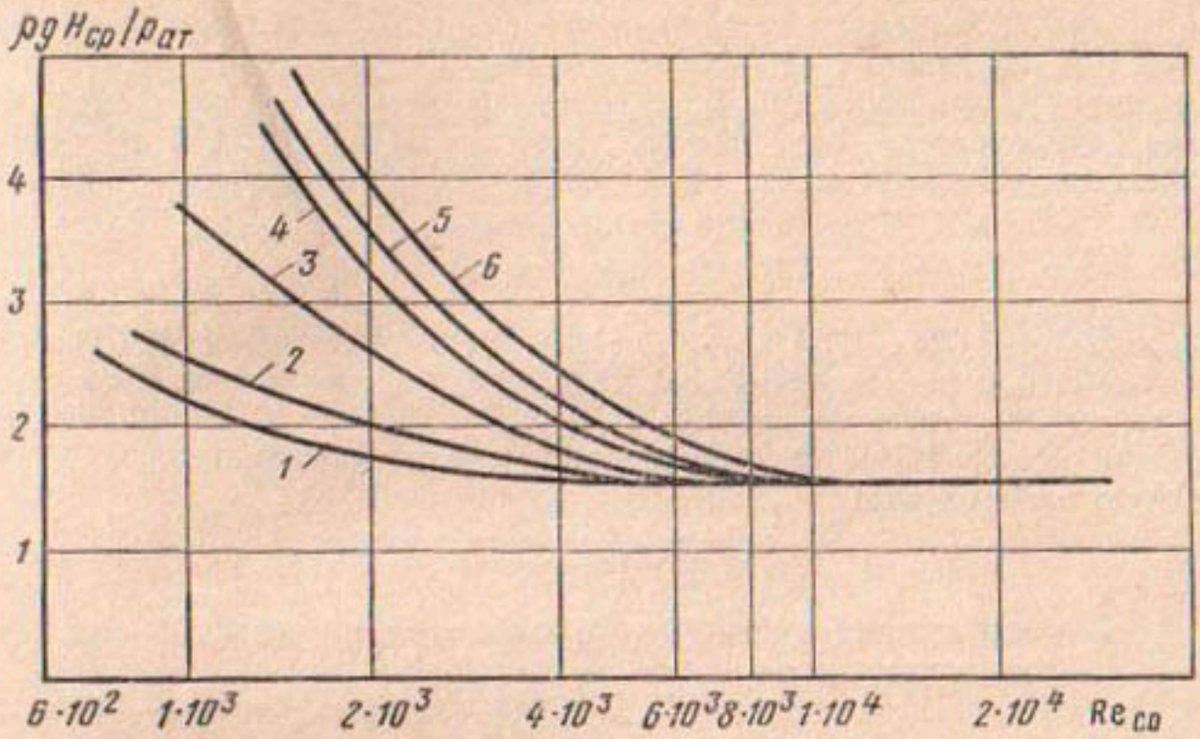


Рис. 5.12. Зависимость $\rho g H_{ср}/p_{ат}$ от $Re_{ср}$: *1...6* — $l/d = 1$; 1,5; 2; 3; 4; 5.

Для систем экран — насадок при $l/d = 3$, $d_{эк}/d \geqslant = 1{,}5$, $Re_{ср} > 1{,}46 \cdot 10^5$, $We_{ср} \geqslant 200$, $H_{ср}$ находят при $0{,}1 \leqslant h/d < 0{,}3$ и $0{,}3 \leqslant h/d < 1$ соответственно из зависимостей: $H_{ср}/d = a\,(p_{ат} - p_п)/(\rho g d) - b$; $H_{ср}/d = 1{,}571\,(p_{ат} - p_п)/(\rho g d) - 21$ (h — расстояние между экраном и насадком; значения a, b приведены в таблице 5.9 [89]).

5.9. Значения коэффициентов *a* и *b*

h/d	0,10	0,15	0,20	0,25
a	2,90	2,00	1,72	1,63
b	925	275	125	75

5.3. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ НАСАДКИ

Истечение в атмосферу и среду с давлением p при полном совершенном сжатии и острых входных кромках. Для определения коэффициентов расхода капиллярных насадков ($d < 2$ мм) рекомендуются формулы [60]:

$$Re < 2\,300$$
$$a_1\mu^2 + b_1\mu^{1{,}632} + c_1\mu = d_1; \qquad (5.71)$$
$$a_1 = p_1\,[\alpha_2 + n\,(1/\varepsilon - n)^2];$$
$$b_1 = p_1 9\,(1 - n)/Re^{0{,}338};\ c_1 = p_1 k 64 l/(Re\, d);$$
$$d_1 = p_1 + \Delta p_{кап};\ \Delta P_{кап} = \sigma\,(1/R_1 + 1/R_2);\ R_1 = 0{,}5\varepsilon^{0{,}5} d;$$
$$R_2 = [l^2 + d^2\,(1 - \varepsilon^{0{,}5})^2]/[4d\,(1 - \varepsilon^{0{,}5})],$$

где α_2 — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей, α_2 зависит от $l \cdot 10^3/(\mathrm{Re}\, d)$ (гл. 4); ε — коэффициент сжатия потока, приближенно ε находят по формулам для истечения через отверстия; k — коэффициент, зависит от $l \cdot 10^3/(\mathrm{Re}\, d)$ (Re определяют по действительной скорости в выходном сечении насадка);

$$\mathrm{Re}_{\text{т}}$$

$$a_2\mu^2 + b_2\mu^{1,75} = c_2; \qquad (5.72)$$

$a_2 = p_1\alpha_2 + p_1\,(1/\varphi^2 - 1)/1/\varepsilon^2 + p_1 n\,(1/\varepsilon - 1)$; $\quad b_2 = p_1 0{,}3164 l/(\mathrm{Re}^{0,25} d)$; $c_2 = p_1 + \Delta p_{\text{кап}}$ (φ — коэффициент скорости, определяют по формулам для истечения через отверстия).

При $\mathrm{Re}_{\text{т}} > 150$ для определения μ можно использовать более простую зависимость:

$$\mu = \sqrt{p_1 + \Delta p_{\text{кап}}/[p_1\,(\alpha_2 + \zeta_{\text{вх}} + \lambda l/d)]}, \qquad (5.73)$$

где $\zeta_{\text{вх}}$ — коэффициент местного сопротивления на входе; λ — коэффициент сопротивления трения по длине (гл. 3,4);
$l/d = 2 \ldots 10$, $4 \cdot 10^3 < \mathrm{Re}_{\text{т}} \leqslant 5 \cdot 10^4$ ($d_y = 1$ мм (d_y — условный диаметр)

$$\mu = 0{,}05 \lg \mathrm{Re}_{\text{т}} + 0{,}555\,[10\,(l/d)^{-1}]^{0,085}/(d/d_{\text{у}})^{0,05}; \qquad (5.74)$$

$l/d = 1$, $8{,}5 \cdot 10^3 < \mathrm{Re}_{\text{т}} \leqslant 5 \cdot 10^4$, $d_{\text{у}} = 1$ мм

$$\mu = [-0{,}05 \lg \mathrm{Re}_{\text{т}} + 1{,}06\,(l/d)^{0,085}]/(d/d_{\text{у}})^{0,05}. \qquad (5.75)$$

Формулы (5.71) ... (5.73) применимы при условии: H_1 (в формуле (5.1)) значительно меньше p_1. При $p_2 \neq 0$

$$\mu = \sqrt{\frac{p_1 + \Delta p_{\text{кап}}}{p_1\,(\alpha_2 + \zeta_{\text{вх}} + \lambda l/d + \zeta_{\text{вых}})}}, \qquad (5.76)$$

где $\zeta_{\text{вых}}$ — коэффициент местного сопротивления на выходе из насадка (гл. 3).

Истечение при несовершенном сжатии потока. Такое сжатие может быть вызвано установкой колец до или после насадков. Если кольцо установлено до насадка и истечение происходит в атмосферу, то для системы кольцо — насадок при $\mathrm{Re}_{\text{т}} > 2300$ соответственно при $p_2 = 0$ и $p_2 \neq 0$:

$$\mu = 1/\sqrt{\alpha_2 + \zeta_{\text{вх. к}} + \zeta_{\text{в. с}} + \zeta_{\text{в. р}} + \lambda l_{\text{к}}/d_{\text{к}} + \lambda_{\text{н}} l/d}, \qquad (5.77)$$

$$\mu = 1\sqrt{\alpha_2 + \zeta_{\text{вх. к}} + \zeta_{\text{в. с}} + \zeta_{\text{в. р}} + \lambda_{\text{к}} l_{\text{к}}/d_{\text{к}} + \lambda_{\text{н}} l/d + \zeta_{\text{вых}}}, \qquad (5.78)$$

где α_2 — коэффициент неравномерности распределения скоростей в выходном сечении насадка; $\zeta_{\text{вх. к}}$, $\zeta_{\text{в. с}}$, $\zeta_{\text{в. р}}$ — коэффициенты потерь соответственно на входе в кольцо, внезапное сужение и расширение потока при входе в насадок; $\lambda_{\text{к}}$, $\lambda_{\text{н}}$ — коэффициенты сопротивления трения по длине соответственно в кольце и насадке; $\zeta_{\text{вых}}$ — коэффициент потерь на выходе потока из насадка.

Кольца, установленные на выходе из насадка, при $l_{\text{к}}/d > 6$ не влияют на μ системы насадок — кольцо. При $l_{\text{к}}/d < 6$ коэффициент расхода определяют при $p_2 = 0$ и $p_2 \neq 0$ соответственно по формулам:

$$\mu = 1\sqrt{\alpha_2 + \zeta_{\text{вх}} + \lambda_{\text{н}} l/d + \zeta_{\text{вх. к}} + \lambda_{\text{к}} l_{\text{к}}/d_{\text{к}}}, \qquad (5.79)$$

$$\mu = 1\sqrt{\alpha_2 + \zeta_{\text{вх}} + \lambda_{\text{н}} l/d + \zeta_{\text{вх.с}} + \lambda_{\text{к}} l_{\text{к}}/d_{\text{к}} + \zeta'_{\text{вых}}}, \qquad (5.80)$$

где $\zeta_{вх.к}$, $\zeta'_{вых}$ — коэффициенты потерь соответственно на входе потока из насадка в кольцо и на выходе из кольца (потери в кольце следует учитывать при $l_к/d_к > 1$).

Приближенные значения μ для систем кольцо — насадок, насадок — кольцо можно получить, определив ζ и λ по соответствующим зависимостям (гл. 3,4).

Для системы экран — насадок при $Re_т > 600$, $d_{эк}/d \geqslant 3$, $0{,}16 \leqslant h/d < 1$ $\mu_c = \mu\,(1 - e^{-h/0{,}2d})$ [60].

Характеристики кавитации и срыва вакуума в капиллярных насадках. Напоры, при которых в капиллярном насадке происходят эти явления, можно найти по формулам [81]:

$$l/d = 2 \ldots 10 \text{ и } Re_т > 10^4 \text{ (приближенно)}$$

$$H_к/d = (p_{ат} - p_п)\,(0{,}076 l/d + 1)/(\rho g d); \tag{5.81}$$

$$l/d = 1 \ldots 10$$

$$H_{ср}/d = 1{,}52\,(p_{ат} - p_п)/(\rho g d); \tag{5.82}$$

для системы кольцо — насадок

$$H_{ср}/d = 1{,}52\,(p_{ат} - p_п)\,[0{,}45\,(d_к/d)^{-1} + 1]/(\rho g d). \tag{5.83}$$

5.4. ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ВНУТРЕННИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ НАСАДКИ

Коэффициенты расхода внутренних цилиндрических насадков при полном совершенном сжатии при $Re_т < 200$ и любых δ/d (δ — толщина стенки насадка), а также для $Re_т > 200$ и $\delta/d \geqslant 0{,}1$ те же, что и для внешних цилиндрических насадков. Их можно определить и по графикам (рис. 5.13).

При $Re_т > 10^4$ и $\delta/d < 0{,}04$

$$\mu = A + B\delta/d, \tag{5.84}$$

где A, B — коэффициенты, для $l/d = 3$, $A = 0{,}69$, $B = 2{,}6$.

При $H_н \geqslant H_{ср}$ и $\delta/d \geqslant 0{,}1$ μ следует определять так же, как и для отверстий в тонкой стенке, а при $\delta/d \leqslant 0{,}04$ и $Re_т \geqslant 10^4$

$$\mu = 0{,}495 + 2{,}4\delta/d. \tag{5.85}$$

Напор срыва вакуума при $Re_{ср} > 10^4$ в насадках, где $l/d = 2 \ldots 5$, можно определить из соотношения:

$$H_{ср}/d = 1{,}46\,(p_{ат} - p_п)/(\rho g d). \tag{5.86}$$

При несовершенном сжатии, вызванном наклоном входного сечения, при $l/d = 3$, $\varepsilon_{вых} = 1$, $10^4 < Re_т < 1{,}25 \cdot 10^5$ согласно исследованиям Ю. А. Скобельцына, В. Х. Межидова μ рекомендуется определять при $\delta/d > 0{,}04$ и $< 0{,}04$ соответственно по формулам:

$$\mu = 0{,}8 - 145 \sin\beta, \tag{5.87}$$

$$\mu = 0{,}69 + 2{,}6\delta/d - (0{,}013 + 3{,}18\delta/d) \sin\beta^{0{,}23 + 17\delta/d}, \tag{5.88}$$

где β — угол наклона входного сечения насадка к горизонту.

Коэффициент расхода внутренних цилиндрических насадков при $\delta/d < 0{,}1$ можно увеличить, установив на входе кольцо, при этом μ находят по графикам (рис. 5.14).

Сравнение коэффициентов расхода внешних цилиндрических насадков и отверстий в тонкой стенке. Значения μ для внешних

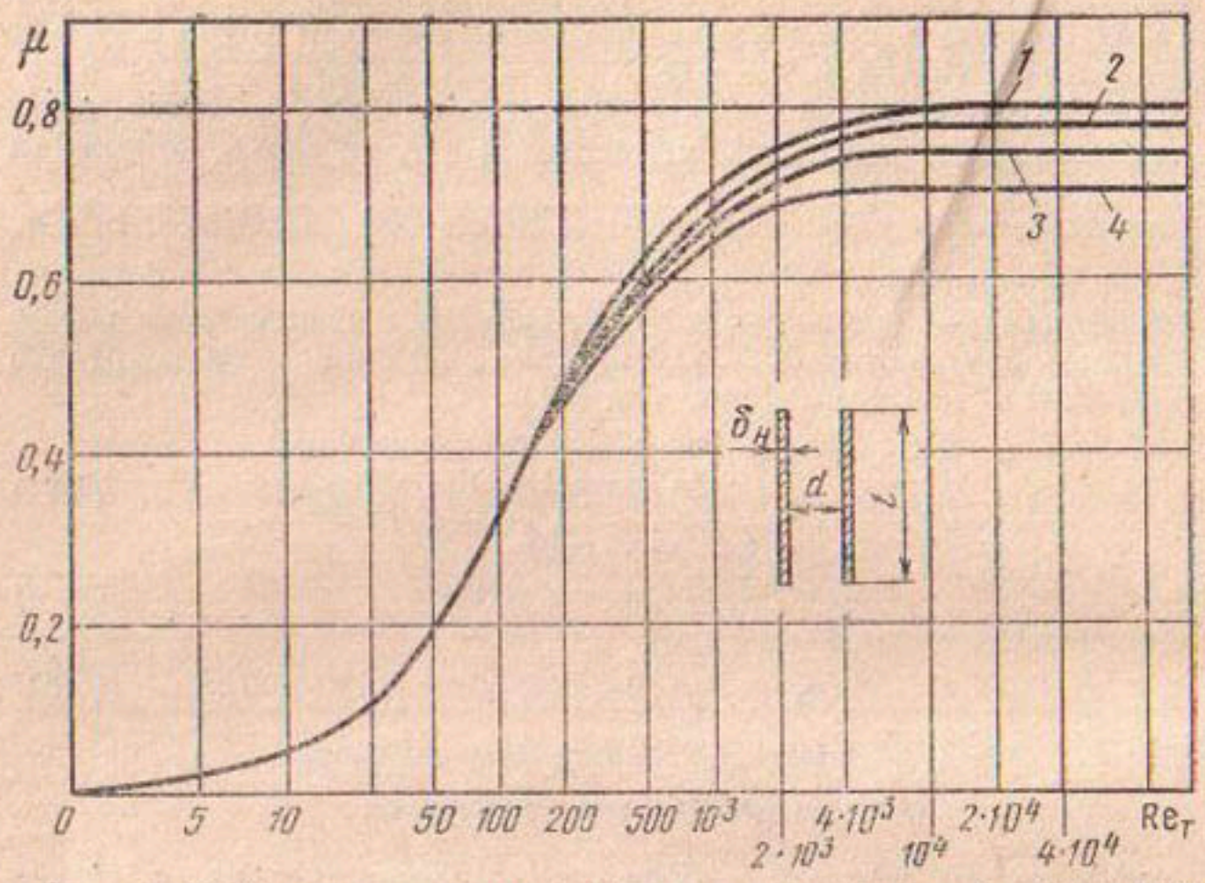


Рис. 5.13. Зависимость μ от $Re_т$ для $l/d = 3$: *1...4* — $\delta/d = 0{,}0045$; 0,019; 0,33; 0,1.

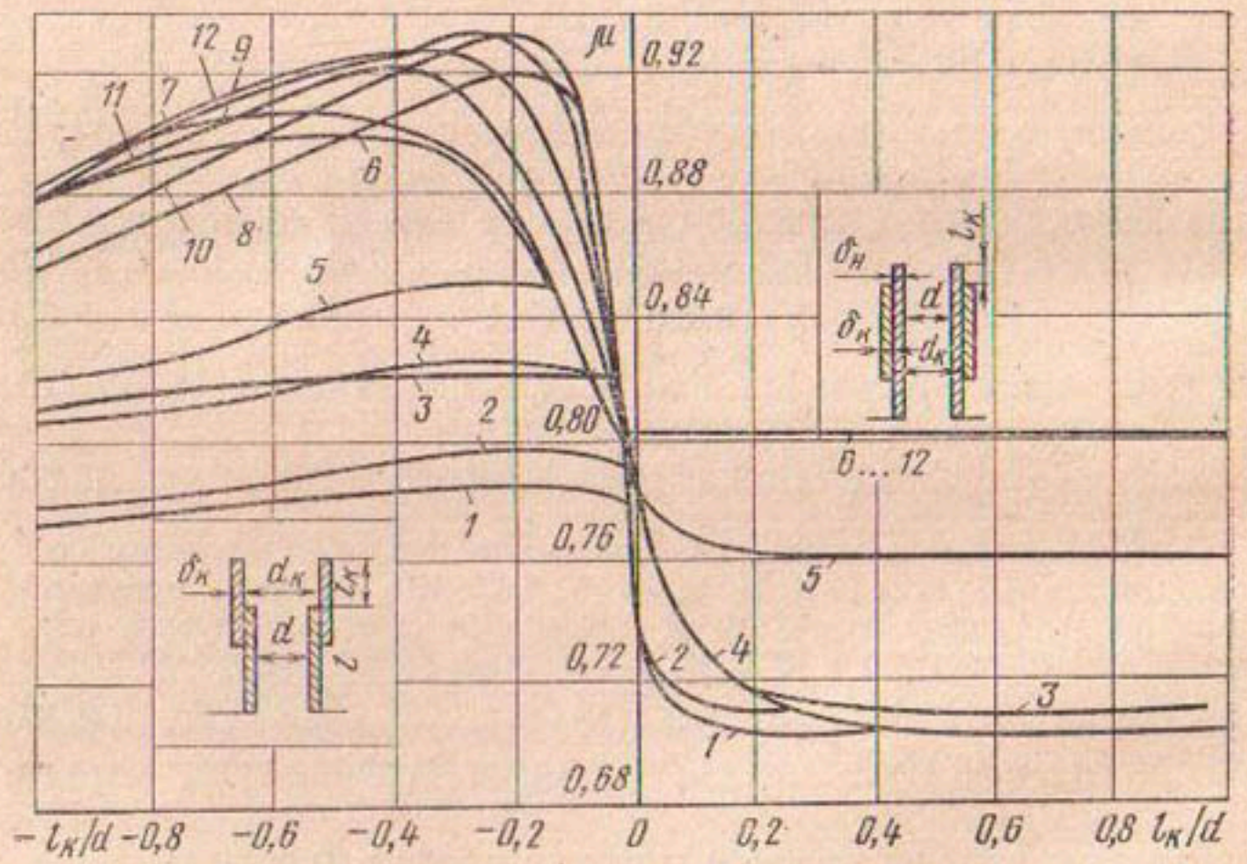


Рис. 5.14. Зависимость μ от $l_к/d$ для внутренних цилиндрических насадков при истечении в атмосферу: *1...12* — $d_к/d = 1{,}022$; 1,028; 1,022; 1,028; 1,062; 1,138; 1,2; 1,38; 1,164; 1,296; 1,148; 1,18; $\delta_к/d_к = 0{,}02$; 0,022; 0,15; 0,098; 0,11; 0,099; 0,11; 0,12; 0,1; 0,15; 0,106; 0,108; $\delta_н/d = 0{,}066$; 0,0045; 0,006; 0,0045; 0,028; 0,065; 0,099; 0,184; 0,077; 0,145; 0,082; 0,094.

цилиндрических насадков ($l/d = 2 \ldots 5$) больше, чем для отверстий в тонкой стенке (в обоих случаях входные кромки острые), на 20 ... 30% при $Re_т \geq 10^4$. При меньших $Re_т$ эта закономерность не соблюдается (табл. 5.10). Значения $Re_{кр}$, при которых $\mu = \mu_0$, соответственно при $l/d = 1 \ldots 20$ и $20 \ldots 50$ равны:

$$Re_{кр} = 211 l/d + 97, \tag{5.89}$$

$$\lg Re_{кр} = 0{,}025 l/d + 3{,}21. \tag{5.90}$$

Внешние цилиндрические насадки целесообразно применять при $Re_т > Re_{кр}$.

5.10. Отношения μ/μ_0 при различных $Re_т$ и l/d

l/d	$Re_т$						
	10	50	10^2	$5 \cdot 10^2$	10^3	10^4	10^5
1,00	0,32	0,64	0,79	1,05	1,12	1,26	—
1,5	0,24	0,50	0,70	1,02	1,10	1,26	1,35
2,00	0,19	0,45	0,65	1,00	1,10	1,28	1,37
2,5	0,16	0,39	0,58	0,97	1,08	1,26	1,36
3,00	0,13	0,34	0,52	0,93	1,06	1,25	1,35
4,00	0,10	0,28	0,44	0,89	1,02	1,24	1,33
5,00	0,08	0,22	0,37	0,84	0,99	1,23	1,32

5.5. ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ КОНИЧЕСКИХ СХОДЯЩИХСЯ И РАСХОДЯЩИХСЯ НАСАДКОВ

Сходящиеся насадки. Для приближенного расчета μ можно использовать формулы для внешних цилиндрических насадков с конусным входом — (5.54) ... (5.56), принимая $l_н/d \leq 0{,}05$. Для различных l/d, $Re_т$ и углов конуса α можно найти μ по графикам (рис. 5.15 ... 5.18).

При полном совершенном сжатии и истечении в атмосферу правомерны формулы [82]:

$$Re_т < 50, \ \alpha = 5 \ldots 40$$

$$\mu = \sqrt{[A/4Re)]^2 + 0{,}5} - A/(4\,Re_т); \tag{5.91}$$

$$A = 20/[h^{0{,}52} (\operatorname{tg} \alpha)^{0{,}75}]; \ h = \omega_1/\omega_2,$$

где ω_1, ω_2 — соответственно площадь входного и выходного сечений насадка;

$$30 \leq Re_т \leq 200, \ \alpha = 1 \ldots 14°, \ l/d = 1 \ldots 20$$

$$\mu = \sqrt{(B/Re_т)^2 + 0{,}5} - B/Re_т; \tag{5.92}$$

$$B = 6{,}3 \sqrt[4]{\sin \alpha} + 2{,}67\,[1 - (r_2/r_1)^3]/\sin 0{,}5\alpha,$$

r_1, r_2 — радиусы входного и выходного сечений насадка;

$Re_т > 10^4$, $l/d = 3$, $\alpha = 10 \ldots 140°$ (по Б. Н. Сиову)

$$\mu = 0{,}00001172\,(180 - \alpha)^2 + 0{,}2. \tag{5.93}$$

Расходящиеся насадки. При отсутствии кавитации ($H_и < H_к$) и срыва вакуума ($H_и < H_{ср}$) в случае истечения в атмосферу при

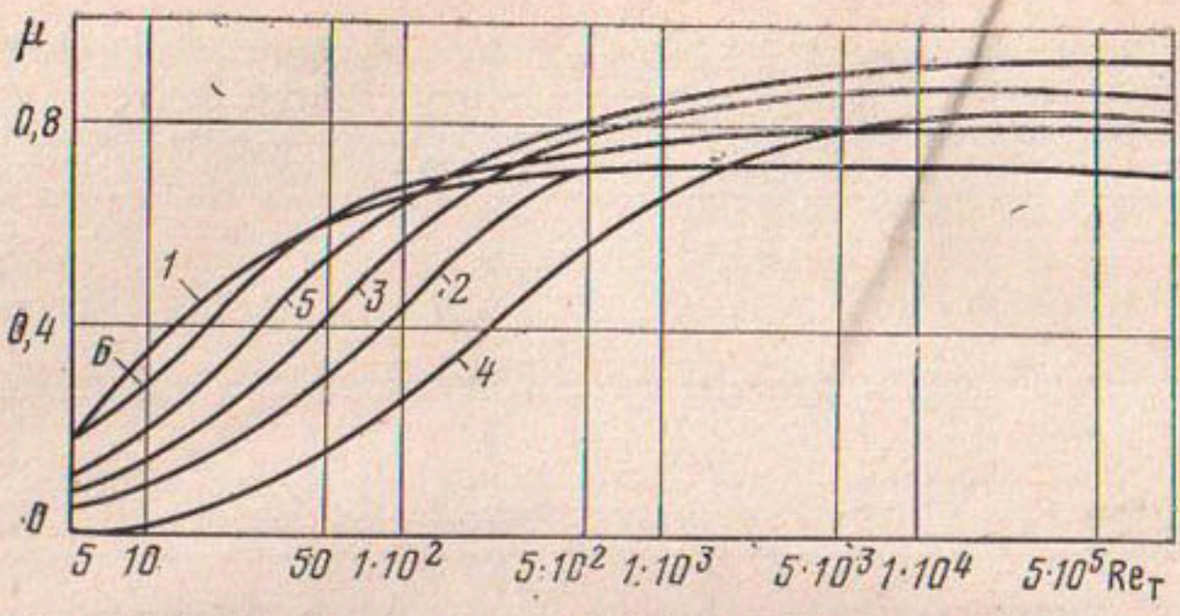


Рис. 5.15. Зависимость μ от $Re_т$, l/d, α: 1...6 — $l/d=1$; 2; 2; 5; 5; 5; соответственно $\alpha=90°$; 3°; 13°45′; 1°12′; 30°50′; 70°30′.

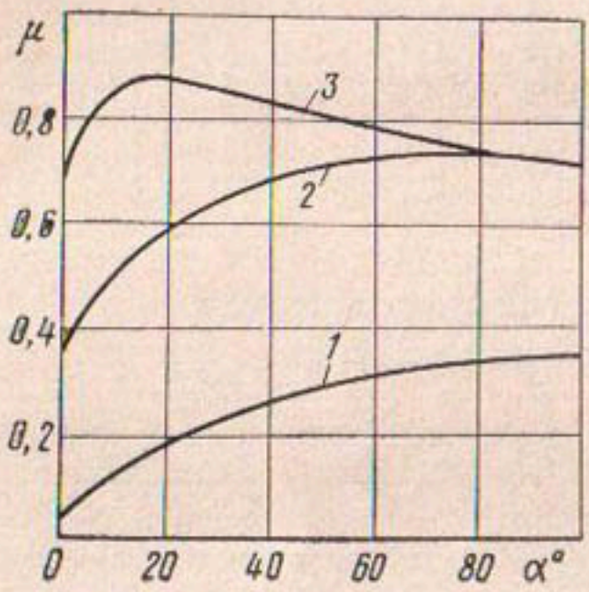


Рис. 5.16. Зависимость μ от α при $l/d=3$: 1...3 — $Re_т=10$; 10^2; 10^3.

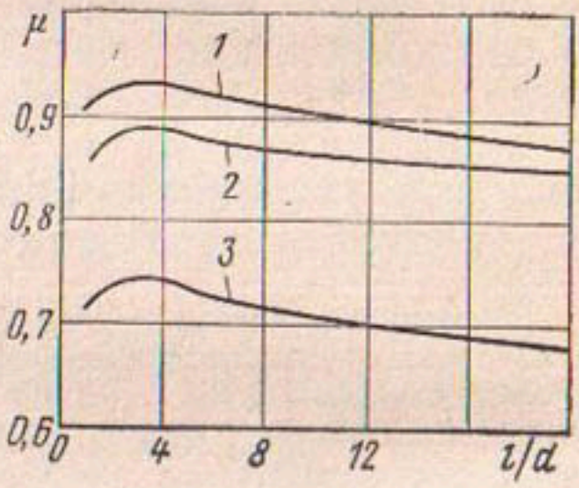


Рис. 5.17. Зависимость μ от l/d при $Re_т=10^4$: 1...3 — $\alpha=10°$; 30°; 90°.

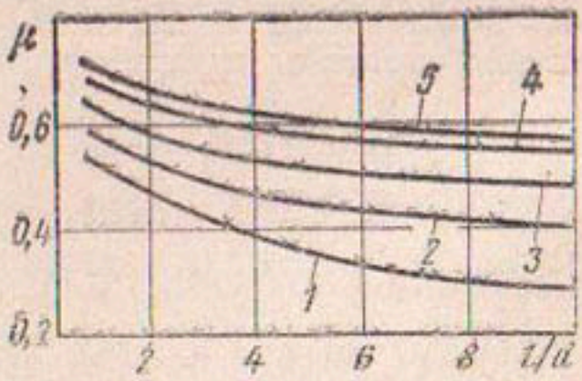


Рис. 5.18. Зависимость μ от l/d при $Re_1=10^2$: 1...5 — 5°; 10°; 15°; 30°; 90°.

полном совершенном сжатии коэффициенты расхода находят по формулам:

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} < 50,\ \alpha \leqslant 40^\circ\ [83]$$

$$\mu = \sqrt{(A/\mathrm{Re}_{\text{т}})^2 + 0{,}5} - A/\mathrm{Re}_{\text{т}}; \tag{5.94}$$

$$A = 20/[n^{0{,}35}(\mathrm{tg}\,\alpha)^{0{,}77}];\ n = \omega_1/\omega_2;$$

ω_1, ω_2 — площадь входного и выходного сечений насадка;

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} = 30 \ldots 2\cdot 10^2,\ \alpha = 1 \ldots 14^\circ$$

$$\mu = \sqrt{(B/\mathrm{Re}_{\text{т}})^2 + 0{,}5} - B/\mathrm{Re}_{\text{т}}; \tag{5.95}$$

$$B = 6{,}3\sqrt[4]{\sin\alpha} + 2{,}67\,[1-(r_1/r_2)^3]/\sin 0{,}5\alpha,$$

где r_1, r_2 — соответственно радиус входного и выходного сечений насадка;

$$\mathrm{Re}_{\text{т}} = 50 \ldots 2\cdot 10^3$$

$$\mu = \sqrt{[c/(2\mathrm{Re}_{\text{т}})]^2 + 0{,}5} - c/(2\,\mathrm{Re}_{\text{т}}); \tag{5.96}$$

$$c = 32\,[1-(r_1/r_2)^3]/(3\sin 0{,}5\alpha) + 25{,}2\sqrt[4]{\sin\alpha} +$$

$$+\sqrt{\sin\alpha}\,(1-50/\mathrm{Re}_{\text{т}})\,[2-2{,}66\,(r_1/r_2)^2 + 0{,}66\,(r_1/r_2)^4].$$

При кавитации значения μ следует уменьшить на 1 ... 3% в зависимости от степени ее развития. Срыв вакуума в конически расходящихся насадках приводит к отрыву жидкости от стенок и резкому уменьшению μ. В этом случае его значение равно значению μ для отверстий в тонкой стенке.

5.6. ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ ВНЕШНИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НАСАДКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ТРАНЗИТНОГО ПОТОКА

Безвихревое истечение жидкости из насадков, установленных под углом α к оси набегающего потока [45]. *Угол* $\alpha = 30^\circ$. Параметры l, h, m (рис. 5.19) безвихревого истечения из насадка можно определить из следующих зависимостей (зависимость для определения h/δ во всех четырех случаях дана в упрощенном виде):

$$l/\delta = \frac{1}{\pi}\left[0{,}5\sqrt{3}\,(A+y)\,\mathrm{arth}\,\frac{d\sqrt{3}}{1+d^2} + (A-y)\,\mathrm{arctg}\,\frac{d}{1-d^2} + \right.$$

$$+0{,}5\,(A-y)\,\mathrm{arctg}\,\frac{d\,(1-d^2)}{1+d^4} - y\pi - \frac{a+c}{2\,(a+1)} - \pi\cos\beta +$$

$$\left. +\sin\beta\,\mathrm{arth}\,\frac{3\sin\beta}{1+2\sin^2\beta} + \sqrt{3}\cos\beta\,\mathrm{arth}\,\frac{\sqrt{3}}{2\cos\beta}\right]$$

(член $y\pi$ входит только при $d > 0{,}5\sqrt{3}$); (5.97)

$$\frac{h}{\delta} = \frac{1}{\pi}\left[1{,}95\,\mathrm{arth}\,\frac{3d-(1+d^2)}{1+4d^2+d^4} - (A-y)\sqrt{3}\,\mathrm{arctg}\,\frac{\sqrt{3}\,d}{1-d^2} + \right.$$

$$+5{,}44 + \frac{c}{d} + \begin{cases} -4c^2+6{,}8c-6] & \text{если } \beta \leqslant \pi/10 \\ 2c+0{,}8] & \text{если } \beta > \pi/10 \end{cases}; \tag{5.98}$$

$$m/\delta = A; \tag{5.99}$$

$$A = (a+c-6\sqrt{a\,(a+1)})/(6d\sqrt{a\,(a+1)},\ y = -0{,}5\,(1+i\sqrt{3})\,G,$$

$$G = -d\,(a+c+6\sqrt{a\,(a+1)}/(6\sqrt{a\,(a+1)},$$

$$a = (1-d^6)^2/(4d^6),\ d = v_{\text{тр}}/v,$$

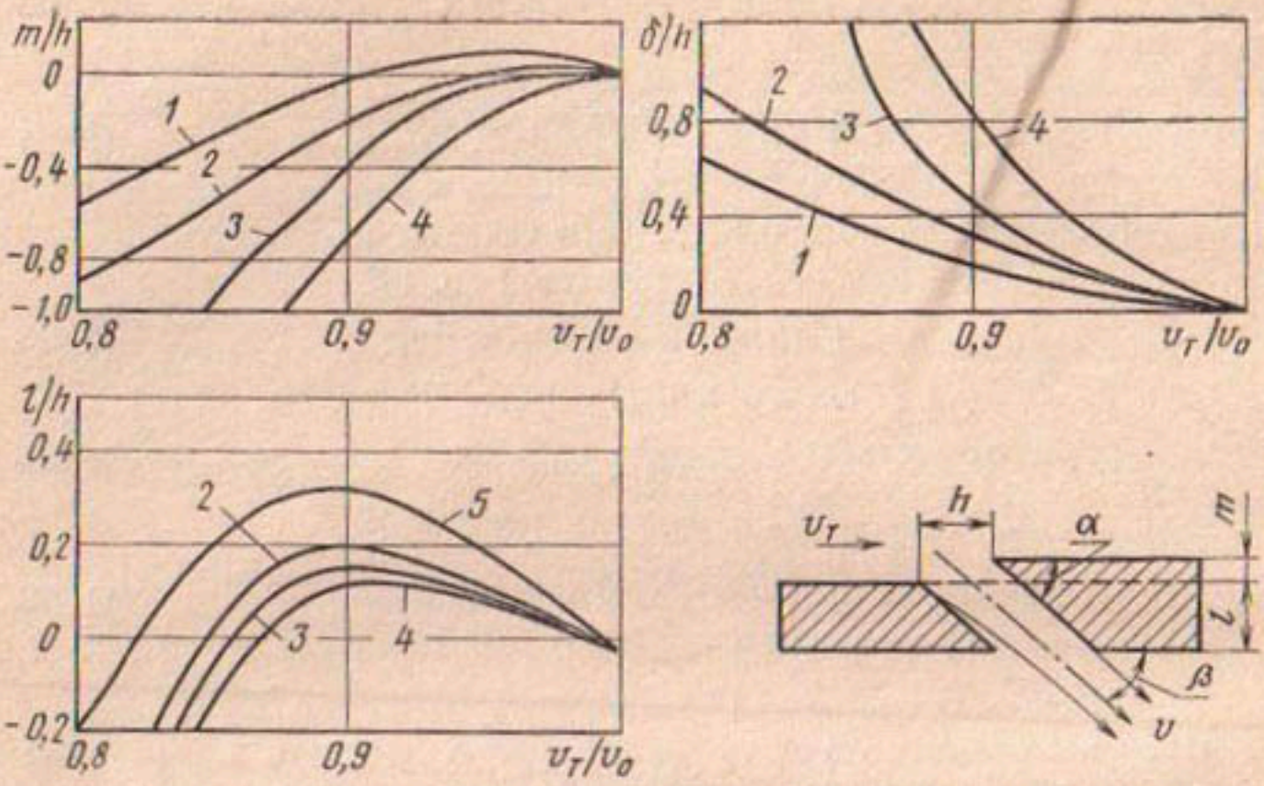


Рис. 5.19. Зависимость l/h, δ/h, m/h от $v_т/v$ для $\alpha=30°$: *1...5* — $\pi/6$; $\pi/10$; $\pi/12$; $\pi/18$; $3\pi/20$.

где δ — ширина струи; $v_{тр}$, v — скорость потока в трубопроводе до насадка и на выходе из него; β — угол между осью потока, вытекающего из насадка, и стенкой трубопровода, в которой он установлен.

При отсутствии уступа перед насадком $m=0$; $A=0$ и $c=-a+4\sqrt{a(a+1)}$.

Результаты вычислений по вышеприведенным зависимостям представлены на графиках, которые могут быть использованы для нахождения l, h, m (рис. 5.19).

Коэффициент расхода можно определить по формуле:

$$\mu=\delta\varphi/h, \tag{5.100}$$

$\varphi=v/v_п$ — коэффициент скорости; $v_п$ — потенциальная скорость, обусловленная перепадом давлений в потоке над стенками трубопровода в бесконечности и в среде за насадком.

Угол $\alpha=45°$. Параметры l, h, m можно определить из следующих зависимостей:

$$\frac{l}{\delta}=-\frac{1}{\pi}\left[\frac{A'+E'}{2}\ln\frac{1-\sqrt{2}\,d+d^2}{1+\sqrt{2}\,d+d^2}+(A'-E')\operatorname{arctg}\frac{d\sqrt{2}}{1-d^2}+A'\pi-\right.$$

$$-E'\pi+\frac{a+c}{\sqrt{2}\,(a+1)}-\sqrt{2}\left(\sqrt{1-\sqrt{1-c}}\operatorname{arcth}\sqrt{1-\sqrt{1-c}}\right)+$$

$$\left.+\sqrt{1+\sqrt{1-c}}\operatorname{arcth}\frac{1}{\sqrt{1+\sqrt{1-c}}}\right)\Bigg]$$ (член $A'\pi$ входит при $d>0{,}707$); (5.101)

$$\frac{h}{\delta}=\begin{cases}\frac{1}{\pi}\left[\frac{2(a-c)}{2a+1}\operatorname{arctg} d-\frac{\pi}{2d}\frac{3a+2-c}{2a+1}+4\operatorname{arth} d+0{,}6+\right.\\ \left.+2{,}4d+\frac{c}{d}\right] \text{ при } \beta\geqslant\frac{\pi}{9};\\ \frac{1}{\pi}\left[\frac{2(a-c)}{2a+1}\operatorname{arctg} d-\frac{\pi}{2d}\frac{3a+2-c}{2a+1}+4\operatorname{arctg} d-2{,}8+\right.\\ \left.+2{,}4c+\frac{\sqrt{c}}{2}+\frac{c}{d}\right] \text{ при } \beta<\frac{\pi}{9};\end{cases} \tag{5.102}$$

$$m/\delta=E'; \tag{5.103}$$

$$A'=-d\left[a+c+4\sqrt{a(a+1)}\right]/\left(4\sqrt{a(a+1)}\right),\quad d=v_{\text{тр}}/v,$$
$$a=(1-d^4)^2/(4d^4),\ c=\sin^2 2\beta,\ E'=a+c-4\sqrt{a(a+1)}/\left[4d\sqrt{a(a+1)}\right].$$

Если в стенке нет уступа перед насадком, $m=0$, $E'=0$, тогда $c=-a+4\sqrt{a(a+1)}$.

Результаты вычислений по зависимостям (5.101)...(5.103) можно использовать для нахождения параметров l, m, h (рис. 5.20).

Угол $\alpha=60°$. Параметры l, h, m можно определить из следующих зависимостей:

$$\frac{l}{\delta}=\frac{1}{\pi}\left[A'\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}d}{2-d}+D'\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}}{2d-1}+\frac{\pi}{6}(A'-D')-D'\pi-\right.$$
$$-\frac{A'-D'}{2}\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}(1-d)}{1+d}-\frac{\sqrt{3}}{2}(A'+D')\ln\frac{\sqrt{1-d+d^2}}{1+d}-$$
$$-\frac{A'\sqrt{3}}{2}\ln d-\pi\cos\beta+\sin\left(\frac{\pi}{3}+\beta\right)\ln\frac{\cos(\pi/3-\beta/2)}{\cos(\pi/3+\beta/2)}+$$
$$\left.+\sin\beta\ln\frac{\cos\beta/2}{\cos(\pi/3+\beta/2)}+\frac{(a+c)\sqrt{3}}{2(a+1)}\right]; \tag{5.104}$$

$$\frac{h}{\delta}=\begin{cases}\frac{1}{\pi}\left[\ln\frac{1-d^3}{(1+d)^3}-38{,}6c^2+22{,}74c-4{,}27+\frac{c}{d}\right]\\ \text{при } \beta\leqslant\frac{\pi}{9};\\ \frac{1}{\pi}\left[(1-0{,}2c)\ln\frac{1-d^3}{(1-d)^3}+3{,}74c-1{,}7+\frac{c}{d}\right]\\ \text{при } \frac{\pi}{9}\leqslant\beta\leqslant\frac{\pi}{3}\ m/\delta=A';\end{cases} \tag{5.105}$$

$$A'=a+c-3\sqrt{a(a+1)}/\left[3d\sqrt{a(a+1)}\right];\quad a=(1-d^3)^2/(4d^3), \tag{5.106}$$
$$d=v_{\text{тр}}/v,\quad c=\sin^2(3\beta/2).$$

При отсутствии уступа в стенке перед насадком $m=0$, тогда $c=-a+3\sqrt{a(a+1)}$.

По результатам вычислений по зависимостям (5.104) ... (5.106) можно найти параметры l, h, m (рис. 5.21).

Угол $\alpha=90°$. Для определения h/δ можно использовать фор-

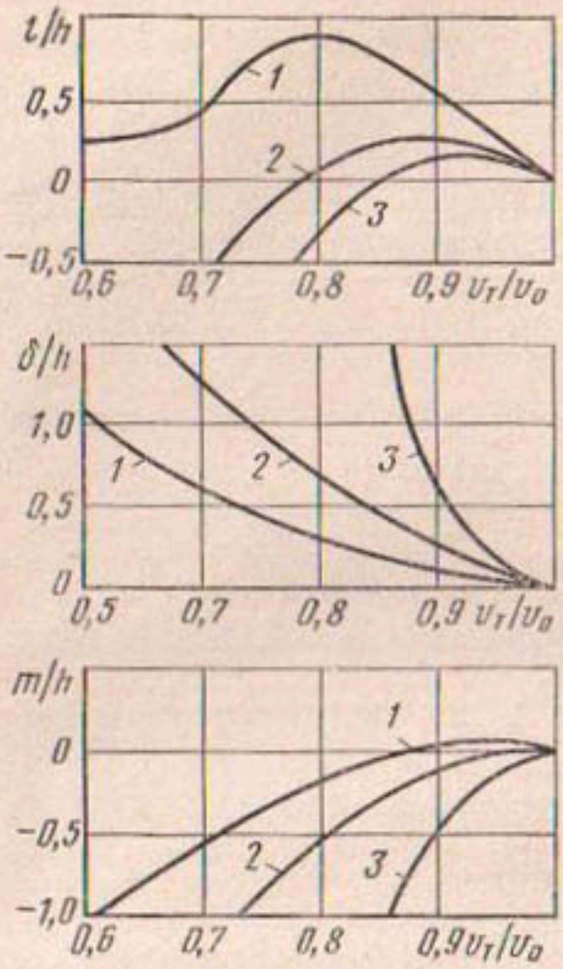


Рис. 5.20. Зависимость l/h, δ/h, m/h от $v_т/v$ для $\alpha=45°$: *1...3* — $\pi/4$; $\pi/9$; $\pi/18$.

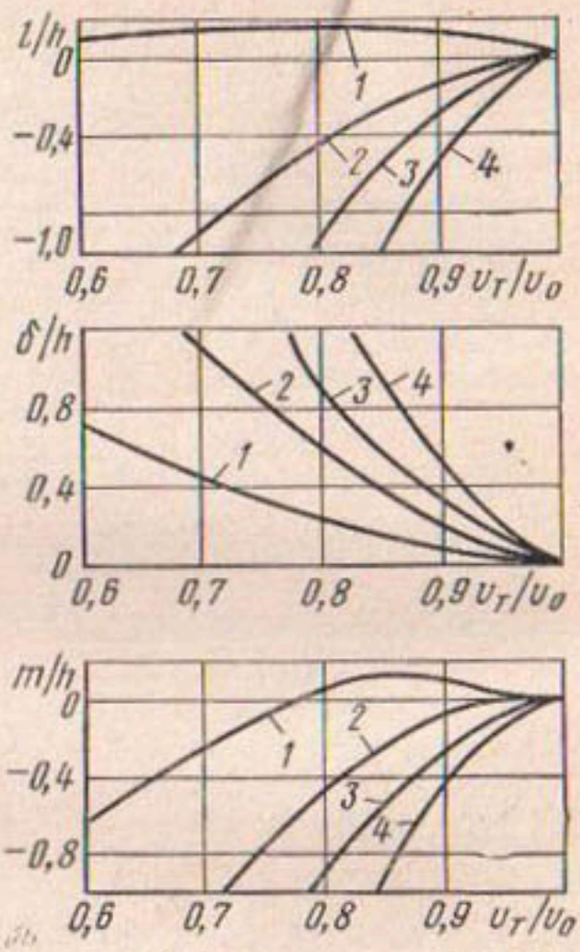


Рис. 5.21. Зависимость l/h, δ/h, m/h от $v_т/v$ при $\alpha=60°$: *1...4* — $\pi/4$; $\pi/9$; $\pi/12$; $\pi/18$.

мулу Е. Н. Богомолова в упрощенном виде:

$$h/\delta \approx \frac{1}{\pi}\left[c/a+(2-c)\,\mathrm{arcth}\sqrt{a+1}/\pi\right.\begin{cases}-66{,}4c^2+34{,}4c-4{,}2] & \text{при } \beta\leqslant\pi/6;\\ -2c^2+7{,}3c-1{,}2] & \text{при } \beta>\pi/6\end{cases} \tag{5.107}$$

$$a=(1-d^2)^2/(4d^2),\quad d=v_{тр}/v,\quad c=\sin^2\beta.$$

Для вычисления $\mathrm{arcth}\sqrt{a+1}$ при отсутствии соответствующих таблиц можно использовать формулы:

$$\mathrm{arcth}\sqrt{a+1}\approx\begin{cases}-12d^2+17{,}3d-4{,}5\ (d\leqslant 0{,}7)\\ 17d^2-21d+8{,}1\ (d>0{,}7).\end{cases} \tag{5.108}$$

При $d=0{,}7$ табличное и приближенное значения $\mathrm{arcth}\sqrt{a+1}=1{,}73$.

Расходные характеристики насадков при $\alpha=90°$. *Входные и выходные кромки острые.* При заполненном истечении коэффициенты расхода при $l/d=3$, $\mathrm{Re}=3\,(10^4\ldots10^5)$, $v_{тр}/v_д=0{,}01\ldots0{,}3$, $v_{тр}/v=0{,}01\ldots0{,}02$ можно определить по формулам [86]:

$$\mu=A_1d/[1+B_1\,(v_{тр}/v_д-C_1)^2], \tag{5.109}$$

$$\mu=A_2d/[1+B_2\,(v_{тр}/v-C_2)^2], \tag{5.110}$$

где $v_д$, $v_{тр}$ — действительные скорости потока соответственно при истечении из насадка и в трубопроводе перед ним; $v=\sqrt{2gH_н}$ — тео-

ретическая скорость потока при истечении из насадка; A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2 — коэффициенты (табл. 5.11).

5.11. Значения коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2

d, м	A_1	A_2	B_1	B_2	C_1	C_2
0,004	212,0	212,0	3,65	5,30	0,01	0,01
0,006	139,0	139,0	3,25	5,25	0,01	0,02
0,008	103,0	103,0	2,95	5,20	0,02	0,02
0,010	81,5	81,5	2,62	4,50	0,02	0,02
0,012	67,0	67.0	2,62	4,50	0,03	0,03

Радиальный и конический входы [86]. Коэффициенты расхода можно определить по формулам при $Re = 2 \cdot 10^4 \ldots 10^5$ для потока в трубопроводе и $Re = 4 \cdot 10^4 \ldots 2 \cdot 10^5$ для потока, вытекающего из насадка:

$$\mu = (r/d)^{\varphi_1} (v_{тр}/v_д)^{\delta_1}, \quad (5.111)$$

$$\mu = (r/d)^{\varphi_2} (v_{тр}/v)^{\delta_2}, \quad (5.112)$$

где r — радиус закругления входных кромок насадка; v — теоретическая скорость истечения потока; φ_1, φ_2, δ_1, δ_2 — постоянные безразмерные коэффициенты (табл. 5.12).

5.12. Значения коэффициентов φ_1, φ_2, δ_1, δ_2

r/d	φ_1	φ_2	δ_1	δ_2
0,10	0,143	0,159	—0,104	0,115
0,15	0,131	0,141	—0,077	—0,083
0,20	0,110	0,116	—0,054	—0,057
0,25	0,091	0,095	—0,041	—0,043
0,50	0,187	0,213	—0,039	—0,045
0,75	0,640	0,607	—0,060	—0,057
1,50	0,412	—0,433	—0,050	—0,053

Для конических насадков (угол конусности $\alpha = 0 \ldots 15°$, $l/d = 5$) при $Re = 2{,}5 \cdot 10^4 \ldots 8{,}5 \cdot 10^4$ для потока в трубопроводе и $Re = 4 \cdot 10^4 \ldots 2 \cdot 10^5$ для потока на выходе из насадка применимы следующие формулы:

$$\mu = \alpha^{\varphi_1} (v_{тр})/v_д)^{\delta_1}; \quad (5.113)$$

$$\mu = \alpha^{\varphi_2} (v_{тр}/v)^{\delta_2}, \quad (5.114)$$

где α — угол конусности, рад; φ_1, φ_2, δ_1, δ_2 — постоянные безразмерные коэффициенты (табл. 5.13).

Давление срыва вакуума в насадках с острыми входными кромками. Давление $p_{ср}$ (Па) при $l/d = 2 \ldots 5$, $v_{тр} = 0{,}5 \ldots 0{,}4$ м/с и $t = 10 \ldots 50$ °С равно [86]:

$$p_{ср} = [a (l/d - 1) (v_{тр} + 0{,}4) + b] \cdot 10^5, \quad (5.115)$$

5.13. Значения φ_1, φ_2, δ_1, δ_2 в зависимости от α

α, рад	φ_1	φ_2	δ_1	δ_2
0,021	0,091	0,094	—0,078	—0,080
0,56	0,071	0,073	—0,037	—0,038
0,103	0,089	0,093	—0,050	—0,052
0,158	0,108	0,113	—0,051	—0,054
0,217	0,180	0,192	0,082	—0,087
0,234	0,113	0,117	—0,037	—0,038

где a, b — коэффициенты, зависящие от упругости паров жидкости, при $p_п = 8257$ Па (температура потока при истечении 42 °С) $a = 0{,}23$; $b = 3{,}5$.

При $p > p_{ср}$ коэффициенты расхода насадков следует определять как для отверстий в тонкой стенке.

Угол отклонения потока при истечении. При $v/v_{гр} = 4 \ldots 36$, $Re = 2 \cdot 10^4 \ldots 10^5$ для потока в трубопроводе и $Re = 4 \cdot 10^4 \ldots 3 \cdot 10^5$ в

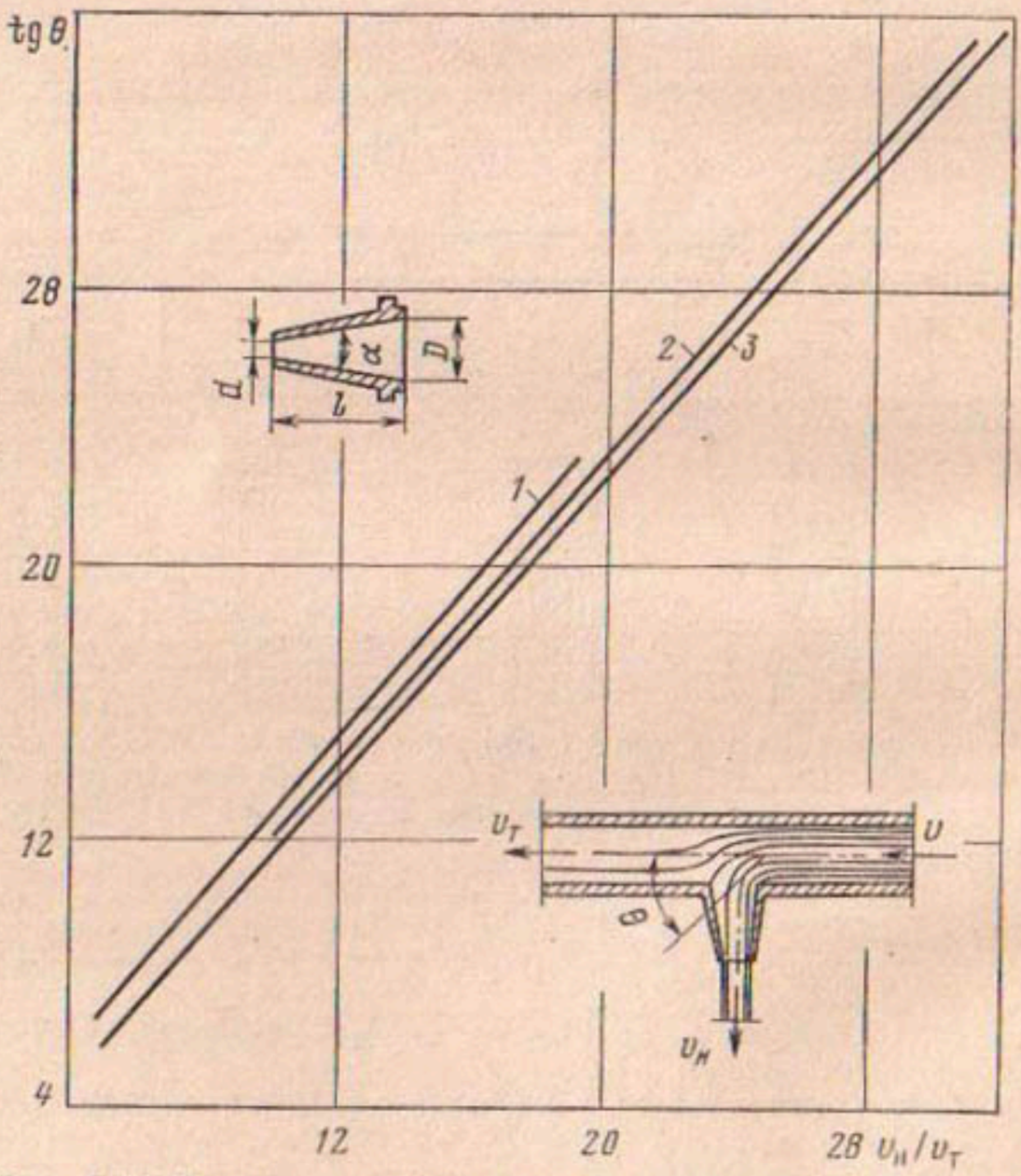


Рис. 5.22. Зависимость θ для конических насадков от $v_н/v_т$ при $l/d = 5$, $d = 0{,}008$ м; 1...3 — $\alpha = 1°12'$; 3°6'; 12°27'.

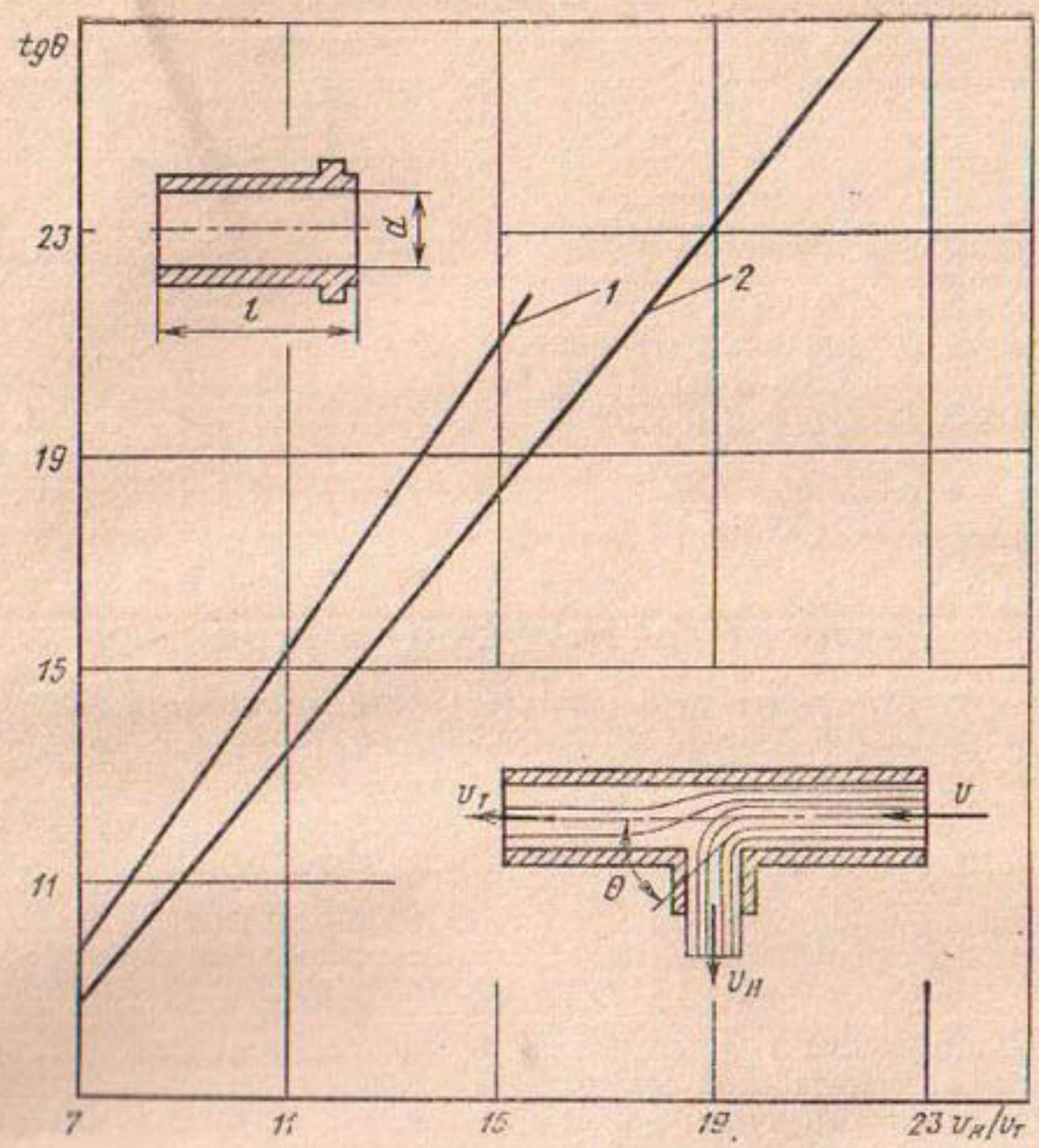


Рис. 5.23. Зависимость θ для внешних цилиндрических насадков от $v_н/v_т$ при $l/d=3$: *1*, *2*=*d*—0,002 м, 0,004...0,016 м.

насадках угол отклонения потока θ зависит от $v/v_{тр}$. Определить θ можно по графикам (рис. 5.22, 5.23) или по формуле Е. В. Кузнецова:

$$\operatorname{tg}\theta = Av/v_{тр} + B, \tag{5.116}$$

где *A*, *B* — постоянные коэффициенты, зависящие от формы и размеров насадков.

Используя формулу (5.116), можно получить выражение для определения μ для цилиндрических и конически сходящихся насадков:

$$\mu = (A + Bv_{тр}/v), \tag{5.117}$$

где *A*, *B* — коэффициенты (табл. 5.14).

5.14. Значения A и B для различных насадков

Насадок	A	B
Цилиндрический насадок, $l/d=3$:		
$d=0{,}002$ м	1,450	−0,750
$d=0{,}004\ldots0{,}016$ м	1,228	−0,101
Конически сходящийся насадок:		
$l/d=3$, $d=0{,}008$ м $\alpha=12°$	1,210	0,320
$l/d=5$, $d=0{,}008$ м $\alpha=5°45'$	1,168	0,456
То же, $\alpha=1°12'$	1,132	1,434
То же, $\alpha=3°6'$	1,111	0,890
То же, $\alpha=12°27'$ и $13°26'$	1,130	−0,040

5.7. ЗАТОПЛЕННОЕ ИСТЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ

При турбулентном движении жидкости в насадке коэффициент расхода равен (по данным Ш. А. Шабазова, В. И. Ашихмина):

$$\mu_з=\mu/\sqrt{1+0{,}03\mu^2}, \tag{5.118}$$

где μ — коэффициент расхода при незатопленном истечении в атмосферу.

При $3\cdot10^2\,\mathrm{Re}_т<35\cdot10^3$

$$\mu_з=1/[1{,}25k+60l/(C\,\mathrm{Re}_т\,d)], \tag{5.119}$$

где k — коэффициент уменьшения μ при затопленном истечении вследствие турбулентной вязкости, $k=1{,}008$.

Для внешнего цилиндрического насадка $\mu_з$ можно находить и по формулам А. Н. Гнедковского [19].

5.8. ИСТЕЧЕНИЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПОРЕ

Период, в течение которого уровень жидкости в призматической емкости (приток в емкость $Q_{пр}$ и $\omega_е$ — const) опустится с H_1 до H_2, равен:

$$t=\frac{2\omega_е}{\mu\omega\sqrt{2g}}\left(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2}+\sqrt{H_{пр}}\ln\frac{\sqrt{H_{пр}}-\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_{пр}}-\sqrt{H_2}}\right); \tag{5.120}$$

$$H_{пр}=Q_{пр}^2/(2g\mu^2\omega^2);$$

при $Q_{пр}=0$

$$t=2\omega_е(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2})/(\mu\omega\sqrt{2g}); \tag{5.121}$$

при $H_2=0$

$$t=2\omega_е\sqrt{H_1}/(\mu\omega\sqrt{2g}). \tag{5.122}$$

Для сосуда цилиндрической формы (длина L, диаметр D) с горизонтальной осью время полного опорожнения равно:

$$t=4LD\sqrt{D}/(3\mu\omega\sqrt{2g}). \tag{5.123}$$

5.9. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДКОВ И ОТВЕРСТИЙ

Независимо от формы отверстия и насадка коэффициенты расхода для них практически равны (табл. 5.15).

5.15. Значения μ, φ для различных отверстий, насадков при $Re_т = 10^5$

Отверстие, насадок	Коэффициент скорости, φ	Коэффициент расхода, μ	Удельная энергия потока
Отверстие:			
круглое	0,97	0,605	$0,941H$
квадратное	—	0,6	—
прямоугольное	—	0,605	—
круглое	—	0,87	—
Внешний цилиндрический насадок:			
с острыми входными кромками, $l/d=3$	0,805	0,805	$0,672H$
с коническим входом, $l_к/d=0,5$; $\alpha=60°$	0,946	0,946	$0,925H$
с радиальным входом, $l/d=3$; $r/d=0,2$	0,961	0,961	$0,945H$
Внутренний цилиндрический, $l/d=3$; $\delta/d=0,02$	0,740	0,740	$0,504H$
Конический сходящийся, $l/d=3$; $\alpha=13°45'$	0,947	0,947	$0,927H$
Конический расходящийся, $l/d=3$; $\alpha=4°$	0,864	0,864	$0,226H$

Применение внешних цилиндрических насадков целесообразно, если $l/d=2...3$. Для увеличения их расходов вход необходимо выполнять конусным или радиальным ($r/d \geq 0,2$; $l_к/d \geq 0,15$; $\alpha=40...60°$). Внутренние цилиндрические насадки следует применять при $\delta/d > 0,04$.

При использовании конически сходящихся насадков должны соблюдаться следующие условия: $l/d=2...3$, $\alpha=12...13°$ ($Re_т > 2\cdot10^2$) или $\alpha=60...80°$ ($Re_т < 2\cdot10^2$); конически расходящихся насадков — $l/d=3...4$, $\alpha \approx 4°$. Вертикальное их расположение при $Re > 10^4$ недопустимо, ибо во всех случаях будет происходить отрыв жидкости от стенок и $\mu_н = \mu_0$. При $Re > 10^4$ для увеличения расхода через отверстия или насадки следует применять кольцо размерами $l_{кол}/d=1...1,5$, $d_{кол}/d=1,3...1,4$.

5.10. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ НА ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Примем, что жидкость в баке однородна и частоты колебаний ее частиц и бака совпадают. Тогда закономерность изменения амплитуды колебаний жидкости в сечении заборного отверстия можно записать в виде [64]:

$$y = 250a_в \cos 2\pi f_в t/[f^2 \cos 0,5\pi (H_ж/H_р)], \qquad (5.124)$$

где $a_в$ — вибрационная перегрузка; м/с²; f — частота вибрации, Гц; $H_ж$ — уровень жидкости в баке, м; $H_р = c/(4f)$ — высота резонансного

столба жидкости, соответствующая частоте вибрации f, м; $c=\sqrt{gE_ж/[\gamma(1+d_б)E_ж/(\delta E_б)]}$ — скорость распространения колебаний в жидкости; $d_б$, δ — диаметр и толщина стенки бака; $E_ж$, $E_б$ — модули объемной упругости и материала стенок бака; t — время, с.

В уравнении (5.124) величина $\cos 2\pi f_в t$ свидетельствует о периодическом законе изменения y в зависимости от времени t, поэтому можно записать:

$$y_{пик}=250a_в/(f^2\cos 0{,}5\pi H_ж/H_р). \qquad (5.125)$$

Амплитуда $y_{пик}$ неограниченно возрастает с приближением выражения в знаменателе к нулю, то есть при $H_ж/H_р=(2i-1)$ наступает явление резонанса ($i=1$, 2, 3 — обертоны столба жидкости). Значения высот резонансного столба жидкости приведены в таблице 5.16.

5.16. Значения $H_р$

f, Гц	i	$H_р$, мм	f, Гц	i	$H_р$, мм
40	1	2 290		1	114
	1	229	800	2	342
400	2	687		3	570
	3	1 145			

Истечение без явления резонанса будет обеспечено при соблюдении следующего условия:

$$H_ж \neq (2i-1)\,c/(4f). \qquad (5.126)$$

Амплитуду колебаний, соответствующую срыву вибрации, можно вычислить при $0{,}5 \leqslant l/d \leqslant 10$ и $0{,}3 \leqslant d/d_0 \leqslant 10$ по формуле:

$$y_{ср}=[0{,}0295l/d+0{,}024\,(d/d_0)^{1{,}7}-0{,}0225]\,d_0, \qquad (5.127)$$

где d_0 — условный диаметр, $d_0=1$ мм.

Для того чтобы предотвратить возникновение двухфазных потоков, значительных амплитуд колебаний жидкости и, как следствие, увеличение потерь напора при истечении, параметры вибрации бака $a_в$, f и $H_ж$ следует определять из условия $y_{пик}<y_{ср}$.

Критические значения $a_{вкр}$, $f_{кр}$, $H_{жкр}$, соответствующие $y_{ср}$, находят из уравнения:

$$\frac{250a_{вк}}{f_к^2\cos 0{,}5\pi H_{жк}/H_{рк}}=[0{,}0295l/d+0{,}024\,(d/d_0)^{1{,}7}-0{,}0225]\,d_0. \qquad (5.128)$$

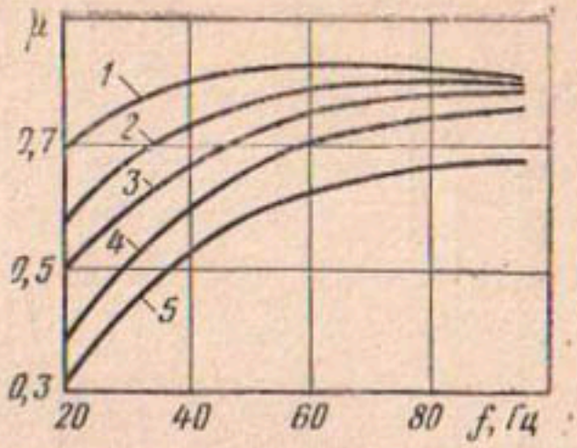
Коэффициенты расхода внешних цилиндрических насадков при полном совершенном сжатии, острых входных кромках можно определять по графикам (рис. 5.24 ... 5.27) в широком диапазоне f, $Re_т$, $n_в$ ($n_в=A\,(2\pi f)^2/g$, A — амплитуда колебаний).

Коэффициенты расхода при различных f и $H_ж$ можно определять по графикам на рисунке 5.28, а также по формуле для круглых отверстий с острыми входными кромками при полном совершенном сжатии и истечении в атмосферу при $Re_т=2\cdot10^4$ ... $5\cdot10^4$, $f=20$ ... 80 Гц и $h_в=1$ ... 4:

$$\mu_в=\mu g/(8{,}7Af^2+0{,}68g), \qquad (5.129)$$

где μ — коэффициент расхода отверстия при отсутствии вибрации.

Рис. 5.24. Зависимость μ от f для внешнего цилиндрического насадка при $l/d=3$, $d=10$ мм, $Re_т=28\,600$: 1...5 — $n_в=1$; 2; 3; 4; 5.



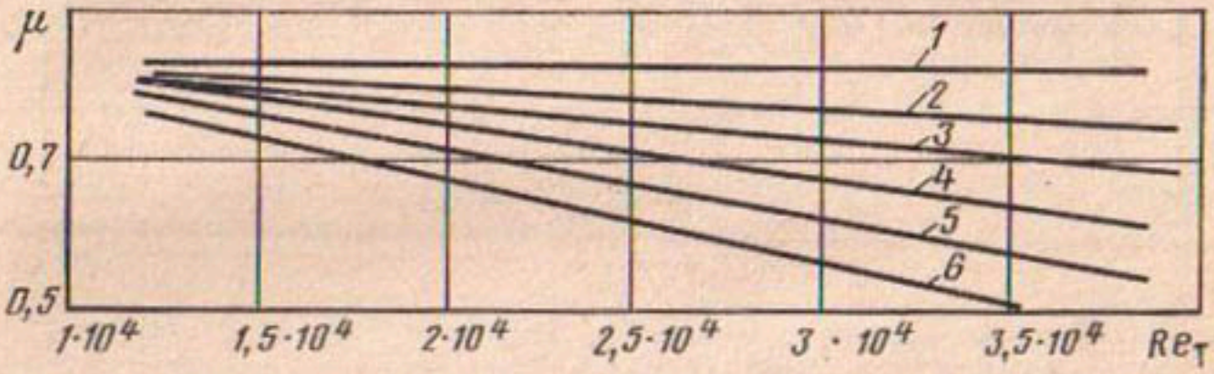


Рис. 5.25. Зависимость μ от $Re_т$ для внешнего цилиндрического насадка при $l/d=3$, $d=10$ мм, $f=60$ Гц: 1 — без вибрации; 2...6 — $n_в=2$; 3; 4; 5; 6.

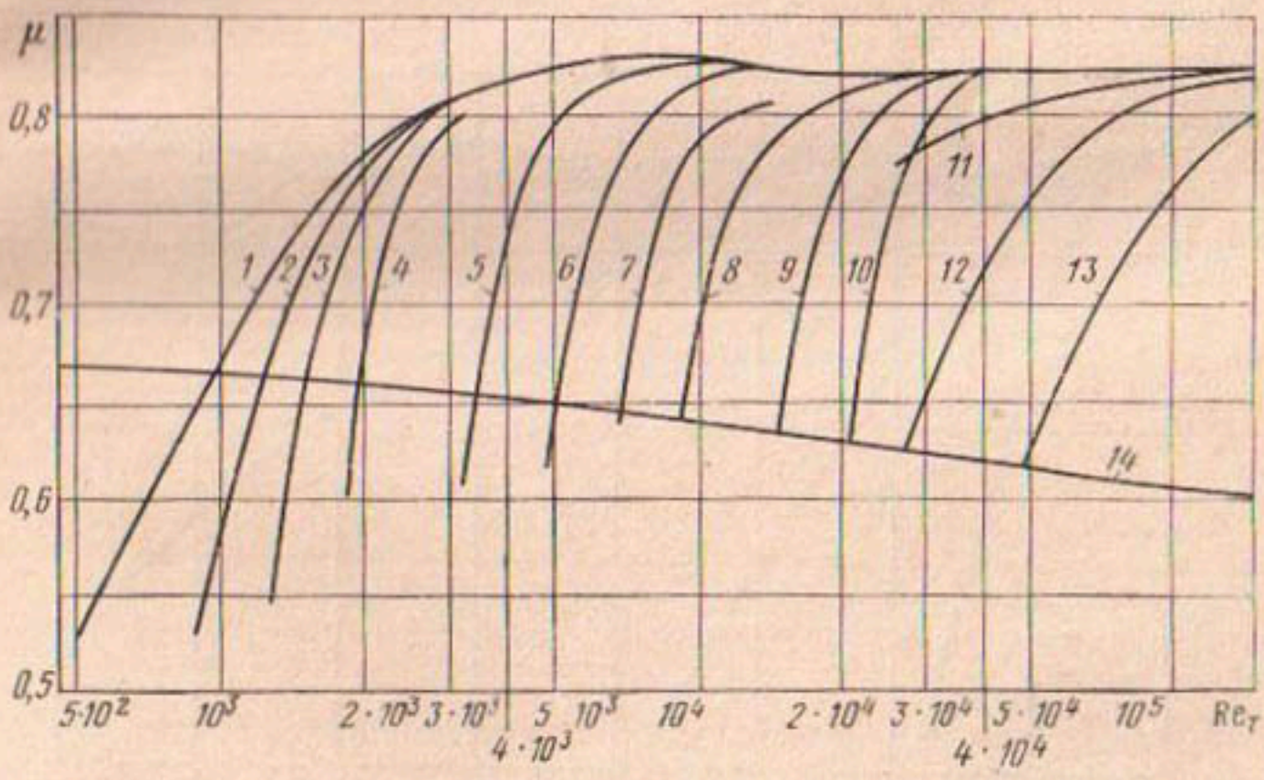


Рис. 5.26. Зависимость μ от d, $n_в$, $Re_т$ при $H_ж=200$ м, $f=40$ Гц; d — 1 — 0,3...10 мм; 2...4 — 0,3; 5...7 — 1,0; 8...10 — 4; 11...13 — 10; $n_в$ — 1 — 0; 2, 5, 8, 11 — 2; 3, 6, 9, 12 — 4; 4, 7, 10, 13 — 8; 14 — μ для отверстий в тонкой стенке при $n_в=0$; 1 — μ при отсутствии вибрации.

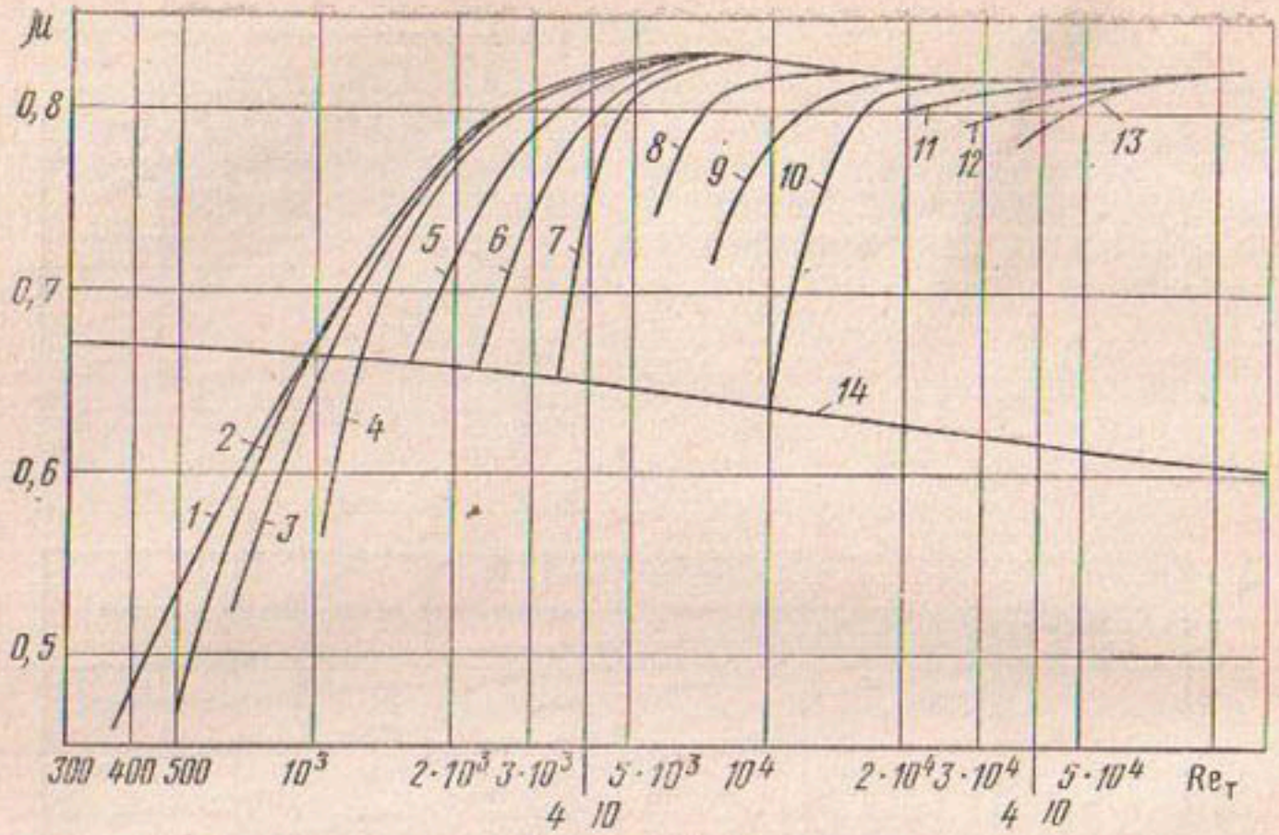


Рис. 5.27. Зависимость μ от d, $H_ж$, $Re_т$ при $n_в = 1$; $f = 40$ Гц: d — 1...4 — 0,3 мм; 5...7 — 1; 8...10 — 4; 11...13 — 10; $H_ж$ — 2, 5, 8, 11 — 100 мм; 3, 6, 9, 12 — 200; 4, 7, 10, 13 — 400; 1 — $n_в = 0$.

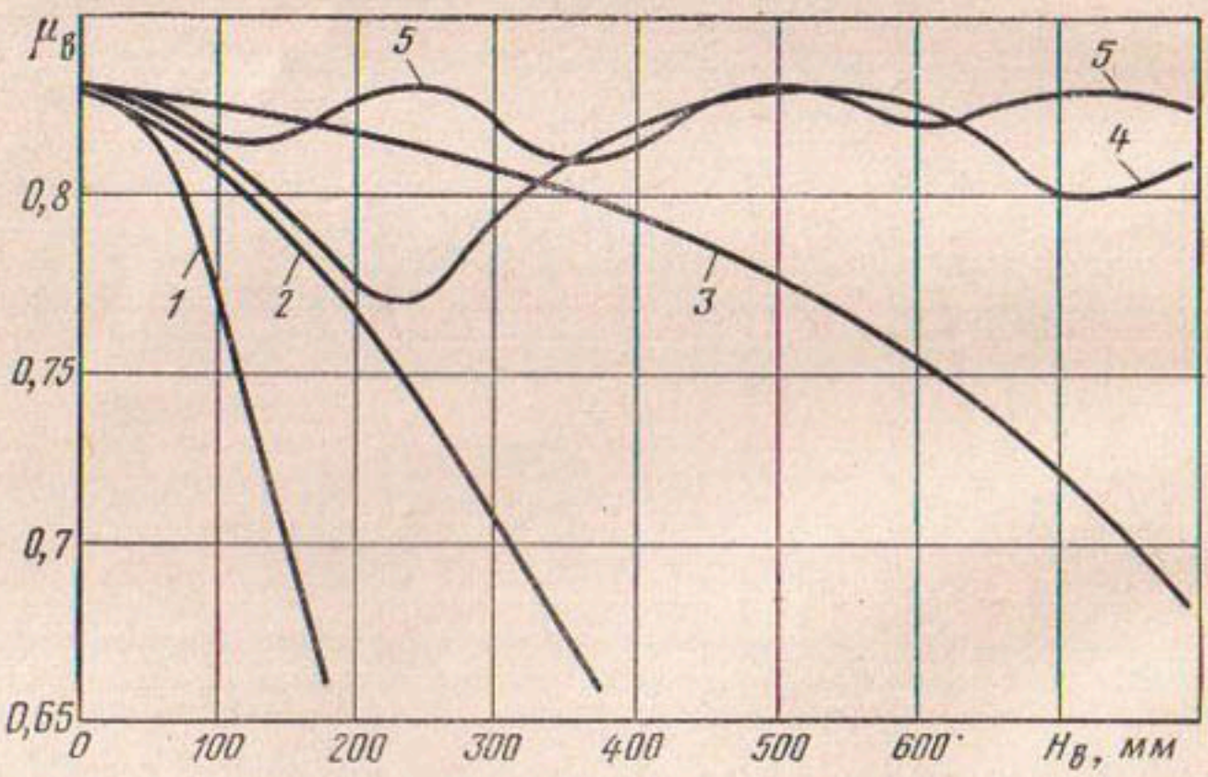


Рис. 5.28. Влияние f и вибрируемого уровня жидкости $H_ж$ на μ при $d = 1$ мм, $l/d = 3$, $p_2 = 7{,}85$ кПа, $Re_т = 4\,300...6\,000$: 1...5 — $f = 800$ Гц; 400; 40; 40; n соответственно 2; 2; 1; 2; 4.

5.11. ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУЙ, ВЫТЕКАЮЩИХ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

Средняя скорость струи в сечении, отстоящем на расстоянии l от выходного сечения насадка, при истечении в воду в состоянии покоя равна (по М. В. Коновалову):

$$v_l = mvd/[(1+md/l)\,l], \tag{5.130}$$

где m — постоянная, $m=2{,}9$; v — скорость на выходе из насадка; d — диаметр насадка на выходе.

Для водяных незатопленных струй осевая скорость равна:

$$u_l = 145ud/l, \tag{5.131}$$

где u — осевая скорость на выходе из насадка.

Дальность полета струи, при которой она не распадается, равна (по А. М. Царевскому):

$$l_п = 0{,}415\sqrt[3]{\alpha d H_и^2}, \tag{5.132}$$

где α — угол наклона струи к линии горизонта при вылете, град.

Скорость в неограниченном слое изменяется согласно зависимости [48]:

$$u/u_{max} = [1-(y/b)^{1,5}]^2, \tag{5.133}$$

где u_{max} — максимальная скорость в сечении вязкого подслоя (на основном участке это скорость на оси струи, а на начальном — в ядре постоянных скоростей); y — ордината точки со скоростью u; $b=0{,}22x$ — ширина вязкого подслоя; x — расстояние от выходного сечения до сечения, где определяют скорости.

Параметры вертикальной водяной струи можно определить по формулам:

$$H_{в.п} = H_и/(1+k_{в.п}H_и); \tag{5.134}$$

$$H_к = H_{в.п}\,(0{,}98-0{,}0083H_{в.п}); \tag{5.135}$$

$$R = \varphi_R H_{в.п}, \tag{5.136}$$

где $H_{в.п}$, $H_к$ — высота подъема струи и компактной части; $k_{в.п}$ — коэффициент (табл. 5.17); R — радиус действия раздробленной и распыленной части при наклоне струи; φ_R — коэффициент, зависящий от угла наклона струи α (табл. 5.18).

5.17. Значения коэффициента $k_{в.п}$

d, мм	10	15	20	25	30	40
$k_{в.п}$	0,023	0,014	0,009	0,006	0,0044	0,0024

5.18. Значения φ_R

$\alpha°$,	15	30	45	60	75
φ_R	1,30	1,20	1,12	1,07	1,03

Параметры свободной круглой струи определяют по формулам [48]:

$$l_{пол} = 0{,}145 d/a, \quad (5.137)$$

$$l_{нач} = 0{,}335 d/a, \quad (5.138)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = 3{,}4a, \quad (5.139)$$

$$u_{max} = 0{,}96 v/(a l_i/d + 0{,}29), \quad (5.140)$$

$$R = \rho Q v (1 - \cos \varphi), \quad (5.141)$$

$$R = \rho Q (u_1 - u) \text{ при } \varphi = 90°, \quad (5.142)$$

$$R = 2\rho Q (u_1 - u) \text{ при } \varphi = 180°, \quad (5.143)$$

$$N = \rho Q (u_1 - u) u \text{ при } \varphi = 90°, \quad (5.144)$$

где $l_{нач}$ — длина начального участка; α — угол, равный половине угла расширения струи; u_{max} — скорость на оси основного участка струи; a — коэффициент структуры потока в выходном сечении, $a \approx 0{,}08$; R — давление струи на преграду; Q — расход жидкости в струе; v — скорость потока относительно преграды; φ — угол отклонения струи от первоначального направления; u_1, u — абсолютные скорости жидкости и преграды (при ее перемещении); N — мощность струи.

Глава 6
ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

Повышение давления при гидравлическом ударе определяют по формулам:

Н. Е. Жуковского

$$\Delta p = \rho c v, \tag{6.1}$$

где c — скорость распространения ударной волны; v — скорость движения жидкости в трубе до остановки потока;

Л. С. Лейбензона

$$\Delta p = \rho c v \sqrt{1 + k_v}, \tag{6.2}$$

где k_v — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение скоростей по сечениям, при ламинарном режиме $k_v = 0{,}333$, турбулентном в гладких трубах — 0,015, шероховатых — 0,035.

Повышение давления при непрямом ударе можно определить из выражения $\Delta p_н = \Delta p t / t_з$ или по формуле Мишо:

$$\Delta p_н = 2\rho v l / t_з, \tag{6.3}$$

где $t_з$ — время закрытия запорного устройства; l — длина трубопровода.

В соответствии с известной методикой, Л. С. Геращенко получил формулу для определения приращения давления при гидравлическом ударе, вызванном мгновенным неполным закрытием запорного устройства или открытием предохранительного клапана:

$$\Delta p = k_г \rho c \left[v - \sqrt{c^2 + 2(cv + gH)(\zeta_с + \zeta_к)} - c \right] / (\zeta_с + \zeta_к), \tag{6.4}$$

где $k_г$ — коэффициент, учитывающий влияние на Δp противодействие пружины, для запорного устройства $k_г = 1$, предохранительного клапана $k_г = 1{,}1$; $\zeta_с = 2gH/v^2$, $\zeta_к$ — коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно системы и запорного устройства (клапана); H — напор в системе до закрытия запорного устройства или открытия предохранительного клапана.

Повышение напора при закрытии концевых задвижек равно [12]:

$$\Delta H = cv \left[1{,}24 - 0{,}16 c t_з / (2l) \right] / g. \tag{6.5}$$

При гидравлическом ударе, возникающем в трубопроводе вследствие плохого выпуска воздуха и образования воздушных подушек, ΔH ориентировочно можно определить по формуле:

$$\Delta H = 100 (v_1 - v_2), \tag{6.6}$$

где v_1, v_2 — скорость воды соответственно перед закупориванием трубопровода воздушной подушкой и после него.

Повышение давления при отключении ДМ «Фрегат» при одиночной и групповой работе Δp (кПа) равно (по А. М. Рудь):

$$\Delta p = mvcg^{-1} \left(0{,}87 e^{-0{,}038 t_з c/l} + 0{,}16 \right), \tag{6.7}$$

где c — скорость распространения ударной волны, для стальных и чугунных трубопроводов $c \approx 1020 \ldots 1170$ м/с; m — коэффициент

условий работы, при групповой работе ДМ, расположенных вблизи источника возмущения (отключаемой машины), $m=0{,}64$; при работе ДМ от отдельных гидрантов и на значительном удалении от источника возмущения $m=0{,}92$; при одиночной работе и наличии рядом с ДМ тупиковых отводов $m=1{,}24$, без них $m=1$ (все значения m справедливы при отключении ДМ за время более 27 с).

Ударное давление в тупиковом трубопроводе равно [16]:

$$p_у = p_д + 10^{-5}\rho\,\Delta v\,cg, \qquad (6.8)$$

где $p_д$ — давление в месте установки дождевальной техники, МПа; Δv — изменение скорости воды в трубопроводе при прекращении водозабора.

Скорость распространения ударной волны равна:

$$c = c_{зв}\sqrt{1/[1+E_ж d/(E_т\delta)]}, \qquad (6.9)$$

где $c_{зв}=\sqrt{E_ж/\rho}$ — скорость распространения звуковой волны в среде, имеющей модуль упругости $E_ж$ и плотность ρ, для воды при $t=10$ °С и давлении 1 ... 2,5 МПа $c_{зв}=1435$ м/с; $E_ж$, $E_т$ — модули объемной упругости жидкости и материала стенки трубы (табл. 6.1, 6.2); d, δ — диаметр трубы и толщина ее стенки.

6.1. Модуль объемной упругости твердых тел

Материал	$E_т\cdot10^{-10}$, Па	Материал	$E_т\cdot10^{-10}$, Па
Алюминий	7,05	Полиэтилен	0,14 ... 0,20
Бетон	2,12	Сталь	21,20
Винипласт	0,28 ... 0,30	Стекло	6,00
Латунь	10,00	Стеклопластик	0,50 ... 1,00

6.2. Значения $E_ж/E_т$

Трубы	$E_ж/E_т$	Трубы	$E_ж/E_т$
Асбестоцементные	0,11	Резиновые	333 ... 1 000
Бетонные	0,10 ... 0,14	Стальные	0,01
Винипластовые	0,68 ... 0,73	Чугунные	0,02
Полиэтиленовые	1,00 ... 1,45		

Примечание. Для железобетонных труб $E_ж/E_т=(0{,}1-0{,}14)/(1+9{,}5\omega_a/\delta)$, где ω_a — площадь сечения арматуры на 1 м длины, $\omega_a=0{,}015$ ... $0{,}05$. При укладке трубопровода на грунт, согласно данным В. С. Дикаревского, вместо δ подставляют $\delta_г=\delta+dE_г/(2{,}7E_т)$; $E_г=39$ МПа; 34; 29,4 соответственно для песка, суглинка, глины.

С учетом нерастворенного в воде воздуха c можно вычислять приближенно по формуле (6.9), подставляя в нее значение $E_ж$ с учетом воздушных включений $E'_ж$, которое находят из соотношения [62]

$$E_ж/E'_ж = 1+\varphi_W p_{am}E_ж/p, \qquad (6.10)$$

где φ_W — объемное содержание не растворенного газа в воде; p — давление в жидкости.

Если конец трубы не закреплен, то c равно:

$$c = c_{зв}\sqrt{1/[1+(1-\mu_п^2)E_ж d/(E_т \delta)]}, \qquad (6.11)$$

где $\mu_п$ — коэффициент Пуассона, для стальных труб $\mu_п = 0{,}25 \ldots 0{,}33$, полиэтиленовых — $0{,}32 \ldots 0{,}5$.

Скорость распространения ударных волн в различных трубах можно определять по данным таблиц 6.3, 6.4 [12, 53].

6.3. Скорость распространения ударных волн в железобетонных трубах

d, мм	c, м/с
< 100	600 ... 1 200
100 ... 600	550 ... 1 100
> 600	500 ... 1 000

6.4. Скорость распространения ударной волны в различных трубах

d, мм	Стальные		Чугунные		Асбестоцементные	
	δ, мм	c, м/с	δ, мм	c, м/с	δ, мм	c, м/с
50	4	135,5	7,5	1 340	9	1 130
75	4	1 315	8,0	1 300	9	1 040
100	5	1 310	8,5	1 280	11	1 025
125	5	1 280	9,0	1 250	12	990
150	6	1 280	9,5	1 235	14	980
200	6	1 240	10,5	1 200	16	940
250	6	1 205	11,5	1 175	19	930
300	7	1 200	12,5	1 160	23	925
350	7	1 170	13,0	1 140	27	925
400	8	1 170	14	1 120	30	920
450	8	1 148	15	1 110	34	920
500	8	1 125	16	1 100	38	925
600	9	1 110	18	1 085	45	920

Во время отключения ДМ «Фрегат» при равномерном закрытии задвижки скорость потока в трубопроводе изменяется согласно зависимости [13]:

$$v_0 = v\,(1 - t_т/t_з)^{\alpha}, \qquad (6.12)$$

$$\alpha = \left[0{,}5\left(\lg\frac{1+\Sigma\zeta_м+\lambda l/d}{1+\Sigma\zeta_м+\lambda l/d+\zeta_з}+\lg\frac{H+\Delta H}{H}\right)\right]\Big/\lg(1-t/T),$$

где $t_т$ — текущая ордината времени: α — коэффициент, учитывающий закономерность изменения скорости; $\zeta_з$ — коэффициент сопротивления задвижки; H — гидродинамический напор на гидранте; ΔH — повышение напора при закрытии задвижки.

При отражении ударной волны, например от напорного резервуара, гидравлический удар может быть прямым — $t_ф > t_з$ и непрямым — $t_ф < t_з$, где $t_ф = 2l/[c\,(1-v^2/c^2)] \approx 2l/c$ — время, за которое

ударная волна пройдет расстояние от источника возмущения до напорного резервуара и вернется обратно.

Расчетное время закрытия задвижки равно [73]:

$$T_р = (1 - h/d_з)\, T, \tag{6.13}$$

где h — прикрытие задвижки, при котором начинается активное изменение скорости и давления потока; $d_з$ — диаметр задвижки (для задвижек типа «Лудло» $h/d_з = 0{,}63$); T — полное время закрытия задвижки.

Время закрытия задвижек, обеспечивающее допустимые пределы давления, можно определить по зависимости [73]:

$$T_д = \frac{l}{0{,}017c} \lg \frac{0{,}87cv_0}{\Delta Hg - 0{,}16cv_0}. \tag{6.14}$$

Объем воды, который необходимо сбросить из трубопровода для гашения гидравлического удара, равен [16]:

$$W_г = \pi\rho d^4\, \Delta v\, [1/E_в - d/(10^2 \delta E_т)]/(4 \cdot 10^3 k_0 g), \tag{6.15}$$

где k_0 — коэффициент ослабления ударной волны, $k_0 = 1{,}5 \ldots 1{,}8$.

Методы расчета явлений гидравлического удара для различных случаев приведены в [12].

В настоящее время имеется программа расчета гидравлического удара на ЭВМ (К. П. Вишневский, Б. М. Лемаев, Н. У. Койда и др.)

Глава 7
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ОТКРЫТЫХ РУСЛ

7.1. РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ

Основные расчетные уравнения:

$$Q=\omega C\sqrt{Ri} \tag{7.1}$$

или

$$Q=K\sqrt{i};$$

$$v=C\sqrt{Ri}, \tag{7.2}$$

где $K=\omega C\sqrt{R}$ — расходная характеристика русла; ω, v — площадь поперечного сечения потока и его средняя скорость; C — коэффициент Шези; R — гидравлический радиус; i — уклон дна русла.

Коэффициент Шези можно определять по формулам:

Н. Н. Павловского

$$C=R^y/n; \tag{7.3}$$

$$y=2{,}5\sqrt{n}-0{,}13-0{,}75\sqrt{R}\,(\sqrt{n}-0{,}1)$$

или приближенно при $R<1$ м и >1 м соответственно: $y\approx 1{,}5\sqrt{n}$; $y\approx 1{,}3\sqrt{n}$, где n — коэффициент шероховатости стенок русла (табл. 7.1, 7.2); y — показатель степени;

И. И. Агроскина

$$C=1/n+17{,}72\lg R; \tag{7.4}$$

А. Д. Альтшуля (для гладких стенок)

$$C=20\lg\frac{R}{\varepsilon+0{,}385\nu/\sqrt{gRi}}; \tag{7.5}$$

при температуре воды 15 °С $\nu=1\cdot10^{-6}$ м²/с, тогда

$$C=20\lg\frac{R}{\varepsilon+0{,}04/\sqrt{Ri}}; \tag{7.6}$$

при $\varepsilon\sqrt{Ri}\geqslant 0{,}04$

$$C=20\lg(R/\varepsilon); \tag{7.7}$$

при $\varepsilon\sqrt{Ri}\leqslant 0{,}0005$

$$C=20\lg R\sqrt{Ri}+48, \tag{7.8}$$

где ε — приведенная шероховатость (табл. 7.3);

О. М. Айвазяна (для земляных каналов) [3]

$$C=8{,}86/(a+bi^{1/3}/R)^{1/2}, \tag{7.9}$$

где a, b — коэффициенты.

При расчете русл с неоднородной шероховатостью дна и стенок определяют приведенный коэффициент шероховатости [13]:

при $n_{max}/n_{min}>1{,}5\ldots 2$

$$n_{ср}=(\chi_1 n_1^{3/2}/\chi+\chi_2 n_2^{3/2}/\chi+\ldots+\chi_m n_m^{3/2}/\chi)^{2/3}; \tag{7.10}$$

при $n_{max}/n_{min} < 1{,}5 \ldots 2$

$$n_{ср} = (\chi_1 n_1 + \chi_2 n_2 + \ldots + \chi_m n_m)/\chi, \qquad (7.11)$$

где χ — смоченный периметр; $\chi_1, \chi_2, \ldots \chi_m$ — части смоченного периметра с коэффициентами шероховатости $n_1, n_2, \ldots, n_m$.

7.1. Значения n для каналов в скальных грунтах [74]

Поверхность ложа канала	n
Хорошо обработанная	0,02...0,025
Посредственно обработанная, без выступов	0,03...0,035
То же, с выступами	0,04...0,045

7.2. Значения n для облицованных каналов [74]

Облицовка	n
Бетонная, хорошо отделанная	0,012...0,014
Бетонная, грубая	0,015...0,017
Сборные железобетонные лотки	0,012...0,015
Облицовка тесаным камнем	0,013...0,017
Кладка бутовая на цементном растворе	0,017...0,030
Покрытия из асфальтобитумных материалов	0,013...0,016
Одернованное русло	0,03...0,035

7.3. Значения ε

Поверхность	ε, мм
Исключительно гладкая	0...0,01
Чистая цементная штукатурка	0,02...0,06
Металлические лотки с гладкой внутренней поверхностью	0,02...1,00
Бетонная	0,05...1,50
Земляные стенки	1...50
Бутовая кладка	0,5...20
Стенки каналов в скале	3...80

Гидравлические элементы живого сечения потока. Для русл трапецеидального сечения (рис. 7.1): $\omega = (b + mh)\,h$; $\chi = b + m'h$; $R = (b + mh)h/(b + m'h)$, где h — глубина наполнения; $m = 0{,}5\,(m_1 + m_2)$ — средний коэффициент заложения откоса; $m' = \sqrt{1 + m_1^2} + \sqrt{1 + m_2^2}$ или при $m_1 = m_2$ $m' = 2\sqrt{1 + m^2}$ (рис. 7.1, *а*).

Гидравлические элементы для русл прямоугольного и треугольного поперечного сечений можно рассчитывать по тем же формулам, принимая $m_1 = m_2 = 0$ для прямоугольного сечения, $b = 0$ — для треугольного.

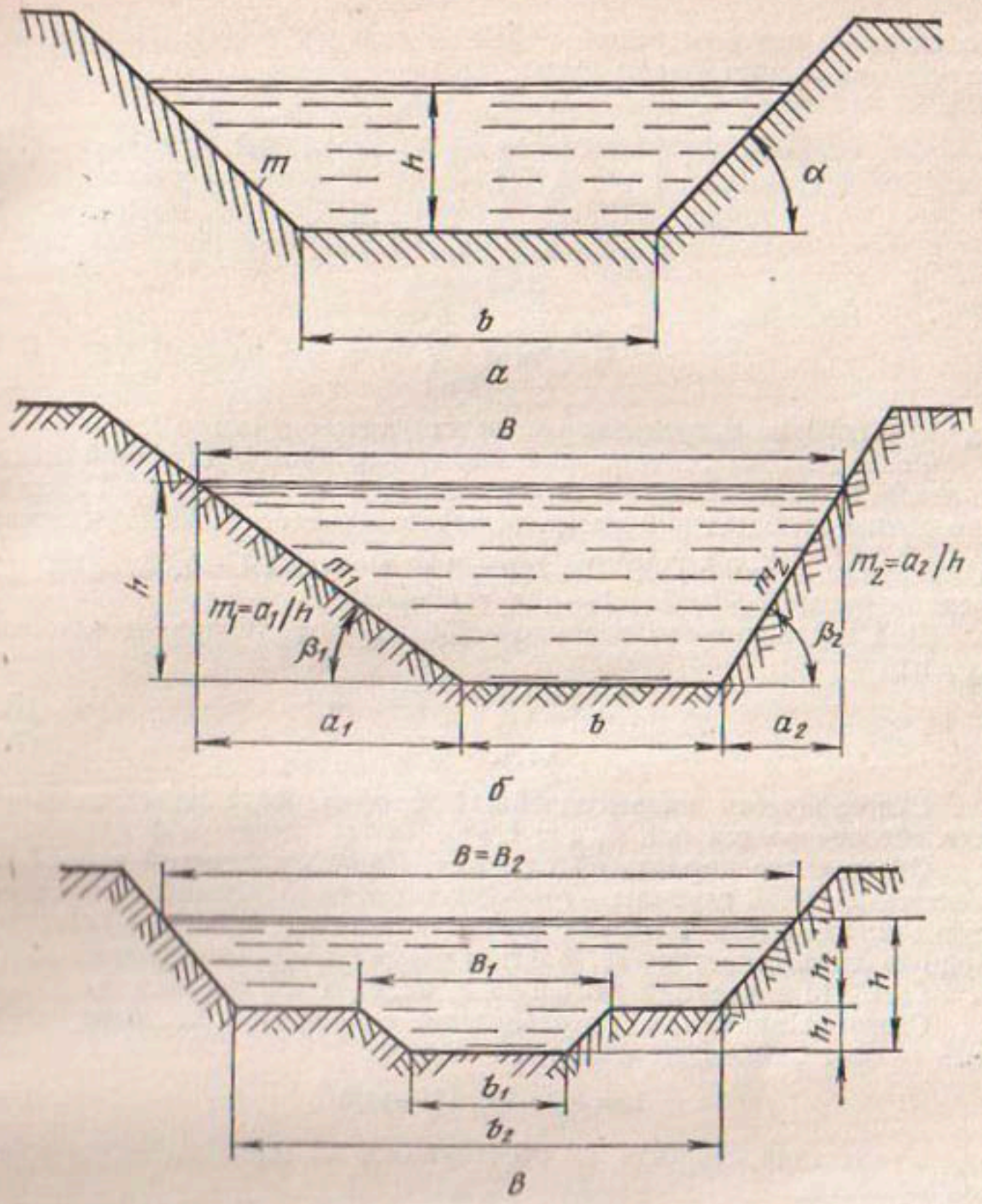


Рис. 7.1. Сечение русл: *а* — трапецеидальное, $m_1=m_2$; *б* — трапецеидальное, $m_1 \neq m_2$; *в* — полигональное.

Для русл параболического профиля, характеризуемых уравнением параболы $x^2=2py$ (p — параметр параболы):

$$\omega=4h\sqrt{2ph}/3; \tag{7.12}$$

$$B=2\sqrt{2ph}; \tag{7.13}$$

$$\chi=p\left[\sqrt{2\beta(1+2\beta)}+\ln\left(\sqrt{2\beta}+\sqrt{1+2\beta}\right)\right]; \tag{7.14}$$

$$R=\frac{2Bh}{3p\left[\sqrt{2\beta(1+2\beta)}+\ln\left(\sqrt{2\beta}+\sqrt{1+2\beta}\right)\right]}, \tag{7.15}$$

где B — ширина канала поверху; $\beta=h/p$ — относительная глубина.

Русла полигонального профиля (рис. 7.1, *в*) можно рассматривать как составные: основание в форме трапеции или треугольника и рас-

положенные над ним участки трапецеидальной формы [13]. В этом случае при симметричном русле:

$$\omega = \sum_{i=1}^{n} \left[b + 2 \left(\sum_{i=1}^{n} m_{i-1} h_{i-1} \right) + m_i h_i \right] h_i; \qquad (7.16)$$

$$\chi = b + 2 \sum_{i=1}^{n} h_i \sqrt{1 + m_i^2}; \qquad (7.17)$$

$$B = b + 2 \sum_{i=1}^{n} m_i h_i, \qquad (7.18)$$

где h_i — глубина в пределах соответствующего участка.

Рациональные соотношения между глубиной и шириной канала трапецеидального сечения можно определить по А. С. Гиршкану (по данным наблюдений на среднеазиатских оросительных каналах): $h = A\sqrt[3]{Q}$; $R = 0{,}5Q^{0{,}4}$; $\beta = b/h = 3\sqrt[4]{Q} - m$ ($A = 0{,}65 \ldots 0{,}85$ для мелких русл; $A = 0{,}85 \ldots 1$ — для глубоких).

Для гидравлически наивыгоднейшего профиля трапецеидального сечения

$$\beta_{г.н} = 2\left(\sqrt{1 + m^2} - m\right); \qquad (7.19)$$

$$R_{г.н.} = 0{,}5h. \qquad (7.20)$$

Гидравлически наивыгоднейший профиль параболического сечения обеспечивается при $\beta_{г.н} \approx 1{,}886$.

Определение нормальной глубины. Наиболее простой способ расчета нормальной глубины — графоаналитический. Сущность его в следующем: задаваясь четырьмя-пятью значениями h, определяют расходную характеристику K, а затем строят графическую зависимость $K = f(h)$. По заданному значению K находят по графику $h_р$.

Скорости движения. Распределение скоростей в широких открытых руслах описывают формулой Базена:

$$u = u_п - 24v\,(h - y)/hC, \qquad (7.21)$$

где u — местная скорость на расстоянии y от дна; $u_п$ — скорость на поверхности.

Скорость непосредственно у дна равна (по Ю. М. Константинову):

$$u_д = 1{,}25\,v/\lg\,(6{,}15h/\Delta), \qquad (7.22)$$

где Δ — высота выступов эквивалентной шероховатости.

Местные скорости можно определять приближенно по формуле А. Д. Альтшуля:

$$u/u_п = [y/(2h)]^{8/C}. \qquad (7.23$$

Выбранный в процессе проектирования уклон канала должен обеспечивать неразмываемость и незаиляемость канала, то есть должно соблюдаться условие:

$$v_{min} \leqslant v \leqslant v_{max}, \qquad (7.24)$$

где v_{min} — допускаемая незаиляющая скорость; v_{max} — допускаемая неразмывающая скорость.

Для определения v_{min} можно использовать формулы:

И. И. Леви

$$v_{min} = 0{,}000225\, W \sqrt[4]{p/0{,}01}\, \sqrt{R}/(\sqrt{d}\, n), \qquad (7.25)$$

где W — гидравлическая крупность взвешенных наносов; d — средний диаметр частиц взвешенных наносов, мм; P — насыщенность (по массе) взвешенных наносов частицами $d_{ср} \geqslant 0{,}25$ мм, %;

Ю. М. Константинова ($P < 0{,}01\%$)

$$v_{min} = a\sqrt{R}, \qquad (7.26)$$

где a — коэффициент;

А. С. Гиршкана

$$v_{min} = AQ^{0{,}2}, \qquad (7.27)$$

где A — коэффициент, при $W < 1{,}5$ $A = 0{,}33$, $1{,}5...3{,}5 - 0{,}44$, при $W > 3{,}5$ $A = 0{,}55$;

Е. А. Замарина

$$v_{min} = \sqrt[3]{\rho^2 W_0^2\, W/(700^2 Ri)}, \qquad (7.28)$$

где ρ — мутность потока; W_0 — гидравлическая крупность (мм/с) взвешенных наносов, $W_0 = W$ при $W > 2$ мм/с и 2 мм/с при $W < 2$ мм/с; $W = \Sigma P_i W_i/100$ — средняя гидравлическая крупность наносов; $W_i = 0{,}25\,(W_1 + 3W_2)$; W_1, W_2 — максимальное и минимальное значения гидравлической крупности для данной фракции; P_i — содержание наносов той или иной фракции, %.

Максимальную допускаемую скорость определяют по формулам:

И. И. Леви при $R/d = 50...5 \cdot 10^3$

$$v_{max} = A\sqrt{gd}\,\lg[R/(7d)], \qquad (7.29)$$

где d — средний диаметр частиц грунта русла; A — коэффициент, зависящий от уплотненности грунта, $A = 3{,}2$ — для хорошо уплотненных грунтов и 2,8 для грунтов с более рыхлой структурой;

Б. И. Студеничникова при $h/d \leqslant 600$

$$v_{max} = 3{,}6\sqrt[4]{hd}, \qquad (7.30)$$

для песчаных русл

$$v_{max} = 1{,}04\sqrt{gd}\,(R/d)^{0{,}25}; \qquad (7.31)$$

А. М. Латышенкова при $h/d > 600$

$$v_{max} = 5d^{0{,}3}\,h^{0{,}2};$$

А. А. Черкасова для необлицованных каналов в мягких грунтах

$$v_{max} \approx v_0 R^{\alpha}, \qquad (7.32)$$

где v_0 — неразмывающая скорость при $R = 1$ м; α — коэффициент, $\alpha \approx 1/3$;

А. С. Гиршкана

$$v_{max} = kQ^{0{,}1}, \qquad (7.33)$$

где k — коэффициент (табл. 7.4);

В. Н. Гончарова для песчаных русл

$$v_{max} = 0{,}96\sqrt{gd^{0{,}4}\,(d + 0{,}0014)^{0{,}6}}\,(R/d)^{0{,}2}. \qquad (7.34)$$

Значения v_{min} и v_{max} можно определить по СНиП II-52—74.

7.4. Значения k

Несвязные грунты	k	Связные грунты	k
Песок средний	0,45...0,5	Супесь	0,53
Песок крупный	0,50...0,60	Суглинок легкий	0,57
Гравий мелкий	0,60...0,75	Суглинок средний	0,62
Гравий средний	0,75...0,90	Суглинок тяжелый	0,68
Гравий крупный	0,90...1,00	Глина	0,75
Галька мелкая	1,00...1,30	Глина тяжелая	0,85

Гидравлические расчеты мелиоративных каналов. Все внутрихозяйственные постоянные оросительные каналы рассчитывают на нормальный и минимальный расход брутто:

$$Q_{бр} = Q_н + Q_п, \tag{7.35}$$

где $Q_н$ — расход (нетто) воды, подаваемой непосредственно на поле; $Q_п = Q_{п.ф} + Q_{п.и}$ — общие потери воды из канала; $Q_{п.ф}$, $Q_{п.и}$ — потери соответственно на фильтрацию и испарение.

Магистральные каналы, кроме того, рассчитывают и на пропуск потока форсированным расходом [103]:

$$Q_ф = Q_{бр} k_ф, \tag{7.36}$$

где $k_ф$ — коэффициент форсирования, $k_ф = 1{,}2...1{,}3$ при $Q_{бр} < 1$ м³/с, 1,15...1,2 при 1...10, 1,1...1,15 при $Q_{бр} > 10$ м³/с.

Расход $Q_н$ равен:

для временного оросителя и участкового распределителя

$$Q_н = m\omega/(3{,}6t); \tag{7.37}$$

для внутрихозяйственного и хозяйственного распределителя

$$Q_н = q\omega, \tag{7.38}$$

где m — поливная норма ведущей культуры, м³/га; ω — расчетная площадь полива, обслуживаемая каналом, га; t — продолжительность полива, ч; q — расчетная ордината укомплектованного графика гидромодуля для севооборотного участка или для всей площади хозяйства, л/с на 1 га.

Потери воды на фильтрацию для каналов непрерывного действия при неизвестных размерах поперечных сечений можно приближенно рассчитать по формуле С. А. Гиршкана:

$$Q_{п.ф} = 0{,}063\, k_ф \sqrt{Q_н}, \tag{7.39}$$

где $k_ф$ — коэффициент фильтрации (табл. 7.5).

При свободной фильтрации и установившемся режиме потери на фильтрацию можно определить по А. Н. Костякову:

$$Q_{п.ф} = \sigma Q_н l/100, \tag{7.40}$$

где $\sigma = A/Q_н^n$ — доля потерь от расхода на 1 км длины канала; A — коэффициент (табл. 7.6); n — показатель степени (табл. 7.6); l — длина канала, км.

Потери на фильтрацию на 1 км длины канала равны [74]:

7.5. Значения $k_ф$ для каналов в земляном русле

Грунты	$k_ф$, м/сут
Тяжелые суглинки	0,01...0,05
Средние и легкие суглинки	0,05...0,10
Супеси	0,1...0,25
Мелкий песок	0,5...1,0
Мелкозернистый песок	1...5
Среднезернистый песок	5...20

для каналов криволинейного сечения

$$Q'_{п.ф} = 0{,}0116\, k_ф\, (B + 2h); \qquad (7.41)$$

для каналов трапецеидального сечения

$$B/h < 4$$

$$Q'_{п.ф} = 0{,}0116\, k_ф \mu\, (B + 2h), \qquad (7.42)$$

$$B/h > 4$$

$$Q_{п.ф} = 0{,}0116\, k_ф\, (B + Ah), \qquad (7.43)$$

где μ, A — коэффициенты (табл. 7.7).

7.6. Значения A и n

Грунт	A	n
Тяжелый	0,7	0,3
Средний	1,9	0,4
Легкий	3,4	0,5

7.7. Значения μ и A

B/h	$m=1$		$m=1{,}5$		$m=2$	
	A	μ	A	μ	A	μ
2	—	0,98	—	0,78	—	0,62
3	—	1,00	—	0,96	—	0,82
4	—	1,14	—	1,04	—	0,94
5	3,0	—	2,5	—	2,1	—
6	3,2	—	2,7	—	2,3	—
7	3,4	—	3,0	—	2,7	—
10	3,7	—	3,2	—	2,9	—
15	4,0	—	3,6	—	3,3	—
20	4,2	—	3,9	—	3,6	—

При свободной фильтрации и неустановившемся режиме потери на 1 км длины канала равны (по А. Н. Костякову):

$$Q_{п.ф} = \frac{0{,}016\, k_1}{t^{0,5}} \left(\beta + 2\gamma \sqrt{1 + m^2}\right) h_0 / t^{0,5}, \qquad (7.44)$$

где k_1 — коэффициент, характеризующий скорость поглощения воды данным грунтом в первую единицу времени, м/сут; t — время от начала пуска воды по каналу до момента измерения; сут; γ — поправка на боковое капиллярное поглощение воды в откосы, $\gamma = 1{,}1 \ldots$ $\ldots 1{,}4$; $\beta = b/h$.

Потери на испарение равны:

$$Q_{п.и} = Bel, \tag{7.45}$$

где e — слой испарения с водной поверхности в единицу времени, принимают по данным наблюдений.

Определив $Q_{бр}$, расчет каналов ведут по основным расчетным формулам для равномерного движения. Подробно расчеты каналов даны в [90, 94].

Лотковые каналы применяют при $Q = 0{,}5 \ldots 5$ м³/с и $i \leqslant 0{,}01$ (внутрихозяйственные и хозяйственные каналы). Значения $Q_н$ определяют так же, как и для каналов. Таблицы и номограммы для расчетов приведены в [13].

7.2. НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ

В открытых руслах неравномерное движение потока устанавливается при изменении по длине водотока размеров и формы его поперечного сечения, шероховатости стенок, продольного уклона русла.

Удельная энергия сечения. Средняя удельная энергия $Э$ для любого сечения потока, отнесенная к плоскости сравнения, проходящей через низшую точку живого сечения, равна:

$$Э = h + \alpha v^2/(2g) = h + \alpha Q^2/(2g\omega^2), \tag{7.46}$$

где α — коэффициент Кориолиса, показывающий неравномерность распределения скоростей в сечении, $\alpha \approx 1 \ldots 1{,}1$.

Глубина, при которой удельная энергия сечения для данного расхода достигает минимума, называется критической $h_{кр}$ (рис. 7.2). При этом выполняется условие:

$$\alpha Q^2/g = \omega_{кр}^3/B_{кр} \tag{7.47}$$

или

$$П_к = \alpha Q^2 B_{кр}/(g\omega_{кр}^3) = 1.$$

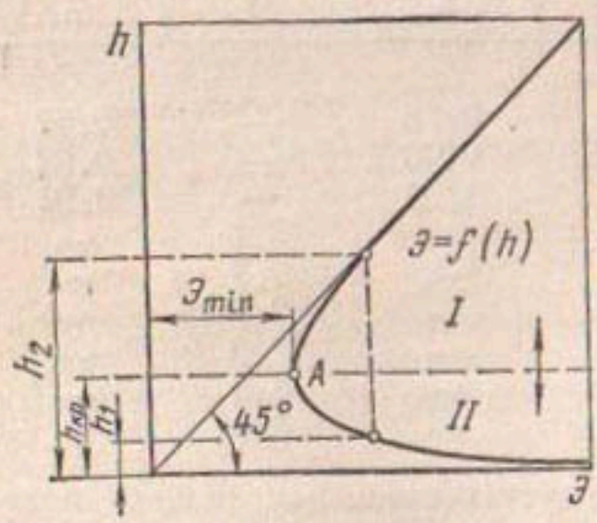


Рис. 7.2. Зависимость $Э$ от h: I, II — соответственно спокойное и бурное состояние потока.

Различают бурное состояние потока ($h < h_{кр}$), спокойное ($h > h_{кр}$) и критическое ($h = h_{кр}$). При этом параметр кинетичности $П_к$ соответственно равен: $П_к > 1$, $П_к < 1$ и $П_к = 1$.

Определение критической глубины и критического уклона. Для русла произвольной формы $h_{кр}$ находят подбором из уравнения

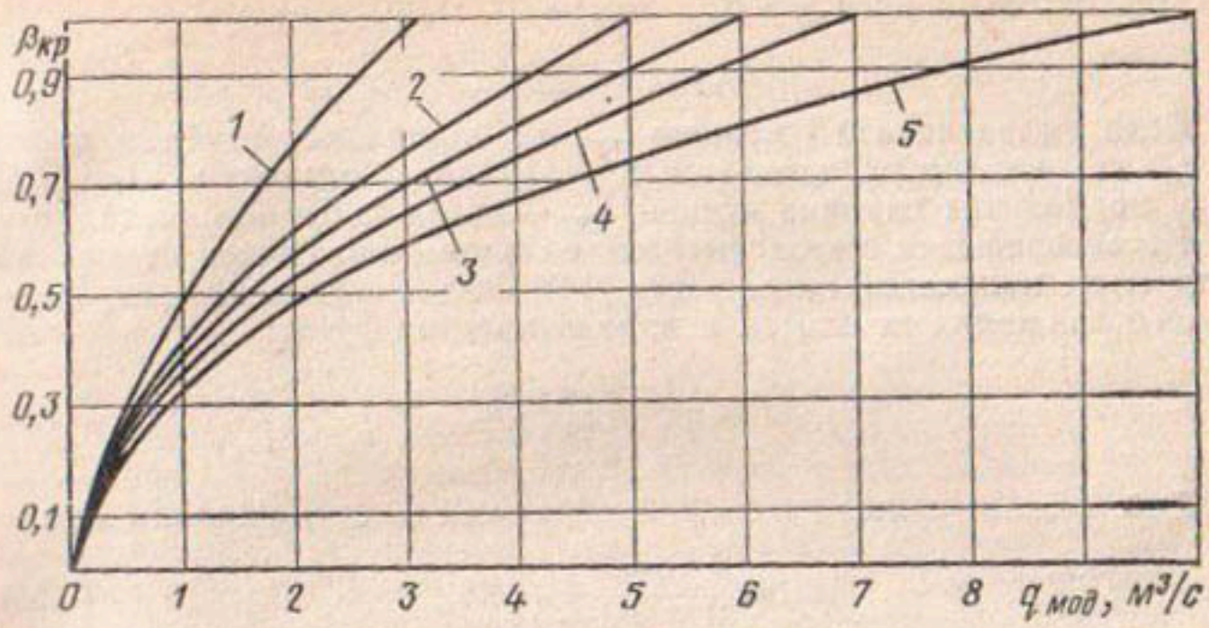


Рис. 7.3. Зависимость $\beta_{кр}$ от $q_{мод}$: *1...5* —$m=0$; 1; 1,5; 2; 3.

7.(47), задаваясь значениями h, или же используют графоаналитический метод. Строят график $\omega^3/B=f(h)$ и для $\omega^3_{кр}/B_{кр}$ находят $h_{кр}$.

Для нахождения $h_{кр}$ в русле трапецеидального сечения можно использовать графоаналитический метод Н. Г. Киселева. По вычисленному значению расхода модельного канала $q_{мод}=Q/(b^2\sqrt{b})$ находят $\beta_{кр}$ по графикам (рис. 7.3), а затем определяют $h_{кр}=\beta_{кр}b$.

Глубину $h_{кр}$ можно определить по приближенным решениям И. И. Агроскина:

трапецеидальное сечение

$$h_{кр}=k(1-\sigma_к/3+0{,}105\,\sigma_к^2), \tag{7.48}$$

$$k=\sqrt[3]{\alpha Q^2/(gb^2)},$$

$$\sigma_к=mk/b;$$

прямоугольное сечение

$$h_{кр}=\sqrt[3]{\alpha q^2/g}, \tag{7.49}$$

где $q=Q/b$ — удельный расход;

треугольное сечение

$$h_{кр}=\sqrt[5]{2\alpha Q^2/(gm^2)},$$

$$h_{кр}\approx 0{,}73\sqrt[5]{(Q/m)^2} \tag{7.50}$$

(при $\alpha\approx 1$ и $g=9{,}81$ м/с²);

параболическое сечение

$$h_{кр}=\sqrt[4]{27\alpha Q^2/(64gp)}, \tag{7.51}$$

$$h_{кр}\approx 0{,}455\sqrt[4]{Q^2/p},$$

где $\sqrt[4]{27\alpha/(64g)}=0{,}455$ при $\alpha\approx 1$ и $g=9{,}81$ м/с².

Критический уклон дна русла, при котором заданный расход при равномерном движении проходит с глубиной $h_{кр}$, равен:

$$i_{кр}=g\omega_{кр}/(\alpha C^2_{кр}R_{кр}B_{кр})=g\chi_{кр}/(\alpha C^2_{кр}B_{кр}). \tag{7.52}$$

Для широких русл $\chi = B_{кр}$, тогда

$$i_{кр} = g/(\alpha C_{кр}^2). \qquad (7.53)$$

Если уклон канала i меньше $i_{кр}$, то нормальная глубина больше $h_{кр}$, то есть поток находится в спокойном состоянии. При $i > i_{кр}$ нормальная глубина меньше $h_{кр}$—поток в бурном состоянии.

Установившееся неравномерное плавноизменяющееся движение в открытых призматических руслах [13]. Общее уравнение неравномерного движения жидкости в призматическом русле:

$$dl = \frac{1 - \Pi_к}{i - Q^2/k^2}\, dh. \qquad (7.54)$$

Для русла с прямым ($i > 0$) и обратным ($i < 0$) уклоном дна:

$$idl = \frac{1 - \Pi_к}{1 \pm (Q/Q')^2}\, dh, \qquad (7.55)$$

где $Q' = K\sqrt{i}$—расход, который пропускало бы данное живое сечение при условии равномерного потока, имеющего $K^2 = \omega^2 C^2 R$.

Для русла с горизонтальным дном ($i = 0$):

$$dl = \frac{1 - \Pi_к}{-(Q^2/K^2)}\, dh \qquad (7.56)$$

или

$$i'dl = \frac{\Pi_к - 1}{(Q/Q')^2}\, dh,$$

где i'—произвольное положительное значение уклона; Q'—расход, который пропускало бы данное живое сечение при равномерном движении потока при уклоне i'.

Гидравлический показатель русла. Широко применяется при построении кривых свободной поверхности в призматических руслах. Уравнение для гидравлического показателя x русла можно получить из зависимости Б. А. Бахметева между расходными характеристиками в сечениях K_1, K_2 и соответствующими глубинами h_1 и h_2:

$$x = 2(\lg K_1 - \lg K_2)/(\lg h_1 - \lg h_2). \qquad (7.57)$$

Для определения x существуют зависимости [13]:

для широких прямоугольных русл

$$x = 2y + 3; \qquad (7.58)$$

для треугольных русл

$$x = 2y + 5; \qquad (7.59)$$

для широких параболических русл

$$x = 2y + 4; \qquad (7.60)$$

для прямоугольных русл

$$x = 2y + 3 - (2y + 1)\lg(\chi_2/\chi_1)/\lg(h_2/h_1); \qquad (7.61)$$

$$x = 2y + 3 - (2y + 1)\, 2/(\beta + 2); \qquad (7.62)$$

$$\beta = b/h_{ср};\ h_{ср} = 0{,}5\,(h_1 + h_2);$$

для трапецеидальных русл

$$x=2y+3-(2y+1)\lg(\chi_2/\chi_1)/\lg(h_2/h_1+(2y+3)\lg(B_2/B_1)/\lg(h_2/h_1), \quad (7.63)$$

$$x=(2y+3)(1+m)/(\beta+m)-(2y+1)\sqrt{m^2+1}/(\beta+\sqrt{m^2+1}), \quad (7.64)$$

где χ_1, χ_2—смоченные периметры; y—показатель степени в формуле Н. Н. Павловского $C=n/R^y$; B_1, B_2—ширина живого сечения поверху.

Построение кривых свободной поверхности потока в призматических руслах. Для их построения имеется ряд способов: Б. А. Бахметева, Н. Н. Павловского, Б. Т. Емцева и др. Ниже приводится способ, предложенный М. И. Скибой. Способ основан на решении дифференциального уравнения неравномерного движения путем численного интегрирования по методу Симпсона. Интегрирование выполнено при малом шаге переменной без осреднений, упрощений и

7.8. Значения $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ при $m=0$

η	$F(\eta)$				$\Phi(\eta)$			
	$\beta_0=0$	$\beta_0=0,5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$	$\beta_0=0$	$\beta_0=0,5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$
0,0	2,005	2,005	2,005	2,005	12,00	12,00	12,00	12,00
0,1	2,005	2,005	2,005	2,005	5,087	11,79	11,92	11,95
0,2	2,002	2,004	2,005	2,005	2,379	11,55	11,82	11,87
0,3	1,996	2,000	2,003	2,003	3,946	11,33	11,70	11,79
0,4	1,881	1,992	1,997	1,999	3,619	11,12	11,57	11,69
0,5	1,956	1,974	1,986	1,989	3,339	10,93	11,45	11,58
0,6	1,912	1,939	1,962	1,969	3,077	10,73	11,30	11,47
0,7	1,838	1,879	1,931	1,917	2,810	10,56	11,14	11,33
0,8	1,707	1,770	1,831	1,856	2,502	10,26	10,94	11,15
0,9	1,433	1,535	1,639	1,686	2,065	9,886	10,63	10,88
1,0	0,350	0,310	0,264	0,239	0,343	0,304	0,258	0,234
1,1	1,570	1,394	1,194	1,082	1,430	1,271	1,087	0,985
1,2	1,992	1,776	1,527	1,388	1,713	1,526	1,310	1,189
1,3	2,274	2,033	1,754	1,598	1,858	1,658	1,427	1,298
1,4	2,496	2,238	1,939	1,771	1,949	1,742	1,503	1,368
1,5	2,687	2,416	2,100	1,922	2,012	1,801	1,556	1,418
1,6	2,859	2,577	2,248	2,062	2,058	1,844	1,596	1,456
1,7	3,017	2,726	2,386	2,193	2,094	1,878	1,627	1,485
1,8	3,156	2,867	2,517	2,318	2,122	1,904	1,651	1,509
1,9	3,307	3,002	2,643	2,439	2,144	1,925	1,671	1,528
2,0	3,443	3,132	2,765	2,556	2,162	1,943	1,688	1,644
3,0	4,646	4,298	3,884	3,646	2,247	2,025	1,766	1,720
4,0	5,737	5,371	4,933	4,680	2,274	2,051	1,792	1,746
5,0	6,789	6,413	5,960	5,697	2,286	2,063	1,804	1,657
6,0	7,824	7,440	6,977	6,708	2,292	2,069	1,810	1,653
8,0	9,866	9,473	8,997	8,720	2,298	2,075	1,816	1,669
10,0	11,89	11,49	11,01	10,73	2,301	2,078	1,819	1,672

Примечание. При $\beta_0>5$ допустимо принимать значения функций $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ для $\beta=5$ (то же в таблицах 7.9. . .7.15).

использования приближенных зависимостей, что обеспечивает достаточно высокую точность расчетов при малой затрате времени [79].

Расчетные уравнения имеют следующий вид:

при $i > 0$

$$i_0 l/h_0 = F(\eta_2) - F(\eta_1) - \Pi_{к_0}[\Phi(\eta_2) - \Phi(\eta_1)], \qquad (7.65)$$

где l — расстояние между заданными сечениями, в которых глубины h_1 и h_2, причем h_1 выше по течению, h_2 — ниже; $\eta = h/h_0$ — относительная глубина неравномерного движения; $\Pi_{к_0} = \frac{\alpha Q^2 \beta_0}{g\omega_0^3}$ — const при заданном расходе Q; B_0, ω_0 — ширина и площадь живого сечения, соответствующие h_0; h_0 — нормальная глубина; $F(\eta)$, $\Phi(\eta)$ — функциональные зависимости, определяют по $\beta_0 = b/\eta_0$ и m (табл. 7.8... ...7.11); b — ширина русла по дну; m — коэффициент заложения откоса;

7.9. Значения $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ при $m = 0{,}5$

η	$F(\eta)$				$\Phi(\eta)$			
	$\beta_0=0$	$\beta_0=0{,}5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$	$\beta_0=0$	$\beta_0=0{,}5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$
0,0	2,005	2,005	2,005	2,005	12,00	12,00	12,00	12,00
0,1	2,005	2,005	2,005	2,005	11,97	11,93	11,95	11,96
0,2	2,005	2,005	2,005	2,005	11,91	11,84	11,87	11,89
0,3	2,005	2,004	2,004	2,004	11,85	11,74	11,78	11,81
0,4	2,004	2,002	2,000	2,000	11,78	11,64	11,69	11,73
0,5	2,003	1,996	1,992	1,992	11,70	11,54	11,58	11,63
0,6	1,999	1,984	1,975	1,974	11,61	11,43	11,47	11,53
0,7	1,987	1,969	1,942	1,941	11,52	11,81	11,34	11,40
0,8	1,958	1,907	1,876	1,874	11,40	11,16	11,13	11,24
0,9	1,881	1,786	1,726	1,720	11,23	10,94	10,93	10,99
1,1	0,621	0,827	0,972	0,993	0,531	0,733	0,878	0,902
1,2	0,816	1,069	1,250	1,277	0,631	0,877	1,056	1,088
1,3	0,961	1,240	1,442	1,474	0,679	0,950	1,149	1,187
1,4	1,087	1,384	1,601	1,636	0,708	0,994	1,209	1,251
1,5	1,203	1,512	1,742	1,779	0,726	1,024	1,250	1,296
1,6	1,314	1,633	1,872	1,911	0,738	1,046	1,280	1,329
1,7	1,321	1,748	1,995	2,036	0,747	1,062	1,203	1,355
1,8	1,527	1,859	2,113	2,156	0,754	1,074	1,321	1,376
1,9	1,630	1,968	2,227	2,272	0,758	1,083	1,336	1,393
2,0	1,733	2,075	2,339	2,385	0,762	1,090	1,348	1,407
3,0	2,743	3,100	3,390	3,445	0,775	1,119	1,399	1,450
4,0	3,744	4,106	4,403	4,463	0,777	1,125	1,413	1,490
5,0	4,745	5,106	5,408	5,470	0,777	1,127	1,418	1,498
6,0	5,745	6,106	6,410	6,474	0,778	1,128	1,420	1,502
8,0	7,745	8,106	8,412	8,477	0,778	1,128	1,429	1,506
10,0	9,745	10,11	10,41	10,48	0,778	1,128	1,423	1,506

при $i=0$

$$i_{кр}/h_{кр}=\theta(\xi_2)-\theta(\xi_1), \qquad (7.66)$$

где $\xi=h/h_{кр}$ — относительная глубина; $\theta(\xi)$ — функциональная зависимость, определяют по $\beta_{кр}=b/h_{кр}$ и m (табл. 7.12...7.15).

Построение кривых свободной поверхности в естественных руслах. Общее дифференциальное уравнение установившегося плавно изменяющегося движения жидкости (не приводится) интегрированию из-за сложности практически не поддается, поэтому при расчетах используют непосредственно уравнение Бернулли, решая его путем постепенных приближений для конечных разностей. Рассмотрим решение, предложенное впервые В. И. Чарномским (1914 г.). Запишем уравнение для удельной энергии в двух сечениях при $i>0$:

$$Э_2=Э_1+(I_0-I_{f_{ср}})\,l; \qquad (7.67)$$

$$Э_1=h_1+\alpha v_1^2/(2g);\ Э_2=h_2+\alpha v_2^2/(2g),$$

7.10. Значения $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ при $m=1$

η	$F(\eta)$				$\Phi(\eta)$			
	$\beta_0=0$	$\beta_0=0,5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$	$\beta_0=0$	$\beta_0=0,5$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$
0,0	2,005	2,005	2,005	2,005	12,00	12,00	12,00	12,00
0,1	2,005	2,005	2,005	2,005	11,97	11,95	11,96	11,96
0,2	2,005	2,005	2,005	2,005	11,91	11,88	11,89	11,90
0,3	2,005	2,004	2,004	2,004	11,85	11,80	11,81	11,83
0,4	2,004	2,003	2,001	2,001	11,76	11,72	11,72	11,74
0,5	2,003	1,999	1,995	1,993	11,70	11,63	11,63	11,65
0,6	1,999	1,991	1,981	1,978	11,61	11,53	11,53	11,55
0,7	1,987	1,972	1,953	1,947	11,52	11,42	11,41	11,43
0,8	1,958	1,930	1,897	1,884	11,40	11,29	11,26	11,28
0,9	1,881	1,828	1,765	1,741	11,23	11,10	11,03	11,04
1,0	0,133	0,160	0,193	0,207	0,129	0,155	0,188	0,202
1,1	0,621	0,737	0,879	0,942	0,531	0,646	0,788	0,852
1,2	0,816	0,958	1,134	1,213	0,631	0,771	0,946	1,027
1,3	0,961	1,117	1,313	1,402	0,679	0,883	1,028	1,120
1,4	1,087	1,252	1,462	1,558	0,708	0,871	1,080	1,179
1,5	1,203	1,376	1,595	1,697	0,726	0,896	1,115	1,220
1,6	1,314	1,491	1,719	1,825	0,738	0,914	1,141	1,251
1,7	1,421	1,603	1,837	1,947	0,747	0,927	1,160	1,275
1,8	1,527	1,711	1,950	2,064	0,754	0,936	1,175	1,293
1,9	1,630	1,818	2,061	2,177	0,758	0,944	1,187	1,308
2,0	1,733	1,922	2,162	1,288	0,762	0,950	1,196	1,320
3,0	2,743	2,940	3,203	3,335	0,775	0,971	1,236	1,375
4,0	3,744	3,943	4,211	4,347	0,777	0,975	1,245	1,390
5,0	4,745	2,944	5,213	5,352	0,777	0,976	1,248	1,396
6,0	5,745	5,944	6,214	6,354	0,778	0,976	1,249	1,399
8,0	7,745	7,944	8,214	8,355	0,778	0,977	1,250	1,401
10,0	9,945	9,944	10,21	10,36	0,778	0,977	1,250	1,402

7.11. Значения $F(\eta)$ и $\Phi(\eta)$ при $m=1{,}5$

η	$F(\eta)$				$\Phi(\eta)$			
	$\beta_0=0$	$\beta_0=0{,}61$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$	$\beta_0=0$	$\beta_0=0{,}61$	$\beta_0=2$	$\beta_0=5$
0,0	2,005	2,005	2,005	2,005	12,00	12,00	12,00	12,00
0,1	2,005	2,005	2,005	2,005	11,97	11,96	11,96	11,96
0,2	2,005	2,005	2,005	2,005	11,91	11,89	11,90	11,90
0,3	2,005	2,005	2,004	2,004	11,85	11,82	11,82	11,83
0,4	2,004	2,003	2,002	2,001	11,78	11,74	11,74	11,76
0,5	2,003	2,000	1,996	1,994	11,70	11,66	11,65	11,66
0,6	1,999	1,992	1,984	1,980	11,61	11,56	11,55	11,56
0,7	1,987	1,975	1,960	1,950	11,52	11,46	11,44	11,45
0,8	1,958	1,936	1,909	1,892	11,40	11,33	11,30	11,30
0,9	1,881	1,838	1,787	1,755	11,23	11,14	11,08	11,07
1,0	0,133	0,155	0,181	0,199	0,129	0,150	0,176	0,194
1,1	0,621	0,716	0,828	0,907	0,531	0,625	0,737	0,818
1,2	0,816	0,932	1,070	1,170	0,631	0,746	0,885	0,985
1,3	0,961	1,089	1,242	1,353	1,679	0,806	0,960	1,073
1,4	1,087	1,223	1,386	1,505	0,708	0,842	1,007	1,129
1,5	1,203	1,344	1,516	1,641	0,726	0,866	1,039	1,168
1,6	1,314	1,459	1,636	1,767	0,738	0,883	1,062	1,196
1,7	1,421	1,570	1,752	1,887	0,747	0,895	1,079	1,218
1,8	1,527	1,678	1,863	2,002	0,754	0,904	1,092	1,235
1,9	1,630	1,784	1,972	2,114	0,758	0,911	1,102	1,249
2,0	1,733	1,888	2,079	2,223	0,762	0,917	1,111	1,260
3,0	2,743	2,904	3,106	3,263	0,775	0,937	1,143	1,308
4,0	3,744	3,906	4,111	4,272	0,777	0,940	1,150	1,320
5,0	4,745	4,907	5,113	5,276	0,777	0,941	1,153	1,325
6,0	5,745	5,907	6,113	6,277	0,778	0,942	1,154	1,327
8,0	7,745	7,908	8,114	8,278	0,778	0,942	1,154	1,328
10,0	9,745	9,908	10,110	10,280	0,778	0,942	1,154	1,329

где $I_{f_{ср}}=0{,}5\,(I_{f_1}+I_{f_2})$ — среднее значение уклона трения на участке длиной l между сечениями *1* и *2*; I_{f_1}, I_{f_2} — уклоны трения для этих же сечений.

Уравнение (7.67) решается путем постепенного приближения. При этом должны быть известны прежде всего очертания русла в плане $\omega=f(l)$ и в сечениях $\omega=f(h)$. При известных Q, I_0, h_1 вычисляют $Э_1$. Задаваясь значениями l и произвольной глубиной h_2', находят $Э_2$. По h_1 и h_2' определяют $i_{f_{ср}}$ и $Э_2$. Глубина h_2' подобрана правильно, если $Э_2'$ и $Э_2$ отличаются не более чем на 5%. Эта задача легко решается путем приближенного интегрирования с использованием графиков [79].

Для русл с $i=0$ и $i<0$ $Э_2$ соответственно равны:

$$Э_2=Э_1-i_{f_{ср}}l; \tag{7.68}$$

$$Э_2=Э_1-(I_0+I_{f\,ср})\,l. \tag{7.69}$$

7.12. Значения θ (ζ) при $m=0$

ζ	$\beta_к=0$	$\beta_к=0,5$	$\beta_к=2$	$\beta_к=5$
0,1	6,908	0,207	0,075	0,049
0,2	7,598	0,448	0,185	0,125
0,3	7,997	0,672	0,301	0,211
0,4	8,273	0,850	0,415	0,299
0,5	8,476	1,001	0,522	0,386
0,6	8,628	1,125	0,617	0,468
0,7	8,739	1,223	0,698	0,540
0,8	8,817	1,294	0,761	0,598
0,9	8,862	1,337	0,801	0,637
1,0	8,877	1,352	0,816	0,651
1,1	—0,015	—0,015	—0,016	—0,016
1,2	—0,060	—0,062	—0,065	—0,068
1,3	—0,137	—0,143	—0,153	—0,162
1,4	—0,245	—0,259	—0,284	—0,304
1,5	—0,386	—0,413	—0,461	—0,502
1,6	—0,562	—0,607	—0,676	—0,762
1,7	—0,774	—0,843	—0,960	—1,091
1,8	—1,023	—1,124	—1,304	—1,497
1,9	—1,311	—1,451	—1,712	—1,987
2,0	—1,640	—1,829	—2,188	—2,569
3,0	—7,567	—8,829	—11,79	—15,35
4,0	—19,61	—23,63	—33,55	—46,72
5,0	—39,72	—48,88	—72,37	—106,2
6,0	—69,87	—87,11	—133,20	—205,2
8,0	—168,20	—213,60	—341,00	—554,3
10,0	—330,70	—424,50	—697,40	—1 111,0

7.13. Значения θ (ζ) при $m=0,5$

ζ	$\beta_к=0$	$\beta_к=0,5$	$\beta_к=1,24$	$\beta_к=2$	$\beta_к=5$
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	0,035	0,068	0,058	0,052	0,042
0,2	0,088	0,161	0,144	0,130	0,108
0,3	0,151	0,256	0,236	0,216	0,183
0,4	0,221	0,350	0,328	0,305	0,262
0,5	0,296	0,441	0,419	0,393	0,342
0,6	0,374	0,527	0,504	0,475	0,418
0,7	0,450	0,605	0,580	0,548	0,487
0,8	0,519	0,670	0,641	0,608	0,544
0,9	0,571	0,715	0,683	0,648	0,582
1,0	0,592	0,732	0,699	0,664	0,596
1,1	—0,029	—0,021	—0,018	—0,017	—0,017
1,2	—0,137	—0,094	—0,081	—0,076	—0,073
1,3	—0,360	—0,236	—0,198	—0,186	—0,176
1,4	—0,747	—0,468	—0,384	—0,358	—0,336

ζ	$\beta_к=0$	$\beta_к=0,5$	$\beta_к=1,24$	$\beta_к=2$	$\beta_к=5$
1,5	—1,362	—0,812	—0,653	—0,604	—0,565
1,6	—2,291	—1,300	—1,022	—0,938	—0,873
1,7	—3,614	—1,964	—1,511	—1,376	—1,272
1,8	—5,473	—2,847	—2,143	—1,935	—1,777
1,9	—8,012	—3,995	—2,942	—2,735	—2,403
2,0	—11,41	—5,459	—3,938	—3,596	—3,164
3,0	—162,8	—55,41	—33,66	—27,52	—22,81
4,0	—1 018,0	—287,9	—154,6	—123,7	—83,68
5,0	—4 190,0	—1 038,0	—463,8	—346,8	—224,4
6,0	—13 299,0	—2 997,0	—1 225,0	—847,7	—515,4
8,0	—82 199,0	—16,347,0	—5 983,0	—3 691,0	—1 946,0
10,0	—337 553,0	—62,209,0	—20 940,0	—12 056,0	—5 599,0

7.14. Значения $\theta(\zeta)$ при $m=1$

ζ	$\beta_к=0$	$\beta_к=0,5$	$\beta_к=0,83$	$\beta_к=2$	$\beta_к=5$
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	0,035	0,049	0,048	0,044	0,039
0,2	0,088	0,120	0,120	0,112	0,101
0,3	0,151	0,196	0,198	0,188	0,172
0,4	0,221	0,277	0,279	0,269	0,248
0,5	0,296	0,358	0,362	0,350	0,325
0,6	0,374	0,438	0,442	0,428	0,399
0,7	0,450	0,514	0,517	0,500	0,467
0,8	0,519	0,580	0,580	0,560	0,524
0,9	0,571	0,626	0,625	0,601	0,562
1,0	0,592	0,645	0,643	0,617	0,577
1,1	—0,029	—0,024	—0,022	—0,019	—0,017
1,2	—0,137	—0,108	—0,099	—0,085	—0,076
1,3	—0,360	—0,276	—0,250	—0,210	—0,188
1,4	—0,747	—0,558	—0,499	—0,412	—0,363
1,5	—1,362	—0,988	—0,875	—0,709	—0,615
1,6	—2,291	—1,612	—1,412	—1,123	—0,961
1,7	—3,614	—2,482	—2,153	—1,679	—1,417
1,8	—5,479	—3,644	—3,146	—3,407	—2,002
1,9	—8,012	—5,233	—4,448	—3,339	—2,737
2,0	—11,41	—7,279	—6,128	—4,514	—3,646
3,0	—162,8	—86,72	—67,35	—41,92	—29,26
4,0	—1018	—486,1	—357,3	—195,9	—119,6
5,0	—4 190	—1 864	—1 319	—657,1	—329,0
6,0	—13 299	—5 628	—3 876	—2 045	—860,6
8,0	—82 199	—32 648	—21 673	—9 313	—3 839
10,0	—337 553	—167 097	—83 837	—32 971	—13 536

7.15. Значения $\theta(\zeta)$ при $m=1,5$

ζ	$\beta_к=0$	$\beta_к=0,61$	$\beta_к=2$	$\beta_к=5$
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
0,10	0,035	0,043	0,041	0,038
0,20	0,088	0,108	0,105	0,098
0,30	0,151	0,180	0,177	0,167
0,40	0,221	0,256	0,254	0,241
0,50	0,296	0,335	0,333	0,317
0,60	0,374	0,414	0,410	0,391
0,70	0,450	0,489	0,482	0,459
0,80	0,519	0,554	0,542	0,516
0,90	0,571	0,601	0,585	0,556
1,00	0,592	0,620	0,601	0,571
1,10	—0,029	—0,024	—0,021	—0,018
1,20	—0,137	—0,112	—0,091	—0,080
1,30	—0,360	—0,287	—0,230	—0,198
1,40	—0,747	—0,583	—0,454	—0,385
1,50	—1,362	—1,038	—0,788	—0,658
1,60	—2,291	—1,703	—1,262	—1,036
1,70	—3,614	—2,635	—1,907	—1,538
1,80	—5,473	—3,908	—2,763	—2,190
1,90	—8,012	—5,608	—3,873	—3,018
2,00	—11,41	—7,833	—5,290	—4,051
3,00	—162,8	—96,47	—53,87	—35,01
4,00	—1 018,0	—552,4	—269,9	—153,1
5,00	—4 190,0	—2 145,0	—955,5	—486,2
6,0	—13299	—5543	—2721	—1269
8,0	—82199	—37464	—14561	—5962
10,0	—337553	—175301	—54699	—21165

Решение уравнений (7.68) и (7.69) аналогично решению уравнения (7.67).

Следует учитывать, что чем меньше длина расчетных участков, на которые разбивают поток, тем точнее построение кривых свободной поверхности. Если кривые подпора или спада имеют небольшое падение, то решение Чарномского можно применять для участков сравнительно большой длины.

7.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ

При переходе от бурного состояния потока к спокойному возникает гидравлический прыжок, зависящий от формы русла, уклона дна, размеров и очертаний сопрягающего сооружения, наличия гасителей и т. д.

Совершенный гидравлический прыжок. Для русл с нулевым или малым уклоном дна связь между сопряженными глубинами выражается основным уравнением прыжка:

$$\alpha_0 Q^2/(g\omega_1)+y_1\omega_1=\alpha_0 Q^2/(g\omega_2)+y_2\omega_2, \qquad (7.70$$

где α_0 — коэффициент количества движений; $\alpha_0 \approx 1$; ω_1, ω_2 — площадь живых сечений с сопряженными глубинами h' и h''; y_1, y_2 — глубины погружения центров тяжести этих сечений.

Основное уравнение прыжка можно представить в виде:

$$\Pi(h') = \Pi(h''), \tag{7.71}$$

где $\Pi(h) = \alpha_0 Q^2/(g\omega) + y\omega$ — прыжковая функция.

По уравнению (7.71) можно построить график прыжковой функции для любой формы поперечного сечения, по которому определяют одну из сопряженных глубин при известной второй.

Определить одну из сопряженных глубин при известной другой можно по формулам:

$$h'' = 0{,}5h' \sqrt{1 + 8q^2/(g^2h'^3)} - 1); \tag{7.72}$$

$$h'' = 0{,}5h' \left(\sqrt{1 + 8(h_{кр}/h')^3} - 1\right). \tag{7.73}$$

Для прыжков с большой высотой h'' равна:

$$h'' = 0{,}5h' \left[2{,}83\,(h_{кр}/h')^{3/2} - 1\right]. \tag{7.74}$$

С точностью до 6% h'' можно вычислить по формуле:

$$h'' = 1{,}4h_{кр} \sqrt{h_{кр}/h'}. \tag{7.75}$$

Трапецеидальное русло. Сопряженные глубины можно найти из уравнения (7.70). Для приближенных расчетов допустимы при $h'' \leqslant 5h_{кр}$ формулы А. Н. Рахманова:

$$h'' = (1{,}2h_{кр}^2)/(h' + 0{,}2h_{кр}); \tag{7.76}$$

$$h' = 1{,}2h_{кр}/h'' - 0{,}2h_{кр}. \tag{7.77}$$

Кроме того, для определения h' и h'' можно использовать графики А. Н. Рахманова (рис. 7.4). Для определения одной из сопряженных глубин при известных b, m, $h_{кр}$ вычисляют $\mu = mh_{кр}/b$, а затем одну из относительных глубин, например $\zeta_1 = h'/h_{кр}$. На графике (рис. 7.4) находят линию, соответствующую найденному значению μ, и по ζ_1 определяют ζ_2 (соответствующие друг другу значения ζ_1 и ζ_2 находятся на вертикали, пересекающей кривую μ) и вычисляют $h'' = \zeta_2 h_{кр}$.

После перепада с вертикальной стенкой падения h'' равна (по И. С. Загребину):

$$h'' = 0{,}82Э_{кр}\,(h_{ст}/h_{кр})^{-0{,}55} \tag{7.78}$$

где $Э_{кр} = h_{кр} + \alpha_0 v^2/(2g) + h_{ст}$ — полная удельная энергия над перепадом: $\alpha_0 = 1{,}03$ — для сечения с критической глубиной; $h_{ст}$ — высота стенки.

После перепада с вертикальной стенкой падения h'' для подпертого прыжка при $\beta = 0{,}4 \ldots 1$ (по Г. Я. Швец):

$$h''_п = h''\,(0{,}79 + 0{,}21\beta), \tag{7.79}$$

где h'' — вторая сопряженная глубина свободного гидравлического прыжка; $\beta = h_{ст} - l_{пад}/l_п$, $l_п$ — длина гидравлического прыжка при критическом положении; $l_{пад}$ — дальность падения струи.

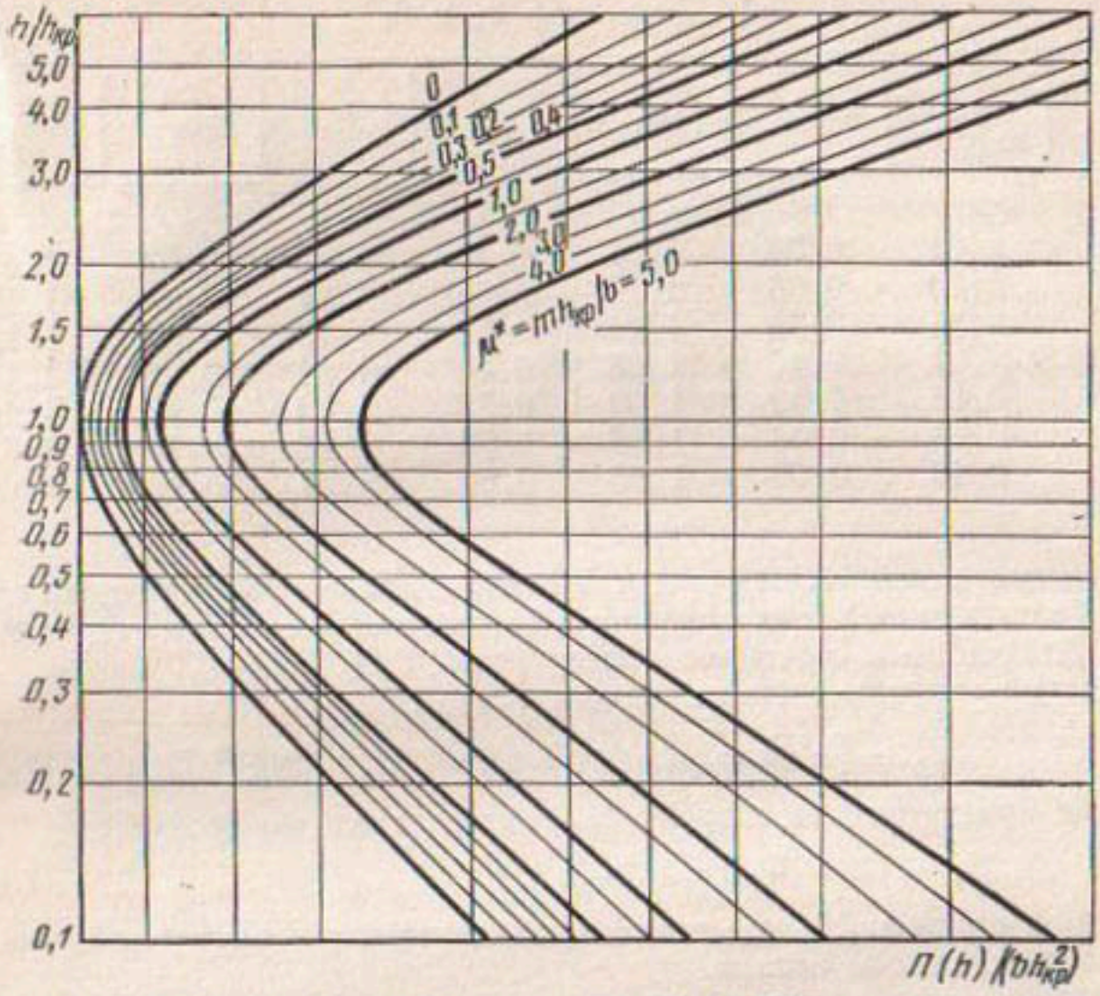


Рис. 7.4. Зависимость $h/h_{кр}$ от $\Pi(h)/(bh_{кр}^2)$ (крайняя левая кривая при $\mu=0$ соответствует гидравлическому прыжку в прямоугольном русле).

Треугольное русло. Основное уравнение прыжка можно представить в относительных величинах:

$$1/\zeta_1^2+2\zeta_1^3/3=1/\zeta_2^2+2\zeta_2^3/3, \qquad (7.80)$$

где $\zeta_1=h'/h_{кр}$, $\zeta_2=h''/h_{кр}$ (рис. 7.5).

Параболическое русло. Основное уравнение прыжка имеет вид;

$$0{,}703Q^2/(gph'^{1,5})+h'^{2,5}=0{,}703Q^2/(gph''^{1,5})+h''^{2,5}. \qquad (7.81)$$

Для решения уравнения (7.81) И. И. Агроскиным составлена таблица вспомогательных величин θ_1 и θ_2 (табл. 7.16), которые находят по формуле $\theta=a_п h$, где $a_п=1{,}09\sqrt[4]{gp}/\sqrt{Q}$. Вычислив θ_1 при h', а затем найдя по таблице θ_2, определяют $h_2''=Q_2/a_п$.

Для расчета h' и h'' можно использовать следующие формулы:

$$h'^{2,5}\left[\left(\sqrt[4]{C}/h'\right)^4+1\right]=(h')^{2,5}\left[\left(\sqrt[4]{C}/h''\right)^4+1\right], \qquad (7.82)$$

где $C=45Q^2/(64gp)$;

при $0{,}15\leqslant z_2\leqslant 0{,}672$ $(0{,}075\leqslant h'/h''\leqslant 0{,}5)$

$$h'=h''(0{,}815z_2-0{,}047); \qquad (7.83)$$

при $2{,}7\leqslant z_1\leqslant 26{,}7$ $(0{,}075\leqslant h'/h''\leqslant 0{,}5)$

$$h''=h'1{,}63z_1/(1+\sqrt{1+0{,}1532z_1}), \qquad (7.84)$$

$$z_1=0{,}836Q\sqrt{\alpha_0}/(\sqrt{gp}h'^2);\quad z_2=0{,}836Q\sqrt{\alpha_0}/(\sqrt{gp}h''^2).$$

7.16. Значения θ_1 и θ_2

θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
0,20	2,61	0,34	1,87	0,48	1,45	0,62	1,20
0,22	2,48	0,36	1,79	0,50	1,41	0,64	1,18
0,24	2,36	0,38	1,72	0,52	1,37	0,66	1,15
0,26	2,24	0,40	1,65	0,54	1,34	0,68	1,12
0,28	2,15	0,42	1,60	0,56	1,30	0,70	1,10
0,30	0,44	0,44	1,55	0,58	1,27	0,72	1,07
0,32	0,46	0,46	1,50	0,60	1,24	0,74	1,05

Круговое (сегментное) русло. Для определения сопряженных глубин в безнапорном русле кругового (сегментного) сечения радиусом r И. И. Агроскиным составлен график (рис. 7.6).

Потери энергии в общем случае равны:

$$h_{пот}=[h'+\alpha_{01}v_1^2/(2g)]-[h''+\alpha_{02}v_2^2/(2g)]^2. \qquad (7.85)$$

Для прямоугольного русла $h_{пот}$ определяют по формуле:

$$h_{пот}=(h''-h')^3/(4h'h''). \qquad (7.86)$$

Длина прыжка. За нее принимают длину горизонтальной проекции поверхностного вальца.

Прямоугольное русло. Для определения $l_п$ используют формулы:

М. Д. Чертоусова

$$l_п=10{,}3h'(\sqrt{Fr_1}-1)^{0,81}, \qquad (7.87)$$

где

$$Fr_1=\alpha v_1^2/(2gh^1)=(h_{кр}/h')^3;$$

О. М. Айвазяна

$$l_п=8(10+\sqrt{Fr_1})\,h_{пот}/Fr_1, \qquad (7.88)$$

где $h_{пот}$ — потери энергии в прыжке, определяют по формуле (7.86

П. М. Степанова

$$l_п=21h_{кр}-29{,}6a/\sqrt{Fr}, \qquad (7.89)$$

где a — высота прыжка; Fr — число Фруда в сечении перед прыжком.

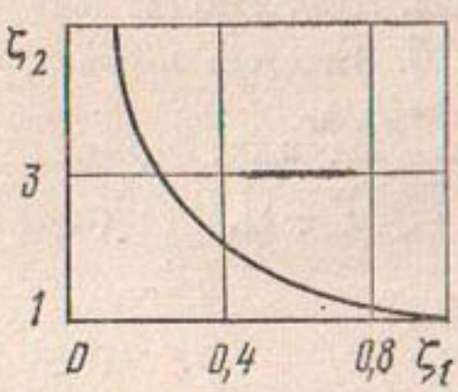


Рис. 7.5. Кривая соотношения ζ_1 и ζ_2.

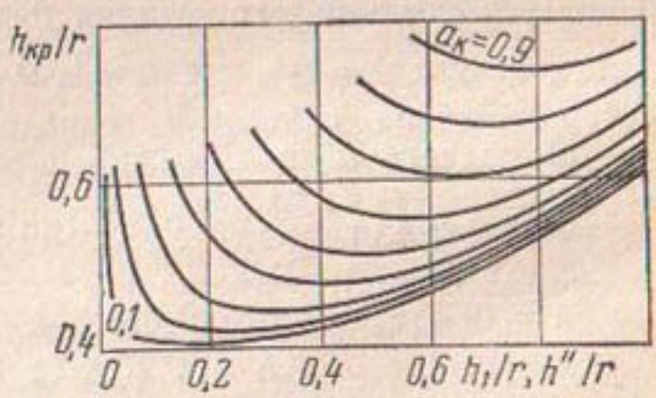


Рис. 7.6. Зависимость $a_к$ от h'/r и h''/r (кривые даны через 0,1): $a_к=\sqrt[3]{Q^2/(gr^5)}$.

Трапецеидальное русло. Рекомендуется использовать формулы:

А. С. Мейерова

$$l_п = 10{,}3h' (\sqrt{Fr_1} - 1)^{0,81} \left[1 + 1{,}76 \frac{m(h'' - h')}{\chi_1}\right], \quad (7.90)$$

где Fr_1, χ — число Фруда и смоченный периметр в сечении до прыжка;

М. Д. Чертоусова

$$l_п = 5h'' \left[1 + 4\sqrt{(B_2 - B_1)/B_2}\right], \quad (7.91)$$

где B_1 и B_2 — ширина потока поверху в сечении до прыжка и за ним.

За одноступенчатым перепадом $l_п$ можно определять:

по И. С. Загребину

$$l_п = 7{,}48 \sqrt[3]{m} T_0 (h_{пер}/h_{кр})^{-2/3}, \quad (7.92)$$

где T_0 — полная удельная энергия над перепадом, подсчитанная по критической глубине; $h_{пер}$ — высота перепада;

по Г. Я. Швец

$$l_п = kh'', \quad (7.93)$$

где k — коэффициент; $k = 4{,}33 + 3{,}01m - 0{,}24m^2$;

для подпертого прыжка по Г. Я. Швец

$$l_{пп} = k\beta h''_п, \quad (7.94)$$

$$h''_п = h''(0{,}79 + 0{,}21\beta); \ \beta = (l_{ст} - l_{пад})/l_п,$$

где $l_п$ — длина свободного гидравлического прыжка при критическом уклоне $i_{кр}$.

В нижнем бьефе быстротока $l_п$ можно определять по формулам В. А. Степина:

при $m = 0...0{,}5$

$$l_п = h_{кр}(6{,}6m^2 + 8{,}2); \quad (7.95)$$

при $m = 0{,}5...2$

$$l_п = h_{кр}(17{,}1m + 2{,}6); \quad (7.96)$$

при $m = 2...3$

$$l_п = 29{,}3h_{кр}\sqrt{m}. \quad (7.97)$$

В сегментных руслах $l_п$ определяют по формуле В. С. Кальфа:

$$l_п = 6(\omega_2 - \omega_1)/B_1. \quad (7.98)$$

В руслах с повышенной шероховатостью длина прыжка уменьшается; для ее расчета можно использовать формулу Ю. М. Кузьминова:

$$l_{п.ш} = l_п [1 - 0{,}65 (\Delta/h'')^{0,28}], \quad (7.99)$$

где $l_п$ — длина прыжка в гладком русле; Δ — средняя высота выступов шероховатости.

Длина участка за прыжком, на котором устанавливается профиль скоростей такой же, как и при равномерном движении, равна:

по М. С. Вызло

$$l_{пп} = 0{,}4h_0/n, \quad (7.100)$$

где h_0 — нормальная глубина; n — коэффициент шероховатости;

по М. Д. Чертоусову

$$l_{пп} = (2{,}5\ldots3)\, l_п. \qquad (7.101)$$

Затопленный прыжок в призматическом русле. В нижних бьефах гидротехнических сооружений мелиоративных систем сопряжение в большинстве случаев происходит по типу затопленного прыжка.

Прямоугольное призматическое русло. Длину прыжка можно определить по формулам П. М. Степанова:

истечение из-под затвора

$$l_п = 3{,}19 h_{кр}^3 \sqrt{h_{кр}} / \left[(h_0 - h'')\sqrt[3]{h_c}\right], \qquad (7.102)$$

$$h'' = \sqrt{h_0^2 - 2q^2 (h_0 - h_c)^3 / g h_0 h_c});$$

$$T_0 = \sqrt{2h_{кр}^3/h_0 - 2h_{кр}^3/h_c - h_0} + h_{кр}^3/(2\varphi h_c^2);$$

$$2h_{кр}^3/h_0 = (h''^2 - h_0^2) + 2h_{кр}^3 \varphi \sqrt{2(T_0 - h'')}/h_{кр}^{1,5},$$

где $l_п$ — длина прыжка (расстояние по горизонтали от затвора до конца вальца); h_0 — нормальная глубина в отводящем русле; h'' — наименьшая глубина прыжка; $h_c = \varepsilon a$ — сжатая глубина; a — высота открытия затвора; ε — степень сжатия;

истечение через водослив

$$l_п = 2{,}88 h_{кр}^3 \sqrt{h_{кр}} / \left[(h_0 - h_c)\sqrt{h_c^3}\right], \qquad (7.103)$$

где $l_п$ — длина прыжка (расстояние от сечения с глубиной h до конца вальца).

Согласно данным П. М. Степанова, сжатая глубина при истечении через водослив увеличивается с увеличением степени затопления. Меняется коэффициент скорости φ в силу взаимодействия транзитной струи с надтранзитной и подтранзитной зонами.

При истечении через водослив с тонкой стенкой φ можно определять по таблице 7.17 или по формуле;

$$\varphi = 1{,}6 z/p_н - 0{,}115, \qquad (7.104)$$

где z — перепад; $p_н$ — высота водослива со стороны нижнего бьефа.

7.17. Значения φ в зависимости от $z/p_н$

$z/p_н$	0,35	0,40	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
φ	0,445	0,524	0,605	0,685	0,765	0,845	0,925

При истечении через водослив практического профиля φ определяют по таблице 7.18 или по формуле:

$$\varphi = 0{,}76 + 0{,}32 z/p_н. \qquad (7.105)$$

7.18. Значения φ в зависимости от $z/p_н$

$z/p_н$	0,35	0,4	0,45	0,52	0,55	0,6	0,65	0,7
φ	0,872	0,888	0,904	0,920	0,936	0,952	0,968	0,984

Трапецеидальное русло. При совершенном прыжке наблюдается сбойность течения, при затопленном это явление отсутствует. Стабильность затопленного прыжка зависит от коэффициента заложения откоса m и степени затопления ζ. Согласно данным К. А. Сеньшиной, при $m=1$ сбойность прекращается при $\zeta=1{,}05\ldots1{,}1$; $m=1{,}5$ $\zeta=1{,}1\ldots1{,}2$.

Длину затопленного прыжка находят по формуле (по К. А. Сеньшиной);

$$l_{эп}=A\,(h_0-h_c), \tag{7.106}$$

где A — коэффициент (табл. 7.19).

7.19. Значения A

m	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
A	7,9	9,20	10,6	12,60	15,0

Кривая свободной поверхности затопленного прыжка. Для ее построения можно воспользоваться эмпирической зависимостью:

$$y=h_0+x^{3/2}\,(h_c-h_0)\,c, \tag{7.107}$$

или относительно x

$$x=\sqrt[3]{(y-h_0)^2/[c\,(h_c-h_0)]^2};$$

$$c=0{,}056\,(\sqrt{h_c})^{3/2}/\left[\zeta^3\left(\sqrt{h_{кр}^3}\right)^{3/2}\right], \tag{7.108}$$

где x — расстояние от конца прыжка до искомой точки свободной поверхности; ζ — степень затопления прыжка; y — глубина в рассматриваемом сечении.

Критерии перехода от затопленного прыжка к поверхностному. При истечении через водосливы затопленный прыжок при соответствующей глубине в нижнем бьефе переходит в поверхностный, характеризующийся возникновением в нижнем бьефе ряда поверхностных мелких волн. Под транзитной струей возникает донный валец.

Для расчета мелиоративных сооружений, которые зачастую работают в этом режиме, важно знать критерии перехода донного режима в поверхностный.

Водослив с тонкой стенкой. При заданных высоте водослива p, напоре на водосливе H и удельном расходе q таким критерием является глубина в нижнем бьефе h_{02} — нормальная граничная глубина. При $h_0<h_{02}$ в нижнем бьефе будет донный режим, при $h_0>h_{02}$ — поверхностный.

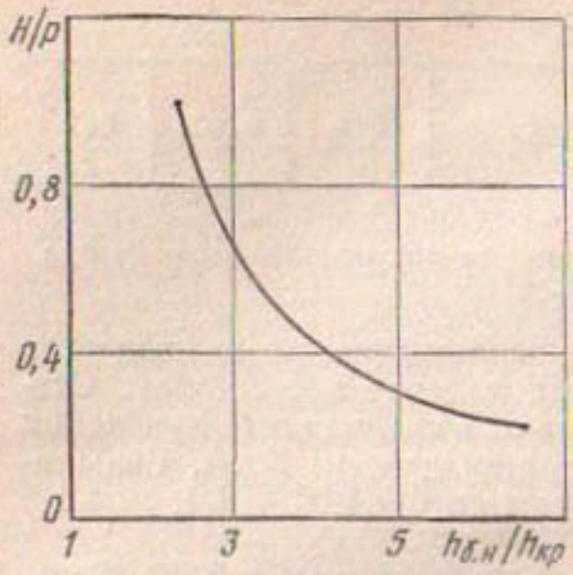


Рис. 7.7. Зависимость H/p от $h_{б.н}/h_{кр}$.

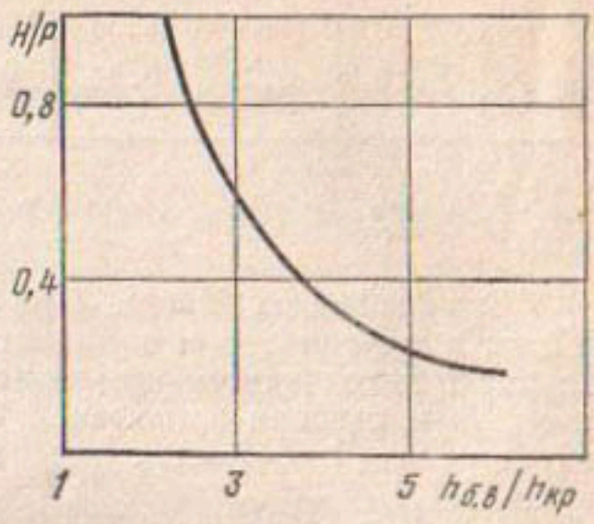


Рис. 7.8. Зависимость H/p от $h_{0в}/h_{кр}$.

Следует учитывать, что при перемене режимов в зависимости от их последовательности значения h_{02} различны: при переходе от донного режима к поверхностному — $h_{0н}$, от поверхностного к донному — $h_{0в}$. Эти глубины можно определить по формулам П. М. Степанова, используя данные таблицы 7.20 или графики (рис. 7.7, 7.8):

$$H/p = 3{,}16\,(h_{0н}/h_{кр})^{-1{,}44}, \tag{7.109}$$

или

$$h_{0н} = h_{кр} l\,(3{,}16 l_п - l_п H/p)/1{,}44. \tag{7.110}$$

$$H/p = 2{,}96\,(h_{0в}/h_{кр})^{-1{,}5}, \tag{7.111}$$

или

$$h_{0в} = h_{кр} l\,(2{,}96 l_п - l_п H/p)/1{,}5. \tag{7.112}$$

7.20. Значения $h_{0н}/h_{кр}$ и $h_{0в}/h_{кр}$

H/p	$h_{0н}/h_{кр}$	$h_{0в}/h_{кр}$	H/p	$h_{0н}/h_{кр}$	$h_{0в}/h_{кр}$
0,20	6,82	6,00	0,65	3,00	2,24
0,25	5,84	5,17	0,70	2,85	2,61
0,30	5,14	4,58	0,75	2,72	2,49
0,35	4,62	4,13	0,80	2,60	2,39
0,40	4,20	3,78	0,85	2,49	2,29
0,45	3,88	3,50	0,90	2,39	2,21
0,50	3,60	3,26	0,95	2,31	2,13
0,55	3,37	3,06	1,00	2,23	2,05
0,60	3,18	2,89			

Водослив практического профиля криволинейного очертания (безвакуумный). Для определения $h_{0н}$ можно использовать формулу П. М. Степанова:

$$T_0/h_{кр} - 1{,}05/\varphi^2 = \sqrt{2h_{кр}/h_{02н} + h_{02н}/h_{кр}^2 - 2{,}9}, \tag{7.113}$$

или

$$\zeta_т - 1{,}05/\varphi^2 = \sqrt{2/\zeta_{02н} + \zeta_{02н} - 2{,}9}, \tag{7.114}$$

где T_0 — полный напор относительно дна в нижнем бьефе; φ — коэффициент скорости, определяют по формуле (7.105); $\zeta_т$, $\zeta_{02н}$ — соответственно $T_0/h_{кр}$ и $h_{02н}/h_{кр}$.

Волнистый прыжок. При $Fr_1 \leqslant 3$ в сечении перед прыжком (соотношение при этом сопряженных глубин $h''/h' < 2$) в руслах прямоугольного сечения возникает волнистый прыжок, характеризующийся рядом волн, постепенно затухающих по направлению движения потока. Под каждой волной образуются небольшие донные водовороты.

За вторую сопряженную глубину принимают глубину в ближайшем к прыжку живом сечении, в котором давление распределяется по гидростатическому закону. Это сечение находится на значительном расстоянии от начала прыжка.

Соотношение между сопряженными глубинами приближенно можно определить (по А. И. Модзалевскому) при $Fr_1 = 1{,}5 \ldots 3$ из зависимости:

$$h''/h' = 1{,}15\sqrt{Fr_1} - 0{,}15. \qquad (7.115)$$

Высоту первой волны $a = h_в - h'$ можно найти по формулам:
В. В. Смыслова

$$a = h'\left[0{,}58\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) - 1\right]; \qquad (7.116)$$

А. И. Модзалевского

$$a = 0{,}55h'(Fr_1 - 0{,}61). \qquad (7.117)$$

Длина волнистого прыжка как расстояние от начального сечения с глубиной h' до сечения, где волны затухают, может быть весьма значительна — в несколько сот раз больше h'. Поэтому $l_п$ обычно определяют по формуле Г. Т. Дмитриева, полученной в результате анализа длин размыва вследствие прыжка-волны:

$$l_{пр} = 10{,}6h'(Fr_1 - 1). \qquad (7.118)$$

Прыжок при большом уклоне дна русла. Рассмотрим случай, когда уклоны дна больше критических — $i > i_{кр}$. Для определения второй сопряженной глубины $h''_в$ (по вертикали) и длины прыжка $l_п$ (горизонтальная проекция) пользуются эмпирическими зависимостями. При уклонах $i \geqslant 0{,}07$ и $6{,}5 < Fr_1 \leqslant 28{,}1$

$$h''_в/h'_в = h''/h' + ki, \qquad (7.119)$$

где h', h'' — сопряженные глубины в горизонтальном русле при Fr_1; i — уклон дна русла; k — опытный коэффициент (табл. 7.21).

7.21. Значения k

Fr	5	10	15	20	25	30	35	40
k	16,3	21,8	26,5	30,8	34,6	38,8	40,8	43,3

При $i \leqslant 0{,}33$ $h''_в$ определяют по формуле Г. И. Косяковой:

$$h''_в = (h'' - h')(1 - 1{,}75i) + h'\sqrt{h' - i^2} + l_п(1 + 3i)i/\sqrt{1 - i^2}, \qquad (7.120)$$

где $h'h''$, $l_п$—сопряженные глубины и длина прыжка в горизонтальном русле при Fr_1.

Длину прыжка в горизонтальной проекции можно определить по формулам:

Г. К. Илчева

$$l_п = 10{,}3\,(\sqrt{Fr}-1)^{0{,}81}\,(1+3{,}75i)\,h' = l'_п\,(1+3{,}75i)\,h', \qquad (7.121)$$

где $l'_п = 10{,}3h'\,(Fr_1-1)^{0{,}81}$—длина прыжка в горизонтальном русле;

Г. Н. Косяковой

$$l_п = l'_п\,(1+3i). \qquad (7.122)$$

При обратном уклоне дна ($i<0$) для расчета $h''_в$ и $l_п$ $|i|\leqslant 0{,}2$ И. А. Снегиревым рекомендуются формулы:

$$h''_в = (1-2i)\,(h''-h'-il'_п)+h', \qquad (7.123)$$

$$l_п = l'_п\,(1-2i),$$

где h', h'', $l'_п$—сопряженные глубины и длина прыжка в горизонтальном русле при том же Fr; i—абсолютное значение обратного уклона.

Гидравлический прыжок в цилиндрических трубопроводах круглого сечения. *Прыжок без учета аэрации потока при постоянном диаметре трубопровода d.*

При $h''<d$ режим на участке за прыжком безнапорный, и прыжок рассчитывают по формулам для открытых русл. Связь между h' и h'' определяют по основному уравнению прыжка (7.71). При $h''>d$ используют следующую формулу:

$$\alpha_0 Q^2/g\omega_1+\omega_1 y_1-A\omega_2=\alpha_0 Q^2/g\omega_2+\omega_2 y_2, \qquad (7.124)$$

$$\omega_2=0,\ d^2; \quad y_2=h-0,\ 5d,$$

где $A=(p_{ат}-p_п)/(\rho g)$—величина вакуума в надпрыжковой зоне при $p_п<p_{ат}$, при $p_п>p_{ат}$ A входит в формулу (7.124) со знаком плюс.

Для упрощения расчетов М. М. Скиба предложил графические зависимости (рис. 7.9), для построения которых использовано уравнение:

$$\Pi\,(\gamma)=1/\sigma+F\,(\gamma_к)\,\chi\,(\gamma), \qquad (7.125)$$

где $\gamma=h/r$; $\sigma=\omega/r^2$; $\beta=B/r$; $\Pi\,(\gamma)=\Pi\,(h)\,gr^5/(r^3\alpha_0 Q^2)$; $F\,(\gamma_к)=gr^5/(\alpha_0 Q^2)$; $\psi\,(\gamma)=\beta^3/12+(\gamma-1)\,\sigma$.

Если $h''<d$ (ориентировочно), при известной h' определяют h'' по $\gamma_2=h''/r$ (рис. 7.9) из условия $\Pi\,(\gamma_1)=\Pi\,(\gamma_2)$, предварительно вычислив γ_1 и $F\,(\gamma_к)$. При $h>d$ и $p_п=p_{ат}$ h'' определяют также, при $p_п\neq p_{ат}$ значение h'' следует уточнить по формулам:

при $p_п<p_{ат}$

$$h''=h''_{p_п=p_{ат}}+h_{вак}; \qquad (7.126)$$

при $p_п>p_{ат}$

$$h''=h''_{p_п=p_{ат}}-h_{изб}. \qquad (7.127)$$

Длину гидравлического прыжка определяют по формулам:

В. С. Кальфа ($h''<d$)

$$l_п=6\,(\omega_2-\omega_1)/B_1; \qquad (7.128)$$

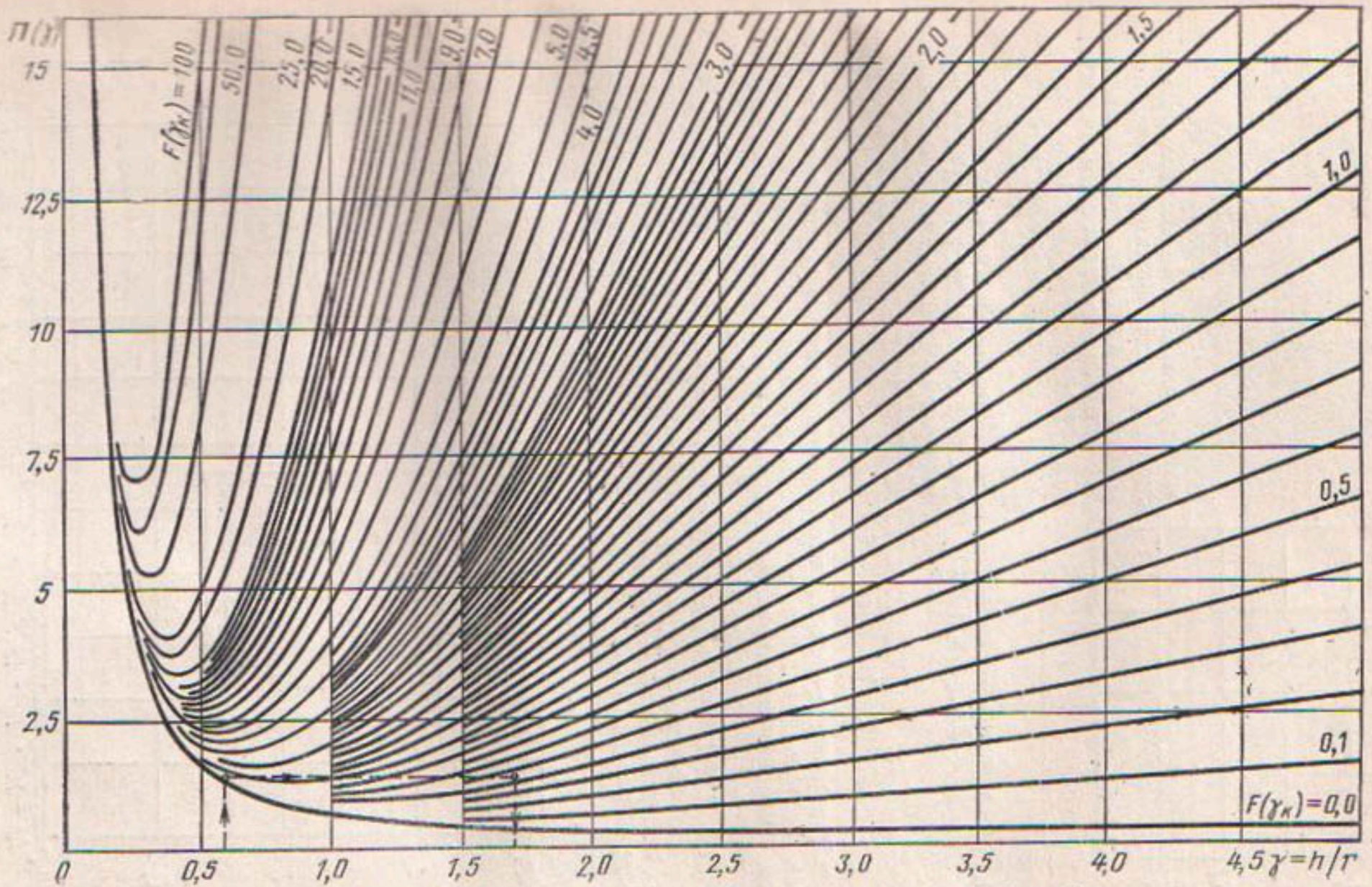


Рис. 7.9. Зависимость $\Pi(\gamma)$ от $F(\gamma_к)$ и h/r: $F_1^1(\gamma_к) = gr^5/(\alpha Q^2)$.

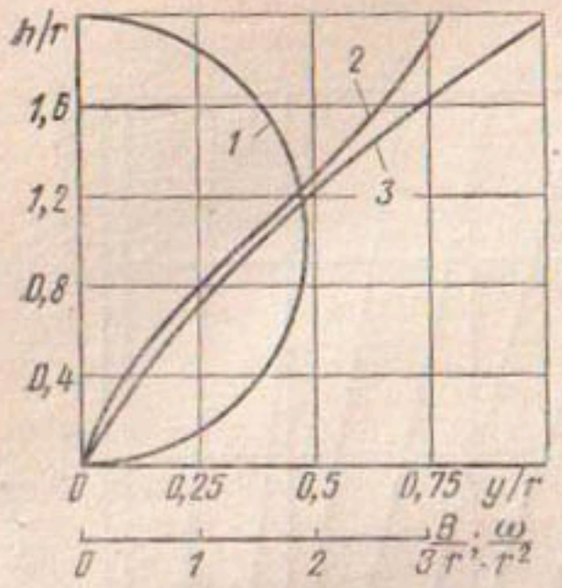


Рис. 7.10. Зависимости h/r от y/r: 1—B/r; 2—ω/r^2; 3—y/r.

Л. П. Калинской ($h'' > d$)

$$l_п = 10r\sqrt{\gamma_к^2(\gamma_к/\gamma_1 - 1{,}2)}\,(1 - 0{,}57\,\lambda_1), \quad (7.129)$$

где $\gamma_к = h_{кр}/r$ — относительная критическая глубина.

Вспомогательные графические зависимости геометрических элементов живого сечения (в безразмерных величинах как функции наполнения трубы) и график для нахождения $h_{кр}$ позволяют упростить расчеты (рис. 7.10).

Прыжок без учета аэрации потока при изменении диаметра трубы. Основное уравнение прыжка при увеличении диаметра — (7.71), а при напорном движении за прыжком ($h'' > d_2$):

$$\alpha_0 Q^2/(g\omega_1) + \omega_1 y_1 - A\omega_2 = \alpha_0 Q^2/(g\omega^2) + (h_2 - 0{,}5d_2)\,\omega_2. \quad (7.130)$$

Для расчета условий сопряжения бьефов в трубчатых безнапорных сооружениях, где в качестве гасителя избыточной кинетической энергии используется насадок-труба большего диаметра, чем основная труба сооружения, М. М. Скиба предложил графики (рис. 7.11, 7.12) для определения h', где $\tau_0 = T_0/r_{нас}$, $\lambda = \alpha Q^2/(2gr_{нас}^5)$.

Гидравлический прыжок с учетом аэрации потока. С увеличением кинетичности бурного потока возрастает и степень захвата им воздуха вследствие самоаэрации и локального захвата воздуха прыжком. В связи с этим учет аэрации при сопряжении бьефов с помощью

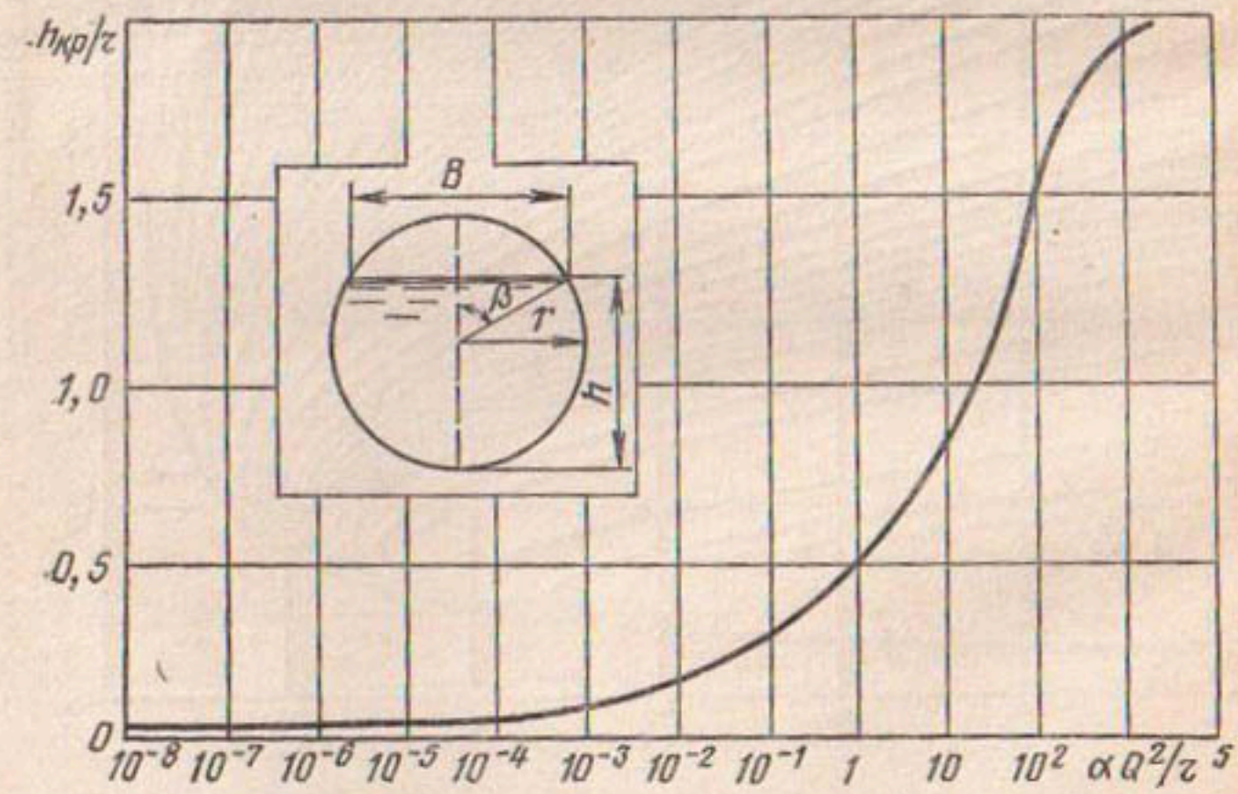


Рис. 7.11. Зависимость $h_{кр}/r$ от $\alpha Q^2/r^5$.

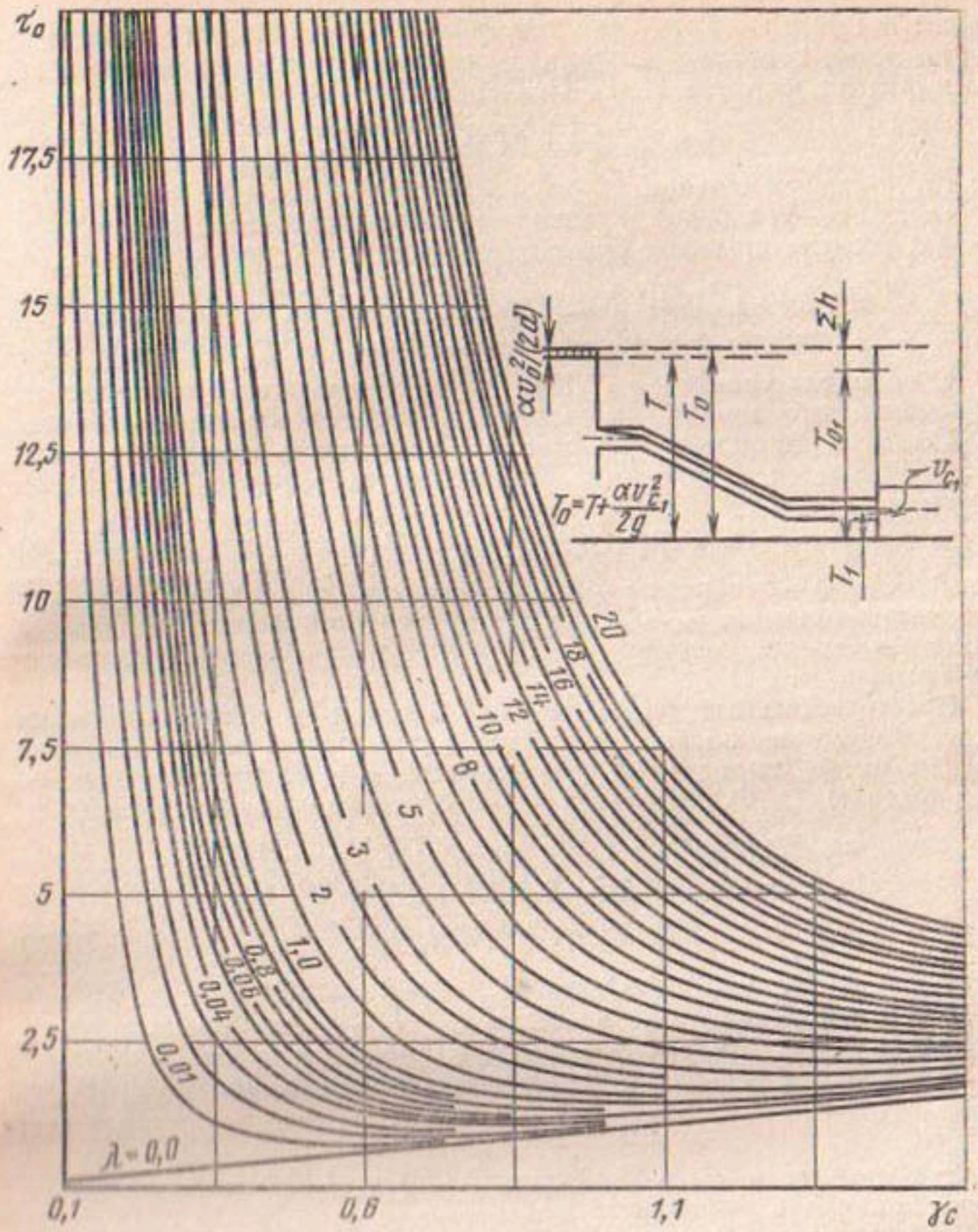


Рис. 7.12. Зависимость τ_0 от γ_c и λ.

гидравлического прыжка имеет большое значение, в особенности при проектировании высоконапорных сооружений.

Основное уравнение прыжка с учетом аэрации потока имеет вид:

$$Q^2/g\omega_1 + \omega_1 y_1 = Q\,(Q + Q_a)/(g\omega_2) + (h'' - 0{,}5d + h_{вак})\,\omega_2, \quad (7.131)$$

где Q_a — расход воздуха, захватываемого гидравлическим прыжком; $h_{вак} = A$ — вакуум в воздушной полости перед прыжком.

Степень захвата воздуха прыжком можно определить лишь весьма приближенно:

$$\beta = Q_a/Q = 0{,}012\,(\sqrt{Fr_1} - 1)^{1,4}, \quad (7.132)$$

где $Fr_1 = v_1/(gh')$ — в сечении перед прыжком. При $Fr > 40$ для потока перед отогнанным прыжком степень его самоаэрации можно рассчитать по формуле Н. Б. Исаченко:

$$\beta = Q_a'/Q = 0{,}04\sqrt{Fr_c - 40}, \qquad (7.133)$$

где Fr_c в сжатом сечении.

Основное уравнение прыжка с учетом самоаэрации потока и захвата воздуха прыжком будет иметь вид:

$$Q(Q + Q_a')/(g\omega_1) + \omega_1 y_1 = Q(Q + Q_a' + Q_a)/(g\omega_2) + \\ + (h'' - 0{,}5d + h_{вак})\,\omega_2. \qquad (7.134)$$

С помощью уравнения (7.134) можно определять местоположение гидравлического прыжка и выполнять расчет сопряжения бьефов.

По мере затопления прыжка его способность захватывать воздух уменьшается, β при этом определяют по формуле В. А. Храпсковского:

$$\beta_з = \beta_c k_з/(16k_з - 15), \qquad (7.135)$$

где $\beta_з = Q_a/Q$ — отношение расхода воздуха к расходу воды для затопления прыжка; β_c — то же, для критической формы сопряжения прыжка в сжатом сечении; $k_з = (h'' + A)/h_{сж}$ — коэффициент затопления прыжка.

Пространственный гидравлический прыжок в непризматическом русле. В случае плавно расширяющегося русла, когда в первом сечении поток выходит из криволинейного в плане отверстия, по предложению О. Ф. Васильева h' и h'' определяют из уравнения:

$$2\alpha_0 Q^2/(g\theta^2 r_1 h') + r_1 h'^2 = 2\alpha_0 Q^2/[g\theta^2(l_п' + r_1)\,h''] + \\ + (l_п' + r_1)\,h''^2 - 0{,}3\,(h'^2 + h'h'' + h''^2)\,l_п'; \\ l_п' = l_п/(1 + 0{,}052 l_п/r_1), \qquad (7.136)$$

где r_1 — радиус, соответствующий первой сопряженной глубине; θ — угол расширения русла в плане; $l_п'$, $l_п$ — длина прыжка соответственно в непризматическом и призматическом русле.

В начальном сечении прыжка число Фруда равно:

$$Fr_1 = \alpha Q^2/(gh'^3\theta^2 r_1^2). \qquad (7.137)$$

Значения α и α_0 в формулах (7.136) и (7.137) можно приближенно принимать равными 1.

Для расчета прыжка в прямоугольном суживающемся русле, за которым следует русло с большим уклоном дна или уступ (например, вход в быстроток после водослива), рекомендуются формулы В. А. Шевченко:

$$l_п' = 7{,}2h'\sqrt{Fr_1}/(1 - 0{,}8Э_1\sqrt{Fr_1}\,\mathrm{tg}\,0{,}5\theta/B_1), \qquad (7.138)$$

где $Э_1$, B_1, Fr_1 — удельная энергия, ширина русла и число Фруда в сечении перед прыжком; θ — угол сужения русла;

$$b_2 = B_1 - 2l_п'\,\mathrm{tg}\,0{,}5\theta; \qquad (7.139)$$

$$(1 + 2\psi_2)\,\zeta_1^3 + (1 - \psi_2)\,\zeta_1^2 - (2 + \psi_2 + 6\,Fr_1)\,\zeta_1 + 6\,Fr_1/\psi_2 = 0; \qquad (7.140)$$

$$\psi_2 = b_2/B_1, \quad \zeta = h''/h', \qquad (7.140)$$

где b — ширина русла в конце прыжка.

Глава 8
ГИДРАВЛИКА ВОДОСЛИВОВ И СООРУЖЕНИЙ

8.1. ВОДОСЛИВЫ

Водосливы с острым ребром (тонкой стенкой).

Прямоугольные водосливы. Основные формулы для их расчета следующие:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g}\, H^{3/2}, \tag{8.1}$$

$$Q = mb \sqrt{2g}\, H_0^{3/2}, \tag{8.2}$$

где m, m_0 — коэффициенты расхода, соответственно не учитывающий скорость подхода и учитывающий ее; $H_0 = H + \alpha v_0^2/(2g)$ — полный напор на водосливе; b — ширина водослива; v_0 — скорость подхода.

Коэффициенты расхода можно определить:

по формулам Базена для совершенных водосливов (незатопленных без бокового сжатия)

$$m_0 = (0{,}405 + 0{,}0027/H)\,[1 + 0{,}55H^2/(H+p)^2]; \tag{8.3}$$

$$m_0 = 0{,}405 + 0{,}0027/H \text{ (без учета скорости подхода)}; \tag{8.4}$$

при $p \geqslant 0{,}5H$ и $H \geqslant 0{,}1$ м [24]

$$m_0 = 0{,}402 + 0{,}054H/p; \tag{8.5}$$

по формуле Элги для водосливов незатопленных с боковым сжатием

$$m_0 = [0{,}405 + 0{,}0027/H - 0{,}03\,(B-b)/B]\,\{1 + 0{,}55H^2b^2/[(H+p)^2B^2]\}. \tag{8.6}$$

где B — ширина подводящего канала.

Значение коэффициента расхода при наклоне водослива ($m_{нак}$), для косых ($m_{кос}$) и криволинейных ($m_{кр}$) водосливов находят, умножая значение m_0 на соответствующие коэффициенты $k_{нак}$, $k_{кос}$ и $k_{кр} = 1 - H/(pB)$ (табл. 8.1, 8.2, 8.3).

8.1. Значения коэффициента $k_{нак}$ в зависимости от угла наклона водослива [13]

Угол наклона	135°	123°40′	108°30′	90°	71°30′	56°20′	43°	26°40′	14°10′
$k_{нак}$	0,93	0,94	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,12	1,09

8.2. Значения коэффициента $k_{кос}$ в зависимости от угла α между осью потока и водосливом

H/B	α, °			
	15	30	45	60
0,2	0,79	0,80	0,94	0,97
0,4	0,61	0,79	0,87	0,95
0,6	0,49	0,71	0,83	0,93
0,8	0,40	0,65	0,79	0,92
1,0	0,33	0,61	0,76	0,91
1,2	—	0,57	0,74	0,90

8.3. Значения B [13]

B	α, °				
	15	30	45	60	65
Для широких каналов	1,4	2,8	5,0	9,1	26,3
Для узких каналов	1,2	2,1	3,6	7,7	26,3

При подтоплении водослива коэффициент расхода равен [24]:

$$m_э = k_э m_0; \tag{8.7}$$

$$k_э = 1{,}05\,(1 + 0{,}2h_п/p)\,\sqrt[2]{z/H},$$

где $h_п$ — высота подтопления, равная превышению уровня воды в нижнем бьефе над нижней точкой водослива; z — разность отметок уровней воды в верхнем и нижнем бьефах. При $0{,}15 \leqslant H/p < 0{,}25$ и $0 \leqslant h_п/p \leqslant 0{,}03$ $k_э$ необходимо умножить на 0,96.

Для полигональных в плане водосливов расход воды равен [13]:

$$Q = m_0\,(\Sigma b_{пр} + k_{кос}\Sigma b_{кос})\,\sqrt{2g}\,H^{1,5}; \tag{8.8}$$

$$k_{кос} = 1 - \psi H/p,$$

где $\Sigma b_{пр}$, $\Sigma b_{кос}$ — общая длина соответственно прямых и косых участков порога водослива; ψ — коэффициент (табл. 8.4).

8.4. Значения ψ в зависимости от α

α°	30	45	60	75	90
ψ	0,36	0,24	0,12	0,04	0,00

Треугольные водосливы. Расход воды для них равен:

$$Q = m_0 \operatorname{tg} 0{,}5\theta\,\sqrt{2g}\,H^{2,5} = m_{0\,(тр)}\,\sqrt{2g}\,H^{2,5}, \tag{8.9}$$

где $m_{0\,(тр)} = m_0 \operatorname{tg} 0{,}5\theta$.

Согласно исследованиям Томпсона, для водослива с $\theta = 90°$ при $H = 0{,}05 \ldots 0{,}25$ м $m_{0\,(тр)} = 0{,}316$, тогда

$$Q = 1{,}4H^{2,5} \tag{8.10}$$

Кингом предложена для этого же случая уточненная формула:

$$Q = 1{,}343H^{2{,}47}. \qquad (8.11)$$

При $22° \leqslant \theta \leqslant 118°$, согласно Ф. Гриву, расход равен:

$$Q = 1{,}331\,(\mathrm{tg}\,\theta)^{0{,}995}H^{2{,}47}. \qquad (8.12)$$

Трапецеидальные водосливы. Расход можно определить по формуле:

$$Q = m_0\,(b + 0{,}8H\,\mathrm{tg}\,\theta)\,\sqrt{2g}\,H^{1{,}5}, \qquad (8.13)$$

где θ — угол наклона боковых граней водослива.

Согласно исследованиям Чиполетти, при $\mathrm{tg}\,\theta = 0{,}25$ значение m_0 не меняется, причем для этого случая $m_0 \approx 0{,}42$, тогда

$$Q = 1{,}86bH^{3/2}. \qquad (8.14)$$

Затопление водослива учитывают коэффициентом $k_з$ (табл. 8.5), то есть $m_з = k_з m_0$.

8.5. Значения $k_з$ в зависимости от $h_п/H$ (по Л. А. Валентини)

$h_п/H$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$k_з$	0,99	0,97	0,94	0,9	0,86	0,8	0,73	0,64	0,52

Круговые водосливы. Расход определяют по формуле К. Сандена и А. Штрауса:

$$Q = \mu Q_1 d^{2{,}5}, \qquad (8.15)$$

где μ — коэффициент расхода; Q_1 — условный расход при $d = 0{,}1$ м (табл. 8.6); $a = H/d$ — степень заполнения отверстия водослива; d — диаметр отверстия.

8.6. Значения Q_1 в зависимости от a (по А. Штаусу)

a	Q_1, л/с	a	Q_1, л/с	a	Q_1, л/с	a	Q_1, л/с
0,05	0,027	0,03	0,912	0,55	2,821	0,80	5,372
0,10	0,107	0,35	1,223	0,60	3,294	0,85	5,913
0,15	0,238	0,40	1,571	0,65	3,790	0,90	6,451
0,20	0,417	0,45	1,957	0,70	4,305	0,95	7,016
0,25	0,643	0,50	2,373	0,75	4,834	1,00	7,471

Для расчета μ используют формулы:

$$\mu = 0{,}555 + d/110H + 0{,}041H/d; \qquad (8.16)$$

при совершенном сжатии (по Ф. Л. Поповьян)

$$\mu = 0{,}378 + 0{,}137H/d + 0{,}044/(H/d); \qquad (8.17)$$

при неполном сжатии (по Ф. Л. Поповьян)

$$\mu = 0{,}435 + 0{,}101H/d + 0{,}036/(H/d). \qquad (8.18)$$

Параболические водосливы. Уравнение расхода для выреза по параболе $x^2=2py$ имеет вид:

$$Q=m_0\sqrt{2gp}\,H^2. \qquad (8.19)$$

Исследованиями Ф. Грива установлено, что при 0,25 см $\leqslant p \leqslant$ 5 см и 3 см $< H <$ 60 см значения m_0 достаточно устойчивы. Для каждого водослива $M=m_0\sqrt{2gp}$ постоянная, поэтому

$$Q=MH^2, \qquad (8.20)$$

где $M=2{,}768\sqrt{p}$ (по опытам Ф.Грива).

Водосливы практического профиля. Расход можно определять по формуле Н. Н. Павловского:

$$Q=mb\sqrt{2g}\,H_{\text{п}}^{1,5}k_{\text{н}}k_{\text{ф}}k_{\text{сж}}k_{\text{з}}, \qquad (8.21)$$

где $k_{\text{н}}$, $k_{\text{ф}}$, $k_{\text{сж}}$, $k_{\text{з}}$ — коэффициенты соответственно полноты напора, формы водослива, бокового сжатия и затопления (для незатопленного водослива, водосливов вакуумного профиля эллиптического очертания, а также для безвакуумного водослива Кригера—Офицерова при $h_{\text{п}}/H_{\text{п}} \leqslant 0$ $k_{\text{з}}=1$; для других случаев значения $k_{\text{з}}$ приведены в таблице 8.7 [24]).

Коэффициент бокового сжатия определяют (формула Френсиса — Кригера):

$$k_{\text{сж}}=1-0{,}1nk_{\text{фор}}H_0/b, \qquad (8.22)$$

где n — число боковых сжатий, при одном отверстии $n=2$; $k_{\text{фор}}$ — коэффициент формы береговых устоев и промежуточных быков водослива; для прямоугольной $k_{\text{фор}}=1$, круглой и под углом 90° $k_{\text{фор}}=0{,}7$, параболической $k_{\text{фор}}=0{,}4$.

Для водосливов прямоугольного сечения $k_{\text{н}}=0{,}7+0{,}185H/\delta$, $k_{\text{ф}}=1+r/H$ (δ — толщина водослива; r — радиус гребня).

Коэффициент расхода для водослива прямоугольного профиля при $H \leqslant p < 4H$ и $0{,}6H < \delta \leqslant H$ равен:

$$m=0{,}42k_{\text{н}}. \qquad (8.23)$$

Если входное ребро закругленное, например $r=(0{,}1\ldots0{,}2)\,\delta$, то $k_{\text{ф}}=1{,}05$, а коэффициент расхода

$$m=0{,}44k_{\text{н}}. \qquad (8.24)$$

8.7. Значения $k_{\text{з}}$ в зависимости от типа водослива и $h_{\text{п}}/H_{\text{п}}$

$h_{\text{п}}/H_{\text{п}}$	Вакуумный профиль	Безвакуумный нормального очертания	Безвакуумный с уширенным гребнем
0,0	0,98	—	—
0,2	0,94	0,98	—
0,4	0,86	0,96	—
0,6	0,74	0,93	—
0,8	0,53	0,79	0,96
0,9	0,40	0,60	0,78

При наклоне верхней грани в сторону верхнего бьефа значения m вычисляют по формулам (8.23) и (8.24) соответственно при

$s = \operatorname{ctg} \alpha < 10$ и $s = 5 \ldots 10$ (α — угол между гранью и горизонтом); в сторону нижнего — по формуле (8.23) при $s = 20$.

В случае наклона в обе стороны m принимают как для водосливов с наклонной гранью в сторону верхнего бьефа или же используют следующие формулы [13]:

низкие водосливы при $0{,}4 \leqslant \delta/H \leqslant 2{,}5$:

$$m = \delta/[(B\delta/H - C)\,H], \tag{8.25}$$

где B, C — параметры (табл. 8.8);

водосливы средней высоты при $2 < p/H < 3$, $s = s' = 1 \ldots 2$, $0{,}5 \leqslant \delta/H \leqslant 2$ (при $\delta/H < 0{,}5$ $m = 0{,}445$):

$$m = 1/\sqrt{4{,}5 + 2\delta/H}; \tag{8.26}$$

высокие водосливы с пологими откосами $p/H > 3$, $s = s' = 1 \ldots 2$, $0{,}5 \leqslant \delta/H \leqslant 2$ (при $\delta/H < 0{,}5$ $m = 0{,}445$):

$$m = 1/\sqrt{4{,}2 + 2{,}5\delta/H}. \tag{8.27}$$

Значения m для низких водосливов можно находить по данным таблицы 8.9 в зависимости от δ/H и $s' = \operatorname{ctg} \alpha'$ (α' — угол наклона низовой грани к горизонту). При округлении входного ребра коэффициент расхода увеличивают на 5 ... 8%.

8.8. Значения B и C в зависимости от $s = \operatorname{ctg} \alpha$

s	1	2	3	4	5	10
B	2,90	2,81	2,79	—	2,77	2,72
C	0,27	0,21	0,20	—	0,17	0,09

8.9. Значения m для низких водосливов

s'	δ/H_0						
	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5
1	0,460	0,415	0,395	0,37	0,350	0,34	0,335
2	0,445	0,42	0,40	0,375	0,345	0,33	0,330
3	0,420	0,40	0,38	0,36	0,335	0,325	0,325
5	—	0,38	0,365	0,35	—	—	—
10	—	0,35	—	—	—	—	—

Водосливы криволинейных очертаний следует рассчитывать по данным [13, 24].

Для плавно округленного входа и вертикальной напорной грани при $p/H \geqslant 2$ рекомендуется формула А. Р. Березинского:

$$m = 0{,}36 + 0{,}1\,(2{,}5 - \delta/H)/(1 + 2\delta/H). \tag{8.28}$$

Водосливы с широким порогом. Для неподтопленного водослива расход определяют по формуле [13]:

$$Q = \varphi h b \sqrt{2g\,(H_0 - h)}, \tag{8.29}$$

или

$$Q = mb\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \qquad (8.30)$$

где φ — коэффициент скорости (табл. 8.10).

В том случае, когда площадь поперечного сечения потока в сечении, где измеряется напор H, больше $4bH$, скоростью подхода можно пренебречь, то есть $H_0 = H$.

Для незатопленных водосливов при отсутствии бокового сжатия значения m можно рассчитывать по формулам А. Р. Березинского соответственно для прямоугольного и закругленного входного ребра ($r/H \geqslant 0{,}2$):

$$m = 0{,}32 + 0{,}01\,(3 - p/H)/(0{,}46 - 0{,}75p/H); \qquad (8.31)$$

$$m = 0{,}36 + 0{,}01\,(3 - p/H)/(1{,}2 + 1{,}5p/H). \qquad (8.32)$$

При боковом сжатии и плавном входе в виде сходящихся под некоторым углом (менее 25°) вертикальных стенок (сопряжение по типу раструба), а также других очертаний (закругление в плане, сопряжение по типу косых плоскостей) значение m принимают равным 0,35 ... 0,36, при неплавном входе (сопряжение по типу обратных стенок) — согласно исследованиям В. В. Смыслова:

$$m = 0{,}3 + 0{,}08/(1 + p_1/H), \qquad (8.33)$$

где p_1 — высота порога со стороны верхнего бьефа; H — напор на пороге без учета скорости подхода.

8.10. Значения φ в зависимости от m (по Д. И. Кумину)

m	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38
φ	0,943	0,956	0,97	0,983	0,996

Подтопление водосливов с широким порогом происходит при $h_п/H > 0{,}8$. При $0{,}8 < h_п/H < 0{,}94$ степень подтопления незначительная, расход в этом случае можно определить по формуле:

$$Q = mbk_з\sqrt{2g}\,H_0^{3/2}, \qquad (8.34)$$

где $k_з$ — коэффициент затопления (табл. 8.11);

при сильном затоплении — $h_п/H > 0{,}94$

$$Q = ab\varphi_п h_п\sqrt{2g\,(H_0 - h_п)}, \qquad (8.35)$$

где a — коэффициент, учитывающий перепад восстановления $z_{вс}$, значения a в зависимости от параметра $\nu_н = bh_п/[B\,(h_п + p_н)$ приведены в таблице 8.12; $\varphi_п$ — коэффициент скорости подтопленного водослива; при плавном входе $\varphi_п = 0{,}96$ ... 0,97, при неплавном — на 5 ... 10% меньше значения φ для незатопленного водослива.

8.11. Значения $k_з$ (по В. В. Смыслову)

$h_п/H_0$	0,82	0,86	0,90	0,92	0,94
$k_з$	1,00	0,97	0,92	0,84	0,73

8.12. Значения a [13]

Вход	$v_н$			
	0	0,3	0,5	0,7
Неплавный	1,00	1,15	1,30	1,2
Плавный	1,30	1,50	1,45	1,3

Боковые водосливы. Для определения расхода незатопленных боковых водосливов в прямоугольном русле Г. А. Симоняном предложена формула:

$$Q = m_6 l \sqrt{2g}\, H_2^{3/2}, \tag{8.36}$$

где l — длина ребра водослива (ширина сливного фронта); H_2 — напор над ребром водослива в его конце.

Для нахождения m_6 можно использовать следующие эмпирические формулы соответственно для водосливов с острым ребром и практического профиля:

$$m_6 = 0{,}25 + 0{,}167\,(H_1/H_2 - \sqrt{\Pi_{к_2}}); \tag{8.37}$$

$$m_6 = 0{,}287 + 0{,}169\,(H_1/H_2 - \sqrt{\Pi_{к_2}}), \tag{8.38}$$

где $\Pi_{к_2} = v_2^2/(gh_2)$ — параметр кинетичности в отводящем канале; H_1 — напор над ребром водослива во входном сечении.

Для боковых прямоугольных водосливов с острым ребром расход можно определить по формуле:

$$Q = 0{,}4b\sqrt{2g}\, H_{ср}^{3/2}, \tag{8.39}$$

где $H_{ср}$ — средний напор на водосливе.

Стандартные водосливы. Уравнение расхода для общего случая имеет вид [69]:

$$Q = A_п m b_{пр} \sqrt{2g} H^n, \tag{8.40}$$

где $A_п$ — постоянная (для прямоугольного сечения $n = 1{,}5$, $A_п = 2/3$; треугольного $n = 2{,}5$, $A_п = 8/15$; для водослива с широким порогом $n = 1{,}5$, $A_п = 2\sqrt{3}/3$); $b_{пр}$ — приведенная ширина.

Для стабильной работы стандартных водосливов в подводящем канале должны быть соблюдены следующие условия: $\mathrm{Fr} \leqslant 0{,}6$ для водосливов с острым ребром в общем случае; $\mathrm{Fr} \leqslant 0{,}7$ — для водосливов прямоугольного и треугольного сечения $\mathrm{Fr} = Q/(\omega_к \sqrt{gh_0})$; $\omega_к$ — площадь поперечного сечения канала, h_0 — нормальная глубина).

Для водосливов с острым ребром расход равен:

треугольное сечение

$$Q = 2{,}361 m\, \mathrm{tg}^{0,5}\, \theta H_{пр}^{2,5}, \tag{8.41}$$

где θ — центральный угол; $H_{пр} = H + k_н$, — приведенный напор, то есть напор над вершиной центрального угла в створе измерения уровня; $k_н$ — поправка на вязкость и поверхностное натяжение жидкости (табл. 8.14); значения m приведены в таблице 8.13;

прямоугольное сечение

$$Q = 2{,}953 m b_{пр} H_{пр}^{1,5}, \tag{8.42}$$

$$m = m_t + a' H/p, \tag{8.43}$$

где $b_{пр}=b+k_в$ — приведенная ширина водослива, значения $k_в$ приведены в таблице 8.15; $H_{пр}=H_0+k_н$ — приведенный напор; $k_н=1$ мм; a' — поправочный множитель (значения a' и m_l приведены в таблице 8.16);

трапецеидальное сечение

$\operatorname{tg}\theta=0{,}25$

$$Q=1{,}86bH^{1,5}; \tag{8.44}$$

$\operatorname{tg}\theta=1$

$$Q=1{,}86m_ф bH^{1,5}; \tag{8.45}$$

$$m_ф=(b+H)/(b+0{,}25H). \tag{8.46}$$

8.13. Значения m для треугольных водосливов при $p/B\leqslant 0{,}2$ и $H/p\leqslant 0{,}8$

$\theta°$	22,5	45	60	90	120
m	0,592	0,580	0,577	0,578	0,587

8.14. Значения $k_н$

$\theta°$	22,5	45	70	90	100	120
$k_н$	2,75	1,50	1,00	0,85	0,80	0,85

8.15. Значения $k_в$

b/B	$k_в$ мм	b/B	$k_в$ мм
0,1	2,5	0,6	3,5
0,2	2,5	0,7	4,0
0,3	2,5	0,8	4,2
0,4	3,0	0,9	3,5
0,5	3,0	1,0	—1,0

Примечание. B, b — ширина соответственно подводящего русла и водослива.

8.16. Значения m_l и a'

b/B	m_l	a'	b/B	m_l	a'
1,0	0,602	0,075	0,5	0,592	0,012
0,9	0,598	0,064	0,4	0,591	0,006
0,8	0,596	0,045	0,3	0,590	0,002
0,7	0,594	0,030	0,2	0,588	0,002
0,6	0,593	0,018	0,1	0,587	0,002

Для водосливов с широким порогом расход равен:

треугольный профиль

$$Q = 1{,}96 m_v b H^{1,5}; \tag{8.47}$$

прямоугольный профиль

$$Q = 2 m_l m_v b \sqrt{2g} H^{1,5}/(3\sqrt{3}). \tag{8.48}$$

При $0{,}1 \leqslant H/l \leqslant 0{,}4$, $0{,}15 \leqslant H/p \leqslant 0{,}6$ (l — длина порога водослива) $m_l = 0{,}864$, а при $0{,}4 \leqslant H/l \leqslant 1{,}6$ и $H/p < 0{,}6$ $m_l = 0{,}191 H/l + 0{,}782$. При $H/p < 0{,}6$ $m_v = 1$.

8.17. Значения m_v для водосливов с широким порогом треугольного профиля

$H/(H+p)$	p, м								
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	1,004	1,004	1,005	1,006	1,007	1,008	1,009	1,010	1,011
0,2	1,013	1,015	1,016	1,017	1,019	1,021	1,022	1,024	1,026
0,3	1,030	1,032	1,034	1,037	1,039	1,042	1,044	1,047	1,050
0,4	1,056	1,059	1,062	1,065	1,069	1,072	1,076	1,080	1,084
0,5	1,093	1,097	1,102	1,107	1,112	1,117	1,123	1,129	1,135
0,6	1,141	1,154	1,162	1,169	1,177	1,185	1,194	1,204	1,214
0,7	1,234	1,246	1,258	1,272	1,286	1,302	—	—	—

8.18. Значения m_v для водосливов с широким порогом прямоугольного профиля при $H/p > 0{,}6$ и $H/l < 0{,}85$

H/p	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
m_v	1,011	1,023	1,038	1,054	1,064	1,075	1,087	1,098	1,11

Гидравлический расчет стандартных водосливов сводится к нахождению ширины гребня по заданному расходу и принятому верхнему пределу измерения напора при условии обеспечения свободного незатопленного истечения и спокойного режима в подводящем канале [69].

Полигональные водосливы. Ломаные в плане водосливы весьма перспективны, поскольку позволяют при малой длине лобового водосливного фронта обеспечить высокую пропускную способность водослива.

Для расчета таких водосливов с острым ребром (рис. 8.1) можно рекомендовать зависимости, полученные П. М. Степановым:

$$Q = \sigma_ф \varepsilon m_0 L \sqrt{2qH^{1,5}}, \tag{8.49}$$

$$m_п = m_0 \varepsilon \tag{8.50}$$

$$H = h_в - p_в,$$

где m_0 — коэффициент расхода водослива с учетом скорости подхода, m_0 определяют по формуле (8.5); $\sigma_ф$ — коэффициент, учитывающий форму водослива в плане (значения $\sigma_ф$, вычисленные по зависимостям, полученным П. М. Степановым в результате обработки опытных данных, приведены в таблице 8.19); ε — коэффициент бокового сжа-

8.19. Значения $\sigma_ф$

Форма водослива	H/p			
	0,1	0,15	0,2	0,25
Прямоугольная	0,907/0,905	0,893/0,926	0,878/0,933	0,865/0,938
С закругленными углами	0,999/0,91	0,983/0,934	0,967/0,948	0,952/0,951
С циркульной лобовой стенкой	1,034/1,02	1,018/1,044	1,001/1,053	0,986/1,056

Примечание. 1. В числителе — для внешнего
2. Приведенные значения $\sigma_ф$

тия, которое возникает при внешнем переливе; $L = 2l + b$ — длина водосливного фронта; $h_в$ — глубина перед водосливом; $p_в$ — высота водослива; l, b — длина соответственно боковой и фронтальной водосливной стенки.

Согласно результатам исследований, длина боковой водосливной стенки при внешнем переливе не влияет на произведение коэффициентов $m_0\sigma_ф\varepsilon$, при внутреннем — на $m_0\sigma_ф$.

8.2. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ

В зависимости от формы сопряжения потоков в нижнем бьефе сооружений там может наблюдаться либо донный режим, либо поверхностный. Наличие уступа в нижнем бьефе способствует возникновению поверхностного режима.

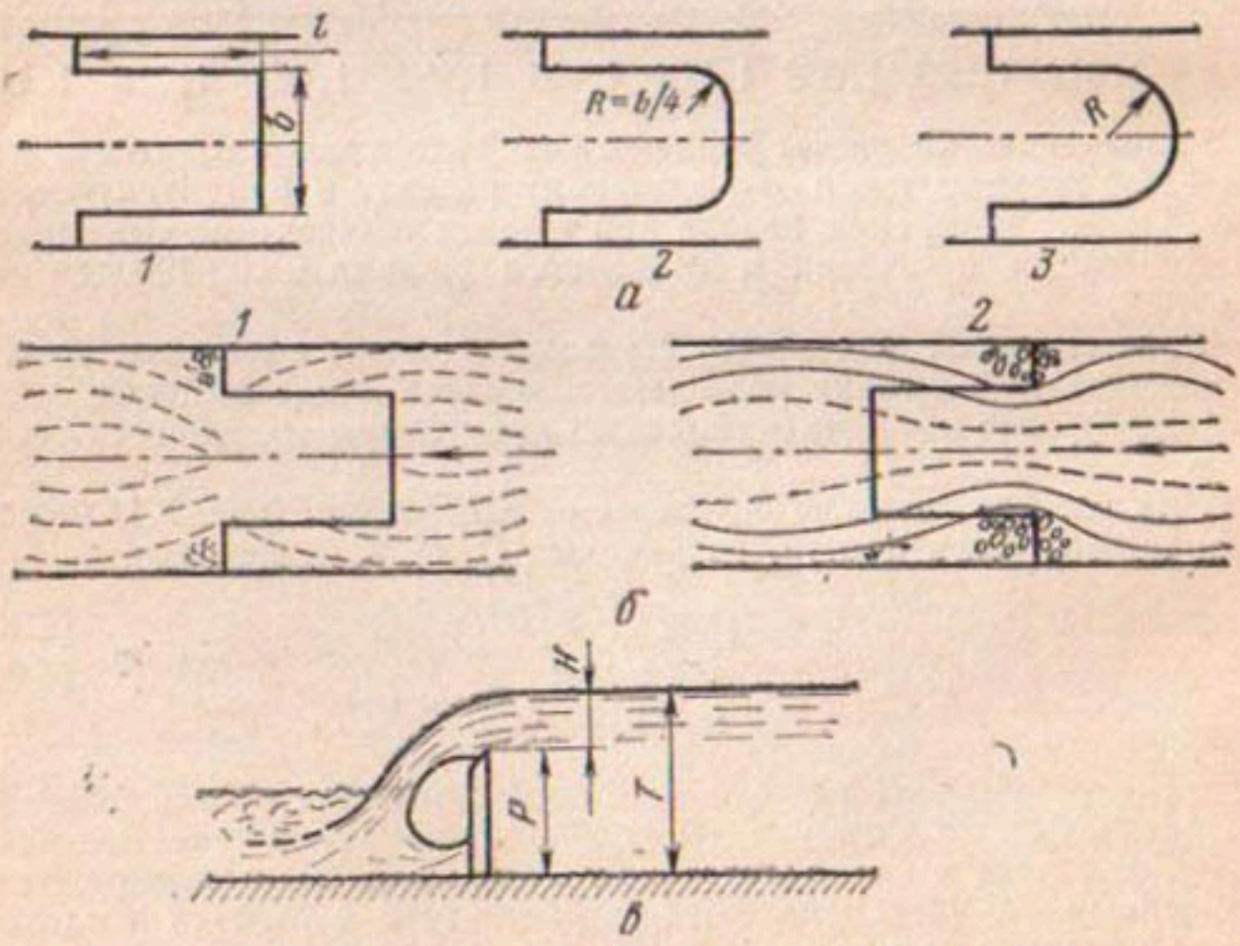


Рис. 8.1. Схемы полигональных в плане водосливов

в зависимости от H/p

H/p				
0,30	0,35	0,4	0,45	0,5
0,853/0,94	0,841/0,936	0,832/0,933	0,821/0,928	0,81/0,924
0,939/0,952	0,926/0,949	0,916/0,947	0,904/0,942	0,89/0,937
0,973/1,057	0,96/1,054	0,948/1,052	0,936/1,046	0,92/1,041

перелива, в знаменателе — для внутреннего.
справедливы при $H/p=0,1 \ldots 0,55$ и $l/b=0,5 \ldots 3$.

Беспрыжковое сопряжение будет наблюдаться только при уклоне дна за сооружением больше критического и нормальной глубине $h_0 \leqslant h_{кр}$. Донный режим обеспечивается при отогнанном прыжке, затопленном и прыжке в критическом состоянии.

Струя, падающая с водослива или выходящая из-под затвора, образует у подошвы водослива или же за затвором наименьшую глубину в нижнем бьефе — сжатую h_c. Если поток в отводящем русле находится в спокойном состоянии, то сопряжение будет происходить в виде прыжка. При $h_c'' > h_0$ прыжок будет отогнанный; $h_c'=h_0$ — прыжок расположится непосредственно у сжатого сечения (критическая форма сопряжения); при $h_c'' > h_0$ образуется затопленный прыжок.

Сопряжения бьефов с донным режимом. Глубину в сжатом сечении можно определить из уравнения:

$$T_0=h_c+\alpha Q^2/(2g\omega_c\varphi^2), \qquad (8.51)$$

где ω_c — площадь сжатого сечения потока; $T_0=p+H+\alpha v_0^2/(2g)$ — удельная энергия потока в верхнем бьефе относительно дна нижнего бьефа; α — коэффициент кинетической энергии, $\alpha=1 \ldots 1,1$; p — высота водослива относительно дна нижнего бьефа; H — напор на водосливе; v_0 — скорость в нижнем бьефе; φ — коэффициент скорости (табл. 8.20, 8.21).

8.20. Значения φ для криволинейных водосливов практического профиля в зависимости от H/p
(по данным Г. П. Скребкова)

H/p	1,5	1	0,5	0,3	0,16	0,1
φ	0,96	0,98	0,96	0,93	0,9	0,88

8.21. Значения φ для различных схем сооружений
(по Н. Н. Павловскому)

Схема сооружения	φ
Истечение из отверстия непосредственно в атмосферу (без слива по поверхности водослива)	1,00...0,97
Истечение из донных отверстий	1,00...0,95
Перепады без затворов	1,00
Перепады с затворами	1,00...0,97
Водосливы плавных форм с затворами	0,95...0,85
Водосливы (полигональные и др.)	0,90...0,80
Водосливы с широким порогом	0,95...0,85

Уравнение (8.51) решают, пользуясь графоаналитическими или табличными методами, или же путем последовательных приближений [13]. Определяют скорость и глубину в сжатом сечении в первом приближении: $v_{c_1}=\varphi\sqrt{2gT_0}$, $h_{c_1}=-b/(2m)+\sqrt{b^2/(4m^2)+Q/(mv_{c_1})}$, затем во втором приближении:

$$v_{c_2}=\varphi\sqrt{2g\,(T_0-h_{c_1})},$$
$$h_{c_2}=-b/(2m)+\sqrt{b^2/(4m^2)+Q/(mv_{c_2})}.$$

Расчет ведут аналогично в третьем и последующих приближениях до тех пор, пока значения h_c в двух последовательных приближениях практически не будут одинаковыми.

Если ширина русла в нижнем бьефе больше ширины отверстия, через которое поток поступает в него, сопряжение бьефов рассматривается в пространственных условиях. При переходе от бурного состояния к спокойному возникает пространственный гидравлический прыжок, уравнение которого, по данным М. З. Абрамова, имеет вид:

$$h''/h'=A\left(\sqrt{1+Б\,\mathrm{Fr}_1}-1\right), \qquad (8.52)$$

где h'' и h' — сопряженные глубины прыжка; A, $Б$ — коэффициенты (табл. 8.22).

8.22. Значения A и $Б$

B/b	6	5	4	3	1
A	0,25	0,27	0,3	0,34	0,5
$Б$	12,00	11,60	11,1	10,40	8,0

Расстояние от выходного сечения до сечения полного растекания определяют по формуле Г. А. Лилицкого:

$$l=(0{,}15\,\mathrm{Fr}_1+0{,}27)\,(B-b). \qquad (8.53)$$

При свободном растекании возможно образование косых прыжков. Расстояние от сечения с полным растеканием до точки, где сходятся косые прыжки, равно:

$$l=B/(2\,\mathrm{tg}\,\beta), \qquad (8.54)$$

где β — угол отклонения косого гидравлического прыжка.

Сопряжение бьефов с поверхностным режимом. Этот режим сопряжения наблюдается ниже водосливных плотин при устройстве водослива с горизонтальным или приподнятым носком и уступом в нижнем бьефе.

Режим сопряжения без поверхностного вальца — первый критический, при возникновении поверхности струи вальца — второй критический режим.

Для первого режима (по Д. И. Кумину):

$$\zeta_1 = 1{,}74\eta\,(\varphi_0 - 0{,}49\beta - 1{,}30) + 1{,}78\beta + 0.22; \qquad (8.55)$$

$$\zeta_1 = 1{,}74\eta\,(\zeta_0 - 1{,}79) + 2 \text{ (при } \beta = 1) \qquad (8.56)$$

$$\zeta_1 = (h_{01} + p)/h_{кр};\ \zeta_0 = (T_0 - p)/h_{кр};\ \eta = p/d,\ \beta = b/B,$$

где h_{01} — нормальная глубина, соответствующая первому критическому режиму; p — высота уступа; d — превышение гребня водослива над сливным ребром уступа; b, B — ширина водослива и отводящего русла.

Для второго критического режима:

$$\zeta = [1{,}96\eta + 0{,}1\,(1-\beta)\,(2-\eta)]\,(\zeta_0 - 0{,}45\beta - 1{,}3) + 1{,}9\beta + 0{,}4;$$

$$\zeta_2 = 1{,}96\eta\,(\zeta_0 - 1{,}75) + 2{,}3; \qquad (8.57)$$

$$\zeta_2 = (h_{02} + p)/h_{кр},$$

где h_{02} — нормальная глубина, соответствующая второму критическому режиму.

Минимальное значение высоты уступа, необходимое для образования поверхностного прыжка, равно (по М. Ф. Складневу):

$$a_{min} = 0{,}4h_{кр}\sqrt{T_0/h_{кр} - 1{,}5}. \qquad (8.58)$$

Длина донного водоворота в незатопленном поверхностном прыжке (по М. Ф. Складневу) равна:

при $h = (0{,}464 - 1)\,h_{кр}$

$$l_1 = 0{,}28\,(h_0 - h)\,[33{,}2 - (h_{кр}/h)^3]; \qquad (8.59)$$

$h < 0{,}464h_{кр}$

$$l_1 = 0{,}015\,(h_0 - h)\,[420 + (h_{кр}/h)^3, \qquad (8.60)$$

где h_0 — нормальная глубина.

В затопленном поверхностном прыжке длина донного и поверхностного водоворота соответственно равна:

$$l_1 = (h_0 - h)\,(6{,}6 - 1/\mathrm{Fr}_1 - 0{,}7h_0/h_{пр_2}); \qquad (8.61)$$

$$l_2 = 0{,}3\,(h_0 - h)\,(1 - 1/\mathrm{Fr}_1 + 2h_0/h_{пр_2}), \qquad (8.62)$$

где $h_{пр_2}$ — вторая сопряженная глубина.

Длина после водоворотного участка в поверхностном прыжке:

$$l_{п.\,в} = (1{,}5 - 2)\,l_1. \qquad (8.63)$$

Для определения условий образования поверхностного прыжка, в сооружениях, заканчивающихся в нижнем бьефе уступом, П. М. Степановым предложен ряд формул. При угле наклона носка к линии горизонта 0...15° и $15 < \mathrm{Fr} < 50$ минимальная высота уступа, при которой может образоваться поверхностный прыжок, равна:

$$a_{min} = \left(4{,}05\sqrt[3]{\mathrm{Fr}_1} - \eta\right) h_н. \qquad (8.64)$$

или

$$a_{\min} = 0{,}54 h_{\text{н}} \, \mathrm{Fr}^{0{,}735} / \cos^3 \alpha, \qquad (8.65)$$

$$\eta = -0{,}4\alpha + 8{,}4,$$

где α — угол наклона свободной поверхности струи в створе уступа, равный углу наклона носка; Fr_1 — число Фруда, соответствующее глубине струи на уступе $h_{\text{н}}$.

Поверхностный прыжок образуется при повышении уровней в нижнем бьефе, если $h_0 \geqslant h_{\text{гр}_1}$:

$$h_{\text{гр}_1} = 1{,}96 \, \mathrm{Fr}^{0{,}23} \sqrt{h_{\text{н}} a}. \qquad (8.66)$$

При снижении уровня в нижнем бьефе поверхностный прыжок перейдет в донный при $h_0 < h_{\text{гр}_2}$:

$$h_{\text{гр}_2} = 1{,}82 \, \mathrm{Fr}^{0{,}22} \sqrt{h_{\text{н}} a}, \qquad (8.67)$$

где $h_{\text{н}}$ — глубина на сходе с носка; Fr — число Фруда, соответствующее $h_{\text{н}}$; a — высота уступа.

Если угол наклона носка или уступа к линии горизонта в диапазоне $\alpha = 2 \ldots 7°$ и $a/h = 4 \ldots 10$, граничные глубины определяют по зависимостям:

$$h_{\text{гр}_1} = 1{,}69 \, \mathrm{Fr}^{0{,}265} \sqrt{h_{\text{н}} a}; \qquad (8.68)$$

$$h_{\text{гр}_2} = 1{,}504 \, \mathrm{Fr}^{0{,}275} \sqrt{h_{\text{н}} a}. \qquad (8.69)$$

Сопряжение бьефов в напорной горизонтальной трубе. Рассмотрим случай втекания из-под затвора в цилиндрическую трубу круглого сечения радиусом r по методике М. М. Скибы.

При определении сопряженных глубин в круговых сечениях при их частичном наполнении вид формы сопряжения устанавливают, сравнивая прыжковые функции.

Прыжковую функцию без учета вакуума можно представить в виде

$$\Pi(h_c) = \alpha Q^2/(g\omega_c) + y_c \omega_c = \alpha Q^2 [\beta^3/12 - (1 - \gamma_c)\sigma_c] \, r^3/(g r^2 \sigma_c);$$

$$\sigma_c = \omega_c / r^2; \; \gamma = h_c / r, \; \beta = B_c / r. \qquad (8.70)$$

Численные значения относительных величин σ_c и β_c определяют по таблицам для русл круговых сечений [79].

Сопряжение в напорной трубе можно установить, сравнив прыжковые функции $\Pi(h_c)$ и $\Pi(y_c)$ (вычисляют в том же сечении, но при напорном течении в трубе):

$$\Pi(y_c) = \alpha Q^2/(g\omega) + y_c \omega, \qquad (8.71)$$

где $y_c = y_{\text{к}} + I\omega(l - l_c)$ — ордината пьезометрической линии (отсчет ведется от оси трубы) в сжатом сечении на расстоянии l_c от начала трубы; $y_{\text{к}}$ — ордината пьезометрической линии в концевом сечении трубы; l — полная длина трубы; $I = Q^2/(\omega^2 C^2 B)$ — уклон трения или пьезометрический уклон.

При $\Pi(h_c) = \Pi(y_c)$ прыжок образуется в сжатом сечении, на всем протяжении трубы наблюдается напорное равномерное движение; при $\Pi(h_c) < \Pi(y_c)$ произойдет затопление вытекающей струи, на всем протяжении трубы равномерное напорное движение; при $\Pi(h_c) > \Pi(y_c)$ за отверстием возникает безнапорное течение по типу отогнанного прыжка в форме кривой подпора, обращенной выпуклостью вниз.

8.3. РЕГУЛИРУЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Регулирующие сооружения служат для забора воды в магистральные каналы и ее подачи в каналы младшего порядка, регулирования уровней, аварийного сброса, промывки каналов от наносов.

Открытые регуляторы представляют собой лоток прямоугольного или трапецеидального сечения, оборудованный затвором. При полностью открытом затворе регулятор рассчитывают как затопленный водослив с широким порогом (разд. 8.1). Коэффициент скорости φ принимают в зависимости от конструкции входа (табл. 8.23).

8.23. Коэффициенты скорости φ в зависимости от типа входа [71]

Конструкция входа	φ
Косые плоскости, порог находится на уровне дна канала верхнего бьефа	0,95
То же, порог приподнят	0,92
Входная часть в виде конуса без порога	0,93
То же, с порогом	0,90
Вход с ныряющими стенками без порога	0,91
То же, с порогом	0,88

Коэффициент сжатия потока можно вычислить по зависимости Френсиса — Кригера:

$$\varepsilon = 1 - 0{,}1n\zeta H/b, \qquad (8.72)$$

где n — число сжатий потока или удвоенное число пролетов; b — ширина пролета регулятора; H — напор перед регулятором; ζ — коэффициент формы входа (табл. 8.24).

8.24. Коэффициент формы входа ζ

Конструкция входа в плане	ζ
Обратная стенка и прямоугольные бычки	1,00
Прямоугольные бычки	0,75
Круглая свая	0,80
Раструб с роспуском в плане 1:2	0,82
Раструб с роспуском в плане 1:4	0,50
Вход в виде косой плоскости	0,40
Очертание бычков плавное, заостренное	0,35...0,4

Если вода поступает в регулятор через боковой отвод, то в расчетную формулу необходимо вводить поправочный коэффициент δ. При отводе воды более 20% расхода канала старшего порядка $Q_{маг}$ и скорости течения в нем 1...1,5 м/с δ определяют по таблице 8.25.

8.25. Зависимость δ от угла отвода α

$\alpha°$,	0	30	45	60	75	90
δ	1	0,97	0,95	0,93	0,90	0,86

При $\alpha = 90°$ и поступлении в регулятор не более 20% $Q_{маг}$, а также при скоростях в этом канале до 1 м/с $\delta = 0{,}9...0{,}95$.

При свободном незатопленном истечении через регулятор коэффициент бокового сжатия рекомендуется вычислять по формуле Е. А. Замарина:

$$\varepsilon = 1 - aH/(H + b), \tag{8.73}$$

где ε — коэффициент сжатия; b — ширина пролета сооружения; $b_{сж}$ — эффективная, или сжатая ширина пролета; H — напор на сооружении; a — коэффициент формы устоя, быка, для обратной стенки $a = 0{,}2$; обратной стенки с конусом $a = 0{,}07$; ныряющей стенки $a = 0{,}075$; косой плоскости $a = 0{,}055$ [71].

При переливе воды через затвор или шандорную стенку расчет ведут как для водослива с острым ребром (разд. 8.1). Если затвор чуть приподнят, то расчет производят как для отверстий затворов (гл. 5). При свободном истечении коэффициент бокового сжатия определяют по формуле (8.73), коэффициенты вертикального сжатия и скорости — соответственно по таблицам 8.26 и 8.27.

8.26. Коэффициенты вертикального сжатия (по Н. Е. Жуковскому)

$h_з/H$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$\varepsilon_в$	0,615	0,620	0,625	0,630	0,645	0,660	0,690

8.27. Коэффициент скорости φ в зависимости от типа входного порога

Порог	φ
Прямоугольный шероховатый порог	0,88
Прямоугольный гладкий порог	0,99
Порог с закругленным входным ребром	0,94
Хорошо округленный входной порог	0,96
Донный слив (порог отсутствует)	1,00

Значения коэффициентов расхода при затопленном истечении можно принимать по таблице 8.28.

8.28. Коэффициенты расхода [40]

Условия и форма входа	Площадь отверстий	
	$\leqslant 2$ м²	> 2 м²
Сжатие сверху, округленные кромки	0,85	0,90
То же, острые кромки	0,80	0,85
Сжатие сверху и с боков, округленные кромки	0,75	0,80
То же, острые кромки	0,70	0,75
Всестороннее сжатие, округленные кромки	0,65	0,70
То же, острые кромки	0,60	0,65

Регуляторы с диафрагмами. Для их расчета используют формулы истечения из-под затвора (свободное или затопленное) (гл. 5).

Расчет нижнего бьефа. Глубину возможного размыва в отводящем канале после регулятора можно рассчитать по полуэмпирической формуле А. И. Тищенко:

$$h_{\text{разм}} = h_{\text{кр}} [0{,}33 + 0{,}65 (\gamma_{\text{гр}} - \gamma_0/(f\gamma_0) + 0{,}07 v_{\text{гр}}/v_{\text{н}} + \\ + 0{,}14 (\gamma_{\text{гр}} - \gamma_0) v_{\text{пр}}/(\gamma_0 f v_{\text{н}})], \qquad (8.74)$$

где $h_{\text{кр}}$ — критическая глубина, отнесенная к водобойной части сооружения прямоугольного поперечного сечения; $\gamma_{\text{гр}}$ — плотность грунта в отводящем русле; γ_0 — плотность воды; $v_{\text{пр}}$, $v_{\text{н}}$ — придонная скорость по динамической оси потока и допускаемая неразмывающая скорость для грунта в отводящем русле (значения $v_{\text{н}}$ на высоте выступов эквивалентной шероховатости принимают согласно рекомендациям [59]); f — коэффициент трения грунта по грунту в насыщенном состоянии (табл. 8.29).

Придонную осевую скорость определяют по эмпирической зависимости:

$$v_{\text{пр}} = v + 0{,}48 v (0{,}1 \sqrt{L/h_{\text{кр}}} + 0{,}83), \qquad (8.75)$$

где v — средняя скорость в живом сечении в рассматриваемом створе; L — расстояние от конца водобойной части до рассматриваемого створа.

Длину участка местных деформаций рекомендуется рассчитывать по зависимости, предложенной А. И. Тищенко:

$$L_{\text{разм}} = 10 v (v_{\text{кк}} - v_{\text{н}})^2/(f \sqrt{g^3 d_{\text{ср}}}), \qquad (8.76)$$

где v — средняя скорость потока в данном створе; $v_{\text{кк}}$ — средняя скорость в живом сечении в конце закрепленного участка; $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр частиц грунта, определяют по кривой гранулометрического состава.

Глубину размыва за шлюзами-регуляторами с учетом вида сопряжения водобойной части сооружения с откосами отводящего русла можно определить по формуле [59]:

$$h_{\text{разм}} = k_{\text{к}} h_{\text{кр}} \sqrt[3]{\bar{u}_{\text{д max}}/u_{\Delta H}}, \qquad (8.77)$$

где $h_{\text{кр}}$ — критическая глубина; $\bar{u}_{\text{д max}} = 2{,}55 B v_{\text{ср}} \sqrt{h_{\text{кр}}}/(\sqrt{x} + 2\sqrt{h_{\text{кр}}})$,

8.29. Значения коэффициентов трения f грунта [59]

Грунт	Плотность (объемная масса), $m/м^3$	f
Песок:		
сухой рыхлый	1,5...1,8	0,75...1
влажный	1,7...1,8	0,62...0,84
насыщенный водой	3,0	0,36...0,47
Глина и суглинок:		
сухие	1,5	0,84...1
Мокрые и текучие:	1,8	0,36
текучепластичные	1,9	0,40
мягкопластичные	1,95	0,43
тугопластичные	2,05	0,47
полутвердые	2,10	0,53
твердые	2,15	0,58
Илистый грунт:		
сухой плотный	1,6	0,84...1
мокрый	2,0	0,38...0,47
Гравий:		
сухой	1,8	0,7 ...0,84
мокрый	1,85	0,58

придонная максимальная осевая скорость в рассматриваемом створе [59]; $u_{\Delta H}$ — допускаемая (неразмывающая) придонная скорость [59]; $k_к$ — коэффициент, учитывающий влияние вида сопряжения водобойной части с откосами отводящего русла (табл. 8.30);

8.30. Значения $k_к$

Сопряжение	$k_к$
Обратная стенка	0,43
Ныряющая стенка	0,37
Раструб	0,23

$Б = 1{,}38\sqrt{\alpha}\,\mathrm{tg}\,\alpha$ — коэффициент; $\alpha = B/\Sigma b$ — коэффициент внезапного расширения потока; B — ширина потока в отводящем русле; Σb — ширина одновременно работающих пролетов сооружения; $v_{ср}$ — средняя скорость в живом сечении потока на выходе из водобойной части; $h_{кр}$ — критическая глубина в отводящем русле; x — расстояние от створа с сжатой глубиной до рассматриваемого створа.

8.4. ВОДОПРОВОДЯЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Водопроводящие сооружения обеспечивают транспортирование воды на участках пересечения каналами естественных и искуственных препятствий.

Ливнеспуски. Для пропуска ливневых и талых вод с прилегающего водосборного бассейна под каналами и дорогами применяют

трубы, работающие в основном в безнапорном режиме. Напорный режим допустим при пропуске катастрофического расхода и лишь в тех случаях, когда повышение уровня перед трубой не создает неблагоприятных условий для работы канала. Расчет ливнеспусков приведен в главе 9.

Акведуки. Гидравлический расчет на пропуск максимального расхода выполняют для входа, лотка и выхода. Вход рассчитывают как подтопленный водослив с широким порогом (разд. 8.1); лоток — на равномерное движение (гл. 7). Для предотвращения подпора на выходе понижение дна отводящего канала относительно отметки дна лотка акведука рассчитывают, используя уравнение Бернулли.

Дюкеры небольшой протяженности рассчитывают на пропуск максимальных расходов, с учетом потерь напора по длине (гл. 4) и на местные сопротивления (гл. 3). При большой длине дюкер проверяют и на пропуск минимальных расходов для выявления возможности возникновения гидравлического прыжка и разработки мероприятий, исключающих его.

Гидротехнические туннели. Гидравлический расчет аналогичен расчету напорных и безнапорных водоводов и заключается в определении максимальной пропускной способности, а также проверке на предотвращение возможности отложения взвешенных наносов при минимальных расходах.

8.5. СОПРЯГАЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Перепады. Гидравлический расчет перепада включает расчет входной части, ступени или ступеней (число их назначают в зависимости от разности отметок верхнего и нижнего бьефов) и выходной части.

Расчет входа. Определяют необходимую ширину перепада $b_п$ при заданных значениях Q и h_0. Если входную часть перепада устраивают по типу водослива с широким порогом или практического профиля, то расчет ее выполняют по формулам, приведенным в разделе 8.1.

При большом диапазоне расходов для обеспечения стабильного режима уровней в подводящем канале и предотвращения подпоров или спадов перед сооружением сечение входной части перепада принимают трапецеидальным. Для расчета в этом случае используют формулу [40]:

$$Q = \varepsilon m_0 (b + 0{,}8mH) \sqrt{2g} H^{1,5}; \quad (8.78)$$

$$m = (A_1 - A_2)/[\varepsilon\zeta (H_1 - H_2)]; \quad (8.79)$$

$$b = (H_1 A_2 - H_2 A_1)/[\varepsilon (H_1 - H_2)]; \quad (8.80)$$

$$A_1 = Q_1/(MH_1^{1,5}); \; A_2 = Q_2/(MH_2^{1,5}); \; M = m_0 \sqrt{2g},$$

где b — ширина входа понизу; m — коэффициент заложения откосов на входе. Коэффициент ζ обычно принимают равным 0,8. Когда вход работает по типу водослива с широким порогом, $m = 0{,}35 \ldots 0{,}37$, для водослива практического профиля $m = 0{,}44 \ldots 0{,}5$. Значения Q_1 и Q_2 по H_1 и H_2 выбирают так, чтобы соответствующие им глубины в подводящем канале равнялись:

$$H_1 = H_{0\,max} - 0{,}25 (H_{0\,max} - H_{0\,min}),$$
$$H_2 = H_{0\,min} + 0{,}25 (H_{0\,max} - H_{0\,min}). \quad (8.81)$$

Если $H_{0\,min}$ неизвестна, то расчетные значения глубины можно принять произвольно в пределах $H_1 = (0{,}83 \ldots 0{,}87)\ H_{0\,max}\ H_2 = (0{,}5 \ldots 0{,}6)\ H_{0\,max}$.

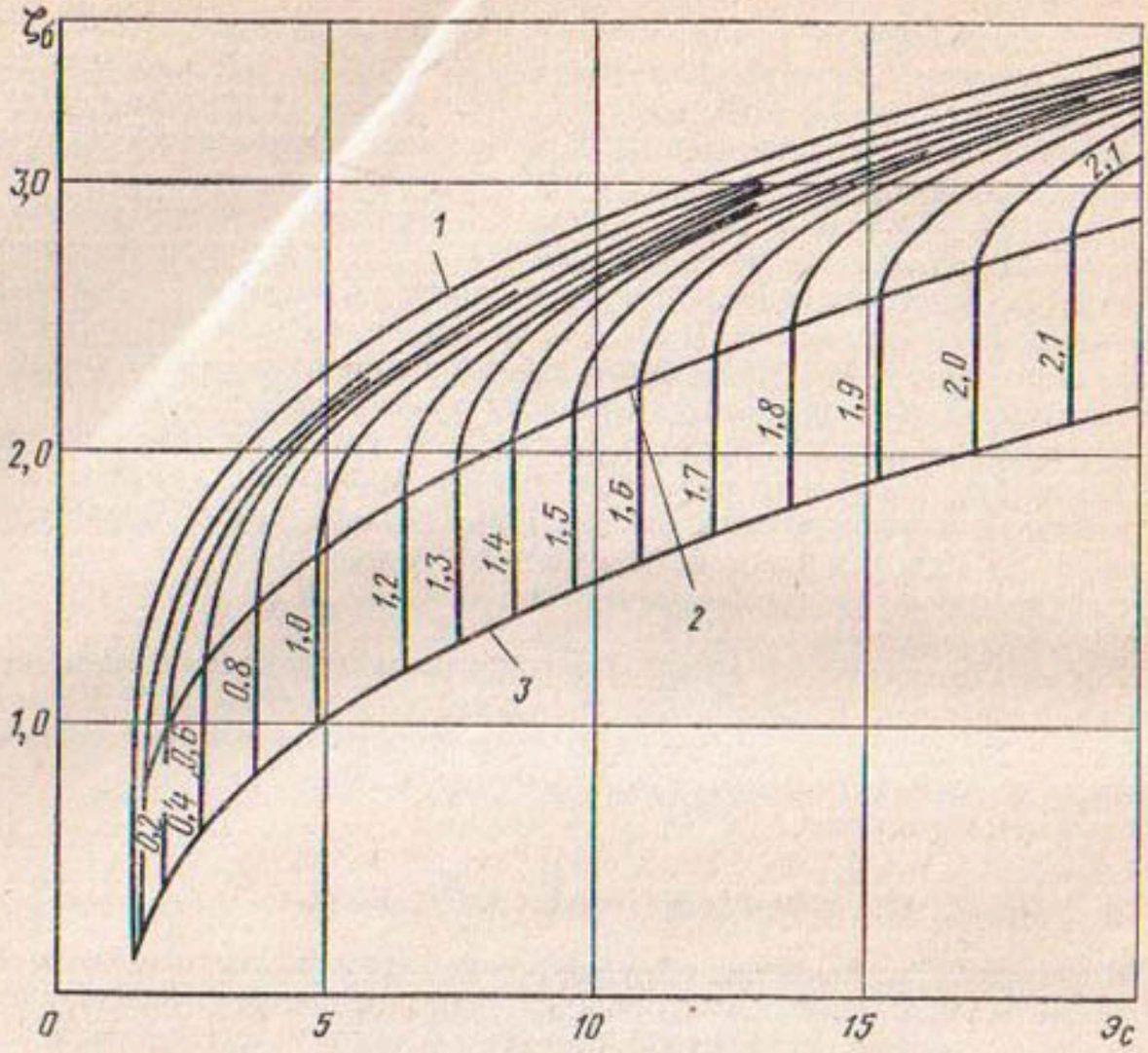


Рис. 8.2. Зависимость ζ_0 от $Э_c$ и ζ_s: *1* — $\zeta_б = f_1(Э_c)$, ζ_s при $\zeta_s = 0$; *2* — $\zeta_б = f_2(Э_c)$ при $\sigma_п = 1$ и $\beta_п = 0{,}5$; *3* — $\zeta_s = f_3(Э_c)$ при $\sigma_п = 1$ и $\beta_п = 0$ (0,2; ... 2,1 — кривые ζ_s).

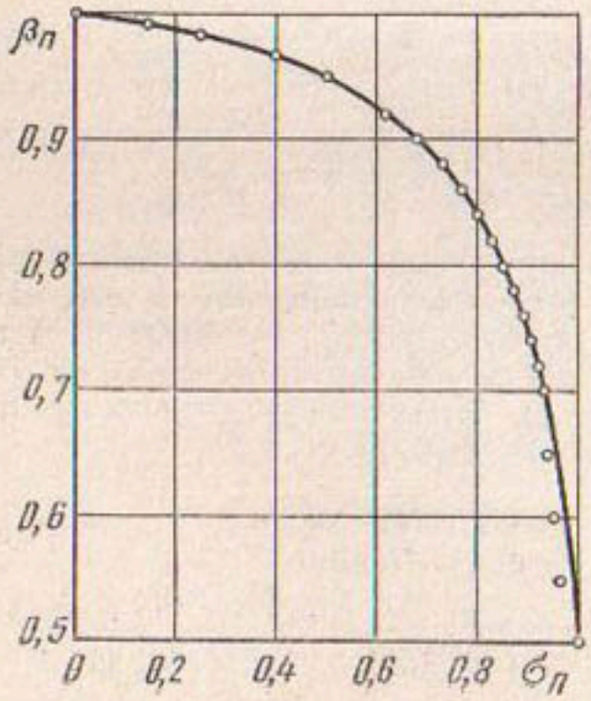


Рис. 8.3. Зависимость $\beta_п$ от $\sigma_п$.

При значительной ширине трапецеидального входа используют многощелевой перепад, разбивая трапецеидальный на несколько щелей, при этом коэффициент заложения откосов каждой из них n/a, где $a=b/(1{,}5H_{max})$ — число щелей.

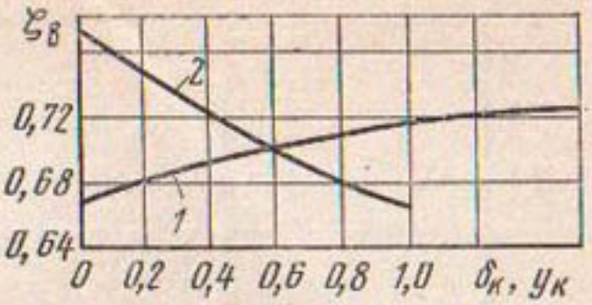


Рис. 8.4. Зависимость $\zeta_в$ от $y_к$ и $\delta_к$: 1 — $\zeta_в=f_1(y_к)$; 2 — $\zeta_в=f_2(\delta_к)$.

Число ступеней n многоступенчатого перепада колодезного типа назначают, исходя из равенства перепадов на каждой ступени ($\Delta z=z/n=\text{const}$) $\Delta p=\Delta H/n$ (z, ΔH — разность отметок соответственно уровней воды и дна в подводящем и отводящем каналах).

Расчетную высоту стенок падения, а также высоту водобойной стенки в конце каждой ступени можно вычислить по формуле Ю. М. Константинова:

$$p=(z/n+0{,}46Ah_{кр})/(1-0{,}09A). \qquad (8.82)$$

При устройстве на выходе в нижний бьеф водобойной стенки $A=(n-1)/n$, водобойного колодца — $A=1$.

При проектировании многоступенчатого перепада рассчитывают обычно первую, вторую и последнюю ступени, остальные ступени принимают такими же, как и вторую. При этом определяют высоту водобойной стенки и длину водобойного колодца, обеспечивающих сопряжение по типу затопленного прыжка. Расчет ступеней перепада рекомендуется вести по способу М. М. Скибы [79].

Расчет первой ступени. Определяют $h_{кр}$ на входе перепада, удельную энергию потока относительно дна первой ступени $E_{c_1}=p_1+h_{кр}+\alpha v_{кр}^2/(2g)$, где $v_{кр}=Q/(\omega_{кр})$, относительную удельную энергию на первой ступени $Э_{c_1}=E_{c_1}/h_{кр}$ и периметр, характеризующий поперечное сечение перепада, $y_{кр}=mh_{кр}/b$. По графикам $\zeta_б=f_1(Э_{c_1}, \zeta_s)$ и $\zeta_s=f(Э_c)$ при $\sigma_п=1$ и $\beta_п=0$ (рис. 8.2, 8.3) определяют относительную вторую сопряженную глубину $\zeta_а=h_а/h_{кр}$, относительную высоту водобойной стенки $\zeta_s=h_s/h_{кр}$ ($\sigma_п=f(h_п/A)$ — коэффициент подтопления) и $\beta_п$. По кривой $\zeta_б=f_1(Э_c, \zeta_s)$ на соответствующем графике по $Э_c$ находят относительную вторую сопряженную глубину $\zeta_б=\zeta_а$.

Тогда вторая сопряженная глубина на первой ступени будет $h_а=\zeta_а h_{кр}$, глубина, необходимая для затопления прыжка, — $h'_а=\sigma h_{а_1}$, где σ — коэффициент запаса, $\sigma=1{,}05\ldots1{,}1$.

Высота водобойной стенки на первой ступени $h_{s_1}=\zeta_{s_1}h_{кр}$ соответствует критической форме сопряжения. Расчетную высоту $h_{s\,расч}$ стенки определяют из уравнения $h_{s\,расч}=h_{s_1}+(\sigma-1)h_а$.

Затем проверяют условия истечения через входную часть перепада. Если соблюдается неравенство $\beta=(h'_{а_1}-p)/h_0\leqslant 0{,}5$, вход перепада работает как незатопленный водослив.

Длина первой ступени перепада определяется длиной водобойного колодца $l_{кл}$, образованного стенкой падения и водобойной стенкой $l_{кл_1}=x+l_п$ ($l_п$ — длина прыжка).

Дальность отлета струи можно вычислить по формуле [79] $x=v_п\sqrt{2y_1/g}$, где $y_1=p+0{,}5h_{в_1}$.

Глубину потока на стенке падения первой ступени перепада определяют по графику (рис. 8.4). Зная $y_к$, по кривой $\zeta_в=f_1(y_к)$ нахо-

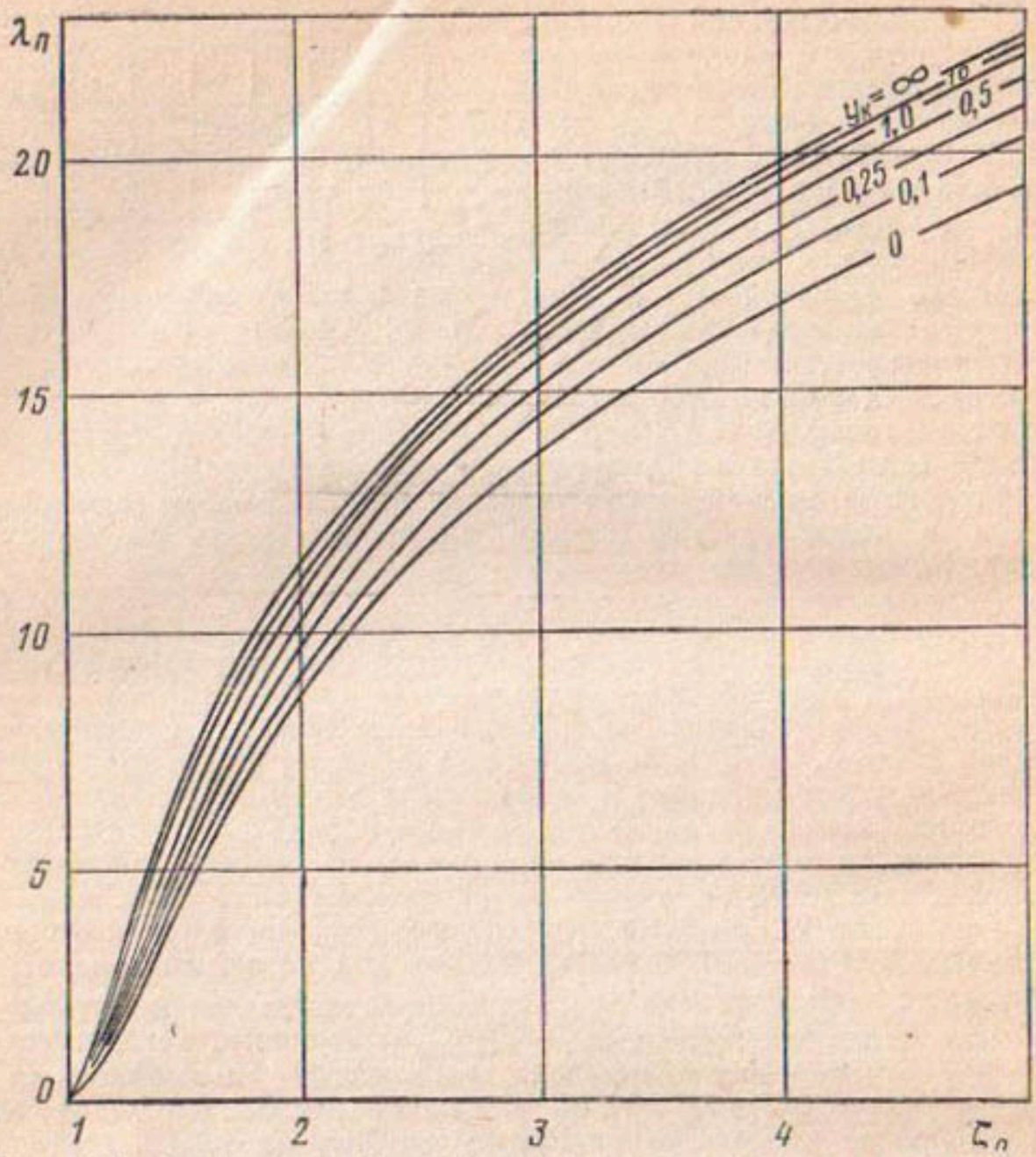


Рис. 8.5. Зависимость $\lambda_п$ от $\zeta_б$ и $y_к$ для призматических русл, прямоугольного, трапецеидального и треугольного сечения с горизонтальным дном.

дят относительную глубину на стенке падения при свободном истечении $\zeta_в = h_в/h_{кр}$, откуда $h_б = \zeta_в h_{кр}$.

Относительную длину прыжка $\lambda_п = l_п/h_{кр}$ определяют по графику $\lambda_п = f(\zeta_а, y_к)$ (рис. 8.5). Предварительно вычисляют безразмерные величины $\zeta_{а_1} = h_{а_1}/h_{кр}$ и $y_{кр} = mh_{кр}/b$. Искомая величина $l_п = \lambda_п h_{кр}$.

Расчет второй ступени перепада. Определив по $y_к$ относительный напор $\zeta_{H_{0_1}} = H_{0_1}/h_{кр}$ над гребнем стенки первой ступени (табл. 8.31), найдем напор над водобойной стенкой первой ступени $H_{0_1} = \zeta_{H_{0_1}} h_{кр}$.

Удельная энергия потока относительно второй ступени перепада и относительная удельная энергия потока равны соответственно $E_{C_2} = H_{0_1} + h_{s\,расч} + p$, $Э_{C_2} = E_{C_2}/h_{кр}$.

Дальнейший расчет выполняется аналогично расчету первой ступени перепада.

Расчет последней ступени (рис. 8.6). Находят удельную энергию потока относительно дна отводящего канала $E_{c_i} = p_i + h_{s\,(i-1)} + H_{0\,(i-1)}$ (i — номер ступени перепада). Затем вычисляют

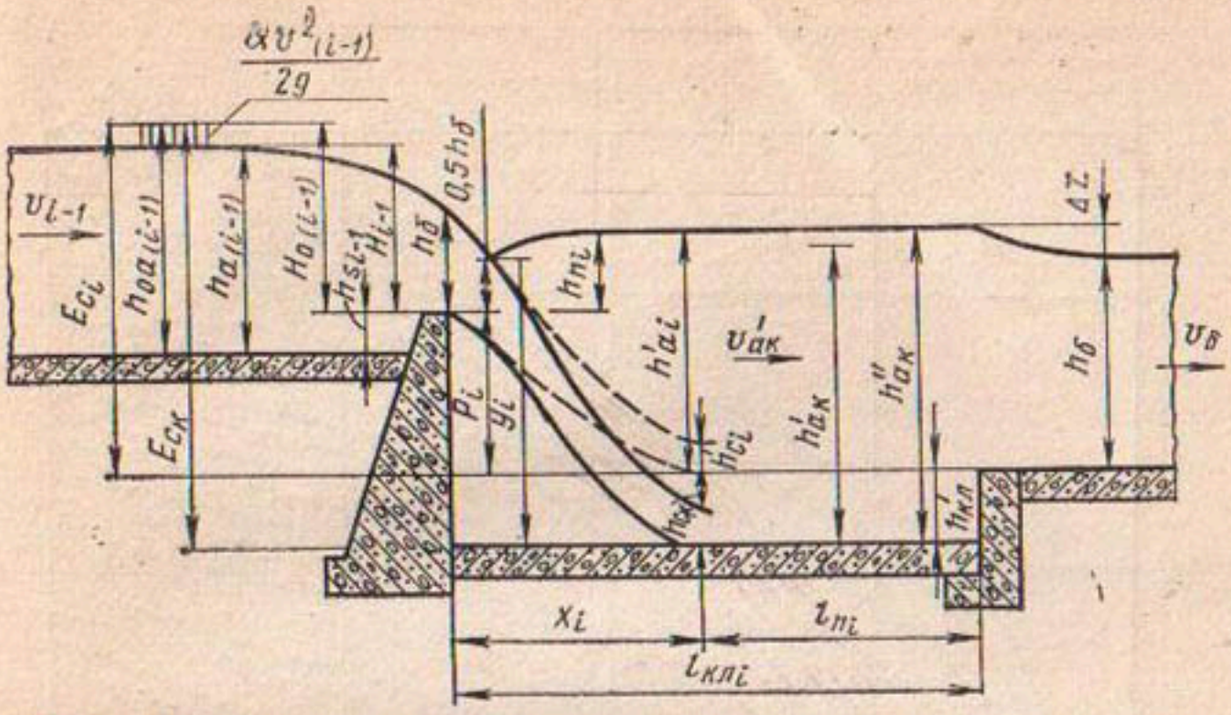


Рис. 8.6. Расчетная схема для последней ступени перепада.

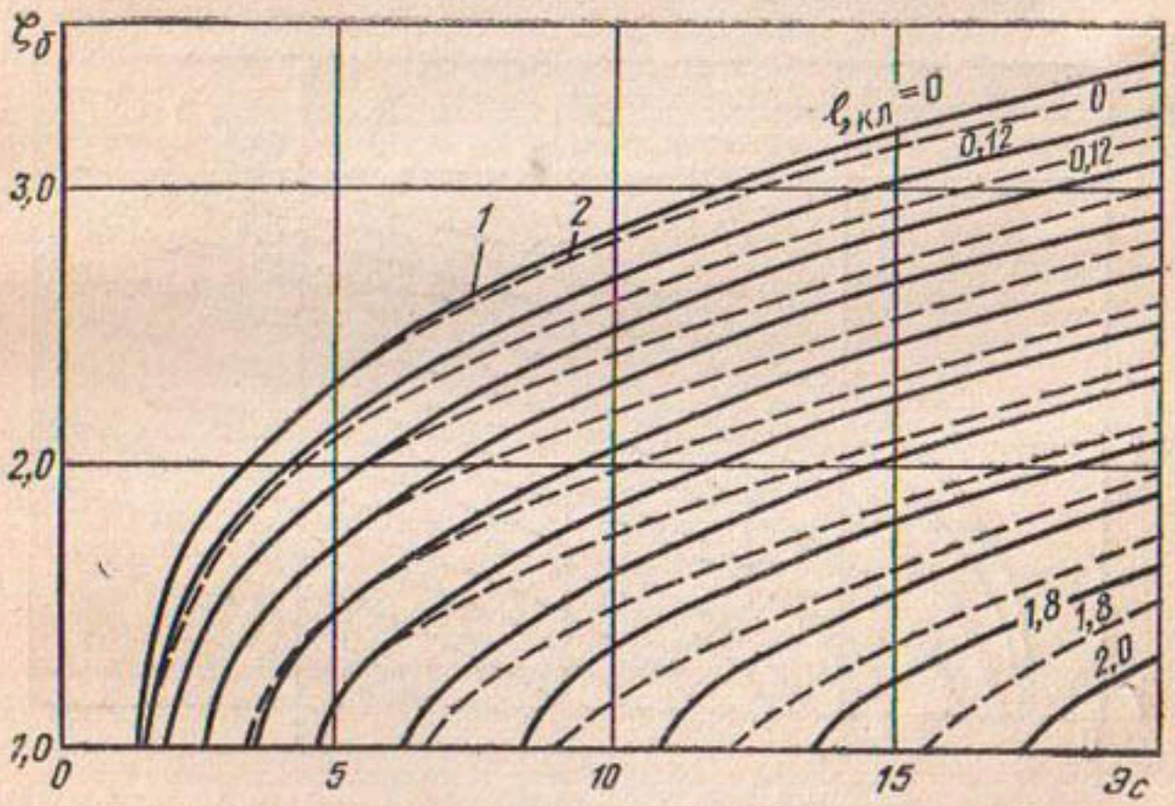
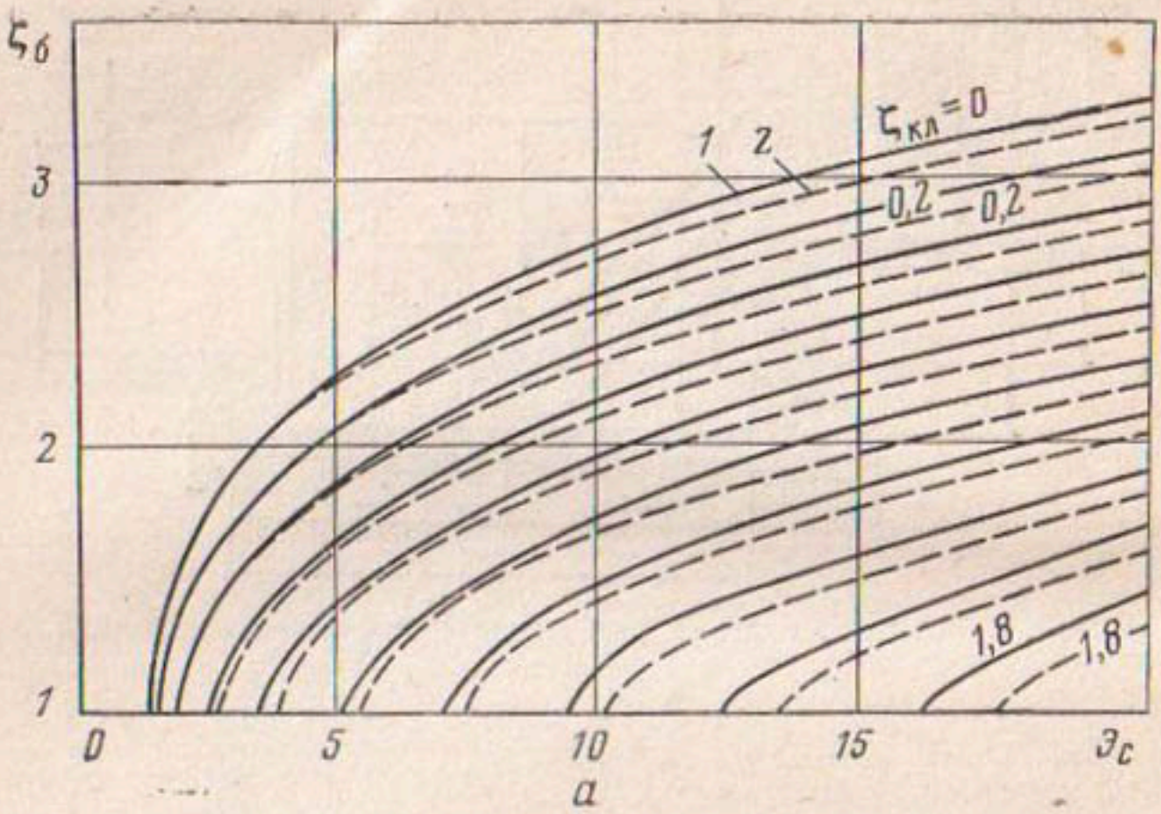


Рис. 8.7. Зависимость $\zeta_б$ от $Э_с$ и $\zeta_{кл}$ призматических русл прямоугольного и трапецеидального сечений: *1* — $y_к = 0$; *2* — $y_к = 0{,}025$ (кривые даны через 0,2).



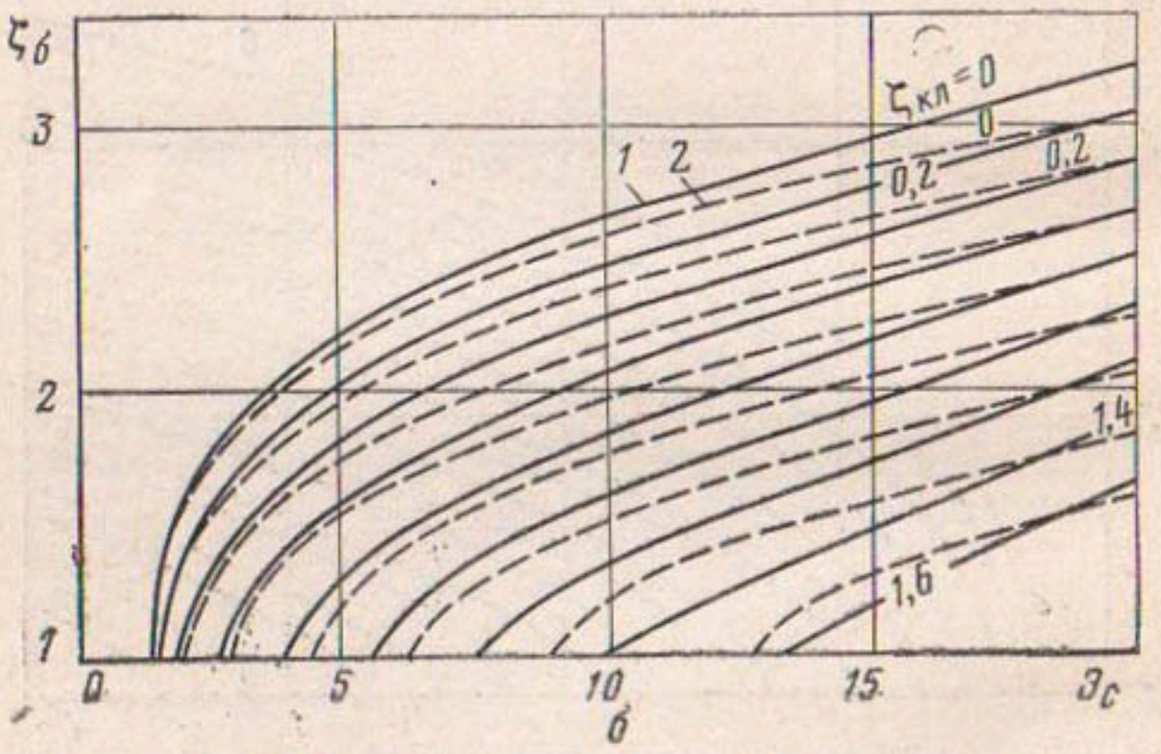


Рис. 8.8. Зависимость $\zeta_б$ от $Э_с$ и $\zeta_{кл}$ для призматических русл трапецендального сечения: *а* — $y_к = 0{,}05$ и 0,1; *б* — $y_к = 0{,}15$ и 0,25 (кривые даны через 0,2).

8.31. Значения $\zeta_{H_{0_1}}$ в зависимости от $y_к$

$y_к$	$\zeta_{H_{0_1}}$	$y_к$	$\zeta_{H_{0_1}}$	$y_к$	$\zeta_{H_{0_1}}$
0,	1,371	0,25	1,284	2,5	1,177
0,025	1,356	0,40	1,258	4	1,167
0,05	1,345	0,75	1,224	6	1,162
0,10	1,326	1,00	1,210	100	1,150
0,15	1,310	1,50	1,194		

относительную удельную энергию $Э_{ci}=E_{c_i}/h_{кр}$ и относительную нормальную глубину $\zeta_б=h_б/h_{кр}$. По $y_к Э_{c_i}$ и $\zeta_б$ по графикам (рис. 8.7, 8.8) находят относительную глубину колодца $\zeta_{кол.\ i}=h_{кол.\ i}/h_{кр}$.

Глубину водобойного колодца для критической формы сопряжения определяют из зависимости $h_{кол.\ i}=\zeta_{кол}h_{кр}$.

Расчетную глубину колодца, обеспечивающую сопряжение по типу затопленного прыжка, можно определить с некоторым запасом (без учета перепада) из зависимости $h_{кол.\ i\ расч}=\sigma h_{кол.\ i}+(\sigma-1)\,h_0$, ($\sigma$ — коэффициент запаса; $\sigma=1{,}05\ldots1{,}1$).

Длину водобойного колодца рассчитывают так же, как и для первой ступени.

Быстротоки. Входная часть работает по типу водослива с широким порогом или практического профиля (разд. 8.1). Расчет лотка (водоската) быстротока состоит в нахождении глубины быстротока, которая будет определять высоту боковых стен и условия сопряжения в нижнем бьефе. На водоскате быстротока устанавливается кривая спада (гл. 7). За начальное сечение обычно принимают сечение на переломе уклона. При наличии бокового сжатия на входе в этом сечении устанавливается глубина $h=(0{,}7\ldots0{,}8)h_{кр}$ [59]. Однако здесь можно принять $h=h_{кр}$.

Если уклон быстротока $i_б>0{,}02\ldots0{,}03$, происходит насыщение потока воздухом (аэрация потока), а также возникает при определенных условиях волновое движение. Глубину аэрированного потока можно найти по формуле:

$$h_а=(1+e)\,h, \tag{8.83}$$

где $e=W_в/W_в=(0{,}035+0{,}83\Delta/R)\sqrt{\mathrm{Fr}-E}$ (формула Н. В. Исаченко) — отношение объема воздуха к объему воды в потоке; Δ/R — относительная шероховатость русла быстротока, при малой шероховатости $\Delta/R=0{,}02\ldots0{,}04$; при большой — $0{,}05\ldots0{,}1$; $\mathrm{Fr}=v^2/(gR)$ — число Фруда, вычисленное по гидравлическому радиусу неаэрированного потока; E — параметр, зависящий от относительной шероховатости (табл. 8.32).

8.32. Значения E в зависимости от ΔR

Δ/R	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
E	33,9	29,4	25,4	22	18,9	16,3	14	11,7	10,3

Критическое число Фруда, при котором начинается аэрация, можно определить по формуле [52].

$$\mathrm{Fr}'_{\text{кр}} = 45\,(1-\Delta/R)^{14}. \qquad (8.84)$$

При значительных уклонах лотка, большой распластанности потока (малая глубина по сравнению с шириной потока) и малой шероховатости дна и боковых стенок быстротока нарушается устойчивость свободной поверхности потока. На быстротоке образуются катящиеся волны, вызывающие переполнение лотка, уменьшение его пропускной способности, сильный волнобой в нижнем бьефе, который зачастую приводит к аварии сооружения, и размывы незакрепленного русла отводящего канала. Возможность волнообразования можно проверить по критерию Т. Г. Войнич-Сяноженцкого. Сверхбурный режим будет отсутствовать при соблюдении следующего условия:

$$1/\mathrm{Fr} > [\chi\omega/(2Bh)]^2 - 2\,(2\alpha_0 - 1)\,\chi\omega/2Bh + 2\alpha_0 - 1, \qquad (8.85)$$

где Fr, ω, B, h — число Фруда, площадь живого сечения, ширина свободной поверхности и глубина потока на быстротоке перед зоной волнообразования; χ — гидравлический показатель русла; $\alpha_0 = (1+K_1^2) + (1+K_2^2)^2/[(1+2K_1)(1+2K_2)]$ — коэффициент количества движения [59]; $K_1 = \sqrt{g}/(K_{\text{к}}C)$, $K_2 = 2K_1(1-b/\chi_0)$; C — коэффициент Шези по Н. Н. Павловскому; $K_{\text{к}} = 0{,}36$ — постоянная Кармана; χ_0, b — смоченный периметр при нормальной глубине h_0 и ширина лотка быстротока по дну.

Условия работы быстротока, при которых поток не перейдет в сверхбурное состояние, следующие [59]:

$$I \leqslant 4I_{\text{кр}}, \qquad (8.86)$$

где $I_{\text{кр}} = v_{\text{кр}}^2/(C_{\text{кр}}R_{\text{кр}})$ — критический уклон.

Более подробные сведения о бегущих (катящихся) волнах на быстротоках и мерах предотвращения этого опасного явления приведены в специальной литературе.

При оголовках неплавного очертания (обратные и ныряющие стенки, раструбы и т. д.) в пределах сооружений возникают косые стоячие волны, которые обусловливают значительную неравномерность глубин как в сечении, так и по длине потока. Установлено, что линии волн при первом своем пересечении несколько меняют направление, при этом всегда соблюдается неравенство $\alpha_1 > \alpha_2$.

Для определения $\operatorname{tg}\alpha_1$ и $\operatorname{tg}\alpha_2$ можно воспользоваться следующими формулами при $\nu = 0{,}3\ldots0{,}6$, $H/b = 0{,}2\ldots1{,}2$, $\delta/H = 0{,}9\ldots5$, $i = 0{,}08\ldots0{,}12$:

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = 0{,}1/\varphi^{0{,}85}; \quad \operatorname{tg}\alpha_2 = 0{,}09/\varphi^{0{,}83}; \quad \varphi = \nu H/b, \qquad (8.87)$$

где $\nu = \omega/\Omega$ — степень бокового сжатия на входе; ω, Ω — живое сечение потока соответственно в начальном сечении входа и в подводящем канале; H, b — напор на входе в быстроток и его ширина.

При проектировании быстротоков и консольных сбросов с неплавным входом может возникнуть необходимость в определении местоположения понижений и повышений свободной поверхности у стенок лотка. В этом случае можно использовать приближенный метод И. Х. Овчаренко. Умножив вычисленное значение $\operatorname{tg}\alpha_1$ на половину ширины быстротока или консольного сброса, получим расстояние от начала входа до сечения $a = a$ (рис. 8.9), в котором про-

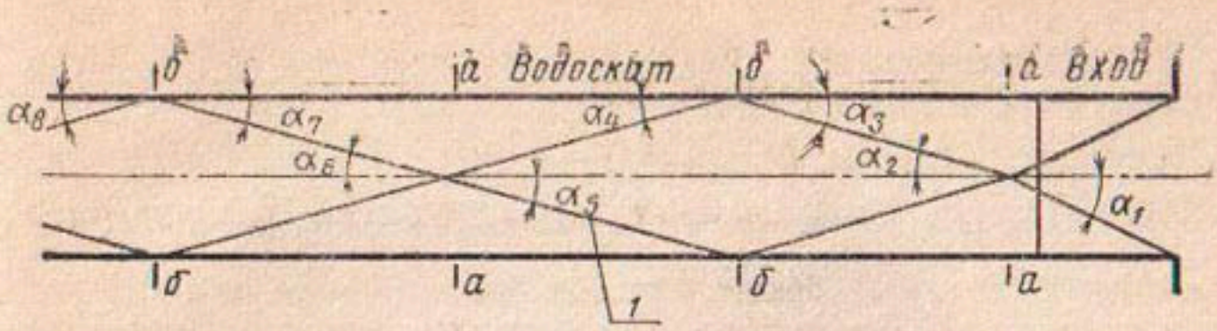


Рис. 8.9. Расчетная схема быстротока прямоугольного сечения при косых стоячих волнах.

исходит первое пересечение линий (гребней) волн. В этом сечении на оси потока возникает значительный бугор, у стенок же создается наибольшее из ближайших понижение свободной поверхности. Умножив значение $\operatorname{tg}\alpha_2$ на $0{,}5b$, получим расстояние между сечениями $a=a$ и $б=б$. В сечении $б=б$ у стенок лотка наблюдается наибольшее из ближайших повышение глубин, в то же время на оси потока образуется наибольшая впадина свободной поверхности. Дальнейшее нахождение мест повышений и понижений глубин у стенок лотка вниз по течению ведется по $\operatorname{tg}\alpha_2$ аналогично. При расчете свободной поверхности на водоскате можно использовать общеизвестные интегралы уравнения неравномерного движения.

Значения глубины у стенок в сечениях $a=a$ и $б=б$ на всем протяжении водоската $h_{ст}=(0{,}85\ldots1{,}25)\,h_{ср}$.

Глубину (без учета глубины воды в нижнем бьефе в рассматриваемом створе) местных размывов за быстротоками-перепадами пропускной способностью до 5 м³/с можно рассчитать по формуле А. И. Тищенко:

$$T_x=3{,}7h_{кр}-\mathrm{Fr}_x^{0,2}, \qquad (8.88)$$

где $h_{кр}=\sqrt[3]{\alpha Q/(gb^2)}$ — критическая глубина, отнесенная к створу в конце водобойной части сооружения; $\mathrm{Fr}_x=\alpha v_{ср\,x}^2/(gh_x)$ — число Фруда в рассматриваемом створе; $v_{ср\,x}$, h_x — средняя скорость потока на вертикали по динамической оси и глубина в рассматриваемом створе; α — коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей ($\alpha=1\ldots1{,}15$).

Среднюю скорость потока $v_{ср\,x}$ находят по формуле [99]:

$$v_{ср\,x}=v_0\left(0{,}011L-1{,}4\sqrt[4]{0{,}001L^3h_{кр}}+5{,}5h_{кр}\right)/h_{кр}, \qquad (8.89)$$

где L — расстояние от конца водобоя до рассматриваемого сечения; v_0 — допускаемая неразмывающая скорость потока.

Длина участка отводящего русла, который необходимо закрепить для предотвращения размывов, равна $L=103{,}3h_{кр}$.

Консольные перепады. Вход и быстроток рассчитывают так же, как для быстротока. Дальность падения струи без учета аэрации и сопротивления воздуха определяют по формуле А. О. Гамбаряна:

$$l_{пад}=2H\left(i_H+\sqrt{(2p+h)/H}\right);\quad H=v^2/(2g\varphi^2), \qquad (8.90)$$

где v — скорость в конце носка; h — глубина в конце носка; p — высота падения струи; φ — коэффициент скорости; $\varphi=0{,}95$;

при горизонтальном носке ($i_H=0$)

$$l_{пад}=\varphi\sqrt{2H(2p+h)}. \qquad (8.91)$$

Максимальную глубину воды в воронке размыва за носком-трамплином рассчитывают по формулам Ц. Е. Мирцхулавы:

несвязные грунты

$$h_p = (3\eta v_{bx} b_0 / W - 7{,}5 b_0) \cdot \sin \alpha_{bx} / (1 - 0{,}175 \operatorname{ctg} \alpha_{bx}) + 0{,}25h; \quad (8.92)$$

связные и скальные грунты

$$h_p = \left(\frac{8{,}3 v_{bx} b_0}{v_{\Delta_0 \text{ вор}}} - 7{,}5 b_0 \right) \frac{\sin \alpha_{bx}}{1 - 0{,}175 \operatorname{ctg} \alpha_{bx}} + 0{,}25h, \quad (8.93)$$

где $\eta = 1{,}5 \ldots 2$; $v_{вх}$, b_0 — скорость струи и высота ее в сечении на входе в поток в нижнем бьефе, в предварительных расчетах $v_{bx} = \varphi_{вод} \sqrt{2gz_0}$; $W = \sqrt{2g(\delta - \delta_0) d / 1{,}75\delta_0}$ — гидравлическая крупность частиц; δ_0, δ — плотность соответственно воды и грунта; d — средний диаметр крупных частиц, слагающих дно воронки размыва в момент ее стабилизации; α_{bx} — угол наклона к горизонту продольной оси струи в сечении на входе в поток в нижнем бьефе; h — глубина потока в нижнем бьефе; $v_{\Delta 0 \text{ вор}}$ — допускаемая донная скорость в стабилизированной воронке размыва.

Значение допускаемой скорости равно:
для несвязных грунтов

$$v_{\Delta 0 \text{ вор}} = (\lg 8{,}8h/d) \sqrt{2gm\left[(\delta - \delta_0) d + 2c^{н}_{у.\,н} k_2\right] / 0{,}44\delta_0 n}; \quad (8.94)$$

для связных грунтов

$$v_{\Delta 0 \text{ вор}} = (\lg 8{,}8h/d) \sqrt{2gm\left[(\delta - \delta_0) d + 1{,}25c^{н}_{у} k\right] / (2{,}6\delta_0 n)}; \quad (8.95)$$

для скальных грунтов

$$v_{\Delta 0 \text{ вор}} = \sqrt{\frac{2gmb^2 \left[R_{ус} + c(\delta - \delta_0) \cos \theta + 3c^2 \delta_{0a} \sin \theta / b\right]}{n\delta_0 \sin \alpha_{вх} (0{,}6b^2 + 0{,}2c^2)}}, \quad (8.96)$$

где h — глубина потока над рассматриваемой зоной дна; d — средний диаметр частиц грунта (d_{50}), м; m — коэффициент условий работы, учитывающий наличие наносов в коллоидном состоянии; для «чистых» потоков $m = 1$; с содержанием наносов больше 0,1 кг/м³ $m \approx 1{,}4$; $n = (v_{\Delta\,max}/v_{\Delta})^2 \approx 1 + d/(0{,}00005 + 0{,}^3 d)$ — коэффициент перегрузки, учитывающий пульсацию скорости; $v_{\Delta\,max}$, v_{Δ} — соответственно максимальная пульсационная и средняя скорость потока у дна; $c^{н}_{у.\,н} = 175\,(10^{10}\alpha)$ — усталостная прочность несвязных грунтов на размыв; k_2 — коэффициент, характеризующий вероятность отклонения показателя сцепления от среднего значения, в предварительных расчетах $k_2 = 1$; d — эквивалентный диаметр отрывающихся отдельностей связного грунта; при отсутствии опытных данных используют зависимость $d = \Delta/0{,}7$, где Δ — высота выступов абсолютной шероховатости дна, либо принимают для супесей $d = 3$ мм, $d = 4$ мм; для суглинков $d = 4$ мм и для глин $d = 4 \ldots 5$ мм; $c^{н}_{у}$ — предел усталости размыва связных грунтов; $c^{н}_{у} = 0{,}035$; k — коэффициент однородности, характеризующий отклонения показателей прочности грунта, в предварительных расчетах $k = 0{,}5$; m — коэффициент условий работы; $R_{ус}$ — усталостная прочность связей между отдельностями скального основания; $R_{ус} \approx 0{,}06 R^{н}_{сж}$ ($R^{н}_{сж}$ — нормативное расчетное сопротивление отдельностей скального грунта сжатию); θ — уклон наклона напластований

к горизонту; если наклон направлен по течению, то значение $\Delta_{\Delta 0\,\text{вор}}$ берется со знаком минус, в противном случае — плюс; δ_{0a} — плотность воды с учетом степени аэрации; определяется в зависимости от скорости течения (3...4 м/с — 20%; 6...12 — 35...50; 20...25 — 60...67%); n — коэффициент перегрузки, вычисляются так же, как и в формуле (8.93) для диаметра эквивалентного шара, определяемого по размерам a, b, c скальных отдельностей, отрывающихся в процессе размыва.

Донные допускаемые скорости вычисляют по формуле Ц. Е. Мирцхулавы:

$$v_{\Delta 0} = 1{,}25\sqrt{2gm\left[(\delta - \delta_0)\,d + 1{,}25c_y^{II}k\right](2{,}6\delta_0 n)}. \qquad (8.97)$$

Для связных грунтов допускаемая донная скорость в стабилизированной воронке размыва равна:

$$v_{\Delta 0\,\text{вор}} = v_{\Delta 0}\left(\cos^3\alpha_{bx} + 3\sqrt[3]{\sin^2\alpha_{bx}}\right), \qquad (8.98)$$

где $v_{\Delta 0}$ — определяют по формуле (8.93) или приближенно по зависимости $v_{\Delta 0\,\text{вор}} = 3v_{\Delta 0}$.

Длину воронки размыва можно определить по формуле Г. А. Юдицкого:

$$l_p = 4{,}5h_p + 2h_{кр}, \qquad (8.99)$$

где $h_{кр}$ — критическая глубина в отводящем русле, м.

Глава 9
ТРУБЧАТЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Трубчатые водопропускные сооружения круглого и реже прямоугольного сечения широко применяются в мелиорации и дорожном строительстве. По числу отверстий сооружения бывают одноочковые, двухочковые, трехочковые.

В действующих типовых сооружениях применяются трубы следующих размеров: круглые — диаметр 0,75 м; 1; 1,25; 1,5; 2; прямоугольные одноочковые — 2 м; 2,5; 3; двухочковые — 2×2,2 м; 2×2,7; 2×3,2.

При расчетах трубчатых сооружений рассматривают входной и выходной участки. Расчет входного участка заключается в определении площади живого сечения и размеров трубы; выходного участка — в обеспечении сопряжения с нижним бьефом.

Существует три режима протекания воды в трубах (рис. 9.1): безнапорный ($H < 1{,}2d < h_т$)); полунапорный ($1{,}2d \leqslant H \leqslant 1{,}4h_т$) и напорный ($H \geqslant 1{,}4d$ и $i_т > I$, где $I = Q/(\omega^2 W^2)$ — уклон трения; Q — расход; ω — площадь поперечного сечения трубы; W — скоростная характеристика).

Наименьшую допустимую высоту насыпи H_{min} над трубами находят по формулам:

безнапорный режим

$$H_{min} = h_т + \delta + h_{зас}; \tag{9.1}$$

полунапорный или напорный режим

$$H_{min} = H + \Delta, \tag{9.2}$$

где $h_т$ — высота трубы; δ — толщина ее стенки; $h_{зас}$ — высота засыпки (не менее 0,5 м); Δ — запас над уровнем подпертых вод; при $d\ (h_т) < 2$ м $\Delta \geqslant 0{,}5$ м; при $d \geqslant 2$ м $\Delta \geqslant 1$ м; H — напор воды перед трубой.

Пропускную способность безнапорных труб любого поперечного сечения можно определить согласно схеме истечения через водослив

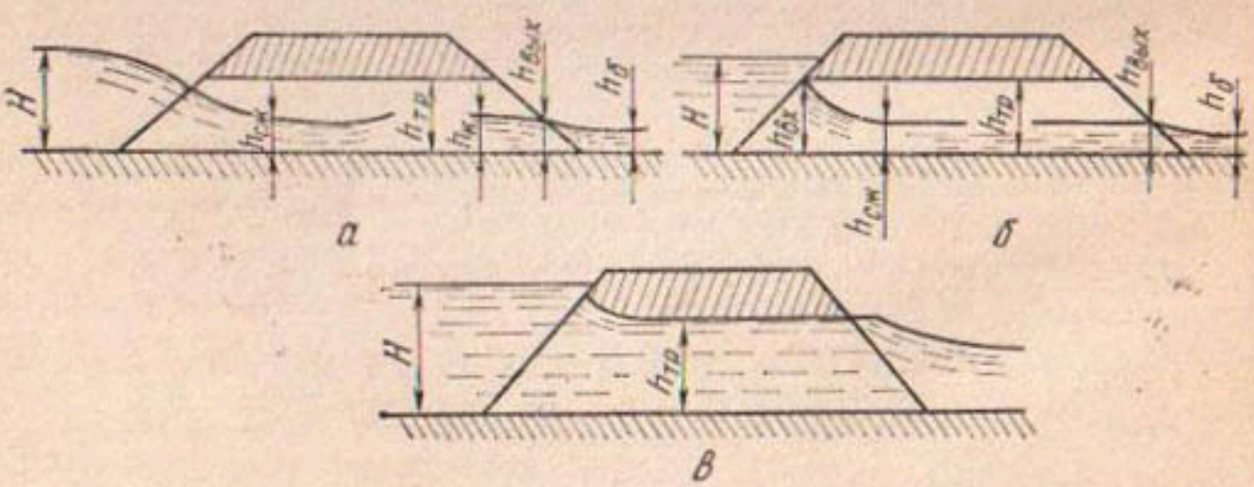


Рис. 9.1. Режимы движения воды в трубчатых сооружениях: *а* — безнапорный; *б* — полунапорный; *в* — напорный.

по формуле А. А. Угинчуса:

$$Q = \mu b_{кр} \sqrt{2g}\, H_0^{1,5}, \qquad (9.3)$$

где μ — коэффициент расхода (табл. 9.1); $b_{кр} = \omega_{кр}/h_{кр}$ — ширина потока в сечении с критической глубиной; $H_0 = H + \alpha_0 v_0/(2g)$ — полный напор перед входом в трубу; α_0 — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей в сечении потока перед входом в трубу; v_0 — средняя скорость перед входом.

9.1. Значения μ

Оголовок	μ
Раструбный:	
$H < 0{,}6d$	0,360
$H > 0{,}6d$	0,335
Воротниковый	0,305
Портальный	0,310

При безнапорном режиме возвышение высшей точки внутренней поверхности труб над поверхностью воды должно быть в круглых трубах не менее $0{,}25d$, в прямоугольных при $h_т \leqslant 3$ м — не менее $h_т/6$, при $h_т > 3$ м — не менее 0,5 м. Глубину потока на входе в трубу ($h_{вх}$) можно определить по рекомендациям Н. П. Розанова: для прямоугольных труб с раструбными оголовками при $i_т < i_{кр}$ $h_{вх} = 0{,}88H$; $i_т > i_{кр}$ $h_{вх} = 0{,}85H$; для круглых труб — с раструбным и портальным оголовками $h_{вх} = 0{,}9H$, с воротниковым $h_{вх} = 0{,}79H$. Пропускная способность полунапорных труб равна (по Н. П. Розанову):

прямоугольное сечение

$$Q = \mu_п \omega \sqrt{2g\,(H - \varepsilon h_т)}; \qquad (9.4)$$

круглое сечение

$$Q = \mu_п \omega \sqrt{2g\,[H - (0{,}708 - 2l_т)\,d]}, \qquad (9.5)$$

где $\mu_п$ — коэффициент расхода (табл. 9.2); ε — коэффициент сжатия (табл. 9.2).

9.2. Значения $\mu_п$ и ε

Коэффициент	Входной оголовок				
	портальный с конусами	воротниковый	раструбный при $\alpha_р$		
			10	20	30...45
ε	0,74/0,79	0,74/0,75	0,76/0,79	0,78/0,79	0,81/0,79
$\mu_п$	0,62/0,65	0,58/0,62	0,61/0,66	0,64/0,69	0,68/0,7

Примечания. В числителе — для прямоугольных труб, в знаменателе — для круглых.

Пропускная способность и коэффициент расхода напорных труб, не затопленных со стороны нижнего бьефа, равна [33]

$$Q = \mu_н \omega \sqrt{2g\,(H_0 + l_т i - 0{,}85h_т)}, \qquad (9.6)$$

$$\mu_н = \sqrt{1/(1 + \zeta_{вх} + \lambda l/d)}. \qquad (9.7)$$

где $\zeta_{вх}$ — коэффициент сопротивления на входе $\zeta_{вх}=0{,}33$ и 0,2 для необтекаемых и обтекаемых оголовков; λ — гидравлический коэффициент сопротивления трения (по данным гл. 4). Коэффициент расхода напорных труб можно определять по формуле (5.46) [84].

При затопленном выходе расход равен:

$$Q=\mu_н\omega\sqrt{2g\,(H+I_т l-h_{н.б})}, \qquad (9.8)$$

где $h_{н.б}$ — глубина воды в нижнем бьефе.

Расчет выходного участка за сооружением заключается в определении условий протекания потока и нахождении наиболее опасного из возможных местных размывов, выборе типа крепления и определении его геометрических размеров.

Глубину потока на выходе из водопропускных труб [ ] в зависимости от уклона дна $i_т$ и параметра $\Pi_Q=Q/(d^{5/2}g^{1/2})$ или $\Pi_Q=Q/(ab\sqrt{ag})$ (a — высота, b — ширина отверстия) можно найти по графикам (рис. 9.2, 9.3). Определив глубину $h_{вх}$, можно рассчитать при известных Q или d скорость потока в выходном сечении сооружения. Затем находят глубины потока после размыва и выполняют детальные расчеты местных размывов.

Для увеличения пропускной способности труб применяют различные оголовки. На рисунках 9.4 и 9.5 приведены значения μ для напорного режима в зависимости от относительного радиуса оголовка r/d, длины конусной части $l_к/d$ и угла конуса β; на рисунке 9.6 — зависимости μ при совершенном сжатии для полунапорного и безнапорного режимов в зависимости от $Fr_{вх}=2H/d$ при незатопленном истечении.

При $i_т=0{,}038\ldots0{,}341$, трапецеидальном подводящем канале ($b_к=$

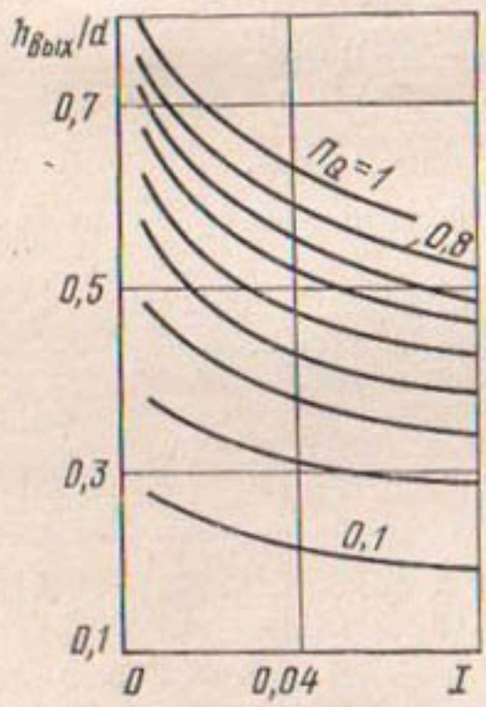


Рис. 9.2. Зависимость $h_{вых}/d$ от Π_Q и i для водопропускной трубы круглого выходного сечения: $\Pi_Q=Q/(d^2\sqrt{dg})$ (кривые даны через 0,1).

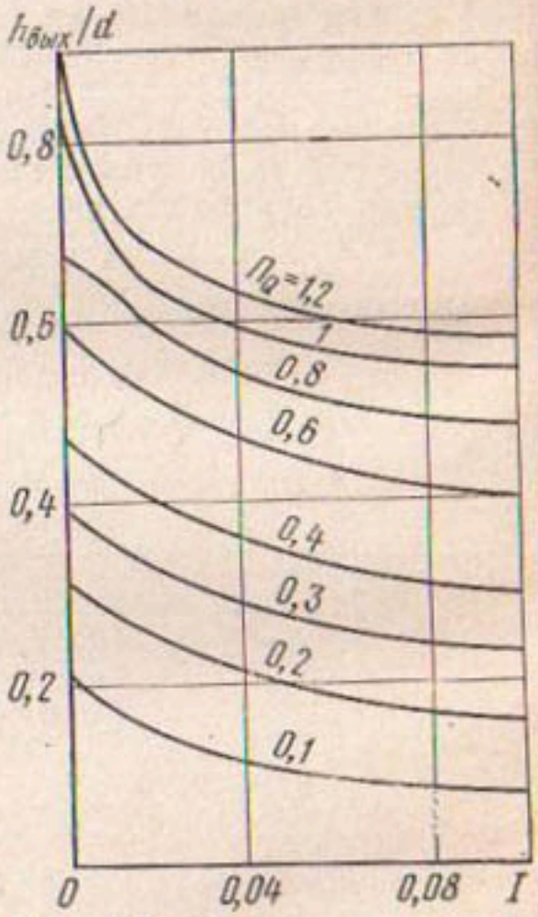


Рис. 9.3. Зависимость $h_{вых}/a$ от Π_Q и i для водопропускной трубы прямоугольного или квадратного сечения: $\Pi_Q=Q/(d\sqrt{ag})$.

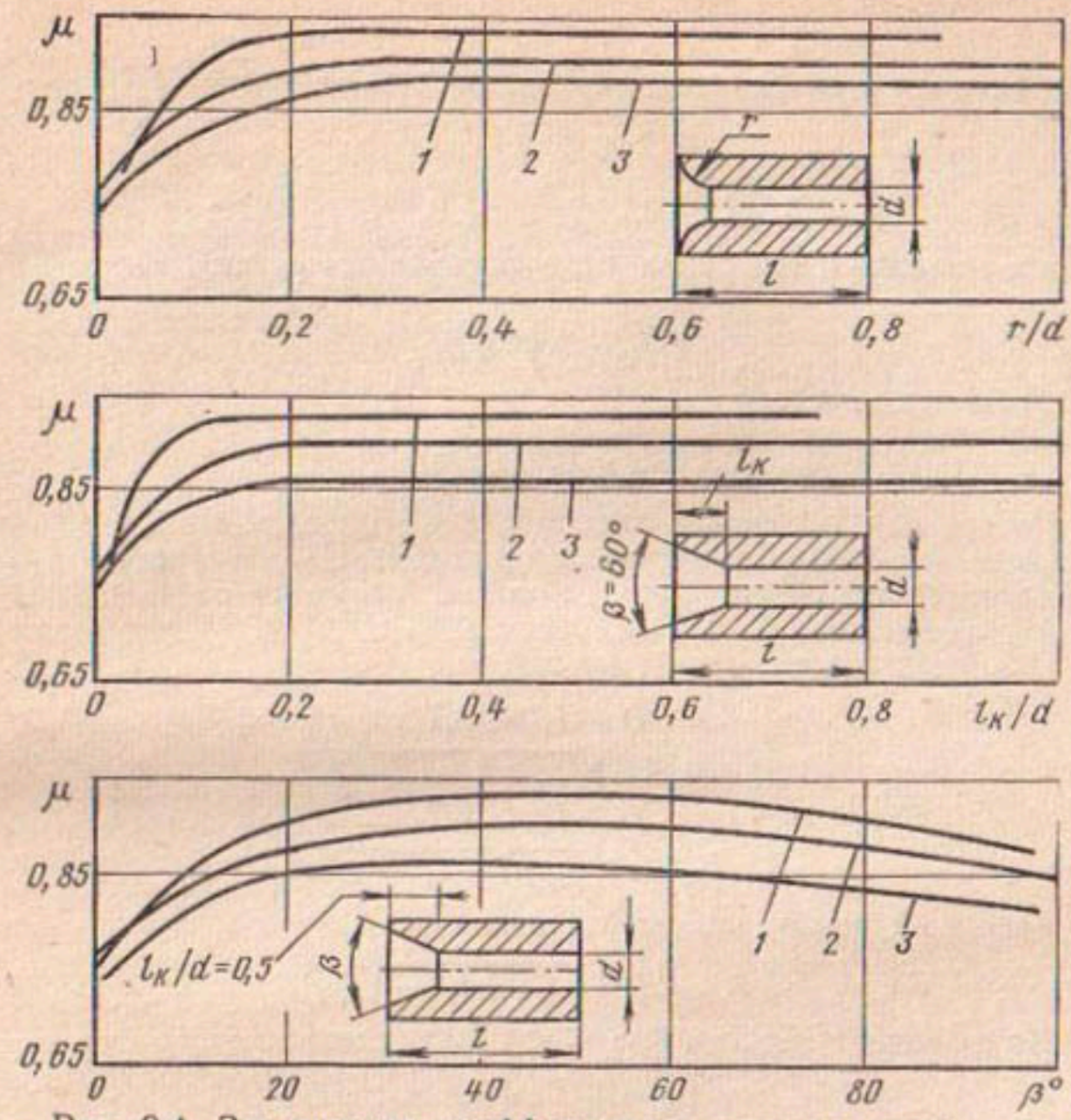


Рис. 9.4. Зависимость коэффициентов расхода труб от формы и размеров оголовков: *1...3* — l/d = 1; 3; 7.

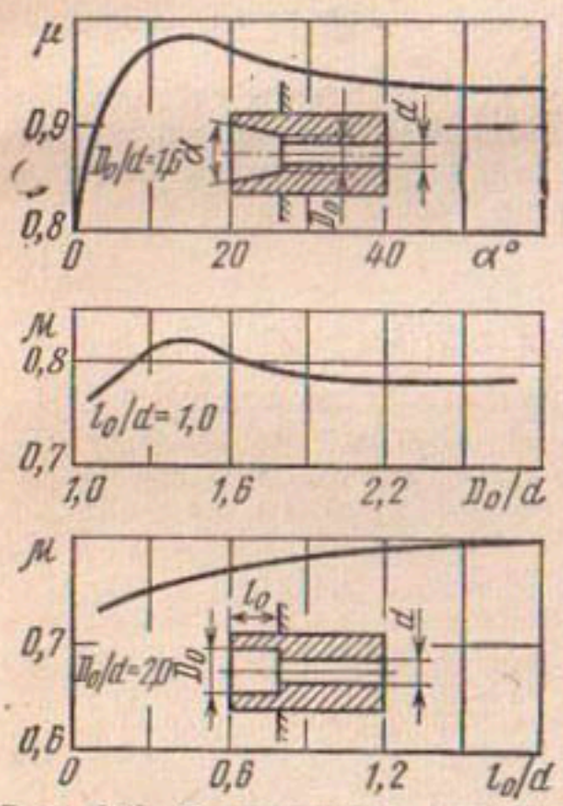


Рис. 9.5. Зависимость коэффициентов расхода труб от размеров кольцевых оголовков.

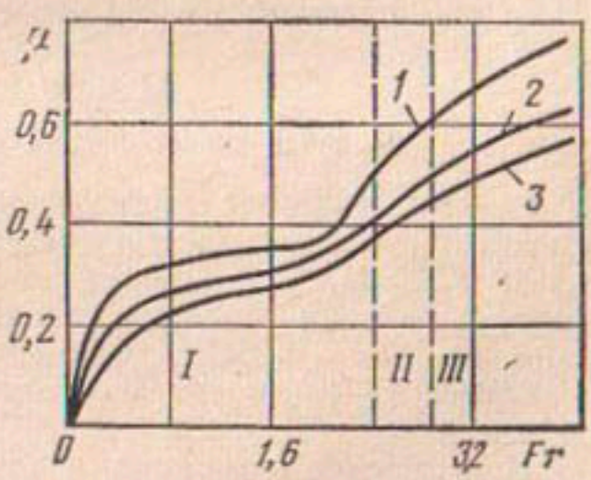


Рис. 9.6. Зависимость коэффициента расхода труб от критерия Фруда: I, II, III — соответственно безнапорная область, полунапорная, напорная; *1...3* — l/d = 3,01; 5,91; 29,85.

$=d$), входном оголовке типа портальной стенки коэффициент расхода равен:

вход не затоплен

$$\mu=(0{,}16i_{\text{т}}+0{,}046)\,H/d+0{,}275I_{\text{т}}+0{,}25; \qquad (9.9)$$

вход затоплен (по схеме истечения из отверстия), выход не затоплен

$$Q=\mu_6\omega\sqrt{2gH_0}, \qquad (9.10)$$

а коэффициент расхода

$$\mu_6=(0{,}715I_{\text{т}}+0{,}3)\,(H/d)^{0{,}64-1{,}4I_{\text{т}}}. \qquad (9.11)$$

Расход для трубчатых сооружений с оголовком типа «капюшон» на входе (срезанный под углом к продольной оси участок трубы, устанавливаемый срезом вниз), которые могут работать в трех режимах, определяют по зависимостям [33]:

напорный режим, выход не затоплен

$$H+i_{\text{т}}l<3{,}7$$

$$Q=0{,}82\omega\sqrt{2g\,(H+i_{\text{т}}l-8d)}; \qquad (9.12)$$

$$H+i_{\text{т}}l>3{,}7$$

$$Q=0{,}78\omega\sqrt{2g\,(H+i_{\text{т}}l-0{,}5d)}; \qquad (9.13)$$

напорный режим, выход затоплен

$$Q=\mu_{\text{н}}\omega\sqrt{2g\,(H+i_{\text{т}}l-h_{\text{вых}})}. \qquad (9.14)$$

Коэффициент расхода при $i_{\text{т}}<0{,}0333$ равен:

$$\mu_{\text{н}}=0{,}761+0{,}45i_{\text{т}}; \qquad (9.15)$$

При $i_{\text{т}}\geqslant 0{,}0333$ $\mu_{\text{н}}=0{,}776=\text{const}$.

Рассмотрим работу трубчатого сооружения с унифицированным оголовком по типу ныряющих параллельных стенок при безнапорном и напорном режимах движения [101].

Безнапорный режим. Если входное сечение трубы не затоплено (выходное сечение может быть незатопленным или затопленным), сооружение работает по схеме истечения через круговой водослив с широким порогом, расход его при этом равен:

$$Q=m\sigma_{\text{п}}b_{\text{к}}\sqrt{2g}\,H_0^{1,5}, \qquad (9.16)$$

$$\sigma_{\text{п}}\,[(h_{\text{сл}}-p)/H-1]/[0{,}74\,(h_{\text{сл}}-p)/H-0{,}798], \qquad (9.17)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — коэффициент подтопления водослива (если водослив не затоплен, $\sigma_{\text{п}}=1$, в противном случае σ определяют по зависимости (9.17); $b_{\text{кр}}=\omega_{\text{кр}}/h_{\text{кр}}$ — ширина потока в фиктивном прямоугольном русле, в котором площадь живого сечения потока и глубина $h_{\text{кр}}$ такие же, как и в фактическом круговом русле; $h_{\text{сл}}$ — глубина воды на сливе; p — разность отметок дна канала в верхнем и нижнем бьефах.

Подтопление водослива начинает влиять на пропускную способность сооружения при условии: $(h_{\text{сл}}-p)>0{,}775H$.

Величина m в зависимости (9.16) равна:

$$m=0{,}326+0{,}148\sin\alpha+0{,}14\sin^2\alpha, \qquad (9.18)$$

где $\sin\alpha$ — уклон трубы.

При работе сооружения с затопленным входным сечением и незатопленным выходным:

$$Q = \mu_б \omega \sqrt{2g(H_п - \eta d)}, \qquad (9.19)$$

где $\mu_б$ — коэффициент расхода, $\mu_б = 0{,}634$; $\eta = 0{,}72 - 0{,}53 \sin\alpha$ — коэффициент, зависящий от типа входного оголовка и уклона трубы.

Напорный режим в трубе с незатопленным выходным сечением возможен лишь при небольшом геометрическом перепаде — не более $0{,}5d$, иначе $i_т < i_{кр}$ [101].

Минимальную допускаемую глубину воды на входе, обеспечивающую устойчивый напорный режим в сооружении при затопленном выходе, можно определить из зависимости:

$$H_{min}/d = 1{,}02 + (0{,}92 - 0{,}3b/d + 0{,}2\sin\alpha + 1{,}1\sin^2\alpha)\,\mathrm{Fr}^{0{,}42 + 0{,}04b/d}, \qquad (9.20)$$

где $\mathrm{Fr} = v^2/gd$ — число Фруда на входе в трубу.

При глубине воды на входе меньше минимальной допускаемой сооружение будет работать в первой фазе напорного режима, то есть в трубу будет попадать воздух через вихревую воронку на входе (вторая фаза — воздух в трубу не попадает). Расход и коэффициент расхода сооружения равны:

$$Q = \mu_c \omega \sqrt{2g\Delta H}; \qquad (9.21)$$

$$\mu_{c_1} = [0{,}673 - 0{,}0027l/d + 0{,}08b/d - 0{,}0177b^2/d^2]\,(H/d)^{0{,}103}; \qquad (9.22)$$

$$\mu_{c_2} = 0{,}762 - 0{,}003l/d + 0{,}03\theta^{0{,}73}, \qquad (9.23)$$

где $\mu_{c_{1,2}}$ — коэффициент расхода сооружения соответственно для каждой фазы; ΔH — гидравлический перепад.

Рассмотрим гидравлический расчет типового оголовка с параллельными ныряющими стенками, горизонтально уложенной железобетонной трубой круглого сечения и выходного оголовка по типу «конверт» [101].

Безнапорный режим работы сооружения возможен при $H < d$. Расход при этом определяют по формуле (9.16). При отсутствии подтопления $\sigma_п = 1$, $m = 0{,}326$. Уровень воды в нижнем бьефе начинает влиять на пропускную способность при $h_{ср} > 0{,}775H$. В этом случае:

$$\sigma_п = (h_{сл}/H - 1)/(0{,}74h_{сл}/H - 0{,}798). \qquad (9.24)$$

Напорный режим. Критерием оценки начала подтопления служит глубина $h_{сл} = 0{,}8d$. При $h_{сл} > 0{,}8d$ наблюдается подтопленное истечение. Расход при этом определяют по формуле (9.19), в которой η в данном случае характеризует распределение давления в выходном сечении; $\eta = 0{,}9$ независимо от l/d. Коэффициент расхода равен:

$$\mu = 1{,}19/(l/d)^{0{,}136}. \qquad (9.25)$$

При затопленном истечении расход определяют по формуле (9.21), а μ_c — по формуле (9.22). Расход прямоугольных трубчатых сооружений для напорного режима при $H > 1{,}3a$, $h_{вых} > 1{,}25a$ определяют по формуле (9.21), для других режимов по зависимостям Л. И. Пашука:

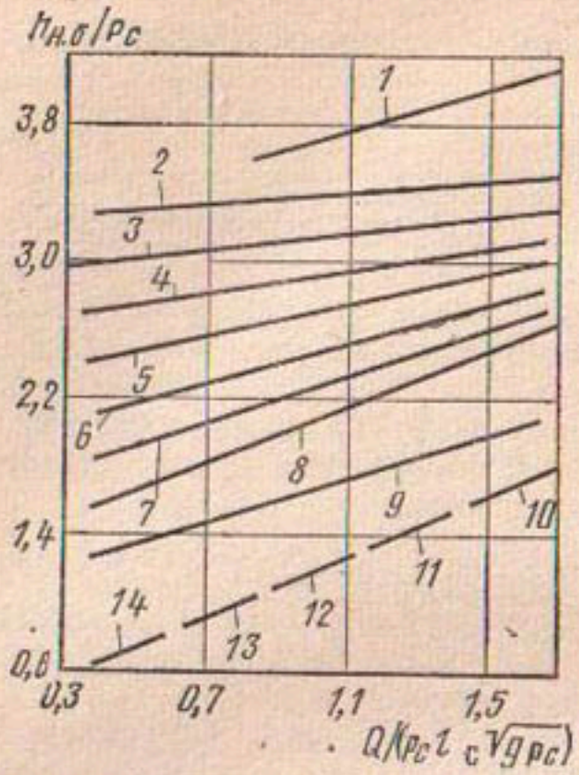


Рис. 9.7. Зависимость $h_{н.б}/l$ от $Q/(l_c l_{BC}\sqrt{g l_c})$: *1...14* — $h_{вых}/h_{н.б}$ = 1,02; 1,03; 1,04; 1,05; 1,06; 1,07; 1,08; 1,09; 1,1; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7.

безнапорный режим

$$H \leqslant a, \quad h_{вых} < 0{,}6a$$

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}; \qquad (9.26)$$

полунапорный режим

$$1{,}1a \leqslant H \leqslant 1{,}6a, \quad h_{вых} < 0{,}8a$$

$$Q = \mu_н \omega \sqrt{2gH_п}; \qquad (9.27)$$

частично напорный режим

$$1{,}1a < H \leqslant 1{,}3a, \quad h_{вых} \leqslant 1{,}2a$$

$$Q = \mu_ч \omega \sqrt{2gz_0}, \qquad (9.28)$$

где H_0 — полный напор над входным порогом трубы; $z_0 = H_0 + p - h_{вых}$ — гидравлический перепад с учетом скорости подхода; p — перепад между дном верхнего и нижнего бьефов.

Коэффициенты расхода определяют по формулам:
безнапорный режим

$$8 \leqslant l/H \leqslant 25$$

$$m = 0{,}154 + H_0/(H_0 + b) + 0{,}273; \qquad (9.29)$$

полунапорный режим

$$5 \leqslant l/H \leqslant 20$$

$$\mu_п = H_0/(H_0 + b) - 0{,}15; \qquad (9.30)$$

частично напорный режим

$$16 \leqslant l/z_0 \leqslant 30 \quad и \quad 0{,}026 \leqslant \psi \leqslant 0{,}047$$

$$\mu = 0{,}354 + 8\psi; \qquad (9.31)$$

напорный режим

$$13 \leqslant l/z_0 \leqslant 65 \quad и \quad 0{,}01 \leqslant \psi \leqslant 0{,}05$$

$$\mu = 1{,}75/(17{,}2 - 1/\psi), \qquad (9.32)$$

$$\psi = z_0/[(1 - \omega/\omega_к + l/\chi_{тр})\,\chi_{тр}],$$

где $\chi_{тр}$ — смоченный периметр трубы; $\omega_к$ — площадь сечения подводящего канала.

Глубину за трубами $h_{н.б}$ при наличии сплошной водобойной стенки высотой $p_c = (0{,}55...0{,}65)\,a$ находят по графикам $h_{н.б}/p_c = f\,(Q/p_c l_c \sqrt{g p_c},\ h_{вых}/h_{н.б})$ (рис. 9.7), где l_c — длина водобойной стенки.

Рассматривая стенку как затопленный водослив, можно более точно определить ее высоту:

$$p_c = h_c - H_c, \qquad (9.33)$$

где h_c — глубина воды перед стенкой; $h_c \approx h_{вых}$; $H_c = Q_{max}/m_п l_c \sqrt{2g}$ — геометрический напор над стенкой; $m_п$ — коэффициент расхода водобойной стенки с учетом подтопления.

Коэффициент расхода водобойной стенки $m_п$ равен:

$$m_п = 0{,}16 + 0{,}32\sqrt{1 - [(h_п/H - 0{,}8)/0{,}16]^2}, \qquad (9.34)$$

где $h_п = h_{н.\,б} - p_с$ — глубина подтопления.

Сопряжение с нижним бьефом будет происходить в виде:
донного затопленного прыжка при

$$h_{вых}/h_{н.\,б} = 1{,}84 - 0{,}324Q/p_c l_c\sqrt{gp_c}; \qquad (9.35)$$

поверхностного затопленного

$$h_{вых}/h_{н.\,б} = 1{,}105 - 0{,}182Q/p_c l_c\sqrt{gp_c}; \qquad (9.36)$$

поверхностного режима со сбойным течением

$$h_{вых}/h_{н.\,б} = 1{,}047 - 0{,}0134Q/p_c l_c\sqrt{gp_c}. \qquad (9.37)$$

Общую зависимость для определения придонных максимальных актуальных скоростей за двухочковыми трубчатыми сооружениями (у откоса) при одинаковом и неодинаковом открытии затворов каждой трубы и при коэффициенте неравномерности их открытия $0 < \beta < 1$ можно представить в виде:

$$v_{д.\,о.\,max} = 1{,}3 + П/[M + K(l_{тр}/h_{н.\,б} - 3)^{3/2}]; \qquad (9.38)$$
$$П = l_{тр}/B;\ l_{тр} = 2a,$$

где B — ширина живого сечения в отводящем русле; M, K — параметры, зависящие от $N = \sqrt{vl_{тр}/(\sqrt{gh_{кр}}B)}$; $M = 0{,}715N - 0{,}186$, $K = 0{,}112N - 0{,}0386$. Если одна труба закрыта, а через вторую проходит $0{,}5Q_{max}$, $M = 0{,}703N - 0{,}25$, $K = 0{,}052N - 0{,}0178$.

Максимальная придонная скорость у дна равна:

$$v_{д.\,д.\,max} = (0{,}75\ldots0{,}85)\,v_{д.\,о.\,max}. \qquad (9.39)$$

Трубчатые сооружения с затворами-автоматами следует рассматривать как единую систему, расход при этом будет равен:

$$Q = \mu_c\omega\sqrt{2g\Delta H}, \qquad (9.40)$$

где $\mu_c = 1/\sqrt{\alpha + \Sigma\zeta}$ — коэффициент расхода системы с затвором; $\Sigma\zeta$ — сумма коэффициентов местных гидравлических сопротивлений и по длине; α — коэффициент неравномерности распределения скоростей; во входном сечении, $\alpha \approx 1$; ΔH — разность уровней воды в верхнем и нижнем бьефах сооружения. Для затвора-автомата Э. Э. Маковского $\zeta_з = (50 - \beta)\,\beta^{-1{,}07Fr^{0{,}05}}$, или $\zeta_з = (50 - \beta)\,\beta^{-1{,}03}$ (по В. А. Храпковскому), где β — угол открытия затвора.

Для трубчатого сооружения с дроссельным затвором при напорном режиме расход определяют при неподтопленном и подтопленном истечении соответственно по формулам Ж. Т. Конбасарова:

$$Q = \mu_c\omega\sqrt{2g(H - \eta d)}; \qquad (9.41)$$

$$Q = \mu_п\omega\sqrt{2g(H - h_0)}, \qquad (9.42)$$

где η — коэффициент, зависящий от степени открытия затвора φ (табл. 9.3); h — нормальная глубина в отводящем русле.

Коэффициент расхода при $1{,}25 \leqslant H/d \leqslant 5$ и $\varphi = 30°$ и $50°$ в обоих случаях определится из $\mu_{с.\,п}/\mu_0 = 1$, при $\varphi = 70°$ и $90°$ для неподтоп-

ленного и подтопленного истечения — соответственно по формулам:

$$\mu_c/\mu_0 = 1{,}3 - 0{,}026H/d; \quad (9.43)$$

$$\mu_п/\mu_0 = 0{,}4d/H + 0{,}92, \quad (9.44)$$

где μ_0 — коэффициент расхода при $H/d = 5$ (табл. 9.4, 9.5).

Косогорные водопропускные трубы следует рассчитывать по данным, приведенным в [55]. Для гидравлических расчетов низконапорных трубчатых сооружений с оголовками по типу «ныряющих» стенок) при работе в частично напорном режиме, сопровождающемся воронкообразованием, и напорном режиме) при их совместной работе с сопрягаемыми бьефами можно использовать графоаналитический метод [34].

9.3. Значения η в зависимости от степени открытия φ

φ, °	5...20	30...60	70...90
η	0,7	0,55	0,76

9.4. Значения μ_0 в зависимости от φ для незатопленного выхода

φ, °	30	50	70	90
μ_0	0,19	0,4	0,6	0,72

9.5. Значения μ_0 в зависимости от φ для затопленного выхода

φ, °	30	50	70	90
μ_0	0,18	0,4	0,6	0,8

Глава 10

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ДОЖДЕВАНИЯ

Характеристики дождевальных машин и аппаратов, необходимые для их гидравлического расчета, приведены на рисунках 10.1...10.6.

Расчет полива дождеванием. При поливе дождеванием определяют продолжительность полива дождевальной машиной (ДМ) на одной позиции (при позиционной работе) или число проходов (при поливе в движении), производительность ДМ (аппаратов) и их число.

Продолжительность полива ($t_п$, мин) при позиционной работе равна:

$$t_п = 16{,}7 m F_д \beta_и / Q_д, \qquad (10.1)$$

где m — поливная норма, м³/га; $F_д$ — площадь одновременного покрытия дождем на позиции, га; $Q_д$ — расход ДМ (аппарата), л/с $\beta_и$ — коэффициент, учитывающий потери воды на испарение; $\beta_и = 1{,}05...1{,}3$.

При поливе в движении число проходов n по участку равно:

$$n = m / \rho_{ср} t_{пр}, \qquad (10.2)$$

где $\rho_{ср}$ — средняя интенсивность дождя, мм/мин; $t_{пр}$ — время прохода ДМ по участку, мин.

Для ориентировочных расчетов продолжительности непрерывного дождевания до образования луж ($t_п$) без учета и с учетом испарения можно использовать соответственно следующие зависимости [20]:

$$t_п = a / (\rho_{ср} b); \qquad (10.3)$$

$$t_п = m \beta_и / \rho_{ср}, \qquad (10.4)$$

где a, b — параметры, характеризующие водопроницаемость почв; $b = 1{,}3...1{,}7$: для тяжелых почв $a = 5...6$, легких $a = 20...30$; $\beta_и = 1{,}1...1{,}3$.

Производительность (га) ДМ за 1 ч чистой работы, 1 ч работы, смену, сутки определяют по формулам соответственно [20,65]:

$$F_{ч.\,ч} = 3{,}6 Q_д / (m \beta_и); \qquad (10.5)$$

$$F_ч = 3{,}6 Q_д k_{см} / (m \beta_и); \qquad (10.6)$$

$$F_{см} = 3{,}6 t_{см} Q_д k_{см} / (m \beta_и); \qquad (10.7)$$

$$F_{сут} = 86{,}4 Q_д k_{сут} / (m \beta_и), \qquad (10.8)$$

где $k_{см}$ — коэффициент использования рабочего времени за смену, принимают в соответствии с технической характеристикой ДМ или по таблице 10.1; $t_{см}$ — продолжительность смены, ч; $k_{сут} = n t_{см} k_{см} / 24$ — коэффициент использования суток (табл. 10.2); n — число рабочих смен в сутки.

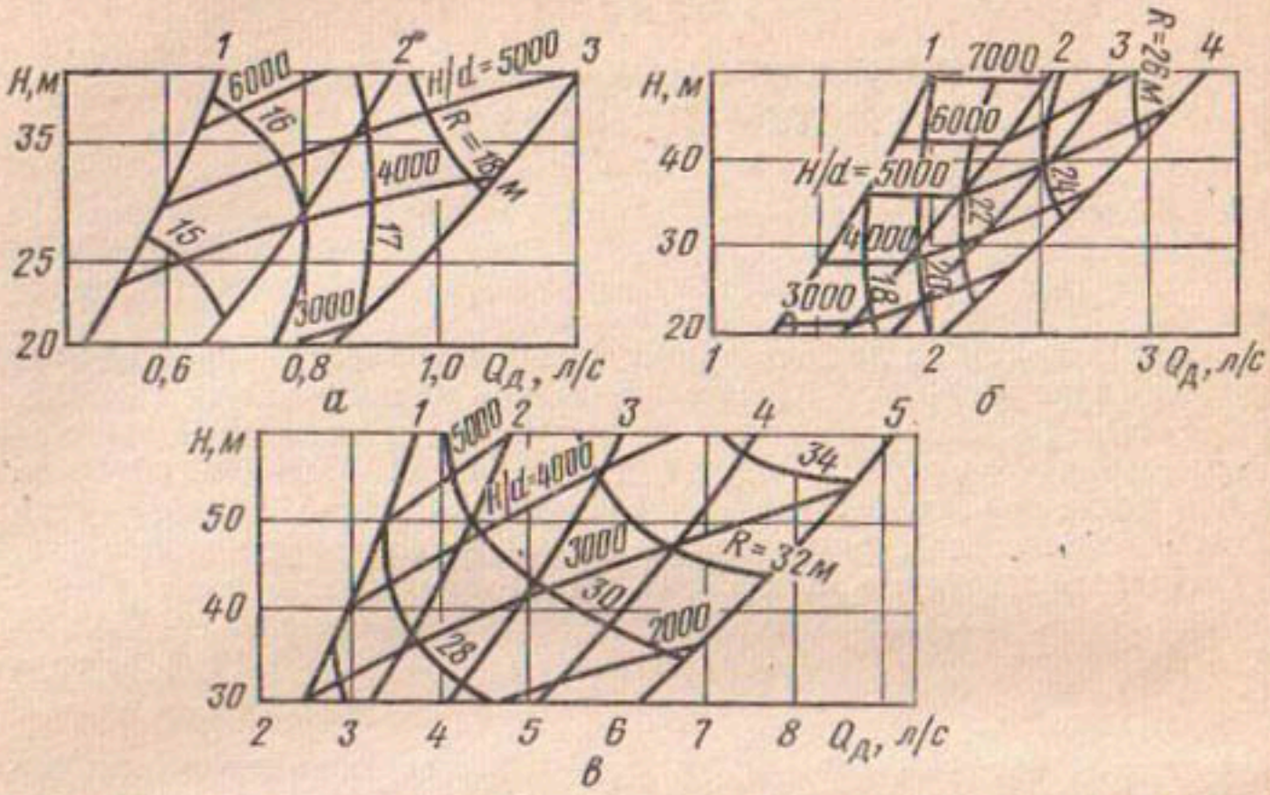


Рис. 10.1. Характеристики дождевального аппарата типа «Роса»: *а* — «Роса-1» (*1*...*3* — d = 6 мм; 7; 8); *б* — «Роса-2»: (*1*...*4* — d = 7, 5, 4 мм; 7,4 мм; 8, 7, 4 мм; 9, 7, 4 мм); *в* — «Роса-3» (d = *1*...*5* — 10, 7, 4 мм; 12, 7, 4 мм; 14, 7, 4 мм; 16, 7, 4 мм; 18, 7, 4 мм).

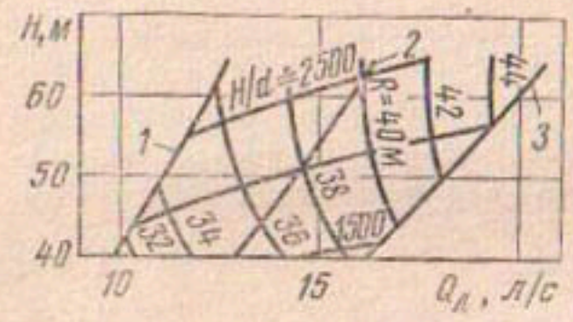


Рис. 10.2. Характеристика дождевального аппарата ДА-2: *1*...*3* — d = 22 мм; 25; 28.

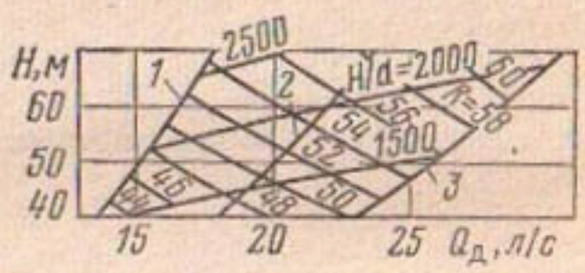


Рис. 10.3. Характеристика дождевального аппарата ДД-30: *1*...*3* — d = 26 мм; 30; 34.

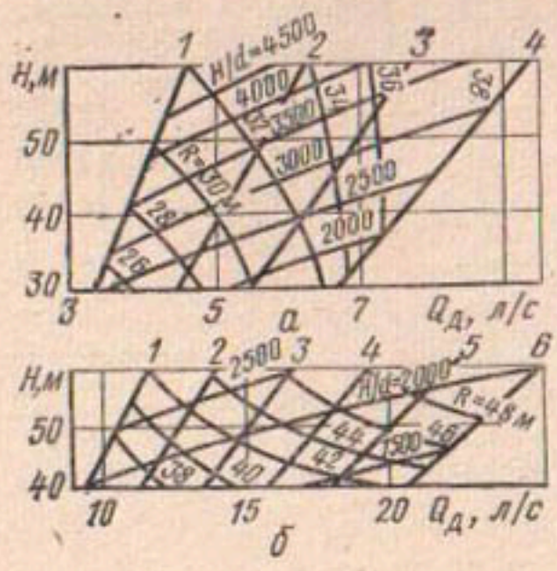


Рис. 10.4. Характеристика дождевального аппарата ПУК: *а* — ПУК-2 (*1*...*4* — d = 12/6 мм; 14/7; 16/7, 18/7); *б* — ПУК-3 (*1*...*6* — d = 20/8 мм; 22/8; 24/8; 26/8; 28/8; 30/10).

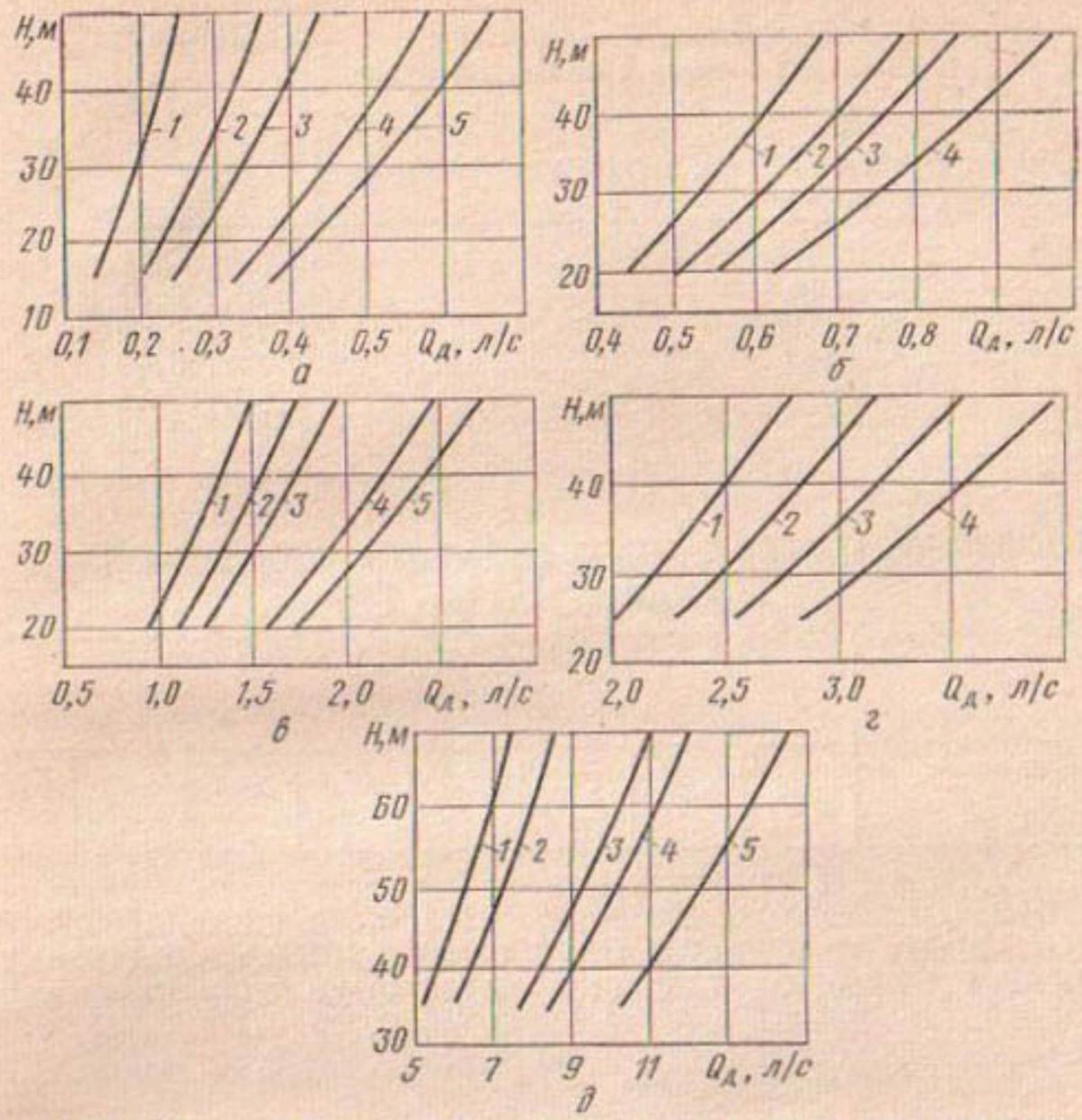


Рис. 10.5. Характеристика дождевальных аппаратов машины «Фрегат»: *а*—серии I (*1...5*—d=3,2 мм; 3,9; 4,3; 5,1; 5,6); *б*—серии II (*1...4*—d=4,8...2,4 мм; 4,8...3,2; 5,1...3,2; 5,6...3,2); *в*—серии III (*1...5*—d=6,3...4,8 мм; 7,1...4,8; 7,1...5,6; 8,7...5,6; 9,5...5,6); *г*—серии IV (*1...4*—d=9,5...5,6 мм; 10,3...5,6; 11,1...5,6; 11,9...5,6); *д*—концевого (*1...5*—d=12,7...7,9...6,3 мм; 14,5...7,9...6,3; 15,9...9,5...7,9; 17,5...9,5...7,9; 19,1...9,5...8,7).

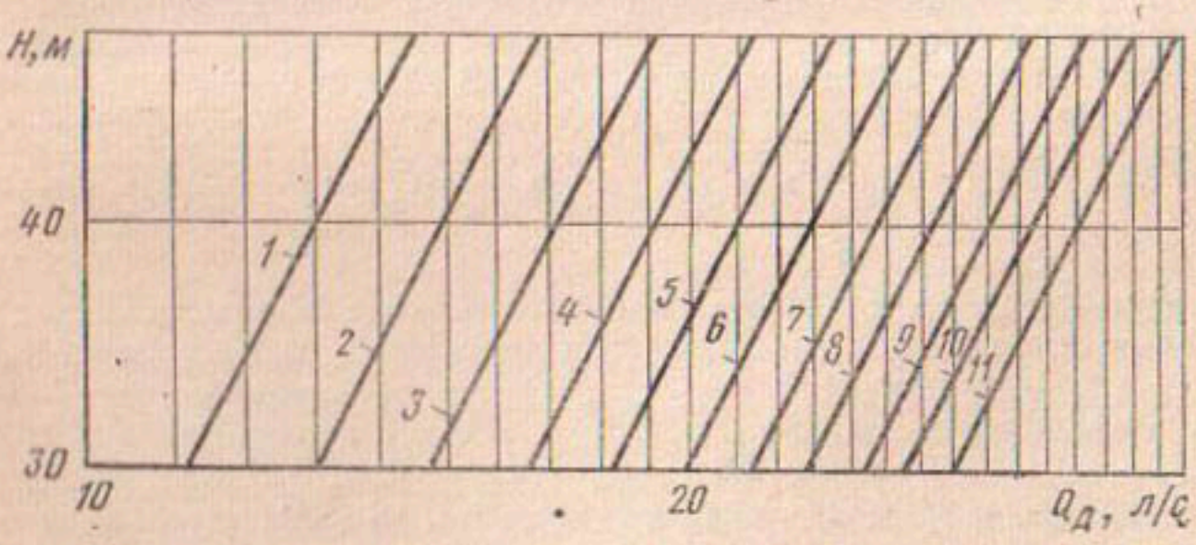


Рис. 10.6. Характеристики одного крыла машины «Волжанка» в зависимости от числа секций: *1...11*—12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30; 32.

10.1. Осредненный коэффициент использования рабочего времени за смену [20]

Дождевальная машина или установка	$k_{см}$
ДДН-70	0,75...0,81
ДДА-100МА	0,75...0,80
ДКШ-64	0,70...0,90
ДФ-120	0,80...0,85
«Фрегат»	0,82...0,93

10.2. Осредненный коэффициент использования времени суток $k_{сут}$ [20]

Дождевальная машина или установка	Поливная норма, м³/га							
	300	400	500	600	700	800	900	1000
ДДН-70	0,750	0,800	0,830	0,860	0,870	0,880	0,890	0,90
ДДА-100МА	0,770	0,850	0,870	0,890	0,900	0,900	0,910	0,91
ДКШ6-4	0,750	0,795	0,830	0,850	0,875	0,885	0,900	0,91
ДФ-120	0,665	0,705	0,730	0,745	0,755	0,770	0,775	0,78
«Фрегат»	0,795	0,825	0,845	0,855	0,865	0,870	0,875	0,89

Допускаемая или предельная сезонная нагрузка (га) на ДМ равна:

$$F_{б.\ сез} = 86{,}4 Q_д t_{кр} k_{сез}/(m\beta_н), \qquad (10.9)$$

где $t_{кр}$ — продолжительность наиболее напряженного (критического) периода, определяют по укомплектованному графику водоподачи, $t_{кр} \approx 10...15$ сут.

Сезонную производительность (га) ДМ можно определить по зависимости:

$$F_{сез} = 86{,}4 Q_д t_{сез} k_{сут} k_{сез}/(M_{ср}\beta_н), \qquad (10.10)$$

где $t_{сез}$ — продолжительность поливного периода в сезоне, определяют по укомплектованному графику водоподачи на севооборотный участок, $t_{сез} \approx 100...120$ сут; $k_{сез} = t_{р.\ сез}/t_{сез}$ — коэффициент использования рабочего времени ДМ в течение сезона (табл. 10.3); $t_{р.\ сез}$ — число дней работы ДМ за сезон; $M_{ср} = M_1\alpha_1 + M_2\alpha_2 + M_n\alpha_n$ — средневзвешенная оросительная норма, м³/га; M_1, M_2..., M_n — оросительная норма каждой культуры в севообороте; α_1, α_2, ..., α_n — доля культуры в севообороте.

10.3. Осредненный коэффициент использования рабочего времени в течение сезона [65]

Дождевальные машины или установки	$k_{сез}$
ДДН-70	0,75
ДДА-100МА	0,73
ДКШ-64	0,85
ДФ-120	0,86
«Фрегат»	0,74

Требуемое число машин для полива севооборотного участка равно:

$$N = q_0 F_c / (Q_д k_р), \qquad (10.11)$$

где q_0 — расчетное значение гидромодуля, л/с; F_c — площадь севооборотного участка (нетто), га; $k_р$ — коэффициент рабочего времени ДМ, $k_р \approx 0{,}8 \ldots 0{,}9$.

Число машин N можно найти и по формуле:

$$N = F_c / F_{д.\,сез}. \qquad (10.12)$$

Качество искусственного дождя. Структура искусственного дождя характеризуется интенсивностью, размером капель, слоем осадков за один цикл и равномерностью распределения по площади орошаемого участка.

Истинную интенсивность дождя можно представить как отношение приращения слоя осадков dh к приращению времени dt, то есть $\rho_и = dh/dt$.

10.4. Расчетные зависимости для определения характеристик дождя [92]

Дождевальная машина, установка	Действительная интенсивность дождя, мм/мин	Слой осадков за один проход или оборот машины, мм	Средняя интенсивность дождя, мм/мин
Короткоструйные, работают в движении (ДДА-100М, ДДА-100МА)	$60Q_д/(bl)$	$60Q_д/(v_д b)$	$60Q_д/(bL)$
Дальнеструйные (ДДН-70, ДД-80 и др.)	$60Q_д/F_д$	$60Q_д/(\pi R^2 n)$	$60Q_д/(\pi R^2)$
Многоопорные позиционного действия («Волжанка», «Днепр»)	$60q/F_д$	—	$60Q_д/(bl)$

Примечание. q — расход воды одним аппаратом, л/с; b — ширина захвата дождем, м; $v_д$ — скорость движения машины, м/мин; l — длина полосы дождя, м; L — длина гона машины, м; $F_д$ — площадь одновременного захвата дождем, м²; R — радиус действия аппарата, м; n — частота вращения аппарата.

Среднюю эффективность дождя определяют по формуле:

$$\rho_{ср} = h_{ср}/t, \qquad (10.13)$$

где $h_{ср}$ — средний слой осадков, выпавших на определенной площади, мм; t — время их выпадения, мин.

В таблице 10.4 приведены расчетные зависимости для определения характеристик дождя для различных типов машин.

В таблицах 10.5, 10.6 приведены допускаемые значения интенсивности дождя.

10.5. Допускаемая интенсивность (мм/мин) дождя при поливных нормах 300...500 м³/га

Почвы	Короткоструйные позиционные аппараты	Машины, работающие в движении, и вращающиеся аппараты
Черноземы легкосуглинистые	0,8...1,0	0,30...0,35
Черноземы средне- и тяжелосуглинистые	0,5...0,8	0,22...0,27
Каштановые и дерново-подзолистые суглинистые почвы	0,4...0,6	0,12...0,20
Сероземы светлые среднесуглинистые	0,3...0,5	0,07...0,15

10.6. Допускаемая интенсивность дождя, мм/мин [14]

Почвы	Уклоны							
	0...0,05		0,05...0,08		0,08...0,12		0,12	
	с культурой	без культуры	с культурой	без культуры	с культурой	без культуры	с культурой	без культуры
Песчаные	0,85	0,85	0,85	0,64	0,64	0,44	0,42	0,21
То же, подстилаемые более плотной почвой	0,74	0,64	0,53	0,42	0,42	0,32	0,32	0,17
Легкие супесчаные	0,74	0,42	0,53	0,34	0,42	0,25	0,32	0,17
То же, подстилаемые более плотной почвой	0,53	0,32	0,42	0,21	0,32	0,17	0,21	0,13
Среднесуглинистые	0,42	0,21	0,34	0,17	0,25	0,13	0,17	0,09
То же, подстилаемые более плотной почвой	0,25	0,13	0,21	0,11	0,17	0,07	0,13	0,04
Тяжелые суглинки и глины	0,09	0,07	0,07	0,04	0,05	0,034	0,04	0,025

Для расчета допускаемой интенсивности дождя Н. Ф. Бефани рекомендует использовать зависимость:

$$\rho_i = \rho / l^{0,02i}, \qquad (10.14)$$

где ρ — допустимая интенсивность дождя при $i=0$; i — уклон поливаемого участка.

Для расчета интенсивности дождя, обеспечивающей сохранение структуры почвы и ее аэрации, можно использовать данные таблицы 10.7.

10.7. Интенсивность дождя, мм/мин

Почвы	По А. Н. Костякову	По А. Моленаару	По А. Г. Грею
Тяжелые	0,01...0,2	0,125...0,165	0,084...0,21
Средние	0,2...0,3	0,21...0,31	0,21...0,32
Легкие	0,5...0,8	0,31...0,41	0,32...0,64

В таблице 10.8 приведены допускаемые значения интенсивности дождя многоопорных ДМ в зависимости от механического состава почвы и уклонов местности.

10.8. Допускаемые значения интенсивности дождя, мм/мин
(по данным УкрНИИГиМа)

Механический состав почв	Уклон местности			
	0,02	0,02...0,05	0,05...0,08	0,08...0,12
Тяжелые	0,08...0,21	0,06...0,08	0,03...0,06	0,02...0,03
Средние	0,21...0,42	0,17...0,21	0,13...0,17	0,07...0,13
Легкие	0,50...0,83	0,32...0,50	0,21...0,32	0,17...0,21

Насадки и аппараты. Расход воды (м³/с) через дождевальные дефлекторные, щелевые насадки и аппараты определяют по формуле:

$$q = \mu\omega \sqrt{2gH_н}, \qquad (10.15)$$

где μ — коэффициент расхода; ориентировочно для дефлекторных насадков $\mu = 0,8...0,94$; щелевых — 0,68...0,75; струйных аппаратов — 0,95...0,97; ω — площадь выходного сечения насадка (аппарата), м²; $H_н$ — напор перед насадком, аппаратом, м. Значения μ можно принимать по таблицам 10.9, 10.10.

Для центробежных насадков [9.2] расход равен:

$$q = a\omega_{соп} \sqrt{2gH_н} / \sqrt{1 + A^2a^2/(1-a^2)}, \qquad (10.16)$$

где $\omega_{соп}$ — площадь выходного сечения сопла; $A = r_c r_{ст} / r^2_{в.п}$ — конструктивный коэффициент; a — коэффициент; при $A=4$ $a=38$; $A=3$ $a=44$; r_c — расстояние от оси подводящего трубопровода до центра сопла насадка, м; $r_{ст}$ — радиус вытекающей струи, м; $r_{в.п}$ — радиус входного патрубка насадка, м.

10.9. Значения коэффициента расхода дефлекторного насадка в зависимости от угла конуса [36]

α,°	60	75	90	105	120	135	150
μ	0,894	0,862	0,850	0,830	0,823	0,810	0,805

10.10. Параметры центробежного дождевального насадка с осевым подводом потока

Элементы насадка					μ
винтовой вкладыш			сопло		
относительная длина участка с шагом		общая относительная длина	угол закрутки, град	d_c/d	
переменным	постоянным				
0,55d	0,45d	1d	7,3	0,45	0,9
0,55d	0,45d	1d	8,3	0,35	0,6

Примечание. $d_{сопл}$, d – диаметр соответственно сопла и вкладыша.

10.11. Значения коэффициентов k, m

Коэффициент	Диаметр вихревой камеры насадка, м		
	116	130	150
k	0,634	0,656	0,752
m	0,989	0,984	0,997

Коэффициент расхода центробежных насадков для низконапорных ДМ можно определить по формуле [14]:

$$\mu = kA^{-m}, \tag{10.17}$$

где k, m — коэффициенты (табл. 10.11); $A = d_c R_0 / r_{вх}$ — конструктивный коэффициент; $d_{сопл}$ — диаметр сопла, мм; R_0 — расстояние от оси сопла до оси входного канала насадка, мм; $r_{вх}$ — радиус входного канала насадка, мм.

Для дефлекторных насадков радиус орошения при $200 < H/d$ 2 000 определяют по формуле:

$$R = H/(0{,}43 + 0{,}014H/d); \tag{10.18}$$

для плоских дефлекторов без стержня (по С. П. Ильину)

$$H/R = a + bH/d; \tag{10.19}$$

при различных углах конуса дефлектора и $3\,000 < H/d < 25\,000$

$$R = H/(a_1 + 0{,}00064H/d); \quad (10.20)$$

для насадков с вогнутыми плавными дефлекторами при $Re = (1...3)\,10^4$ (по А. Г. Васильеву)

$$R = H/[0{,}8 + 3{,}04 \cdot 10^{-4} H/(d_0 - d_{ст})]; \quad (10.21)$$

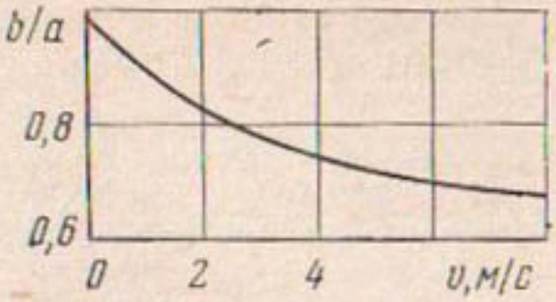


Рис. 10.7. Зависимость b/a от v

для дефлекторов под углом с резкими переходами при $Re = (1{,}5...3{,}5) \cdot 10^4$

$$R = H/[1{,}04 + 2{,}51 \cdot 10^{-4} H/(d_0 - d_{ст})], \quad (10.22)$$

где a, b — коэффициенты, при $d < 0{,}8$ мм $a = 25$, $b = 0{,}00085$; при $d = 1$ мм $a = 5$, $b = 0{,}00067$; при $1{,}1 \leqslant d \leqslant 2$ мм $a = 3{,}5$, $b = 0{,}00059$; $a_1 = 6{,}5\,(1 + \alpha_к/270)$; $\alpha_к$ — угол конуса дефлектора; d_0 — диаметр отверстия крышки; $d_{ст}$ — диаметр стержня.

Радиус орошаемого сектора при $2\,000 < H/h < 5\,000$ равен:

$$R = H/(1{,}15 + 0{,}00003H/h), \quad (10.23)$$

где R — ширина прорези.

Дальность полета струи (траектория неподвижна) центробежных насадков при угле наклона струи к горизонту 32° и H/d 1 000:

по Ф. И. Пикалову

$$R = 0{,}42H + 1\,000d; \quad (10.24)$$

по Б. И. Лебедеву

$$R = H/(0{,}4 + 0{,}00025H/d). \quad (10.25)$$

Если в стволе аппарата имеются элементы, возмущающие поток, то в формуле (10.25) вместо 0,4 берется 0,5. При вращении аппарата с частотой 0,1...1 об/мин, дальность полета струи уменьшается соответственно на 5...15%.

При безветренной погоде дождь распределяют по кругу радиусом R, а при ветре участок полива принимает форму эллипса, у которого большая ось $a = 2R$ совпадает с направлением ветра, а малая b уменьшается по мере увеличения скорости ветра. Значения b/a в зависимости от скорости ветра приведены на рисунке 10.7. Это отношение при $v < 8$ м/с можно вычислить по формуле Ф. С. Салахова, С. Х. Гусейн-заде:

$$b/a = 0{,}34e^{-0{,}35v} + 0{,}66. \quad (10.26)$$

Дальность полета дождевальных струй можно определить по формулам:

Пункера (при полном напоре перед насадком $H \geqslant 40$ м и угле вылета струи $\alpha = 32{,}5°$)

$$R = 1{,}55H\,[1 - 0{,}95H/(4{,}9 + H)]\,\sqrt{1\,000d}; \quad (10.27)$$

Б. М. Лебедева при $800 \leqslant H/d \leqslant 4\,000$

$$R = H/(0{,}5 + 0{,}25H/d); \quad (10.28)$$

Б. В. Нестерводского

$$R = 1{,}4\sqrt{Hd}, \quad (10.29)$$

где d — диаметр насадка, м.

Диаметр наиболее крупных капель приближенно определяют по формуле:

$$d_к = k\sqrt{d_с}/v, \qquad (10.30)$$

где $d_к$ — диаметр капель, мм; $d_с$ — диаметр струи, мм; v — скорость, м/с; k — коэффициент, $k \approx 25{,}5$.

Средний диаметр капель при $10^5 < \mathrm{Re} < 3 \cdot 10^6$ равен:

$$d_{ср.\,к}/d_{сж.\,с} = A/(\mathrm{Re}/10^5)^n + B; \qquad (10.31)$$

$$\mathrm{Re} = v d_{сж.\,с}/\nu,$$

где $d_{сж.\,с}$ — диаметр сжатого сечения струи; A, B, n — коэффициенты, зависящие от расстояния между местом замера капли и соплом; для начала струи $A = 0{,}157$; $n = 0{,}73$; $B = 0$; середины — 0,3; 0,88; 0; конца струи — 0,47; 1; $7 \cdot 10^{-3}$.

Давление дождя (кПа) на почву и растение (по Б. М. Лебедеву):

$$P = 1{,}635 \rho_{ср} \rho_в v/g, \qquad (10.32)$$

где $\rho_{ср}$ — средняя интенсивность дождя, м/мин; $\rho_в$ — плотность воды, кг/м³; $v = c d_к^n$ — скорость падения капель дождя, м/с [38] c, n — величины, зависящие от Re и диаметра капель (табл. 10.12); $d_к$ — диаметр капли, мм.

10.12. Значения c и n

	$\mathrm{Re} < 2$ $d_к < 0{,}1$ мм	$2 < \mathrm{Re} < 800$ $0{,}1 < d_к < 1{,}5$ мм	$800 < \mathrm{Re} < 1600$ $1{,}5 < d_к < 3$ мм
c	$3{,}2 \cdot 10^5$	$3{,}9 \cdot 10^3$	$(4 \ldots 4.5) \cdot 10^3$
n	2	1	0,5

Высоту расположения дождевального аппарата над поверхностью почвы при орошении садов вычисляют по формуле [78]:

$$h = H_д - l \operatorname{tg} \alpha, \qquad (10.33)$$

где $H_д$ — высота дерева до верха кроны, м; l — расстояние между местом стоянки дождевальной установки и ближайшим деревом, м; α — угол наклона дождевального насадка к горизонту, обычно $\alpha \approx 30°$.

Важный показатель оценки качества дождя — размер капель, влияющий на скорость поглощения воды почвой в процессе дождевания и допускаемую поливную норму (табл. 10.13) [10].

10.13. Допускаемая поливная норма (м³/га) в зависимости от диаметра капель и интенсивности дождя

Диаметр капель, мм	Интенсивность дождя, мм/мин			
	0,50	0,75	1,00	1,50
0,4...1	900...200	520...160	400...130	300...100
1...1,5	700...130	370...120	300...90	250...80
1,5...2	340...100	275...80	240...60	190...85
Более 2	190...50	120...40	120...30	100...20

Оптимальные параметры элементов оросительных систем и струйных дождевальных аппаратов следует определять по имеющимся данным [22.23].

Синхронное импульсное дождевание [92]. *Расчет импульсных дождевальных аппаратов автоколебательного действия.* Предварительную нагрузку F принимают из условия обеспечения срабатывания аппарата при максимальном давлении:

$$F = p_в \omega_к, \tag{10.34}$$

где $p_в$ — верхний предел давления в гидроаккумуляторе, $\omega_к$ — площадь клапана, см².

Площади клапана и поршня связаны следующей зависимостью:

$$\omega_к / \omega_п = p_н / p_в, \tag{10.35}$$

где $p_н$ — нижний предел давления в гидроаккумуляторе.

Объем выплеска равен:

$$W_в = W_г p_{ат} [(p_в/p_н)^{1/n} - 1] / p_в + q_п t_в, \tag{10.36}$$

или

$$W_в \approx (0{,}15 \ldots 0{,}25)\, W_г, \tag{10.37}$$

где $W_г$ — объем гидроаккумулятора; $t_в$ — продолжительность выброса; $q_п$ — расход подпитки.

Время накопления и выброса:

$$t_н = W_г p_{ат} (p_в/p_н - 1) / (q_п p_в); \tag{10.38}$$

$$t_в = 2W_в / \mu \omega_{соп} \sqrt{2g (H_в - H_н)}, \tag{10.39}$$

где μ — коэффициент расхода сопла; $\omega_{соп}$ — площадь сопла; $H_в$, $H_н$ — уровни воды в гидравлическом аккумуляторе.

Радиус действия импульсных аппаратов равен:

$$R_и = R \eta_и, \tag{10.40}$$

где R — радиус действия среднеструйного аппарата при максимальном напоре $p_в / (\rho g)$; $\eta_и$ — поправочный коэффициент, зависящий от продолжительности выстрела, начальной скорости и диаметра струи в сжатом сечении, определяют $\eta_и$ экспериментально для каждого типа аппарата.

При расстановке дождевальных аппаратов по квадрату площадь полива, расстояние между аппаратами, число установленных и одновременно работающих аппаратов равны соответственно:

$$F_а = 2R^2; \tag{10.41}$$

$$l = \sqrt{2R}; \tag{10.42}$$

$$N = F_м / (n n_1 F_а); \tag{10.43}$$

$$N_0 = N / z, \tag{10.44}$$

где $F_м$ — площадь массива орошения; n — число полей севооборота; n_1 — число зон на одном севооборотном поле; $n \approx 6 \ldots 10$; z — число делянок одновременного полива в зоне.

Средняя круговая интенсивность дождя по фактическому объе-

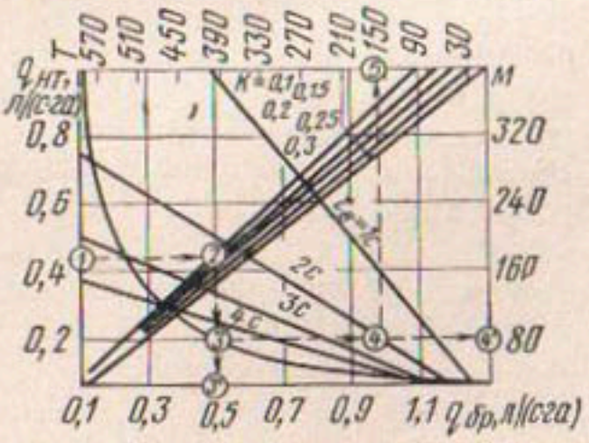


Рис. 10.8. Режим работы импульсных дождевателей ($M = (t_в + t_п)/t_в$; цифрами обозначен порядок расчета).

му выплеска равна:

$$\rho_{ср} = W_в / [F_а (t_в + t_н)]. \quad (10.45)$$

Для расчета системы синхронного импульсного дождевания можно использовать данные таблицы 10.14 и номограмму (рис. 10.8) [93].

10.14. Параметры синхронного импульсного дождевания

Показатель	Расчетная формула или метод установления	Пределы изменения для среднеструйных аппаратов
Удельная водоподача (ордината гидромодуля) q, л/с на 1 га	Расчет гидромодуля	0,3...0,8
Верхний предел давлений в гидроаккумуляторе $p_в$, МПа	На характеристике насоса	0,4...1
Объем гидроаккумулятора $W_г$, л	Конструктивно	20...100 и более
Диаметр сопла $d_{соп}$, мм	»	14...26
Угол поворота за рабочий цикл φ, град	»	2...6
Нижний предел давлений в гидроаккумуляторе $p_н$, МПа	$p_н = (0,4...0,6)\, p_в$	0,2...0,6
Объем выплеска за рабочий цикл $W_в$, л	$W_в = \frac{W_г p_{ат}}{p_в}\left[\left(\frac{p_в}{p_н}\right)^{0,9} - 1\right]$	4...20
Радиус действия R, м	Экспериментально	25...40
Площадь полива при расстановке, га:		
по квадратной схеме	$10^{-4} \cdot 2R^2$	0,12...0,32
по треугольной схеме	$10^{-4} \cdot 2,6R^2$	0,16...0,41
Расход одного аппарата, л/с	$q_а = \omega_а q$	0,04...0,3
Продолжительность накопления $t_н$, с	$t_н = W_в / q_а$	30...180
Продолжительность выброса $t_в$, с	формула (10.39)	1...4
Продолжительность цикла, с	—	30...180
Средняя интенсивность дождя ρ, мм/мин	$\rho = 6 \cdot 10^{-3} q$	0,0018...0,005
Число рабочих циклов за один оборот	$350/\varphi$	60...180

Глава 11
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОЛИВА

Общие положения. Для расчета скорости (м/ч) впитывания на элементарной увлажнительной площадке в момент времени t А. Н. Костяковым предложены формулы:

$$v_{вп.}\, t = k_{вп}/t^{\alpha}, \qquad (11.1)$$

$$v_{вп.\,ср} = k_{вп}/\,[(1+\alpha)\, t^{\alpha}], \qquad (11.2)$$

где $k_{вп}$ — коэффициент водопроницаемости данной почвы в первую единицу времени (табл. 11.1), м/ч; α — коэффициент затухания скорости впитывания (табл. 11.1); $v_{вп.\,ср}$ — средняя скорость впитывания за время t, м/ч (табл. 11.2).

11.1. Значения параметров впитывания α и $k_{вп}$ для сероземов [92]

Почвы	α	$k_{вп}$, м/ч
Супесчаные, подстилаемые галечником, супесчаными и глинистыми отложениями	0,07...0,31/0,14	0,08...0,32/0,176
Средние суглинки, подстилаемые галечником, легкими суглинками с прослоями тяжелого суглинка	0,11...0,75/0,45	0,024...0,0175/0,084
Лёссовидные тяжелые суглинки	0,31...0,86/0,75	0,018...0,096/0,06

Примечание. В числителе — предельные значения, в знаменателе — среднее значение.

11.2. Значения $v_{вп.\,ср}$ и α для различных почв [66]

Почвы	α	$v_{вп.\,ср}$, м/ч
Черноземы: предкавказские слабокарбонатные тяжелосуглинистые	0,36	0,087
предкавказские карбонатные	0,49	0,100
предкавказские слабовыщелоченные легкосуглинистые	0,34	0,110
предкавказские выщелоченные	0,41	0,120
долинные, выщелоченные	0,43	0,073
южные, несолонцеватые	0,66	0,091
темно-каштановые, несолонцеватые	0,42	0,072
темно-каштановые, слабосолонцеватые	0,57	0,063
луговочерноземовидные тяжелосуглинистые	0,40	0,090
луговочерноземовидные	0,59	0,060

Для расчета скоростей впитывания можно использовать формулы:

$$v_{вп.\,t} = bt^{\alpha} + v_{вп.\,уст}; \qquad (11.3)$$

Л. Б. Бунетяну

$$v_{вп.\,ср.} = k_{вп} t^{-\alpha} / (1-\alpha)(2-\alpha), \qquad (11.4)$$

где $v_{вп.\,уст}$ — установившаяся скорость впитывания воды в почву (табл. 11.3); α — коэффициент затухания скорости впитывания (табл. 11.3); b — коэффициент (табл. 11.3).

Скорость движения воды по поверхности орошаемого поля равна:

$$v = C\sqrt{h_п i}, \qquad (11.5)$$

где $C = 87\sqrt{i}/n$ — скоростной коэффициент; i — уклон поверхности; n — коэффициент шероховатости поверхности; $h_п$ — слой воды на поле.

11.3. Значения $v_{вп.уст}$ и α для различных почв [92]

Пахотный слой	α	Подпахотный слой	$v_{вп.уст}$	b
Почвы хорошей структуры в рыхлом состоянии	0,333	Супесь	0,0150	1,45
		Легкий суглинок	0,0080	2,50
		Средний суглинок	0,0045	4,55
		Тяжелый суглинок	0,0025	7,05
		Глины	0,0015	14,60
Почвы обычной средней структуры и плотности	0,600	Супесь	0,0150	0,73
		Легкий суглинок	0,0080	1,47
		Средний суглинок	0,0045	2,50
		Тяжелый суглинок	0,0025	4,50
		Глины	0,0015	7,90
Слабоструктуренные почвы сильноуплотненные	0,75	Супесь	0,0150	0,48
		Легкий суглинок	0,0080	0,39
		Средний суглинок	0,0045	1,55
		Тяжелый суглинок	0,0025	2,90
		Глины	0,0015	4,70

Расчет полива по бороздам. Предельная (максимальная) длина поливной борозды зависит от проницаемости почвы, уклона местности и расхода воды. Наполнение борозды должно быть не более 2/3 ее глубины, а скорость движения воды в ней не более 0,1...0,15 м/с (для борозд с большими уклонами и тяжелыми почвами принимается значение ближе к максимальному). При малых уклонах максимальная глубина борозд 200...250 мм, с увеличением уклонов она уменьшается до 120...150 мм.

В процессе расчета при исходных данных (уклон дна борозды $i_б$, допускаемая (максимальная) скорость движения воды в борозде $v_б$, поливная норма m, средняя скорость впитывания $v_{вп.\,ср}$, коэффициент затухания скорости впитывания α) определяют максимальный расход воды в борозду $q_б$, продолжительность ее подачи $t_б$, максимальную длину борозды $l_б$ и глубину воды в ней $h_б$.

Расход воды в борозде можно определить по следующим зависимостям:

$$q_б = \omega_б v_б, \tag{11.6}$$

где $\omega_б$ — площадь живого сечения борозды, м².

Для борозд треугольного сечения:

$$q_б = \varphi_б h_б^2 v_б; \tag{11.7}$$

при $i_б < 0{,}003$ [66]

$$q_б = 0{,}384 \sqrt{i_б}\,(h_б + 2\Delta)^2/n; \tag{11.8}$$

$$h_б \approx 2H/3;$$

при $i_б < 0{,}0003$ по С. М. Кривовязу

$$q_б = 1{,}28 \sqrt{i_б}\,(0{,}6H - 2\Delta)^2, \tag{11.9}$$

где $\varphi_б$ — коэффициент заложения откоса борозды, $\varphi_б = 1{,}25 \ldots 1{,}5$; n — коэффициент шероховатости, $n = 0{,}04$; H — полная глубина борозды от верха гребня до дна; Δ — точность планировки поля, $\Delta \approx 0{,}03$.

При уклонах от 0,003 до 0,01 для бесструктурных сероземов и пустынных почв хлопковой зоны [93]

$$q_б = 1{,}75 \cdot 10^{-6}/i_б^{2,5}; \tag{11.10}$$

для луговых и лугово-сероземных почв

$$q_б = 2{,}19 \cdot 10^{-6}/i_б^{2,5}; \tag{11.11}$$

при уклонах от 0,02 до 0,1 (по В. Ф. Носенко)

$$q_б = q_{пр}/i_б, \tag{11.12}$$

где $q_{пр}$ — приведенный расход (л/с) для почв средней и слабой сопротивляемости разрыву, то есть при силе сцепления 2...2,2 МПа $q_{пр} = 0{,}004$ л/с; при 2,4...2,5 МПа $q_{пр} = 0{,}005$; для каменистых почв $q_{пр} = (2 \ldots 10) \cdot 0{,}005$ л/с.

Расход сброса при поливе по проточным бороздам равен:

$$q_с = q_б - v_{вп.\,ср} i_б / [(1 - \alpha)\, t_п^{\alpha}]. \tag{11.13}$$

Смоченный периметр в голове борозды в зависимости от расхода в борозду и ее уклона по А. Н. Ляпину

$$\chi = 0{,}111\,(q_б/\sqrt{i_б})^{0,29}. \tag{11.14}$$

Остальные гидравлические элементы живого сечения в голове борозды — ширина зеркала воды, глубина наполнения, площадь живого сечения соответственно равны:

$$B = (\chi + 0{,}009)/1{,}12, \tag{11.15}$$

$$h_б = B^2, \tag{11.16}$$

$$\omega = 0{,}471\,(\chi + 0{,}009)^3. \tag{11.17}$$

Объем воды, подаваемой в борозду, равен [66]:

$$W_б = m a l_б / 1\,000 = 3{,}6 q_б t_б, \tag{11.18}$$

где a — расстояние между осями поливных борозд, на легких почвах $a = 0{,}5 \ldots 0{,}6$ м, средних — 0,6...0,8 м, тяжелых — 0,7...0,9 м, при влагозарядковых и предпосевных поливах $a = 0{,}9 \ldots 1{,}4$ м [72];

Для борозд без сброса

$$W_б = v_{вп.\ ср}\chi_а t_б^{1-\alpha}, \qquad (11.19)$$

где $\chi_а = k_{бп}h_б\sqrt{1+q_б^2}$ — активный смоченный периметр борозды; $k_{б.\ п}$ — коэффициент, учитывающий поглощение воды откосами борозды; для тяжелых почв $k_{б.\ п} = 2{,}5$, средних — 2, легких — 1,5.

Слой воды, впитывающийся за первый час:

$$h_в = k_в/(1-\alpha) + k, \qquad (11.20)$$

где k, b, α — параметры, определяющие впитывание (табл. 11.4).

11.4. Значения параметров k, b, α [50]

Грунты	α	k, м/ч	b
Сильноводопроницаемые супеси и легкие суглинки, подстилаемые галечником примерно уже на глубине 1 м	0,333	0,0150	1,45
Легкие мощные суглинки повышенной водопроницаемости	0,5	0,0080	1,85
Средневодопроницаемые средние суглинки	0,6	0,0045	2,55
Тяжелые суглинки пониженной водопроницаемости	0,7	0,0025	3,50
Слабоводопроницаемые глины и суглинки, подстилаемые непроницаемыми прослойками	0,75	0,0015	4,70

Продолжительность подачи воды в борозду:

$$t_б = [ma/(10\,000 v_{вп.\ ср}\chi_a)]^{1/(1-\alpha)}. \qquad (11.21)$$

Продолжительность добегания воды по сухой борозде до ее конца по А. Н. Костякову равна:

$$t_{б.\ с} = \{B_а k_н k_{вп} l_б/[(1-\alpha)\, q_б]\}^{1/\alpha}, \qquad (11.22)$$

где $B_а$ — ширина активной зоны поглощения воды в борозде; $k_н$ — коэффициент, учитывающий накопление воды в борозде.

Длина добегания струй по сухой борозде [92] равна:

$$l_д = v_0 t_{б.\ с}^{k_з}, \qquad (11.23)$$

где v_0 — скорость продвижения воды по сухой борозде за первую единицу времени; $k_з$ — коэффициент замедления скорости продвижения воды по сухой борозде; $k_з \approx 0{,}4\ldots0{,}9$, максимальное значение обеспечивается при слабой водопроницаемости почв и значительных расходах.

Длину борозды определяют по зависимостям [66,92]:

$$l_б = 3{,}6\cdot10^4 q_б t_б/(ma), \qquad (11.24)$$

$$l_б = q_б^{2/3} i_б^{1/6}/(0{,}1 k_п v_{вп.\ уст}); \qquad (11.25)$$

$$l_б = A_б/(0{,}1 k_п v_{вп.\ уст}\sqrt{i_б}), \qquad (11.26)$$

где $k_п$ — коэффициент, учитывающий уменьшение смоченного периметра по длине борозды, $k_п \approx 0{,}75...0{,}85$; $A_б$ — коэффициент, для почв повышенной сопротивляемости размыву $A_б = 0{,}29$, средней сопротивляемости $A_б = 0{,}025$.

Расчетные уравнения техники полива по бороздам нормой добегания следующие [92]:

без сброса

$$ml_б a/q_б = \{B_а k_н k_{вп} i_б/[(1-\alpha)\, q_б]\}^{1/\alpha}; \qquad (11.27)$$

со сбросом

$$ml_б a/[q_б\,(1-\sigma)] = \{B_а k_н k_{вп} l_б/[(1-\alpha)\, q_б]\}^{1/\alpha}, \qquad (11.28)$$

где a — междурядье для возделываемой культуры; σ — сток в долях подачи воды в голову борозды.

Расчет полива по полосам. Для расчета элементов полива по полосам необходимо иметь следующие исходные данные: уклон полосы $i_п$, допускаемую скорость воды $v_п$ ($v_п = 0{,}1...0{,}2$ м/с), поливную норму полива m, среднюю скорость впитывания $v_{вп.\,ср}$ и α (табл. 11.1).

Для расчета гидравлических элементов потока в начале полосы используют выражения [92]:

$$\chi = B - 2\varphi_п h_в + 2\varphi_п h_п \sqrt{1+\varphi_п^2}; \qquad (11.29)$$

$$\omega = h_п\,(B - 2\varphi_п h_в + \varphi_п h_п), \qquad (11.30)$$

где χ — смоченный периметр, м; B — ширина полосы, м; $\varphi_п$ — коэффициент заложения откосов валиков, м; $h_в$ — высота валиков, $h_в \approx 0{,}1...0{,}25$ м; $h_п$ — слой воды на полосе, м; ω — площадь живого сечения, м^2.

Значение $h_п$ вычисляют по формулам:

$$h_п = (0{,}004 v_п/\sqrt{i_п})^{1,2}, \qquad (11.31)$$

или

$$h_п = \sqrt{q_п/C}, \qquad (11.32)$$

где C — коэффициент скорости, определяют по формуле (11.5); $q_п$ — удельный расход поливной струи, м^3/с на 1 м полосы.

Предельный расход неразмывающей поливной струи в начале полосы равен:

$$q_{п.\,пр} = v_п^2/C. \qquad (11.33)$$

Продолжительность добегания струи по полосе определяют по формуле А. Н. Костякова:

$$t_{доб} = (k_{нак} v_{вп.\,п} l_п/q_п)^{1/\alpha}, \qquad (11.34)$$

где $k_{нак}$ — коэффициент, учитывающий накопление объема воды в полосе, $k_{нак} \approx 1{,}1$; $v_{вп.\,п}$ — средняя скорость впитывания воды в почву за первую единицу времени, м/с.

Время (ч) подачи воды на полосу:

$$t_п = [m/(10^4 v_{вп.\,ср})]^{1/(1-\alpha)}. \qquad (11.35)$$

Длина полосы:

$$l_п = 3{,}6 \cdot 10^4 q_п t_п/m, \qquad (11.36)$$

или

$$l_п = q_п t_п^{\alpha}/v_{вп.\,ср}\ [92]. \qquad (11.37)$$

Расход воды на полосу:

$$Q_п = q_п B. \quad (11.38)$$

При расчете элементов техники полива по широким полосам используют следующие формулы [92]:

$$h_п = 2l\,(q_п^2 n^2 / h_п^{3+2y} - i_п); \quad (11.39)$$

$$t = l\,\{k_{вп} t^{1-\alpha}/[(1-\alpha)\,(2-\alpha)] + 2h_п/3\}/q_п; \quad (11.40)$$

$$l_п = l + \Delta l; \quad (11.41)$$

$$m = 600 q_п t_п / l_п; \quad y = 2\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{h_п}\,(\sqrt{n} - 0{,}1), \quad (11.42)$$

где t — продолжительность продвижения воды по полосе на длину l; Δl — путь продвижения воды после прекращения ее подачи; для почв средней и высокой водопроницаемости $\Delta l \approx 0{,}004l + 40$. В таблицах 11.15...11.17 приведены значения некоторых элементов техники полива по полосам.

11.5. Значения длины полос и удельных расходов воды (по данным ЮжНИИГиМа) [72]

Средняя скорость впитывания воды в почву, мм/м	Уклон орошаемого участка	Длина полосы, м	Удельный расход воды, л/(с·м)
Менее 1,5	0,002...0,004	250...300	8...6
	0,004...0,007	300...350	6...5
	0,007...0,010	350...400	5...4
От 1,5 до 3,0	0,002...0,004	200...250	10...8
	0,004...0,007	250...300	8...6
	0,007...0,010	300...350	6...5
Свыше 3,0	0,002...0,004	150...200	12...10
	0,004...0,007	200...250	10...8
	0,004...0,010	250...300	8...6

11.6. Элементы техники полива по полосам [4]

Почвы	Уклон в направлении полива	Длина полосы, м	Ширина полосы, м	Высота валиков, м	Удельный расход, л/(с·м)
Сероземы легкосуглинистые повышенной водопроницаемости	0,003	200	3,6	0,15	5,5
	0,006	150	3,6	0,15	4,0
Сероземы среднесуглинистые средней водопроницаемости	0,003	400	3,6	0,15	8,0
	0,006	350	3,6	0,15	7,0
Сероземы тяжелосуглинистые слабой водопроницаемости	0,003	500	3,6	0,15	8,5
	0,006	400	3,6	0,15	7,5

11.7. Значения длины полос и удельных расходов для почв средней водопроницаемости (по Е. К. Алаторцеву) [50]

Уклон поверхности	Длина полос, м	Удельный расход, л/(с·м)
0,003...0,005	200...250	8...10
0,005...0,008	250...350	6...8
0,008...0,010	350...450	4...6

Гидравлический расчет транспортирующих и поливных трубопроводов. Расход (нетто) севооборотного участка определяют по формуле [108]

$$Q_{сев} = k_э F_{сев} q_г, \qquad (11.43)$$

где $k_э$ — эксплуатационный показатель, при $i_{тр} < 0{,}008$ $k_э = 1{,}1$; $i_{тр} = 0{,}008...0{,}015$ $k_э = 1{,}15$; $i_{тр} > 0{,}015$ $k_э = 1{,}2$; $F_{сев}$ — площадь севооборотного участка, га; $q_г$ — расчетная ордината гидромодуля, л/(с·га).

Расчетный расход транспортирующих трубопроводов будет равен:

$$Q_{тр} = (k_{эп} m_{max})/(86{,}4 t_п), \qquad (11.44)$$

где $k_{эп}$ — площадь, поливаемая из данного транспортирующего трубопровода, га; m_{max} — максимальная поливная норма ведущей культуры, м³/га; $t_п$ — межполивной период, $t \approx 2...4$ сут.

Расчетный расход $Q_{тр}$ должен обеспечить полив за сутки участка площадью $F_п$, равной дневной производительности трактора $F_{тр}$ на послеполивочной культивации, если она проходит. Определяют второе значение $Q'_{тр}$ и в качестве расчетного принимают большее:

$$Q'_{тр} = m_{max} F_{тр} k_э / 86{,}4. \qquad (11.45)$$

Расчетный расход поливных трубопроводов равен:

$$Q_п = l q_б / a, \qquad (11.46)$$

где l — длина поливного трубопровода, м; a — расстояние между бороздами, м.

Число одновременно работающих транспортирующих трубопроводов:

$$n_{тр} = Q_{сев}/(Q_{тр}\eta), \qquad (11.47)$$

где η — коэффициент использования воды на поливном участке, $\eta = 0{,}98...0{,}99$.

Число одновременно работающих поливных трубопроводов на одном транспортирующем:

$$n_п = Q_{тр}/Q_п. \qquad (11.48)$$

Диаметр транспортирующих и поливных трубопроводов определяют по формуле (11.49), подставляя в нее соответствующие значения расхода

$$d_п = 1{,}13 \sqrt{Q_п / v_{доп}}, \qquad (11.49)$$

где $v_{доп}$ — допустимая скорость в начальном сечении трубопровода, $v_{доп} \approx 1...1{,}2$ м/с.

Диаметр водовыпусков или отверстий в поливном трубопроводе:

$$d_o = \sqrt{q_p/(3{,}48\mu \sqrt{H_н})}, \qquad (11.50)$$

где μ — коэффициент расхода отверстия, водовыпуска (гл. 5); $H_н$ — напор перед отверстием, водовыпуском.

Расчетный расход струи принимают средним между максимальным q_{max} и минимальным q_{min} расходами, подаваемыми в борозду, значениями которых задаются согласно элементам техники полива. Минимальные и максимальные расчетные напоры определяют по формулам [107]:

$$h_{max\,p} = h_{max}\,(1 + q_{max}/q_{min})^2\, q_{min}^2/(4q_{max}^2); \qquad (11.51)$$

$$h_{min\,p} = h_{min}\,(1 + q_{max}/q_{min})^2\, q_{min}^2/(4q_{max}^2), \qquad (11.52)$$

где $h_{max} \leqslant 10$ м; $h_{min} \geqslant 1{,}5$ м.

Определение потерь напора в транспортирующих и поливных трубопроводах следует производить по методике, изложенной в работах [66.10] с использованием данных глав 4, 5.

Глава 12
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ ВНУТРИПОЧВЕННОГО ОРОШЕНИЯ

Основными конструктивными элементами, определяющими особенности систем внутрипочвенного орошения, являются увлажнители. Их конструкция и материал, из которого они изготовлены, влияют на распределение воды и увлажнение почвы. Глубину заложения увлажнителей, как правило, принимают 0,4...0,6 м, напор 0,2...0,5 м, расход на 100 м длины 0,002...0,33 л/с, длину 50...200 м, расстояние между ними 1...3,5 м (для систем без естественного водоупора).

Основные расчетные зависимости. Расстояние B между увлажнителями определяют по формуле В. И. Канардова:

$$B=2\left[0{,}43\sqrt{q_0/k_ф}+1{,}3\,(0{,}2+0{,}3)\,W_{н.\,в}k_п\gamma/q_{уд}\right], \qquad (12.1)$$

где q_0 — расход одного отверстия в увлажнителе, м³/с; $k_ф$ — коэффициент фильтрации грунта, м/с; $W_{н.\,в}$ — наименьшая влагоемкость грунта, %; $k_п$ — коэффициент потенциалопроводности грунта; γ — плотность грунта, г/м³; $q_{уд}$ — расход увлажнителя на 1 м, м³/ч.

Длину увлажнителя можно определить по формуле М. С. Григорова:

$$l_у=q_у/(v\chi), \qquad (12.2)$$

где $q_у$ — расход увлажнителя в его голове, м³/с; v — скорость впитывания воды в почву, м/с; χ — смоченный периметр увлажнителя, м.

Зная скорость впитывания, можно определить удельный расход увлажнителя [111]:

$$q_{уд}=v_{вп}bl, \qquad (12.3)$$

где b, l — соответственно ширина и длина зоны насыщения; $v_{вп}$ — скорость впитывания на глубине закладки увлажнителя за третий час.

Для определения удельного расхода увлажнителя можно использовать и другую формулу [92]:

$$q_{уд}=k_{п.\,пер}h_x, \qquad (12.4)$$

где $k_{п.\,пер}=mTB10^{-7}/(86{,}4t_{м.\,п}h_р)$ — параметр, зависящий от водно-физических свойств почвы и степени перфорации увлажнителя, м²/с; h_x — пьезометрический напор в увлажнителе, м; T — число тактов водооборота; $t_{м.\,п}$ — межполивной период для самого напряженного по водопотреблению месяца, сут; $h_р$ — расчетный напор над осью увлажнителя, м.

Пьезометрический напор в рассматриваемом сечении, отстоящем от начала увлажнителя на расстоянии x, равен [21]:

$$h_x=h_н+(z_н-z_x)-\lambda x v_р^2/(d_у 2g), \qquad (12.5)$$

где $h_н$ — пьезометрический напор во входном сечении увлажнителя, м; $z_н$, z_x — отметки оси увлажнителя соответственно в начале и на расстоянии x от начала, м; λ — коэффициент сопротивления трения по длине; $d_у$ — внутренний диаметр увлажнителя, м; $v_р=v_т+0{,}55v_п$ — расчетная скорость, м/с; $v_т=Q_т/\omega$, $v_п=Q_п/\omega$ — скорость, соответст-

вующая транзитному и путевому расходу, м/с; ω — площадь поперечного сечения увлажнителя, м^2.

Путевой и транзитный расходы равны:

$$Q_п = q_0 x N; \quad (12.6)$$

$$Q_т = q_у - Q_п, \quad (12.7)$$

где $q_0 = \psi\mu\omega_0\sqrt{2gH_и}$ — расход через отверстие, м^3/с; ψ — коэффициент подпора, $\psi \approx 0{,}5 \ldots 1$ (по В. В. Смыслову); μ — коэффициент расхода отверстия (гл. 5); ω_0 — площадь выходного сечения отверстия, м^2; $H_и$ — напор истечения (гл. 5), м; N — число отверстий на 1 м увлажнителя.

Коэффициент сопротивления трения по длине можно определять по формулам А. И. Мурашко при равномерном движении жидкости:

гладкие полиэтиленовые трубопроводы

$$\lambda_0 = 0{,}318/d^{0{,}09}\,\mathrm{Re}^{0{,}25}; \quad (12.8)$$

дренажные полиэтиленовые перфорированные трубопроводы ($d = 37$ мм) соответственно с четырьмя рядами круглых отверстий и с двумя и тремя рядами продольных щелей

$$\lambda_0 = 0{,}37/\mathrm{Re}^{0{,}25}; \quad (12.9)$$

$$\lambda_0 = 0{,}392/\mathrm{Re}^{0{,}25}; \quad (12.10)$$

$$\lambda_0 = 1{,}203/\mathrm{Re}^{0{,}343}; \quad (12.11)$$

поливинилхлоридные (винипластовые) трубопроводы

$$\lambda_0 = 0{,}262/\mathrm{Re}^{0{,}226}; \quad (12.12)$$

гофрированные трубопроводы ($d = 40$ мм)

$$\lambda_0 = 0{,}114/\mathrm{Re}^{0{,}08}. \quad (12.13)$$

Зависимость между $\lambda_п$ при путевом отборе жидкости и λ_0 при равномерном движении имеет вид (по данным А. А. Федорца):

$$\lambda_п = b\lambda_0, \quad (12.14)$$

$$b = 9{,}9/\mathrm{Re}^{0{,}2}.$$

Коэффициент $\lambda_п$ и модуль расхода K равны (по А. А. Федорцу):

гладкие полиэтиленовые трубопроводы (пористые трубки)

$$\lambda_п = 3{,}148/(d^{0{,}09}\,\mathrm{Re}^{0{,}45}); \quad (12.15)$$

$$K = 0{,}626\sqrt{g}\,d^{0{,}045}\,\mathrm{Re}^{0{,}225};$$

дренажные полиэтиленовые перфорированные трубопроводы соответственно с четырьмя рядами круглых отверстий, двумя и тремя рядами продольных щелей

$$\lambda_п = 3{,}663/\mathrm{Re}^{0{,}45};$$

$$K = 0{,}58\sqrt{g}\,d^{2{,}5}\,\mathrm{Re}^{0{,}225}; \quad (12.16)$$

$$\lambda_п = 3{,}881/\mathrm{Re}^{0{,}45};$$

$$K = 0{,}563\sqrt{g}\,d^{2{,}5}\,\mathrm{Re}^{0{,}225}; \quad (12.17)$$

$$\lambda_п = 11{,}91/\mathrm{Re}^{0{,}543};$$

$$K = 3{,}45\sqrt{g}\,d^{2{,}5}\,\mathrm{Re}^{0{,}271}; \quad (12.18)$$

поливинилхлоридные (винипластовые) трубопроводы

$$\lambda_п = 2{,}594/\mathrm{Re}^{0{,}426};$$

$$K = 0{,}689\sqrt{g}\,d^{2{,}5}\,\mathrm{Re}^{0{,}213}; \quad (12.19)$$

поливинилхлоридные гофрированные трубопроводы

$$\lambda_п = 1{,}129/\mathrm{Re}^{0,28};$$

$$K = 0{,}983\sqrt{g}\,d^{2,5}\,\mathrm{Re}^{0,14}. \qquad (12.20)$$

Степень перфорации, при которой $q_{уд} = \mathrm{const}$, определяют из выражения [56]:

$$m_н/m = 1 + \delta_н\left[\alpha_0(2\eta - \eta^2) + \lambda l_у(\eta - \eta^2 + \eta^3/3)/2d_у + g l_г l_у \eta/v_н^2\right]; \qquad (12.21)$$

$$\delta_н = 4c_0 l_у m_н v_н/(\nu d_у \delta),$$

где $m = Nd_0/(4d_у)$ — коэффициент перфорации; N — число отверстий на 1 м увлажнителя; d_0 — диаметр отверстий; $m_н$ — коэффициент перфорации в начале увлажнения; ν — коэффициент проницаемости пористой среды; $v_н$ — скорость в начале увлажнителя; δ — толщина стенки увлажнителя; $\eta = x/l_у$ — относительная длина; $i_г$ — геометрический уклон.

Расчетные скорости можно определить по зависимостям [104]:

$$v_р = \sqrt{v_т^2 + v_т v_п + v_п^2/3}; \qquad (12.22)$$

$$v_р' = v_п/\sqrt{3} \text{ (по В. Г. Лободе)}, \qquad (12.23)$$

где $v_р$, $v_р'$ — расчетная скорость на участке соответственно транзитного и путевого расхода и только путевого расхода.

Для определения продолжительности подачи воды можно использовать формулы [56]:

$$t_п = \pi r_у^2 (R_{пр}^2/r_у^2 - 1)/q_у \qquad (12.24)$$

или

$$t_п = mF_0/(q_у N), \qquad (12.25)$$

где $r_у$ — радиус трубы увлажнителя; $R_{пр}$ — предельный радиус влияния; m — поливная норма, м³/га; F_0 — площадь орошаемого участка, га; N — число увлажнителей.

Время наполнения увлажнителя равно (по А. Г. Назаряну):

$$t_н = l_у/v_н \ln(1 - \eta). \qquad (12.26)$$

Потери напора на трение в полиэтиленовых увлажнителях равны:

$$h = I_у l, \qquad (12.27)$$

где $I_у = 27 \cdot 10^{-5} q_у^{1,78}/d_у^{4,78}$ — гидравлический уклон.

На участках путевого расхода [104]

$$h = \lambda 0{,}0028 Q_п^2 l_у/d_у^5; \qquad (12.28)$$

при наличии транзитного потока

$$h = \lambda 0{,}0028\,(3Q_т^2 + 3Q_п Q_т + Q_п^2)\,l_у/d^5. \qquad (12.29)$$

Условия равенства потерь напора между крайними точками увлажнителя и перепада геодезических отметок выражаются зависимостью [92]:

$$h = i_г l_у = [2{,}67\lambda l_у^3 q_{уд}^2/(\pi^2 g d^5). \qquad (12.30)$$

Удельный расход воды из увлажнителей при напорах 0,4...0,5 м примерно равен: в тяжелых почвах — 0,003...0,004 л/(с·м); сред-

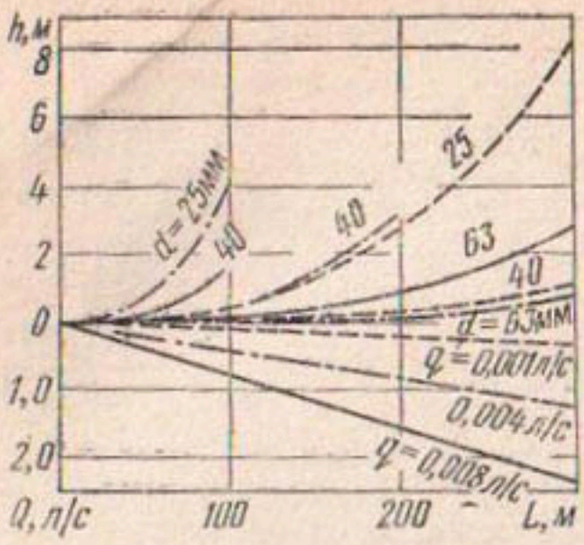


Рис. 12.1. Зависимость для увлажнителей между h, q, L и d.

них — 0,005...0,007 и легких — 0,008...0,001 л/(с·м). Коэффициент λ в формулах (12.6);(12.16)...(12.17) для перфорированных полиэтиленовых труб равен 0,02...0,04; керамических увлажнителей, соединенных втулками,— 0,05...0,07, уложенных встык между слоями полиэтиленовой пленки равен 0,04...0,05.

Расход воды через стыки трубувлажнителей можно определить по формулам С. М. Перехрестова [111] соответственно при напорах 0,1; 0,2; 0,4 м:

$$q = 0{,}0212 l_у \left(0{,}049 + 1/t_п^{3/4}\right) l; \quad (12.31)$$

$$q = 0{,}025 l_у \left(0{,}0867 + 1/t_п^{1/2}\right)/l; \quad (12.32)$$

$$q = 0{,}0317 l_у \left(0{,}0574 + 1/t_п^{7/16}\right)/l, \quad (12.33)$$

где l — длина одного звена трубы.

Значения некоторых элементов техники внутрипочвенного орошения приведены в таблице 12.1, зависимости между длиной увлажнителя, его диаметром, удельным расходом и потерями напора — на рисунке 12.1 [104].

12.1. Значения некоторых элементов техники внутрипочвенного орошения

Водопроницаемость почвы, см/ч	Уклон	Диаметр увлажнителя, м	Длина увлажнителя, м	Удельный расход л/(с·м)	Расход увлажнителя, л/с
Средняя, 6...8	0,005	40	100	0,004	0,4
	0,003	63	200	0,004	0,8
Слабая, 3...4	0,003	25	100	0,001	0,1
	0,001	40	200	0,001	0,2

Расчет оросительной сети [57]. Расчетный расход оросительного трубопровода, потери напора в нем равны:

$$q_{ор} = q_у l_{ор}/B; \quad (12.34)$$

$$h_{ор} = q_{ор}^2 l_{ор}/(3K^2); \quad (12.35)$$

$$h_{уч} = q_{уч}\left[l_{уч} + l_{уч}^2/l_{ор} + l_{уч}^3/(3l_{ор}^2)\right]/K^2, \quad (12.36)$$

где $l_{ор}$ — длина оросителя; K — модуль расхода (гл. 4); $h_{уч}$ — потери напора на отдельных участках трубопровода; $q_{уч}$ — расчетный расход воды на участке.

Напор в начале оросителя принимают равным 0,5...0,6 м, оптимальную его длину — 150...200 м.

Глава 13

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ

Гидравлический расчет поливных и участковых трубопроводов. (По методике комплексного отдела по капельному орошению ВНИИМиТП в Молдавской ССР [75].) При расчете поливных трубопроводов с капельницами исходными данными являются: диаметры трубопроводов [по ГОСТ 18599—73 $d_н$ ($d_{вн}$) — 16 (12) мм, 20 (16), 25 (21), 32 (28) мм]; расход данной капельницы q, м³/с; длина поливного трубопровода $l_т$, м; расстояние между капельницами $l_к$, м; кинематическая вязкость ν, м²/с; уклон поливного трубопровода $i_{п.т}$; средний допускаемый напор в поливном трубопроводе $h_{ср}$, м; назначенная длина расчетного участка Δl, м.

Поливной трубопровод разделяют на участки длиной Δl. На каждом из них определяют потери напора Δh и напор в выбранных сечениях трубопровода $h_{x\,п.т}$, значение которого не должно превышать допускаемое. Расчет ведут с конца трубопровода в следующем порядке. Определяют:

число капельниц n_x на участках длиной Δl и l_i — $n_x = \Delta l / l_k$; $n_i = l_i / l_k$ $\left(l_i = \sum_1^{i-1} \Delta l \text{ — расстояние от конца трубопровода до рассматриваемого сечения} \right)$;

осредненное значение числа Рейнольдса на расчетном участке длиной Δl — $\mathrm{Re} = 1{,}234 q_к (n_i + 0{,}5 n_x)/(d\nu)$;

квадрат модуля расхода — $K^2 = 1{,}232 d^5 g\ \mathrm{Re}/A$; $(A = 0{,}16\,\mathrm{Re}^{0{,}8} + 115)$;

значение коэффициента $k_д$, учитывающего дискретность отбора расхода — $k_д = 1 + 1{,}17\,(l_к / l_{п.т})^{1{,}04}$;

потери напора на расчетном участке трубопровода длиной Δl —

$$\Delta h = k_q q_к^2 \left(n_i^2 + n_i n_x + n_x^2/3\right) \Delta l / K^2 - 3{,}34 q_к^2 \left(n_i n_x + 0{,}5 n_x^2\right)/(g d^4) + \Delta h_м,$$

где $\Delta h_м$ — потери на местные сопротивления в местах подключения капельниц к поливному трубопроводу длиной Δl;

$$\Delta h_м = 0{,}42 \psi q_к^2 \left(0{,}5 n n_x^3 - n_x^3/3\right)/(g d^5),$$

где $\psi = h_{шт}/d$ — относительная высота соединительного штуцера капельницы (табл. 13.1); $h_{шт}$ — высота выступа штуцера; n — общее число капельниц на трубопроводе; напор $h_{x\,п.т}$ в сечениях x-x с интервалом Δl — $h_{x\,п.т} = 1{,}1 h_{ср.к} + \sum_1^i \Delta h - i_{п.т}(l_i + \Delta l)$,

где $h_{ср.к}$ — средний напор в конце поливного трубопровода, м.

13.1. Значения ψ в зависимости от d

d	ψ	φ
0,012	0,396	0,166
0,016	0,296	0,125
0,021	0,226	0,096

Напор в начальном сечении поливного трубопровода с капельницами $h_н$ определяют по зависимости для $h_{x\ п.\ т}$ при длине трубопровода $l_{п.\ т} = l_i + \Delta l$. Значения напора должны отвечать условию $0{,}9h_{ср} \leqslant h_н \leqslant 1{,}1h_{ср}$. В противном случае необходимо изменить диаметр трубопровода.

Потери напора в поливном трубопроводе с капельницами с учетом местных потерь напора можно определить по формуле А. А. Федорца:

$$\Delta h = k_1 k_2 N l_{пол} v^{2-m} \cdot (n_i q_к)^m / g d^{3+m}, \qquad (13.1)$$

где $l_{пол}$ — длина трубопровода с капельницами от конца до рассматриваемого сечения, м; n_i — число капельниц на длине $l_{пол}$; $q_к$ — расход капельницы, л/ч; d — внутренний диаметр трубопровода, м; N — коэффициент (табл. 13.2); m — показатель степени, зависящий от длины поливного трубопровода (табл. 13.2); k_1 — коэффициент, учитывающий тип капельниц и способ подключения их к трубопроводу, для трубопроводов с тупиковыми капельницами $k_1 = 0{,}95$, с проходными — $k_1 = 1$; $k_2 = 1{,}06 - 0{,}0002 l_к/d$ — коэффициент, учитывающий изменение местных сопротивлений при изменении расстояний между капельницами; $l_к$ — расстояние между капельницами; d — диаметр трубопровода.

13.2. Опытные значения коэффициента N и показателя степени m

$l_{пол}$	N	m	$l_{пол}$	N	m
30	$6{,}158 \cdot 10^{-5}$	1,000	114	$1{,}131 \cdot 10^{-7}$	1,226
36	$4{,}214 \cdot 10^{-5}$	1,012	120	$6{,}446 \cdot 10^{-8}$	1,250
42	$2{,}728 \cdot 10^{-5}$	1,024	126	$3{,}375 \cdot 10^{-8}$	1,276
48	$1{,}794 \cdot 10^{-5}$	1,036	132	$1{,}752 \cdot 10^{-8}$	1,303
54	$1{,}196 \cdot 10^{-5}$	1,048	138	$8{,}586 \cdot 10^{-9}$	1,332
60	$8{,}136 \cdot 10^{-6}$	1,061	144	$4{,}114 \cdot 10^{-9}$	1,362
66	$5{,}560 \cdot 10^{-6}$	1,075	150	$1{,}868 \cdot 10^{-9}$	1,394
72	$3{,}598 \cdot 10^{-6}$	1,099	156	$8{,}202 \cdot 10^{-10}$	1,428
78	$2{,}313 \cdot 10^{-6}$	1,105	162	$3{,}518 \cdot 10^{-10}$	1,463
84	$1{,}451 \cdot 10^{-6}$	1,122	168	$1{,}438 \cdot 10^{-10}$	1,500
90	$9{,}458 \cdot 10^{-7}$	1,140	174	$5{,}676 \cdot 10^{-11}$	1,539
102	$3{,}504 \cdot 10^{-7}$	1,180	180	$2{,}136 \cdot 10^{-11}$	1,580
108	$2{,}057 \cdot 10^{-7}$	1,202			

Транзитный расход на подводящем участке поливного трубопровода рассчитывают следующим образом. Определяют:

скорость движения воды на подводящем участке $v = 1{,}277nq_к/d^2$ ($n = l_{п.т}/l_к$ — число капельниц на всей длине поливного трубопровода);

число Рейнольдса на подводящем участке — $Re = vd/\nu$;

коэффициент гидравлического трения по длине — $\lambda = 0{,}2017/Re^{0,2}$;

потери напора на длине $l_{под}$ — $h_{под} = \lambda l_{под} v^2/(d2g)$.

Потери напора на подводящем участке можно вычислить по формулам А. А. Федорца соответственно для труб диаметром $d_н$ ($d_{вн}$) = = 16 мм (12), 20 (16), 25 (21):

$$10^3 I = 0{,}597 Q^{1,816}/d^{4,816}; \quad (13.2)$$

$$10^3 I = 0{,}714 Q^{1,8}/d^{4,8}; \quad (13.3)$$

$$10^3 I = 0{,}969 Q^{1,772}/d^{4,772}. \quad (13.4)$$

Напор в сечении присоединения поливного трубопровода к участковому равен:

$$h_{пт} = h_н + h_{под} - i_{пт} l_{под}. \quad (13.5)$$

При расчете участкового трубопровода необходимо иметь следующие исходные данные: диаметры полиэтиленовых труб $d_н$ ($d_{вн}$): 50 (46) мм, 63 (58), 75 (69), 90 (83), 110 (102), 125 (115), 140 (129), 160 (148); длину участкового трубопровода $l_{у.т}$; длину выбранного расчетного участка Δl; расстояние между поливными трубопроводами $l_{у.п}$; уклон участкового трубопровода $i_{у.т}$. Остальные исходные данные те же, что и для поливного трубопровода. Длину участкового трубопровода разбивают на i участков длиной Δl. На каждом участке определяют потери напора $\Delta h_{у.т}$ и напор в выбранных сечениях $h_{xу.т}$. Последовательность расчета следующая. Определяют:

расход в сечениях присоединения поливного трубопровода к участковому — $Q_{п.т.i} = q_к n$;

число поливных трубопроводов на расчетном участке — $m_x = \Delta l/l_{у.т}$;

число поливных трубопроводов на участке l_i — $m_i = l_i/l_{у.п}$ $\left(l_i = \sum_1^i \Delta l \text{ — расстояние от конца трубопровода до сечения } x\text{-}x \right)$;

осредненное значение Re на расчетном участке Δl — $Re = 1{,}234 Q_{п.т.i}(m_i + 0{,}5m_x)/(d\nu)$;

вспомогательную величину A и квадрат модуля K^2 по формулам для поливных трубопроводов;

значение $K_д = 1 + 1{,}7\,(l_{у.п}/l_{ут})^{1,04}$;

коэффициент отсоединения массы жидкости a_2:

при $3 \cdot 10^3 \leqslant Re \leqslant 5 \cdot 10^4$,

$$a_2 = 0{,}341 \cdot 10^{-4} Re - 0{,}041 \cdot 10^{-8} Re^2,$$

при $5 \cdot 10^4 \leqslant Re \leqslant 17{,}4 \cdot 10^4$

$$a_2 = 0{,}785 - 0{,}21 \cdot 10^{-5} Re;$$

потери напора на расчетных участках длиной Δl — $\Delta h_{у.т} = K_д Q^2_{п.т.i}(m_i^2 + m_i m_x + m_x^2/3)\,\Delta l/K^2 + 1{,}67\,(a_2 - a)\,Q^2_{п.т.i}(m_i m_x + 0{,}5m_x^2)/(gd^4)$;

местные потери напора — $\Delta h_{у.т.м} = 0{,}05 \Delta h_{у.т}$;

напор в сечениях x-x с интервалом Δl —

$$h_{\text{ху. т}} = 1{,}1 h_{\text{п. т}} + \sum_{1}^{i} (\Delta h_{\text{у. т}} + \Delta h_{\text{у. т. м}}) - i_{\text{у. т}} (l_i + \Delta l). \quad (13.6)$$

При невыполнении условия $0{,}9 h_{\text{п. т}} \leqslant h_{\text{ху. т}} \leqslant 1{,}1 h_{\text{п. т}}$ изменяют диаметр трубопровода и расчет повторяют.

Напор в начальном сечении участкового трубопровода определяют по формуле (13.6) при $l_i + \Delta l = l_{\text{у. т}}$. Для ускорения расчета участкового трубопровода рекомендуется использовать примеры и таблицы в [75].

Гидравлический расчет трубопроводов при применении капельниц импульсного действия [75]. Диаметр поливного трубопровода рекомендуется принимать постоянным по всей длине, определяют его по формуле:

$$d_{\text{п}} = 0{,}66 Q_{\text{п}}^{0{,}442}, \quad (13.7)$$

где $Q_{\text{п}} = qF_{\text{п}}T/[\eta k_{\text{с}} (T - t_{\text{в}})]$ — расход в начале поливного трубопровода; q — ордината гидромодуля, м³/(с·га); $F_{\text{п}}$ — площадь участка, орошаемого данным поливным трубопроводом, м; η — КПД сети; $k_{\text{с}}$ — коэффициент суточного использования; T — продолжительность цикла работы системы, с; $t_{\text{в}}$ — продолжительность выплеска всех капельниц системы, с.

Диаметры распределителей более высоких порядков необходимо по длине изменять, определяют их по формуле:

$$d = Q^{0{,}442}, \quad (13.8)$$

где Q — расход данного участка.

Расход в начале системы равен:

$$Q_{\text{с}} = q\omega_{\text{с}}T/[\eta k_{\text{с}} (T - t_{\text{в}})], \quad (13.9)$$

где $\omega_{\text{с}}$ — площадь системы, га.

Напор системы равен:

$$H_{\text{с}} = H_{\text{г. у}} - H_{\text{г. уз}} + H_{\text{к. ср}} + 1{,}1 [\Sigma Q_{\text{п}} h_{\text{п}}/Q_{\text{с}} + \Sigma Q_{\text{у}} h_{\text{у}}/Q_{\text{с}} + \ldots$$
$$\ldots + \Sigma Q_{\text{рт}}/Q_{\text{с}} \Sigma Q_j h_j/Q_{\text{р. т}} + \Sigma Q_i h_i/Q_{\text{с}}], \quad (13.10)$$

где $H_{\text{г. у}}$ — средняя геодезическая отметка участка, м; $H_{\text{г. уз}}$ — геодезическая отметка напорообразующего узла, м; $H_{\text{к. ср}}$ — средний рабочий напор капельницы, $H_{\text{к. ср}} \approx 12$ м; $Q_{\text{п}}$ — расход в начале поливного трубопровода (распределителя первого порядка), м³/с; $Q_{\text{у}}$ — расход в начале участкового трубопровода (распределителя предпоследнего порядка), м³/с; Q_j — расход в начале j-го участка (распределителя второго порядка); м³/с; Q_i — расход в начале i-го участка магистрального трубопровода (распределителя первого порядка), м³/с; $h_{\text{п}}$ — потери напора в поливном трубопроводе при постоянном расходе $Q_{\text{п}}$ по всей его длине; $h_{\text{у}}$ — потери напора в участковом трубопроводе при постоянном расходе $Q_{\text{д}}$ по всей его длине; h_j — потери напора на j-м участке распределителя второго порядка при постоянном расходе Q_j, м; h_i — потери напора на i-м участке магистрального трубопровода при постоянном расходе Q_i, м.

Потери напора определяют по данным глав 3 и 4 с учетом местных сопротивлений, которые обычно принимают равными 10% потерь напора по длине.

Гидравлический уклон при определении потерь напора

$$I = 0{,}00105Q^{1,774}/d^{4,774}. \qquad (13.11)$$

Максимальный напор в начале системы равен:

$$H_{max} = 1{,}1\,(H_в + H_{max\ г.\ у} - H_{г.\ уз}), \qquad (13.12)$$

где $H_в$ — верхний предел рабочего напора в капельнице, $H_в \approx$ $\approx 20...25$ м; $H_{max\ г.\ у}$ — максимальная геодезическая отметка участка, м; $H_{г.\ уз}$ — геодезическая отметка напорообразующего узла, м.

Насос для системы импульсного орошения подбирают таким образом, чтобы обеспечить расчетный и максимальный напоры, определяемые по соответствующим формулам.

На тех участках, где статический напор превысит 40 м, ставят ограничители давлений. Пример расчета импульсно-капельной системы орошения приведен в [75].

Некоторые зависимости гидравлического расчета трубопроводов. Расход в расчетном сечении, в конце и начале поливного трубопровода можно определить соответственно по формулам:

$$Q_р = Q_т + 0{,}55ql; \qquad (13.13)$$

$$Q_р = 0{,}58ql \text{ [62]}; \qquad (13.14)$$

$$Q_н = \sum_i^n Q_i/\eta \text{ [37]}, \qquad (13.15)$$

где $Q_т$ — транзитный расход в расчетном сечении; $q = Q_н/l$ — расход на единицу длины трубопровода; $Q_н$ — расход в начале трубопровода; l — длина трубопровода Q_i — расход одного оросителя; η — КПД поливного трубопровода, $\eta = 0{,}98$.

Расход оросительного трубопровода равен [37

$$Q_i = qF/\eta, \qquad (13.16)$$

где q — ордината гидромодуля в рассматриваемый период, л/с на 1 га; F — площадь, обслуживаемая одним оросительным трубопроводом, га.

Потери напора в оросительном трубопроводе по длине ориентировочно можно рассчитать по формуле [37]:

$$h = lQ_i^2/(3K^2); \qquad (13.17)$$

при равномерном прерывистом распределении расхода вдоль пути транзитный поток на конечном участке отсутствует [87]

$$h = [-\alpha\,(2 - \mu + k\lambda l/(3d)]\,v_к^2/(2g); \qquad (13.18)$$

при наличии транзитного потока

$$h = \left[-\alpha\,(2-\mu) + k\,\frac{\lambda l}{3d}\,\frac{v_т}{v_к - v_т}\right]\frac{v_к^2 - v_т^2}{2g} + k\,\frac{\lambda l}{3d}\,\frac{v_к^2}{2g}, \qquad (13.19)$$

где α — коэффициент, учитывающий распределение скоростей в сечении поливного трубопровода перед капельницей; ориентировочно $\alpha \approx (1...1{,}1)$; μ — коэффициент расхода капельницы; $k = (1 + 1/n) \times$ $\times (2 + 1/n)$ — коэффициент, учитывающий дискретность отделения жидкости от основной массы, $k \approx 1$; $v_т$ — скорость в сечении поливного трубопровода за капельницей; $v_к$ — скорость отделяющегося потока.

Для систем с капельницами импульсного действия [37]:

время заполнения гидроаккумуляторов всех капельниц

$$T = W_в k_{сут} \eta_1/(qF_к) - t_в, \qquad (13.20)$$

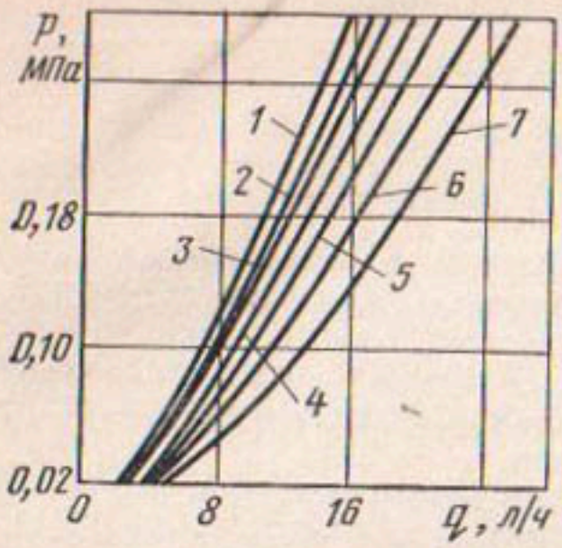


Рис. 13.1. Расход воды микротрубок диаметром 1 мм при их длине: *1...7* — 1 м; 0,83; 0,75; 0,66; 0,58; 0,5, 0,42.

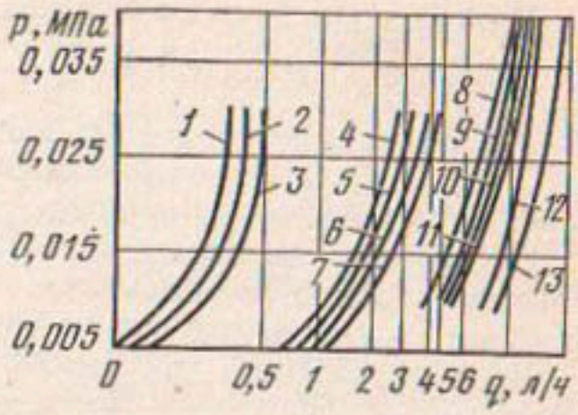


Рис. 13.2. Расход воды в зависимости от диаметра и длины микротрубки: $d = 0{,}5$ мм, *1...3* — $l = 0{,}6$ м; 0,4; 0,3; $d = 1$ мм, *4...7* — $l = 0{,}6$ м; 0,5; 0,4; 0,3; $d = 1{,}7$ мм, *8...13* — $l = 3{,}5$ м; 3; 2,5; 2; 1,5; 1.

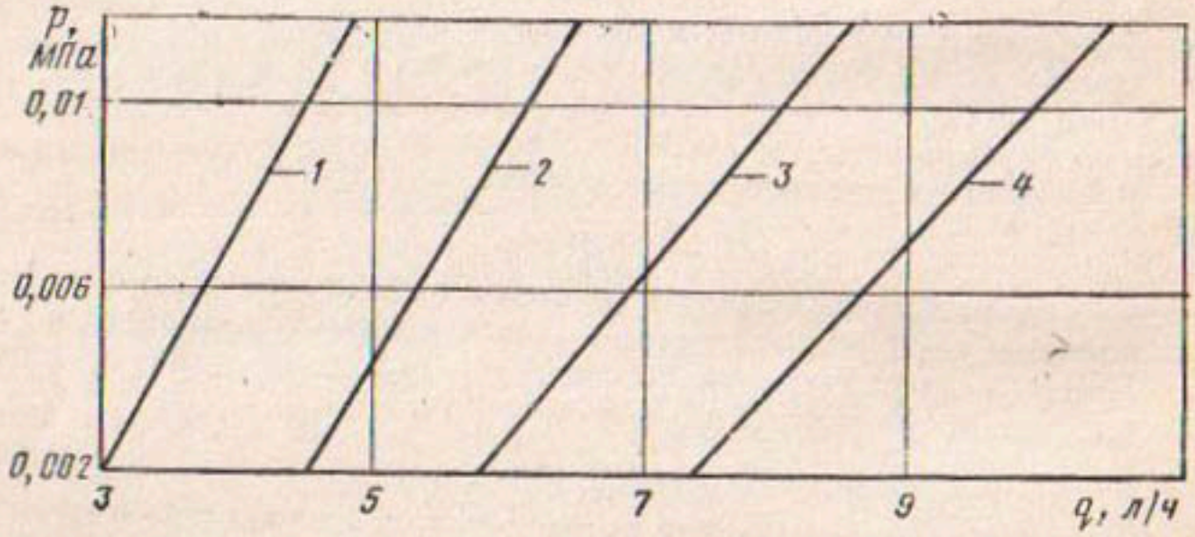


Рис. 13.3. Расходная характеристика капельницы «Таврия-1» при диаметре выходного отверстия: *1...4* — 1,5 мм; 1,8; 2, 28.

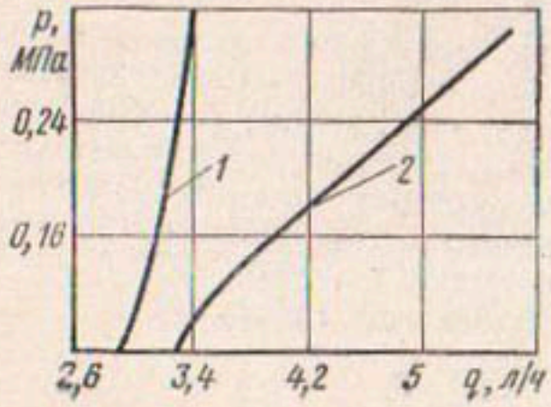


Рис. 13.4. Расходные характеристики капельниц: *1* — К-316; *2* — «Украина-1».

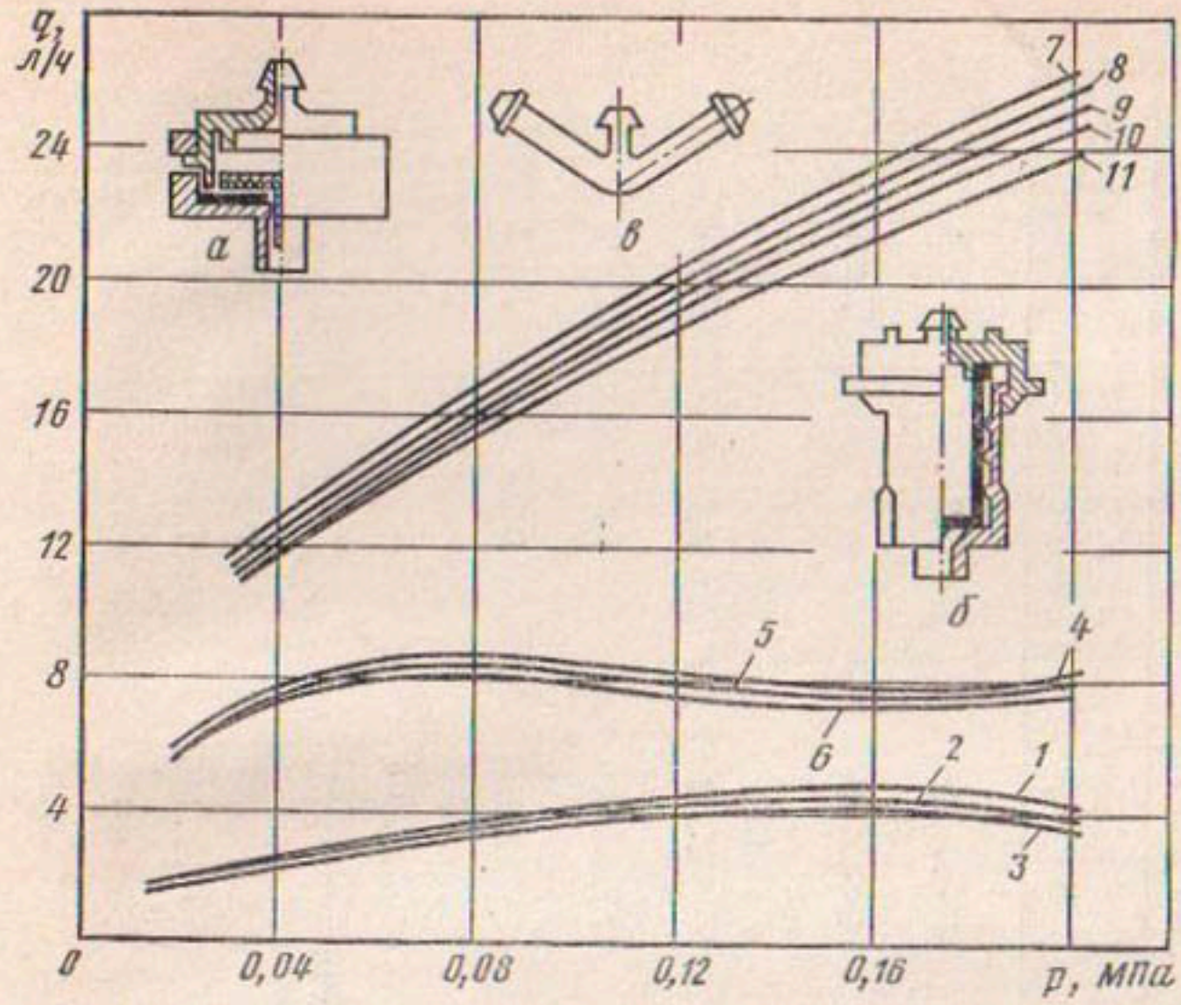


Рис. 13.5. Зависимость расхода от давления при транзитной скорости для капельниц: *а* — «Молдавия-1» (*1*...*3* — 0; 0,4; 0,8 м/с); *б* — распылителя (*7*...*11* — 0; 0,4; 0,7; 1,1; 1,5 м/с); *в* — К-314 (4...6 — 0; 0,5; 1,1 м/с).

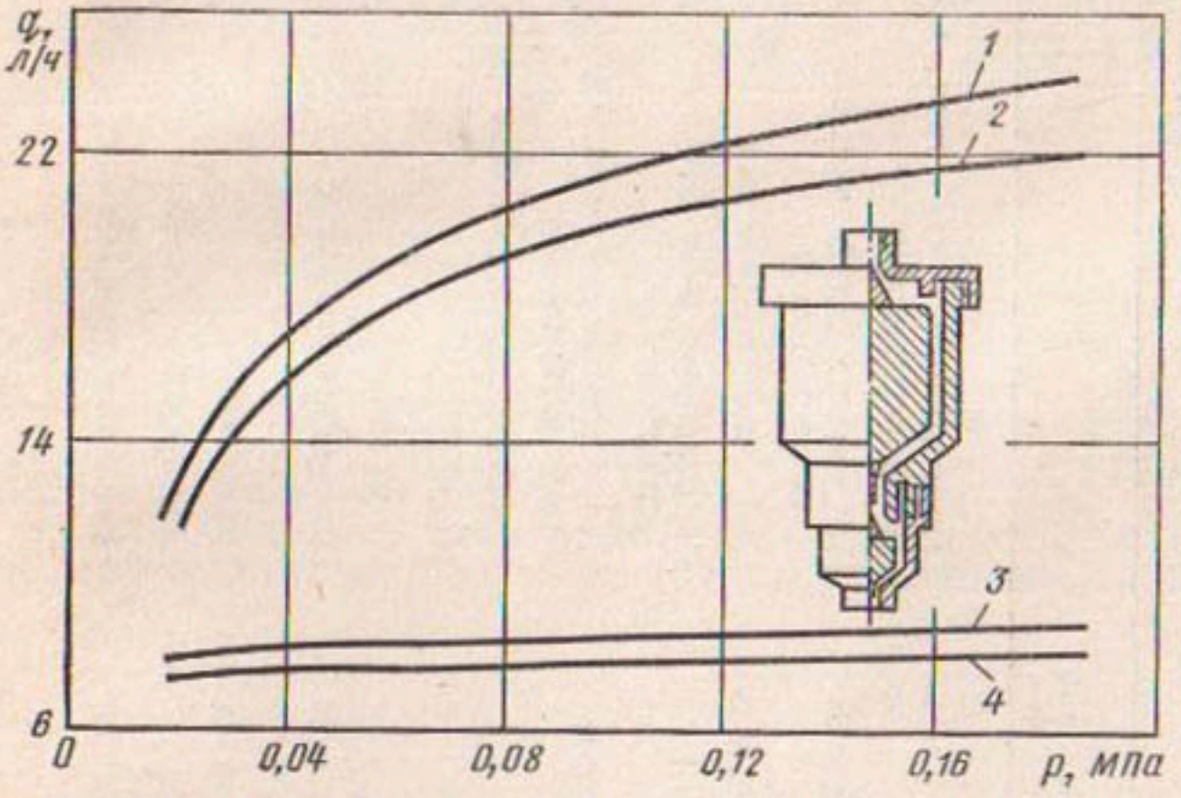


Рис. 13.6. Зависимость расхода от давления и транзитного расхода для капельниц: «ВНИИводполимер» — *1*, *2* — $Q_т$ = 0,025 л/с; 0,06; «Узгипроводхоз-2-»: *3*, *4* — $Q_т$ = 0,025 л/с; 0,06.

13.3. Технические характеристики капельниц

Капельница	Тип	Расход, л/ч	Диапазон давлений, кПа	Допустимая крупность твердых частиц в воде, мм	Площадь полива, м²
«Молдавия-1»	Непрерывного действия, саморегулирующаяся	4,8	100...200	До 0,2	До 6
«Молдавия-2»	Непрерывного действия, самоочищающаяся	3,4...5,7	100...240	—	До 6
«Молдавия-3»	Непрерывного действия	4...16	До 300	—	—
«Таврия-1»	Непрерывного действия, поплавковая	6,8; 10	40...80	До 0,1	До 2,5
«Украина-1»	Непрерывного действия, самоочищающаяся	3,4...5,07	100...240	До 1,0	До 6
К-316	Мембранная прямоточная	10	200...350	До 0,25	До 5,9
К-314	Мембранная	6...12	200...300	—	—
К-350	Мембранная	7,0	100...400	—	—
«Водполимер-3»	Саморегулирующаяся	5+0,5 на один водовыпуск	100...300	—	—
«Узгипроводхоз»	Поплавковая	4,6,8,10	20...270	До 0,8	До 6
«Ала-тау»	С вихревой камерой	2,5...6,5	15...700	До 1,5	До 8
33 АВ-КТ-2	Непрерывного действия	4...16	До 300	—	—
«Коломна-1»	Гидропневмоаккумуляторный (режим работы цикличный импульсный)	0,5...5	150...300	До 1 мм	До 10

где $W_в$ — объем выплеска капельницы, л; $k_{сут}$ — коэффициент суточного использования соответственно системы и воды; η_1 — гидромодуль, л/с на 1 га; $F_к$ — площадь, орошаемая одной капельницей, га; $t_в$ — время выплеска;

средний расход, поступающий в капельницу за время заполнения:

$$Q_{к.\,ср} = q\omega_к (1 + t_в/T)/(k_{сут}\eta_1); \quad (13.21)$$

диаметр трубопровода для любого сечения

$$d = 0{,}655 Q_н^{0{,}442}. \quad (13.22)$$

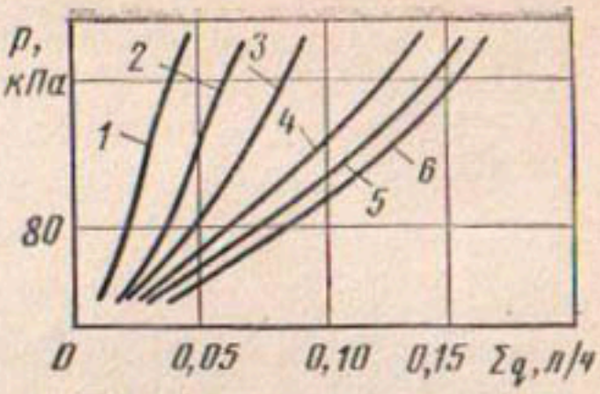


Рис. 13.7. Зависимость давления от расхода капельниц и длины поливного трубопровода: *1* — 30 м; *2* — 60 м; *3* — 90 м; *4* — 120 м; *5* — 150 м; *6* — 180 м.

Гидравлические расчеты капельниц. Расход воды через капельницу можно определить по формуле:

$$q_к = \mu\omega\sqrt{2qH_п}, \quad (13.23)$$

где μ — коэффициент расхода капельницы; ω — площадь выходного сечения капельницы; $H_п$ — напор, при котором происходит истечение из капельницы.

Расход через капельницу можно найти по графикам $q_к = f(p)$ (рис. 13.1...13.4), где p — давление в поливном трубопроводе над капельницей. Расход некоторых типов капельниц в зависимости от скорости транзитного потока в трубопроводе и давления в них приведен на рисунках 13.5...13.7.

Расход капельницы «Молдавия-1» приближенно можно подсчитать по формуле [102]:

$$q = 0{,}028H_т + 3{,}11, \quad (13.24)$$

где $H_т$ — напор в поливном трубопроводе, м.

В зависимости от типа резины, которая используется для диафрагм-компенсаторов, капельницы «Молдавия-1» имеют различные характеристики. Технические характеристики капельниц приведены в таблице 13.3.

При проектировании и эксплуатации систем капельного орошения важно знать, какое давление необходимо поддерживать в сети для обеспечения расчетного расхода капельниц. На рисунке 13.7 приведены такие значения в зависимости от длины поливного трубопровода диаметром 14 мм при расстоянии между капельницами 3 м [98].

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурашидов С. А., Жданов И. А. Определение потерь давления в обратных клапанах.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1968, № 2, с. 127...129.
2. Адамов В. М. Расчет оптимальных сечений напорных водоводов гидроэнергетических установок.— Гидротехническое строительство, 1982, № 2, с. 30...33.
3. Айвазян О. М. К расчету коэффициента Шези земляных каналов.— Гидротехническое строительство, 1982, № 3, с. 30...35.
4. Алексеев В. И., Гершунов Э. В. Справочник гидротехника.— Алма-Ата: Кайнар, 1972, —239 с.
5. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления.— М.: Недра, 1982, —224 с.
6. Альтшуль А. Д., Полякова Э. Н. К вопросу о потерях напора на трение в бетонных напорных водоводах. В кн.: Вопросы гидравлики и водоснабжения, 1980, № 174, с. 25...30.
7. Алтунин В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах.— М.: Колос, 1979. —285 с.
8. Андрияшев М. М. Гидравлические расчеты оборудования водоводов.— М.: Стройиздат, 1979. —104 с.
9. Анисимов В. А., Губер К. В., Зюликов Г. М. и др. Справочник мелиоратора.— М.: Россельхозиздат, 1980.—256 с.
10. Багров М. Н., Кружилин И. П. Прогрессивная технология орошения сельскохозяйственных культур.— М.: Колос, 1980.—208 с.
11. Белан А. Е., Хоружий П. Д. Проектирование и расчет устройств водоснабжения.— Киев: Будивельник, 1981.—190 с.
12. Блохин В. И. Гидравлический удар в напорных оросительных системах.— Новочеркасск, 1975.—128 с.
13. Большаков В. А., Константинов Ю. М., Попов В. Н. и др. Справочник по гидравлике.—Киев: Вища школа, 1977.—280 с.
14. Винников Н. В., Полонский А. М., Данильченко Н. В. Механизация и техника полива сельскохозяйственных культур.— М.: Россельхозиздат, 1976. —159 с.
15. Гавазюк Д. Б., Герасимов Г. Г. Экспериментальные исследования гидромеханических характеристик обратных клапанов.— В сб.: Совершенствование водоснабжения, гидротехнических сооружений и гидравлических расчетов мелиоративных систем.— Кишинев, 1978, с. 32...35.
16. Гарник В. К., Костомаров А. Е., Куделя Н. А. Повышение надежности оросительных систем с чугунными и асбестоцементными трубами.— Гидротехника и мелиорация, 1977, № 3, с. 55...61.
17. Геллер З. И., Скобельцын Ю. А. Влияние гравитационных и поверхностных сил на коэффициент расхода внеш-

них цилиндрических насадков.— Нефтяное хозяйство, 1963 № 9, с. 65...68.
18. Геращенко Л. С. К определению потерь напора в железобетонных напорных трубах с тонкостенными стальными сердечниками.— В сб.: Мелиорация и водное хозяйство.— Киев: Урожай, 1980, с. 61...65.
19. Гнедковский А. Н., Фетисов В. Д. О затопленном истечении жидкости из внешних цилиндрических насадков.— Труды Кубанского СХИ.— Краснодар, 1980, вып. 200/172, с. 121...126.
20. Гниненко В. И., Мартыненко Г. Н. Проектирование закрытой оросительной сети при орошении дождеванием.— Новочеркасск, 1980.—49 с.
21. Гостинцев Д. П. Гидравлический расчет полиэтиленовых увлажнителей при внутрипочвенном орошении.— Экспресс-информация.— ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1979, сер. 1, вып. 10, с. 9...17.
22. Гусев С. И., Никулин С. Н., Хованский Г. С. и др. Методы номографии для определения оптимальных параметров элементов оросительных систем при поливе дождеванием.— Саратов, 1978.— 195 с.
23. Гусев С. И., Хованский Г. С., Никулин С. Н. и др. Оптимальные параметры элементов оросительных систем при поливе дождеванием.— ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1976.— 50 с.
24. Дерюгин Г. К., Чугаев Р. Р. Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов. Ч. I. Прямые водосливы.— Л.: Энергия, 1974.— 58 с.
25. Дерюгин Г. К., Чугаев Р. Р. Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов. Ч. II. Косые, боковые, криволинейные и кольцевые водосливы.— Л.: Энергия, 1976.—23 с.
26. Дикаревский В. С., Якубчик П. П., Продоус О. А. Гидравлические сопротивления железобетонных напорных труб с улучшенной внутренней поверхностью.— Водоснабжение и санитарная техника, 1981, № 9, с. 4...6.
27. Дикаревский В. С., Якубчик П. П., Продоус О. А. Гидравлические сопротивления железобетонных напорных труб с полимерной облицовкой внутренней поверхности.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981, № 11, с. 111...115.
28. Дмитриев А. Ф., Тышенко А. И., Соболевский М. Н. Строительство дренажных коллекторов на участках с большими уклонами.— Гидротехника и мелиорация, 1980, № 3, с. 47...49.
29. Духовный В. А., Баклушин М. Б., Томин Е. Д. и др. Горизонтальный дренаж орошаемых земель.— М.: Колос, 1979.— 255 с.
30. Жданов И. А. Результаты экспериментального исследования комплекса гидравлических сопротивлений при перекачке высоковязких нефтепродуктов.— Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1973, № 6, с. 9...12.
31. Зюликов Г. М. Закрытые оросительные системы,— М.: Колос, 1966.—184 с.
32. Зюликов Г. М., Шалина В. Г. Применение алюминиевых трубопроводов для закрытых оросительных систем.— В кн.: Современные оросительные системы и пути их совершенствования, 1978, вып. 2, с. 98...105.

33. Зубкова Н. Г., Алтунин В. И. Графоаналитический расчет трубчатых сооружений с оголовком типа «капюшон» на входе.— Труды МГМИ, 1978, т. 57, с. 196...204.
34— Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротив-
35. лениям.— М.: Машиностроение, 1975.—559 с.
36. Ильин С. П. Сравнительная характеристика гидравлических параметров дождевальных насадок, применяемых при доращивании укороченных зеленых черенков.— Доклады ТСХА.— М.: 1972, вып. 173, с. 78...81.
37. Ильин С. П., Хроль С. Б., Гросман Ю. И. Гидравлический расчет трубопроводной сети для систем капельного орошения.— Сб. трудов ВНИИГиМ, 1978, вып. 11, с. 106...114.
38. Исаев А. П. Гидравлика дождевальных машин.— М.: Машиностроение, 1973.—121 с.
39. Казеннов В. В., Митюрева Н. Е. О потерях напора на трение в стальных напорных водоводах электростанций.— Сб. трудов Московского инж.-строит. инст., 1980, вып. 174, с. 31...37.
40. Картвелишвили Н. А. Воронкообразования на быстротоках.— Известия АН СССР, ОТН, 1958, № 8, с. 215...220.
41. Киселев П. Г. и др. Справочник по гидравлическим расчетам.— М.: Энергия, 1972.—352 с.
42. Клименко Л. И. Особенности дождевания центробежными насадками.— Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1981, № 8.—с. 17...19.
43. Ковшун В. Я. Пропускная способность безнапорно работающих трубчатых перепадов с большим наклоном трубы.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981, № 2,— с. 110...113.
44. Комлев А. Ф., Скобельцын Ю. А. Истечение жидкости через внешние цилиндрические насадки различной длины с острыми входными и выходными кромками.— Известия вузов. Нефть и газ, 1973, № 2, с. 73...78.
45. Космачев П. П., Скобельцын Ю. А. Боковые истечения жидкости из потока через насадок.— Известия АН СССР. Механика жидкости и газа, 1975, № 2, с. 120...125.
46. Кравченко П. Я. Проектирование осушительной системы.— Новочеркасск. 1976, ч. I с. 88, ч. II с. 96.
47. Кременецкий Н. Н., Томин Е. Д., Хубларян М. Г. Гидравлический расчет пластмассовых дрен, уложенных бестраншейным способом.— Гидротехника и мелиорация, 1978, № 8, с. 94...97.
48. Курганов А. М., Федоров Н. Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации.— Л.: Стройиздат, 1978.—424 с.
49. Межиборский П. М. Таблицы для гидравлического расчета напорных железобетонных водопроводных труб.— Киев: Будивельник, 1975.—118 с.
50. Методические указания и алгоритмы расчета оптимальных параметров при поверхностных способах полива.— Тбилиси, ГрузНИИГиМ, 1979.—108 с.
51. Модзалевский А. И., Куприянов О. И. О шероховатости труб большого диаметра. Гидравлика и гидротехника.— Киев: Техника, 1965, вып. 24, с. 3...9.

52. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методы учета их устойчивости.— М.: Колос, 1970.—179 с.
53. Мостков М. А. Гидравлический справочник.— М.: Гос. изд. по строит. и архитект., 1954.—532 с.
54. Мукурдумов Р. М., Реш Ю. А., Гусанова А. М. и др. Гидравлические сопротивления стыковых соединений полиэтиленовых трубопроводов.— Труды Ташкентского инст. инж. железнодорожн. транспорта, 1970, вып. 72, с. 27...37.
55. Муромов В. С., Лившиц М. Х. Косогорные водопропускные трубы.— М.: Транспорт, 1975.—144 с.
56. Назарян А. Г. Расчет параметров сети внутрипочвенного орошения.— Гидротехника и мелиорация, 1980, № 1, с. 42...44.
57. Николаев М. В., Шевцов Н. М., Зайцева С. В. Временные рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации опытно-производственных систем подпочвенного орошения по увлажнителям из полиэтиленовых перфорированных труб.— Коломна: ВНИИМиТП, 1977.
58. Носова М. М., Барнакова Т. С. Сопротивление входных и выходных отверстий в присутствии проходящего потока.— Промышленная аэродинамика, 1959, № 15, с. 20...37.
59. Овчаренко И. Х., Тищенко А. И. Некоторые вопросы гидравлики сооружений на мелиоративных системах.— Новочеркасск, 1978.—114 с.
60. Овчаренко И. Х., Скобельцын Ю. А., Башилов Е. Б. Рекомендации по расчету расходных характеристик капиллярных насадков.— Новочеркасск, 1980.—15 с.
61. Овчаренко И. Х., Скобельцын Ю. А., Гнедковский А. Н. Рекомендации по гидравлическому расчету пропускной способности внешних цилиндрических насадков при несовершенном сжатии потока на входе.— Новочеркасск, 1980.— 20 с.
62. Орел И. П., Великанов Ю. Н. Гидравлический расчет поливных трубопроводов систем капельного орошения.— Гидротехника и мелиорация, 1978, № 7, с. 52...59.
63. Оффенгенден Ю. С. Гидравлический расчет пластмассовых трубопроводов.— Гидротехника и мелиорация, 1972, № 1, с. 24...28.
64. Пензин В. В., Овчаренко И. Х., Скобельцын Ю. А. Результаты исследований влияния вибрации на движение жидкости в элементах гидравлических систем и рекомендации по их использованию.— Новочеркасск, 1978.—8 с.
65. Петрунин В. П. Орошение дождеванием.— Новочеркасск, 1979.— 99 с.
66. Петрунин В. П. Поверхностное орошение.— Новочеркасск, 1980.—98 с.
67. Полферов Б. В., Давыдов В. Д. Справочник по орошению сельскохозяйственных культур в Донбассе.— Донецк, 1970.—191 с.
68. Попов К. В., Корюкин С. Н. Сооружения на мелиоративных каналах.— М.: Колос, 1972.—152 с.
69. Правила измерения расхода жидкости при помощи стандартных водосливов и лотков. РДП-99—77.— М.: Изд. стандартов, 1977.—52 с.
70. Решеткина Н. М., Борон В. А., Якубов Х. Н. Вер-

тикальный дренаж орошаемых земель.— М.: Колос, 1966.— 232 с.
71. Розанов Н. П. и др. Гидротехнические сооружения.— М.: Стройиздат, 1978.—647 с.
72. Розова А. А., Тельцов А. П. Внутрихозяйственная оросительная сеть.— М.: Россельхозиздат, 1979.—64 с.
73. Рудь А. М. Защита трубопроводов оросительных систем от гидравлических ударов. Гидравлика и гидротехника.— Кишинев, 1977, с. 55...58.
74. Руководство по проектированию магистральных и межхозяйственных оросительных систем. ВТР-II-7—75. Минводхоз СССР, 1975.—51 с.
75. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации систем капельного орошения. ВТР-II-28—81.— Минводхоз СССР, 1981.— 180 с.
76. Рычагов В. В., Шольц М. Е. Взаимное влияние местных сопротивлений в напорных коммуникациях насосных станций.— Экспресс-информация.— ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1970, сер. 6, вып. 2, с. 12...20.
77. Сапожников М. М. Неметаллические напорные трубопроводы.— Л.-М.: Стройиздат, 1957.—163 с.
78. Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации/Под ред. Е. С. Маркова.— М.: Колос, 1981.—375 с.
79. Скиба М. М. Практическая гидравлика для ирригаторов.— М.: Колос, 1966.— 152 с.
80. Скобельцын Ю. А. Рекомендации по расчету пропускной способности отверстий.— Краснодар: Кубанский СХИ, 1980.— 121 с.
81. Скобельцын Ю. А. Рекомендации по гидравлическому расчету кавитационных и срывных характеристик насадков.— Краснодар: Кубанский СХИ, 1980.—12 с.
82. Скобельцын Ю. А., Жигулин В. В. Влияние угла конуса на коэффициенты расхода конически сходящихся насадков.— Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1976, № 11, с. 41...43.
83. Скобельцын Ю. А., Жигулин В. В. Истечение жидкости из конически расходящихся насадков.— Известия вузов. Нефть и газ, 1977, № 9, с. 45...49.
84. Скобельцын Ю. А., Комлев А. Ф., Гнедковский А. М. Коэффициенты расхода дорожных труб.— Труды II Всесоюзной научно-технической конференции. Гидравлика водопропускных дорожных сооружений.— Киев, 1969, с. 283...286.
85. Скобельцын Ю. А., Комлев А. Ф. Влияние цилиндрических колец на расходные характеристики внешних цилиндрических насадков.— Водоснабжение и санитарная техника, 1977, № 12, с. 7...8.
86. Скобельцын Ю. А., Космачев П. П., Кузнецов Е. В. Влияние относительной длины и транзитной скорости на расходные характеристики цилиндрических насадков.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1980, № 10. с. 111...112.
87. Скобельцын Ю. А., Кузнецов Е. В. Гидравлические характеристики отдельных элементов систем капельного орошения виноградников. Прогрессивные приемы выращивания

виноградников и посадочного материала.— Труды Кубанского СХИ.— Краснодар, 1982, вып. 213 (241), с. 48...54.
88. Скобельцын Ю. А., Овчаренко И. Х., Комлев А. Ф. Рекомендации по гидравлическому расчету пропускной способности комбинированных насадков.— Новочеркасск, 1980.— 18 с.
89. Скобельцын Ю. А., Плешков П. Б. Истечение жидкости через систему насадков-экран.— Известия вузов. Энергетика, 1980, № 11, с. 84...88.
90. Скребков Г. П. Гидравлический расчет устойчивых земляных каналов по методу эпюр скоростей.— Гидротехническое строительство, 1981, № 6, с. 25...28.
91. Скрипник О. В., Гаць П. И., Соложенко М. А. Экспериментальные исследования безуклонного и малоуклонного дренажа.— Гидротехника и мелиорация, 1979, № 8, с. 51...54.
92. Справочник по механизации орошения/Под ред. Б. Г. Штепы.— М., Колос, 1979.—303 с.
93. Сурин В. А., Носенко В. Ф. Механизация и автоматизация полива сельскохозяйственных культур.— М.: Колос, 1981.— 271 с.
94. Ташлыков П. Г. Теоретическое обоснование построения совмещенных номограмм расчетных параметров поверхностных водостоков и их применение при проектировании каналов гидравлически наивыгоднейшего живого сечения.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1982, № 8, с. 97...100.
95. Тольцман В. Ф., Шевелев Ф. А. Гидравлический расчет резиновых рукавов.— Нефтяное хозяйство, 1950, № 6, с. 51...54.
96. Тупиченков А. А. О потерях в некоторых местных сопротивлениях при движении через них сжиженных углеводородных газов.— Известия вузов. Нефть и газ. 1961, № 9, с. 102...106.
97. Федорец А. А., Маланчук З. Р. Технические указания по гидравлическому расчету систем капельного орошения.— Коломна, 1981.—456 с.
98. Федорец А. А., Мороз С. М., Конюхов Л. А. Определение сопротивления полиэтиленовых трубопроводов с капельницами.— Гидротехника и мелиорация, 1978, № 2.—18 с.
99. Федоров Е. П. Результаты натурных исследований катящихся волн на быстротоках.— Труды координационных совещаний по гидротехнике.— М.: Госэнергоиздат, 1963, вып. 7, с. 49...53.
100. Френкель Н. З. Гидравлика.— М.: Госэнергоиздат, 1956, с. 279...301.
101. Храпковский В. А., Курманалиев Х. К. Рекомендации по гидравлическому расчету пропускной способности трубчатых сооружений.— Новочеркасск, 1978.—15 с.
102. Хроль С. Б., Ардатов В. П. Гидравлические характеристики капельниц, выпускаемых в СССР и за рубежом.— Экспресс-информация.— ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1980, сер. 7, вып. 3. с. 322.
103. Хруппа И. Ф., Иванов В. П. Гидросооружения и сельскохозяйственные мелиорации.— М.: Колос, 1977.— 384 с.
104. Чернов Г. И. Исследование техники подпочвенного ороше-

ния виноградников в Казахстане.— Гидротехника и мелиорация, 1978, № 12, с. 42...48.
105. Черняк И. Л. Исследования гидравлических сопротивлений специальных гофрированных бензостойких шлангов и запорных вентилей.—Нефтяное хозяйство, 1948, № 6, с. 55...59.
106. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных и пластмассовых водопроводных труб.— М.: Стройиздат, 1970.—112 с.
107. Шейнкин Г. Ю., Губкин В. К., Сурин В. А. и др. Инструкция по проектированию, строительству, эксплуатации самонапорных оросительных систем с поливными трубопроводами.— Минводхоз ТаджССР, 1981.— 112 с.
108. Шестопал А. О., Коваленко И. И., Медведева О. Л. О гидравлическом расчете водопроводов.— Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981, № 12, с 89...92.
109. Шлипченко З. С., Руденко-Грицюк Г. Е., Кресан Н. Г. Местное гидравлическое сопротивление пробочного крана при течении мелассы.— Известия вузов. Пищевая технология, 1964, № 4, с. 154...158.
110. Яблонский В. С., Ван Най. Исследования работы обратного поворотного клапана.— Известия вузов. Нефть и газ, 1959, № 6, с. 109...116.
111. Яковлев Н. П., Разуваев В. С. Расчет системы подпочвенного орошения.— Гидротехника и мелиорация, 1980, № 7, с. 39...41.
112. Яньшин П. И. Гидродинамические характеристики затворов и элементов трубопроводов.— М.: Машиностроение, 1965.— 260 с.
113. Aulich J. Zwiekszenie wspolyczynnika przeplywu α i poprawa wlasnosei metrologicznych kryz ostrobzeznych. Pomiary, automatica, kontrola, 1969, t. XV, N 4, p. 160—162.
114. Halasz A. Strömun technische untersuchungen an rehelventilen. Techn. Inform. Armat. 1972, vol. 7, N 2—4, p. 38—46.
115. Hall G. W. Analitycal determination of the discharge characteristics of cylindrical—tube orifices. Tournae mechanical engineering science. 1963, vol. 5, N 1, p. 91—97.
116. Levin L., Clermont F. Etude des pertes de charge singulieres dans les convergents coniques. Le Génie Civil. 1970, vol. 147, N 10, p. 463—470.
117. Lichtarowicz A., Duggins R. K., Markland E. Discharge coefficients for incompressible non—cavitating flow through long orifices. Gournal mech. eng. Science. 1965, vol. 7, N 2, p. 210—219.
118. Marechel H. Pertes de charge continues en conduite forces de section eirculaire. Ann. des trav. pub. de Belgigul. 1955, N 6, p. 45—52.
119. Moody L. F. Fruction factor for pipe—flow. Trans. of the ASME. 1944, vol. 66, p. 97—107.
120. Nakayama Y. Action of the fluid in the air micrometer first report characteristics of small diameter nozzle orifice. Bull. Gap. Soc. mech. Engrs. 1961, N 4, p. 110—115.
121. Richter H. Rohrhydraulik. Berlin, 1954, s. 328.
122. Stucky A., Bonnard D. Petre de charge dons in etranglement conigul. Bull. techn. de la suisse romande. 1962, N 21, s. 101—110.
123. Swamee P. K. Gain A. K. Explicit eguations for pipeflow problems. Gournal of the hidraulics division. 1976, vol. 102, N 5.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. **Основные физические свойства воды** 3
Глава 2. **Гидростатика** 5
Глава 3. **Местные гидравлические сопротивления** 12
Глава 4. **Движение жидкости в напорных и безнапорных трубопроводах** 43
Глава 5. **Движение жидкости через отверстия и насадки** . . 61
5.1. Истечение через отверстия 61
5.2. Истечение через внешние цилиндрические насадки. 68
5.3. Истечение через цилиндрические капиллярные насадки 75
5.4. Истечение через внутренние цилиндрические насадки 77
5.5. Истечение из конических сходящихся и расходящихся насадков 79
5.6. Истечение из внешних цилиндрических насадков при наличии транзитного потока 81
5.7. Затопленное истечение через насадки 88
5.8. Истечение при переменном напоре 88
5.9. Сравнение характеристик насадков и отверстий . 89
5.10. Влияние вибрации на истечение жидкости 89
5.11. Характеристика струй, вытекающих из отверстий и насадков 93
Глава 6. **Гидравлический удар** 95
Глава 7. **Гидравлические расчеты открытых русл** 99
7.1. Равномерное движение воды 99
7.2. Неравномерное движение воды 106
7.3. Гидравлический прыжок в призматических руслах 115
Глава 8. **Гидравлика водосливов и сооружений** 129
8.1. Водосливы 129
8.2. Сопряжение бьефов 138
8.3. Регулирующие сооружения 143
8.4. Водопроводящие сооружения 146
8.5. Сопрягающие сооружения 147
Глава 9. **Трубчатые сооружения** 158
Глава 10. **Гидравлические расчеты систем дождевания** . . . 167
Глава 11. **Гидравлические расчеты систем поверхностного полива** 179
Глава 12. **Гидравлические расчеты систем внутрипочвенного орошения** 187
Глава 13. **Гидравлические расчеты систем капельного орошения** 191
Указатель литературы 200

Павел Михайлович Степанов,
Иван Харитонович Овчаренко,
Юрий Александрович Скобельцын

СПРАВОЧНИК ПО ГИДРАВЛИКЕ
ДЛЯ МЕЛИОРАТОРОВ

Заведующая редакцией *Г. М. Попова*
Редактор *Н. И. Житько*
Художник *В. П. Карпов*
Художественный редактор *Б. К. Дормидонтов*
Технический редактор *Е. В. Соломович*
Корректоры *А. И. Болдуева,*
К. В. Шин, В. В. Тумарева

ИБ № 3299

Сдано в набор 23.08.83. Подписано к печати 07.12.83. Т-19515. Формат 84×108 1/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,92. Усл. кр.-отт. 11,04. Уч.-изд. л. 12,73. Изд. № 140. Тираж 11 000 экз. Заказ №2066—25 Цена 70 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28.