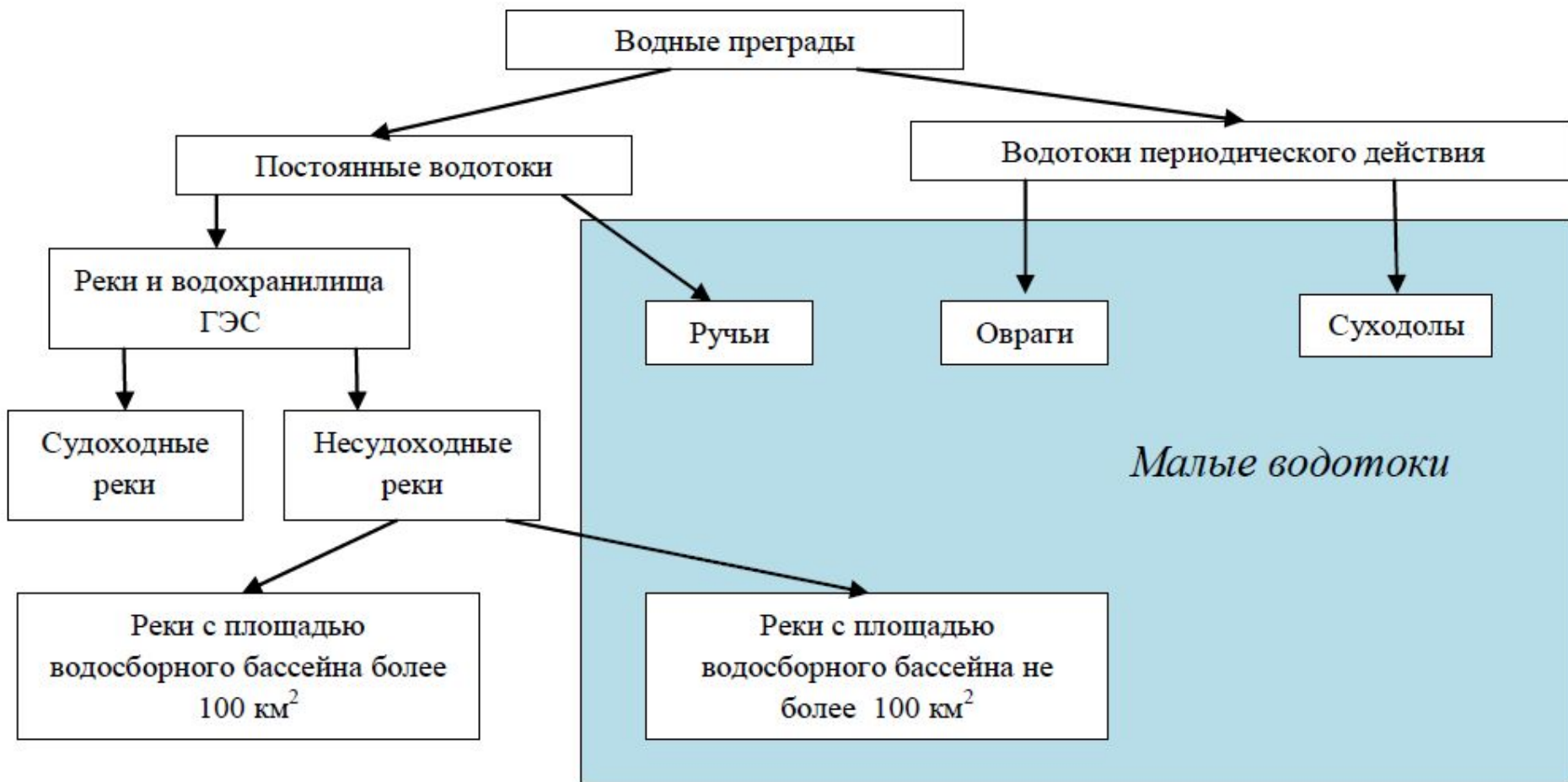


8 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАЛЫХ МОСТОВ И ТРУБ



Классификация водных преград

Общие данные

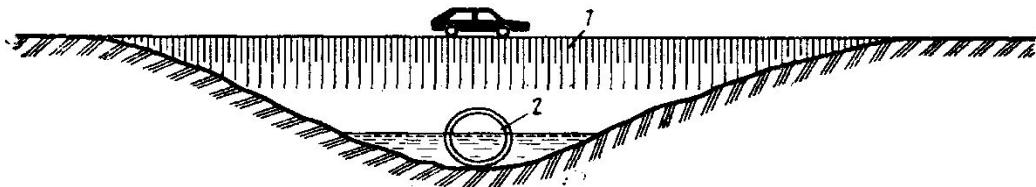


Схема расположения трубы:
1 – земляное полотно; 2 - труба

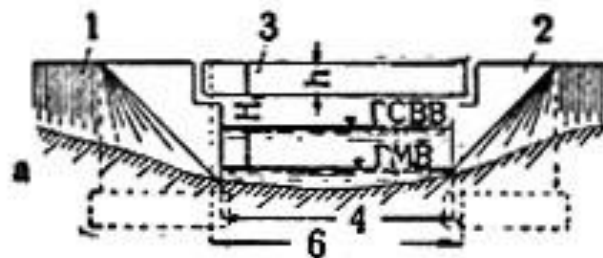
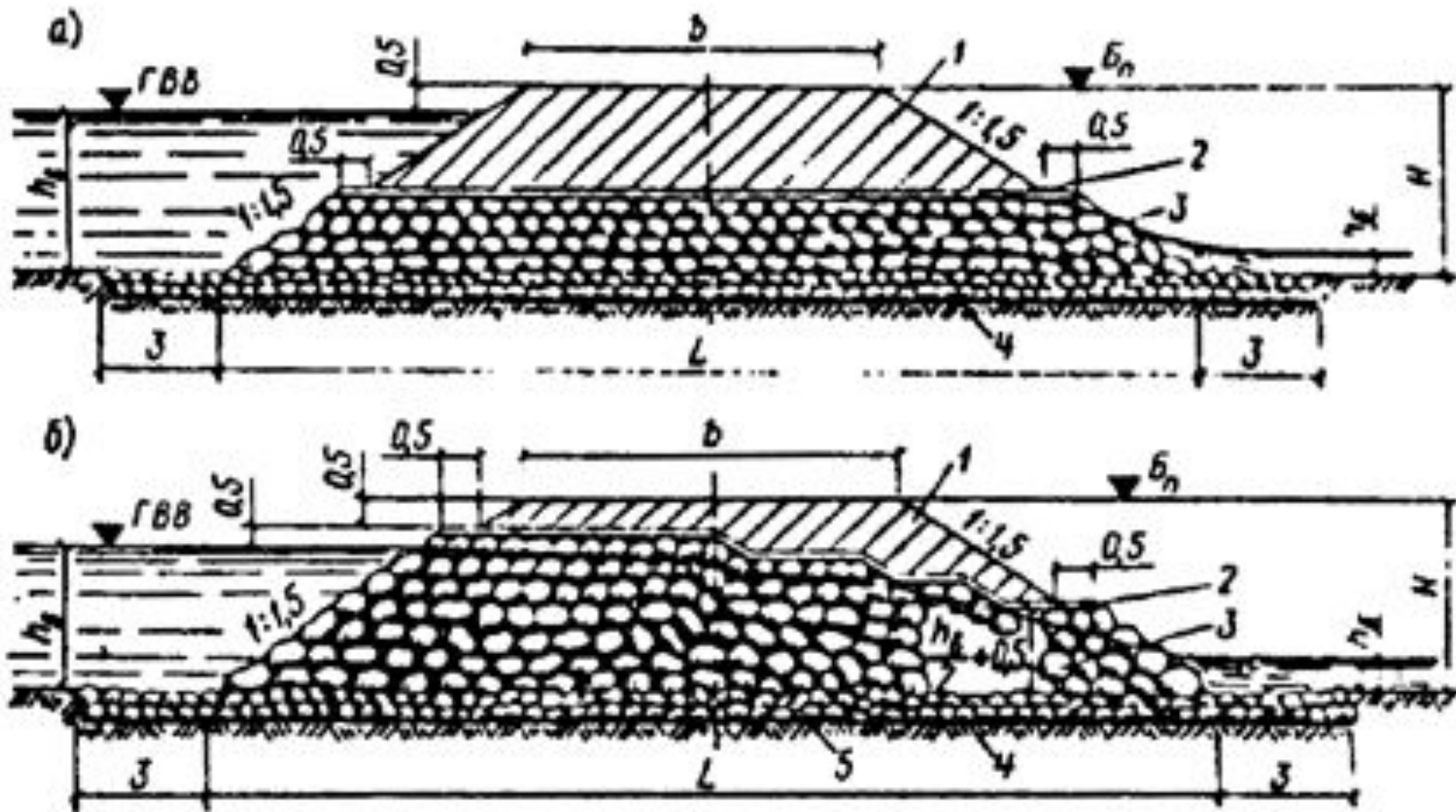


Схема однопролетного моста с ездой поверху

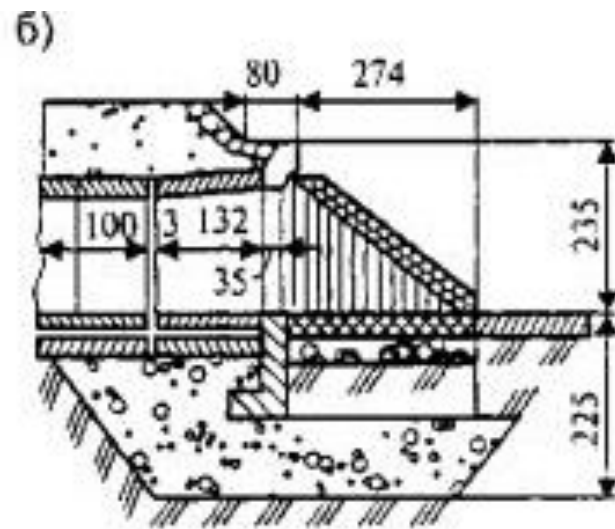
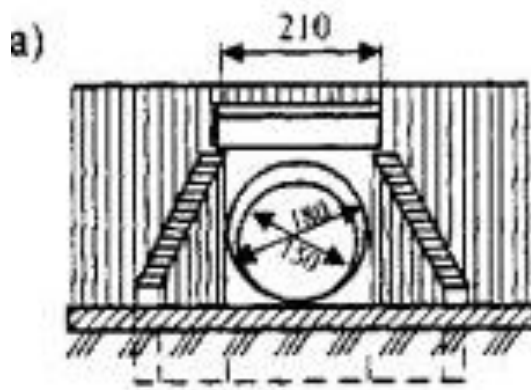


Количество искусственных сооружений на 1 км дороги

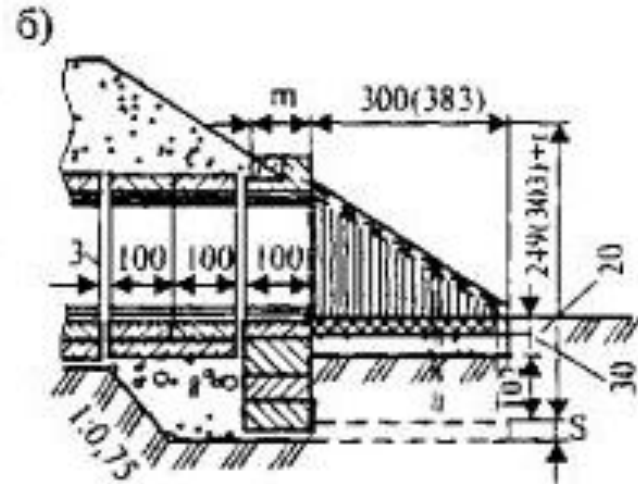
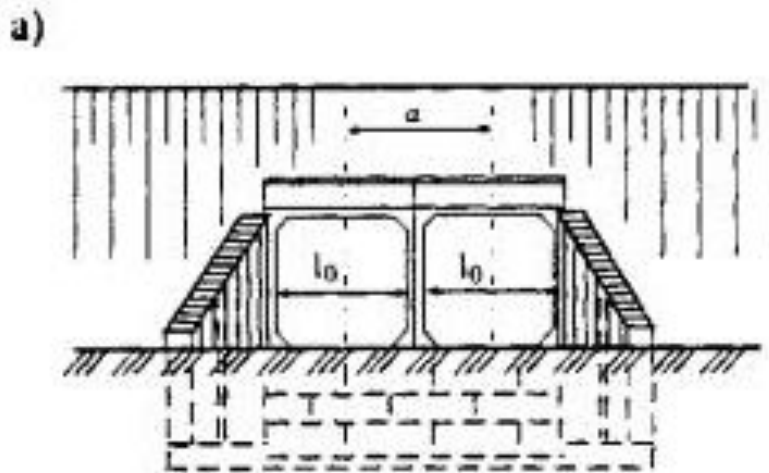
Районы строительства дороги	Среднее количество сооружений на 1 км	Районы строительства дороги	Среднее количество сооружений на 1 км
Пустыни и полупустыни	0,3	Сильно пересеченный рельеф	1,0—1,5
Болотистые районы	1	Горные районы	1,5—2
Равнины	0,5—1	Районы искусственного орошения	3
Среднехолмистый рельеф	0,7—1,2		



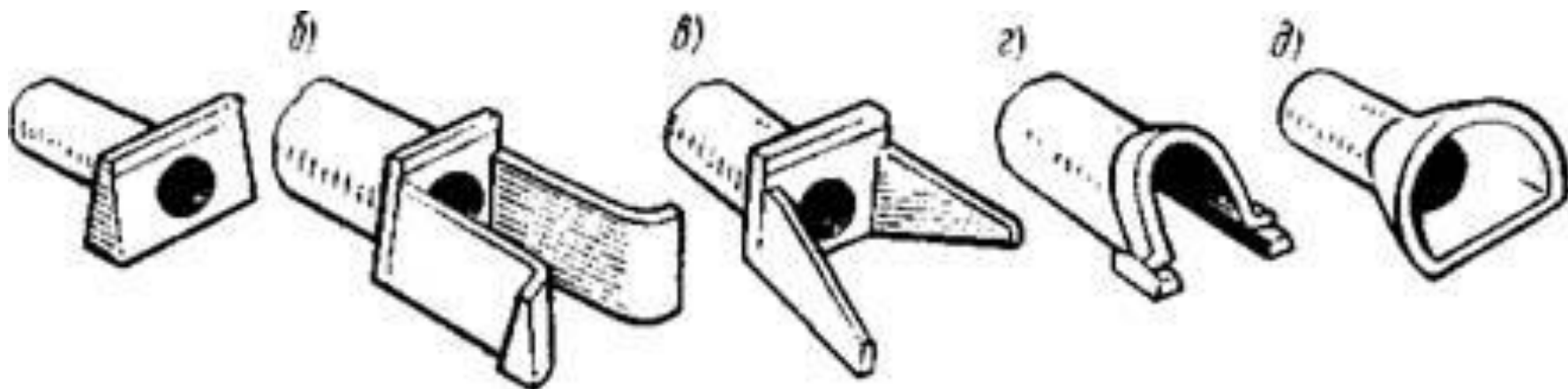
Продольный разрез фильтрующих насыпей
 а — напорных; б — безнапорных; 1 — земляное полотно; 2 — изоляционный слой; 3 — фильтрующая часть насыпи; 4 — укрепление основания; 5 — кривая депрессии.
 ГВВ — расчетный горизонт высоких вод перед сооружением; $h_{в}$ — допускаемая глубина потока перед насыпью; $h_{б}$ — бытовая глубина потока; L — длина фильтрующей насыпи



Круглая одноочковая железобетонная труба:
а - входной оголовок; б - продольный разрез



Прямоугольная двухочковая железобетонная труба:
а - входной оголовок; б - продольный разрез



Типы оголовков труб:

портальные, состоящие из вертикальной стенки, перпендикулярной к оси трубы (а); **коридорные** с параллельными стенками постоянной высоты и развернутыми в начале оголовка (б); **раструбные** с откосными крыльями переменной высоты, расходящиеся от оси трубы (в); **воротниковые** со срезанным параллельно откосу насыпи концевым звеном трубы (г); **обтекаемые** в виде выступающего из насыпи усеченного конуса с плоской

Определение объемов и расходов ливневых вод на малых водосборах

$$Q_{л} = 16,7 a_{расч} F \alpha \varphi, \quad (1)$$

$a_{расч}$ — расчетная интенсивность ливня той же вероятности превышения, что и искомый расход, мм/мин.; F — площадь водосбора, км²; α — коэффициент стока;

φ — коэффициент редукции

$$\varphi = 1 : \sqrt[4]{10F} \quad (2)$$

Для площадей до 100 км²

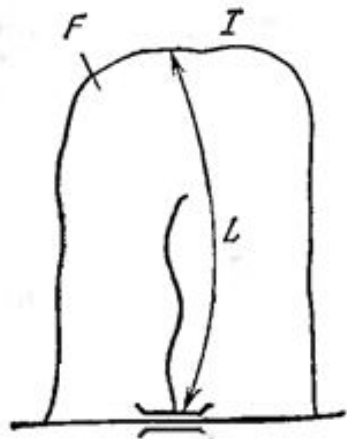
при этом для $F \leq 0,1$ км² $\varphi = 1$.

Связь интенсивности ливня a с его продолжительностью t (мин)

$$a = \frac{K}{t^{2/3}} \quad (3)$$

K — климатический коэффициент, равный $a_{час} 60^{2/3}$

Вид и характер поверхности	Коэффициент α при площади F , км ²		
	0-1	1-10	10-100
Асфальт, бетон, скала без трещин	1,0	1,0	1,0
Жирная глина, тькыры (плоские глинистые поверхности, почти лишенные растительности в пустынях субтропической зоны)	0,7 – 0,95	0,65 – 0,95	0,65 – 0,9
Суглинки, подзолистые, тундровые и болотные почвы	0,6 – 0,9	0,55 – 0,8	0,5 – 0,75
Чернозем, лёсс, каштановые и карбонатные почвы	0,55 – 0,75	0,45 – 0,7	0,35 – 0,65
Супеси, степные почвы	0,3 – 0,55	0,2 – 0,5	0,2 – 0,45
Песчаные, гравелистые, рыхлые и каменистые почвы	0,2	0,15	0,10



$$a = \frac{60^{2/3}}{t^{2/3}} a_{\text{час}} \quad (4)$$

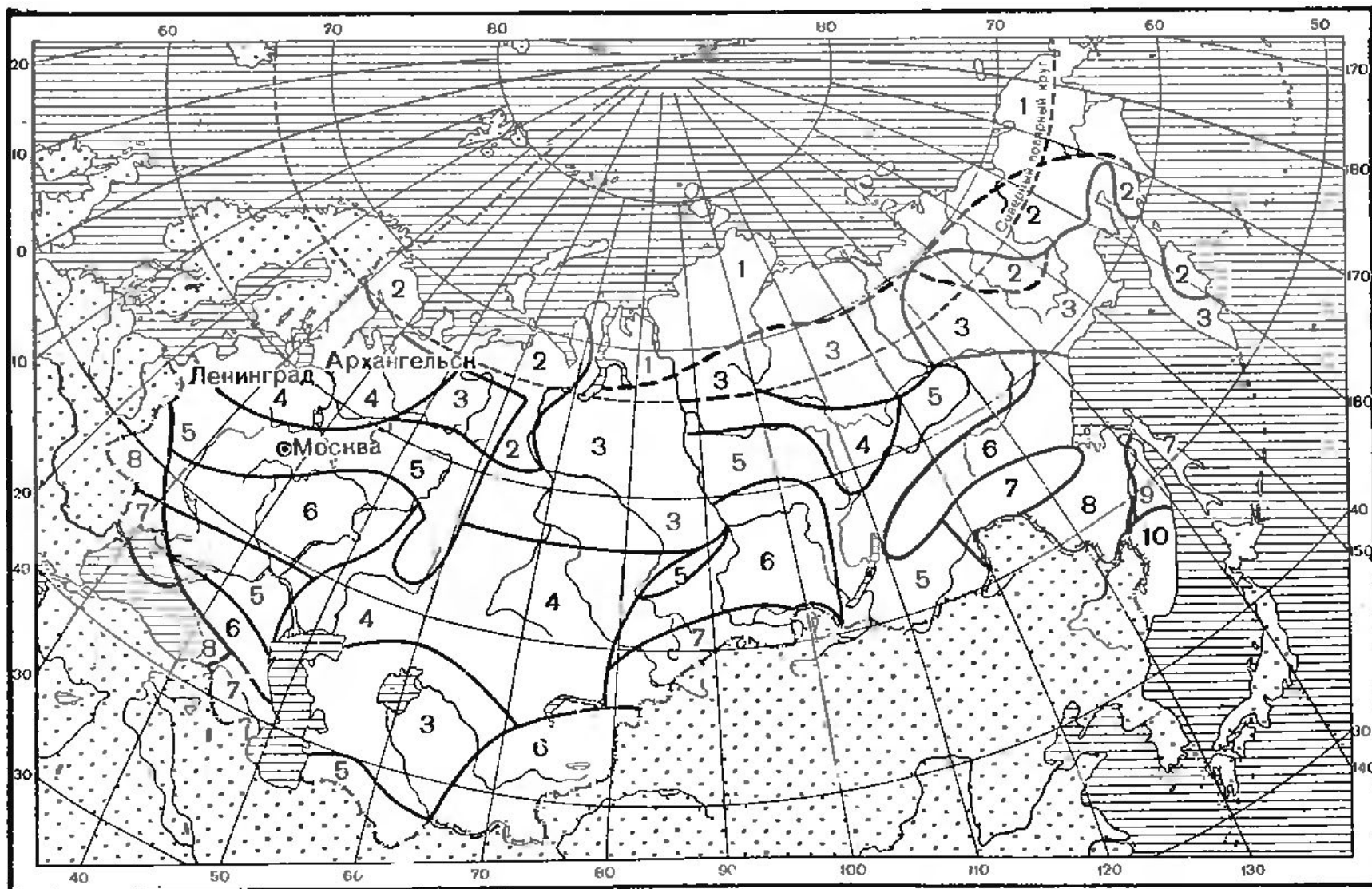
$$t_{\text{расч}} = \frac{L}{v_{\text{доб}}} \quad (5)$$

L – длина бассейна; $v_{\text{доб}}$ – скорость добегаания, км/мин.

Геометрические
элементы
бассейна

$$a_{\text{расч}} = \left(\frac{60v_{\text{доб}}}{L} \right)^{2/3} a_{\text{час}} = K_t a_{\text{час}} \quad (6)$$

Район	$a_{\text{ч}}$, мм/мин при ВП, %							
	10	5	4	3	2	1	0,3	0,1
1	0,27	0,27	0,29	0,32	0,34	0,40	0,49	0,57
2	0,29	0,36	0,39	0,42	0,45	0,50	0,61	0,75
3	0,29	0,41	0,47	0,52	0,58	0,70	0,95	1,15
4	0,45	0,59	0,64	0,69	0,74	0,90	1,14	1,32
5	0,46	0,62	0,69	0,75	0,82	0,97	1,26	1,48
6	0,49	0,65	0,73	0,81	0,89	1,01	1,46	1,79
7	0,54	0,74	0,82	0,89	0,97	1,15	1,50	1,99
8	0,79	0,98	1,07	1,15	1,24	1,41	1,78	2,07
9	0,81	1,02	1,11	1,20	1,28	1,48	1,83	2,14
10	0,82	1,11	1,23	1,35	1,46	1,74	2,25	2,65



Карта ливневого районирования

Проектирование автомобильных дорог. Справочная энциклопедия дорожника. V том / Под ред. Г.А. Федотова и П.И. Поспелова. – М.: База нормативной документации: www.complexdoc.ru, 2007. – 1627 с. (стр. 715)

По данным Д.Л. Соколовского
для обычных задернованных поверхностей бассейна

$$v_{\text{доб}} = 3,5I^{1/4} \text{ (м/с)}, \text{ или } v_{\text{доб}} = 0,2I^{1/4} \text{ (км/мин)}. \quad (7)$$

для водосборов с твердыми гладкими поверхностями

$$v_{\text{доб}} = 10I^{1/4} \text{ (м/с)}, \text{ или } v_{\text{доб}} = 0,6I^{1/4} \text{ (км/мин)}. \quad (8)$$

Коэффициент K_t зависит от длины бассейна L и его уклона I .
 Для случая стекания воды по естественным склонам местности.

$L, \text{ км}$	Значения K_t при уклоне бассейна I							
	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
0,15	4,21							
0,30	2,57	3,86						
0,50	1,84	2,76						
0,75	1,41	2,08	3,93					
1,0	1,16	1,71	2,53	4,50	5,05			
1,25	1,00	1,49	2,20	3,74	4,18	4,50	4,90	5,18
1,50	0,88	1,30	1,93	3,24	3,60	3,90	4,23	4,46
1,75	0,80	1,18	1,75	2,82	3,15	3,40	3,70	3,90
2,0	0,73	1,07	1,59	2,58	2,84	3,06	3,33	3,52
2,5	0,63	0,92	1,37	2,35	2,64	2,85	3,09	3,27
3,0	0,56	0,82	1,21	2,02	2,26	2,44	2,65	2,80
3,5	0,50	0,74	1,10	1,79	2,0	2,16	2,34	2,49
4,0	0,46	0,68	1,0	1,62	1,81	1,95	2,12	2,31
4,5	0,42	0,62	0,93	1,48	1,65	1,78	1,94	2,11
5,0	0,40	0,58	0,86	1,37	1,53	1,65	1,78	1,95
6,0	0,35	0,52	0,76	1,27	1,42	1,54	1,67	1,82
6,5	0,33	0,49	0,73	1,13	1,26	1,36	1,48	1,61
7,0	0,32	0,47	0,69	1,07	1,20	1,29	1,40	1,53
8,0	0,29	0,43	0,63	1,02	1,14	1,23	1,33	1,45
9,0	0,27	0,39	0,58	0,93	1,04	1,12	1,22	1,33
10,0	0,25	0,37	0,54	0,86	0,96	1,04	1,13	1,23
11,0	0,23	0,34	0,51	0,80	0,90	0,97	1,05	1,14
12,0	0,22	0,32	0,48	0,75	0,84	0,91	0,98	1,07
13,0	0,21	0,31	0,46	0,71	0,79	0,86	0,93	0,93
14,0	0,20	0,29	0,43	0,67	0,75	0,81	0,88	0,96
15,0	0,19	0,28	0,41	0,64	0,72	0,79	0,84	0,91
20,0	0,16	0,23	0,34	0,61	0,68	0,74	0,80	0,87
				0,50	0,56	0,61	0,66	0,72



Для случая стекания по
 твердым дорожным
 одеждам значение K_t
следует удваивать, но
 удвоенные коэффициенты
 также не могут
превосходить значения 5,24,
 соответствующего
 установлению полного стока

Расчетная формула расхода ливневого стока

$$Q_{л} = 16,7 a_{\text{час}} K_t F \alpha \varphi \quad (9)$$

Формула расхода полного стока (при $K_t=5,24$ и $\phi=1$)

$$Q_{\text{пс}} = 87,5 a_{\text{час}} F \alpha. \quad (10)$$

$$h_{\text{л}} = a_{\text{расч}} \alpha \varphi t_{\text{расч}} = K_t a_{\text{час}} \frac{L}{v_{\text{дуб}}} \alpha \varphi. \quad (11)$$

Объем стока в м^3

$$W = 60\,000 a_{\text{час}} \frac{F}{\sqrt{K_t}} \alpha \varphi \quad (12)$$

Расчет стока талых вод с малых водосборов

$$Q_m = \frac{k_0 \cdot h_p \cdot F}{(F + 1)^n} \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \quad (13)$$

где k_0 — коэффициент дружности половодья;

n — показатель степени, зависящий от рельефа и климатических условий;

F — площадь водосбора, км²;

δ_1 — коэффициент, учитывающий снижение максимальных расходов в заболоченной местности;

δ_2 — коэффициент, учитывающий снижение максимальных расходов в залесенных бассейнах.

$$\delta_1 = 1 - 0,71 \lg(0,1A_6 + 1) \quad \delta_2 = \frac{1}{(A_l + 1)}$$

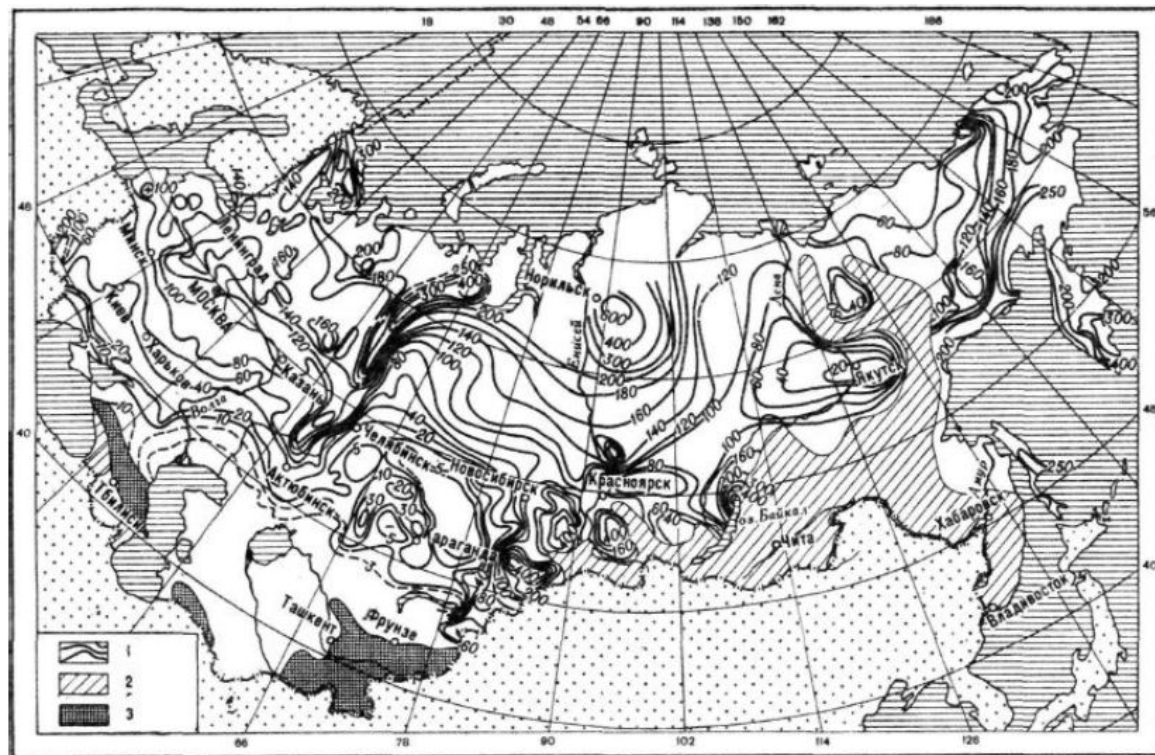
где A_l, A_6 — залесенность и заболоченность водосбора, %. (если в перспективе лес бассейна может быть сведен, принимают $\delta_2 = 1$)

Коэффициент дружности половодья и показатель степени для равнинных районов

Природная зона	Равнинные районы	n	k_0
Тундра и лес	Европейская территория СНГ и Восточная Сибирь	0,17	0,01
	Западная Сибирь	0,25	0,013
Лесостепь и степь	Европейская территория (без Северного Кавказа)	0,25	0,02
	Северный Кавказ	0,25	0,03
	Западная Сибирь	0,25	0,03
Засушливая степь и полупустыня	Западный и Центральный Казахстан	0,35	0,06
	Центральный Алтай	0,35	0,0007

Коэффициент дружности половодья для горных районов

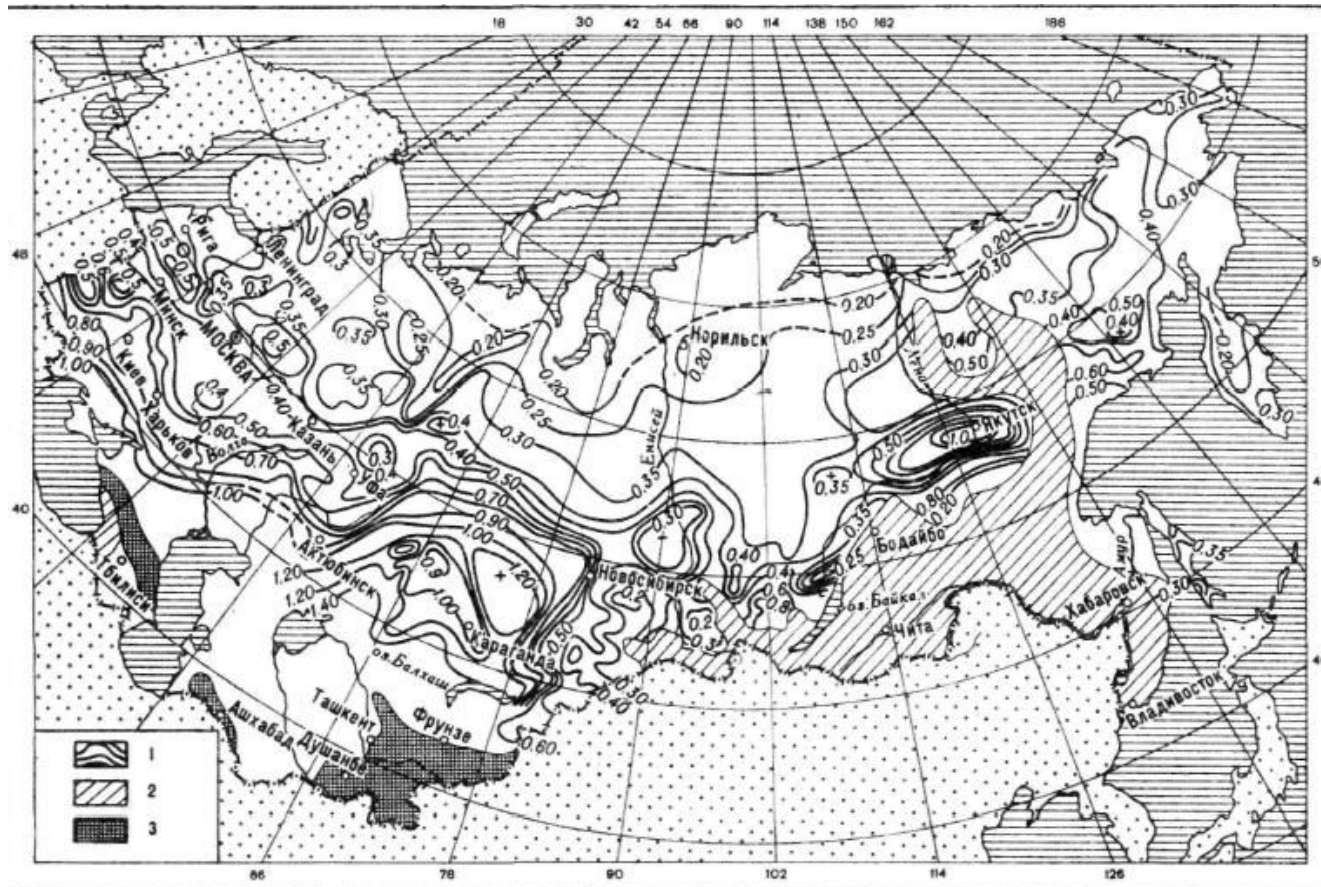
Горные районы	Средняя высота бассейна над уровнем моря, м	K_0
Урал	До 500	0,0025
	Более 500	0,0018
Алтай	До 1000	0,0025
	1000 – 2000	0,0015
	Более 2000	0,0010
Северо-восток России		0,003
Камчатка		0,001
Северный Сахалин		0,0014
Южный Сахалин		0,002



Карта-схема средних слоев талых вод

Расчетный слой суммарного стока h_p

1. По карте средних слоев талых вод определяем h' – *средний многолетний слой стока*.
2. По карте коэффициентов вариации слоев стока талых вод, определяем значение коэффициента вариации $C_{v,карт}$.



Карта коэффициентов вариации слоев стока талых вод

3. Так как карта составлена для водосборных бассейнов площадью более 200 км², то необходимо умножить его на *поправочный коэффициент* $k_{\text{попр}}$

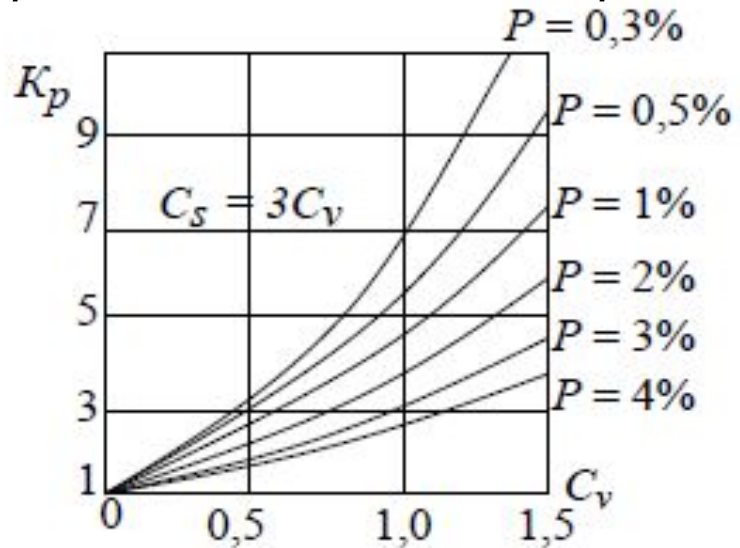
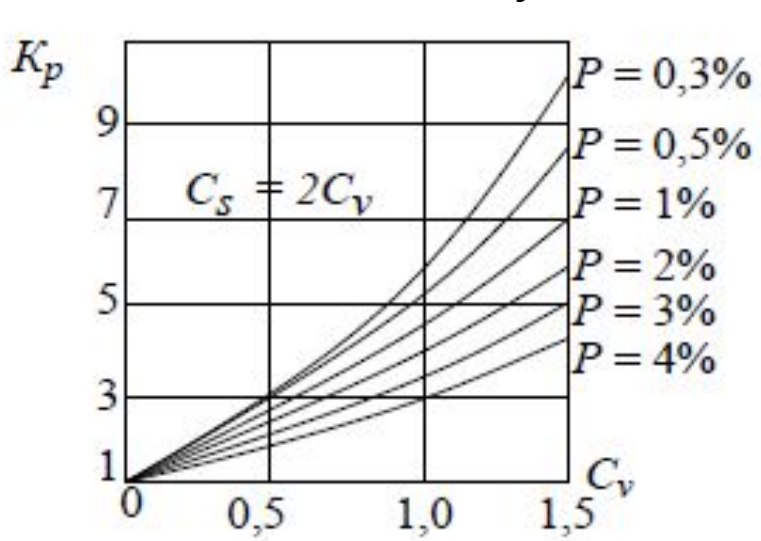
$$C_s = C_v \cdot k_{\text{попр}}$$

Площадь бассейна, км ²	$k_{\text{попр}}$
До 50	1,25
51 – 100	1,20
101 – 150	1,15
151 – 200	1,05

4. Выбираем коэффициент асимметрии C_s

Район проектирования	Коэффициент асимметрии
Равнинные районы	$2C_v$
Северо-запад и северо-восток России (обильные дожди), горные районы	$3C_v$

5. По графикам для расчетных величин P (вероятности превышения), C_v и C_s находим значение модульного коэффициента слоя стока K_p .



6. Вычисляем расчетный слой суммарного стока

$$h_p = h' \cdot K_p$$

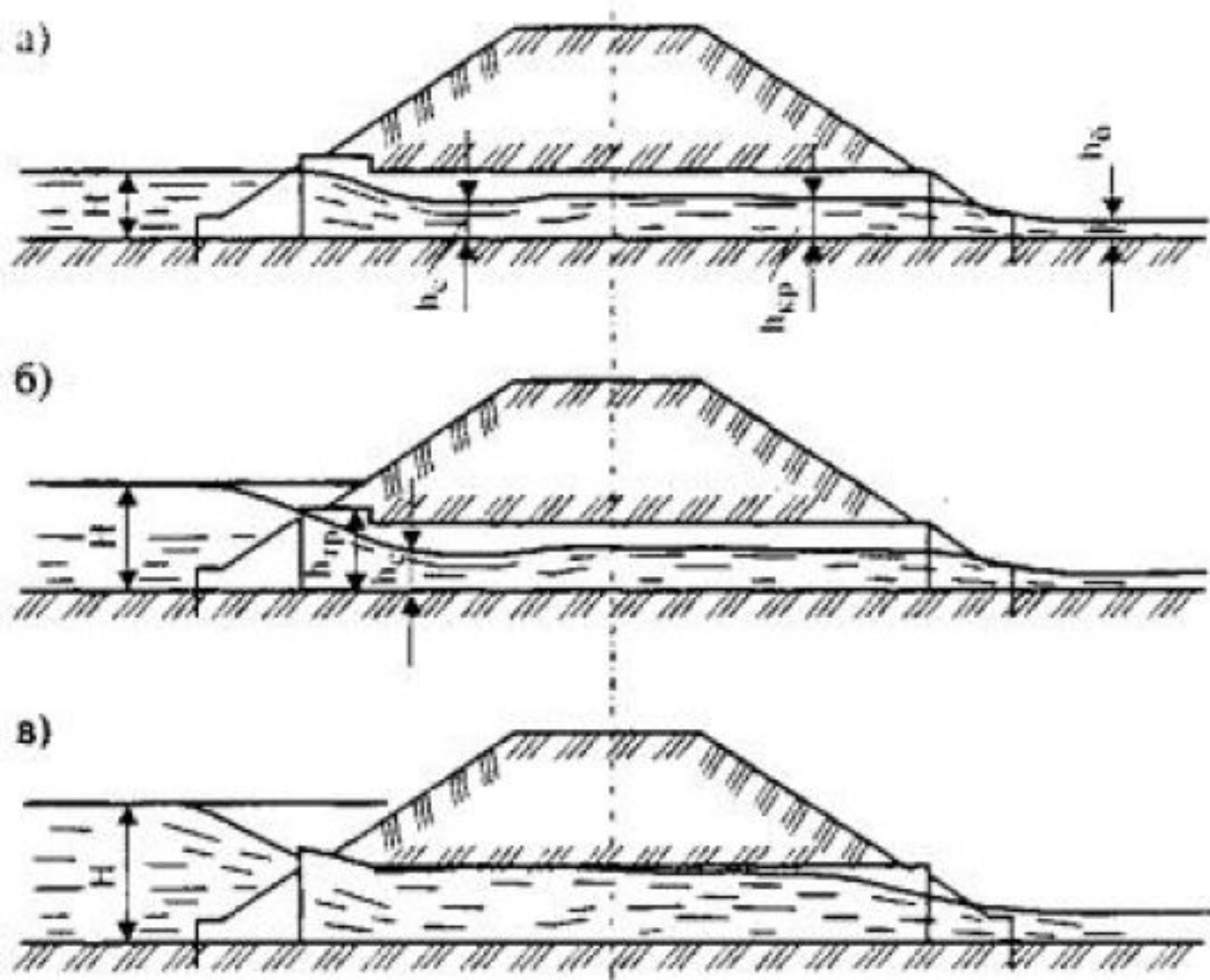
Вероятность превышения расчетного максимального расхода воды (ВП) согласно

Категория дороги	ВП, %
I	1
II, III	2
IV, V	3

В качестве расчетного максимального расхода воды принимаем наибольший расход из найденных, т.е.

$$Q_p = \max(Q_{л}, Q_{т})$$

Расчет отверстий труб



Режимы работы труб:

а - безнапорный; б - полупонапорный; в - напорный

а) безнапорный режим (аналогия водослив с широким порогом)

$$Q_c = \varphi_0 \omega_c \sqrt{2g(H - h_c)},$$

$h_c = 0,9h_{кр}$ - глубина в сжатом сечении, м; $h_{кр}$ - критическая глубина, м.

$v_{кр} = 0,9v_c$ (где v_c - скорость в сжатом сечении)

$$h_c = 0,73v_c^2 / g$$

связь между глубиной H и h_c

$$H = h_c + \frac{v_c^2}{2g\varphi_0^2} = \left(0,73 + \frac{0,5}{\varphi_0^2}\right) \frac{v_c^2}{g}$$

получаем при обычном $\varphi_0 = 0,85$ (для всех оголовков, кроме обтекаемого, обеспечивающего протекание по напорному режиму)

$$H = 1,42 \frac{v_c^2}{g} \approx 2h_c$$

Тогда
а

$$Q_c = 0,85\omega_c \sqrt{gH}$$

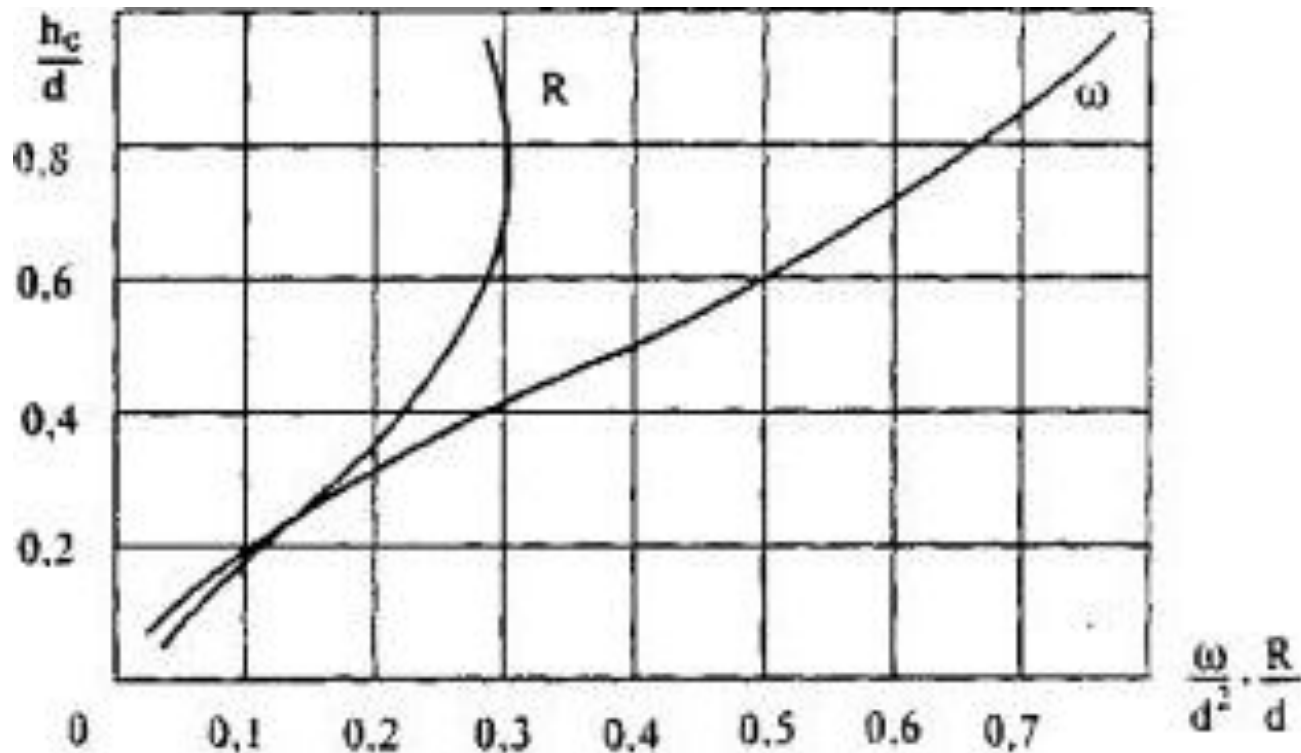
Здесь ω_c - площадь сжатого сечения потока, вычисляемая при глубине $h_c = 0,5H$.
Для прямоугольных сечений ($\omega_c = 0,5bH$)

$$Q_c = 0,425b\sqrt{gH}^{3/2},$$

ил
и

$$Q_c = 1,33bH^{3/2}$$

Для круглых поперечных сечений площадь w_c может быть вычислена с помощью графика, на котором даны величины $w_c/d^2 = f(h_c/d)$, где d - диаметр трубы, м



Графики для расчета круглых сечений

б) полупапорный режим (аналогия истечение из-под щита)

$$Q_c = v_c \omega_c = \phi_n \omega_c \sqrt{2g(H - h_c)}$$

$h_c = 0,6h_{ex}$ (h_{ex} - высота входа в трубу)

При обычных значениях $\phi_n = 0,85$ и $w_c = 0,6w_{ex}$

$$Q_c = 0,5\omega_{ex} \sqrt{2g(H - 0,6h_{ex})}$$

в) напорный режим (аналогия истечение из трубопровода)

$$Q_c = \phi_n \omega_T \sqrt{2g(H - h_T)}$$

w_T и h_T - площадь сечения и высота основного протяжения трубы;

$\phi_n = 0,95$ (для обтекаемого оголовка, обеспечивающего установление напорного режима)

Проверка на незаполняемость поперечного сечения

Полунапорный режим и атмосферное давление в сжатом сечении у входа устанавливается при затопленном входе в трубу и уклоне трубы $i > i_w$.

Расходная характеристика целиком заполненной трубы подсчитывается в зависимости от ее очертания:

для круглых труб $K_0 = 24 d^{8/3}$.

Напорный режим и работа трубы полным сечением практически на всем протяжении при отсутствии подтопления выхода гарантируется при $i \leq i_w$.

При этом, если $i < i_w$ напорной трубой равна

$$H = h_{\text{то}} + \frac{Q_c^2}{2g\varphi_H^2 \omega_{\text{то}}^2} + l_T (i_w - i).$$

При $i = i_w$ наступает переход от напорного режима к полунапорному.

При $i > i_w$ напорный режим срывается.

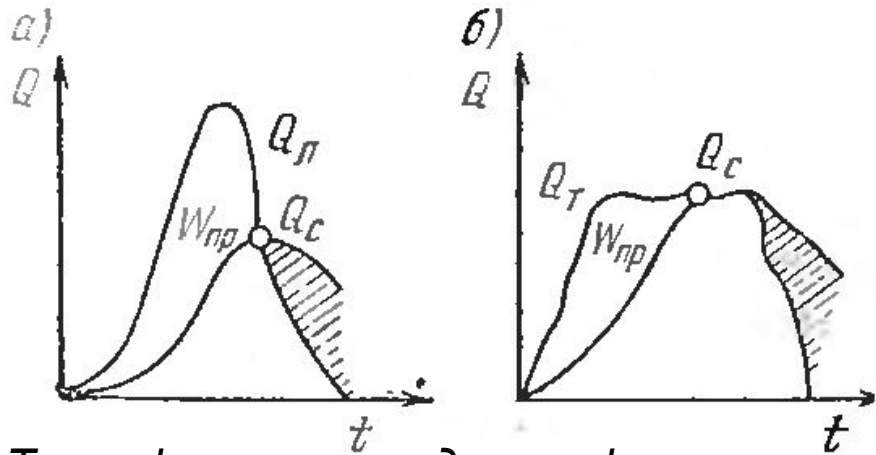


График для определения пропускной способности типовых труб:
 а - круглых; б - прямоугольных (цифры на кривых - отверстия труб, м)

Гидравлические характеристики типовых круглых труб (фрагмент)

Диаметр отверстия, м	Расход, м³/с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с	Диаметр отверстия, м	Расход, м³/с	Глубина воды перед трубой, м	Скорость на выходе из трубы, м/с
Портальный оголовок				1,50	3,50	1,61	3,50
0,75	0,20	0,41	1,40		3,90	1,74	3,80

Учет аккумуляции ливневых вод перед малыми водопропускными сооружениями



Трансформация гидрографа притока воды к сооружению в гидрограф сбросных расходов

а – ливневый сток; б – сток талых

$$W_{пр} = f(H)$$

В частном случае, когда склоны бассейна имеют однообразные уклоны и могут быть представлены в виде двух плоскостей, пересекающихся по линии лог.

$$W_{хр} = \frac{m_1 + m_2}{6I_{лс}} H^3 = k_0 H^3, \quad m_1, m_2, \text{ и } I_{лс} - \text{средние уклоны склонов и лога.}$$

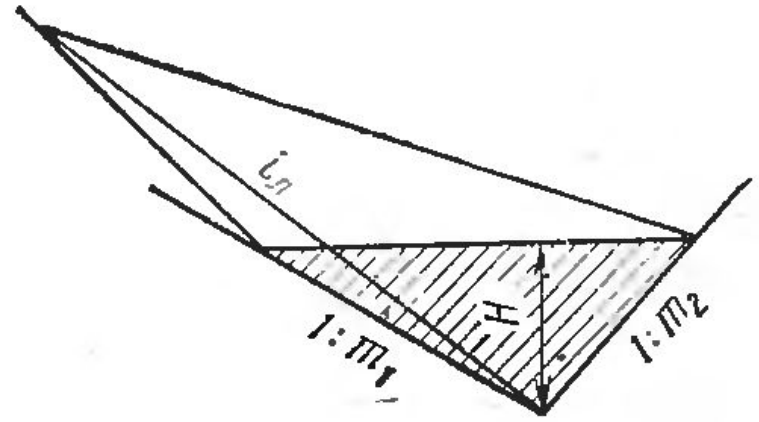
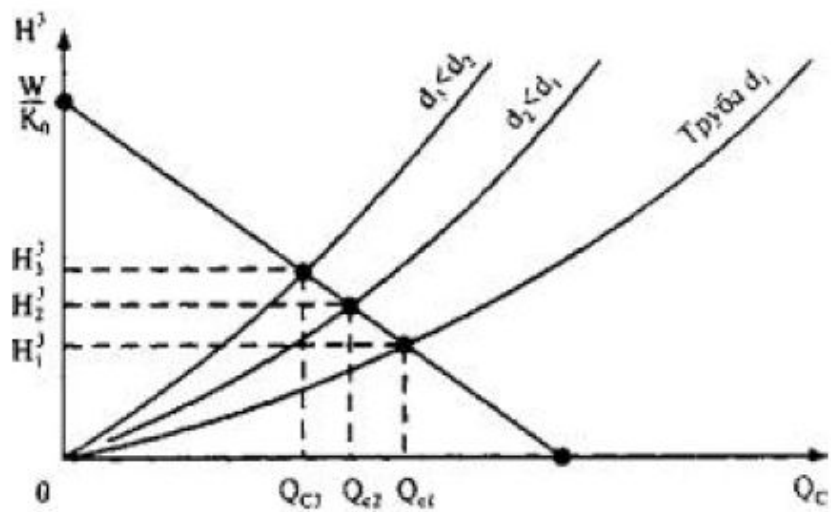


Схема к определению объема пруда





Графо-аналитический прием учета аккумуляции

$$Q_c = Q_{\text{Л}} \left(1 - \frac{W_{\text{пр}}}{W} \right) = Q_{\text{Л}} \left(1 - \frac{a}{W} H^3 \right)$$

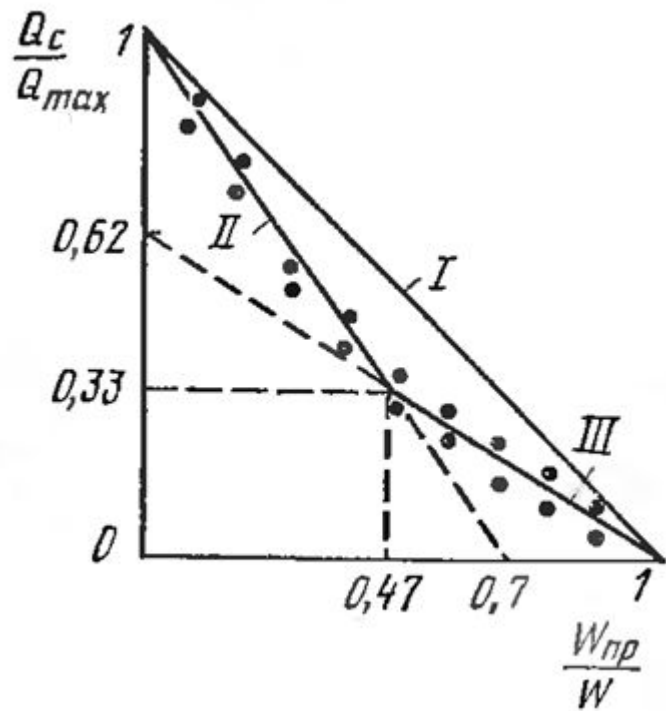
$$Q_c = \lambda_p Q_{\text{Л}},$$

λ_p – коэффициент трансформации

$\frac{W_{\text{пр}}}{W}$	$\lambda_p = Q_c : Q_{\text{Л}}$		$\frac{W_{\text{пр}}}{W}$	$\lambda_p = Q_c : Q_{\text{Л}}$	
	$F \leq 10 \text{ км}^2$	$F > 10 \text{ км}^2$		$F \leq 10 \text{ км}^2$	$F > 10 \text{ км}^2$
0	1,0	1,0	0,50	0,30	0,35
0,05	0,97	0,97	0,55	0,26	0,31
0,10	0,90	0,90	0,60	0,23	0,27
0,15	0,82	0,82	0,65	0,20	0,24
0,20	0,73	0,73	0,70	0,17	0,21
0,25	0,62	0,62	0,75	0,14	0,18
0,30	0,53	0,55	0,80	0,12	0,15
0,35	0,49	0,50	0,85	0,10	0,12
0,40	0,45	0,45	0,90	0,08	0,09
0,45	0,35	0,40	0,95	0,04	0,05
			1,0	0	0

Последовательность расчета:

1. Задают предельный подпор перед сооружением H ;
2. вычисляют объем пруда $W_{\text{пр}}$;
3. зная объем стока W , находят по таблице значение λ_p ;
4. вычисляют Q_c .



Прямые коэффициенты
трансформации

I – по Д.И. Кочерину;

II III – по О.В. Андрееву

$$Q_c = Q_{\text{л}} \left(1 - \frac{W_{\text{пр}}}{0,7W} \right)$$

$$Q_c = 0,62Q_{\text{л}} \left(1 - \frac{W_{\text{пр}}}{W} \right)$$

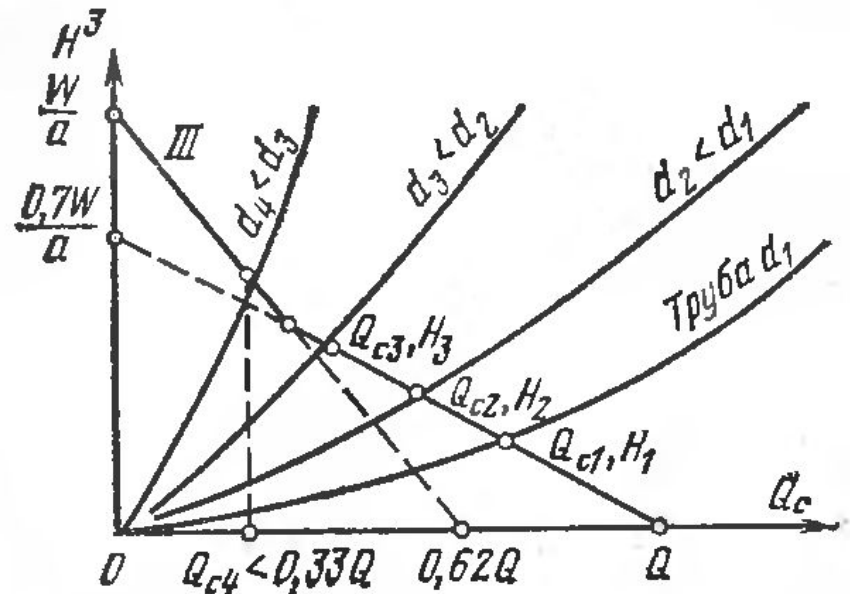


Схема уточненного графо-
аналитического расчета отверстий
труб с учетом аккумуляции

Для зоны λ_p от 1 до 0,33

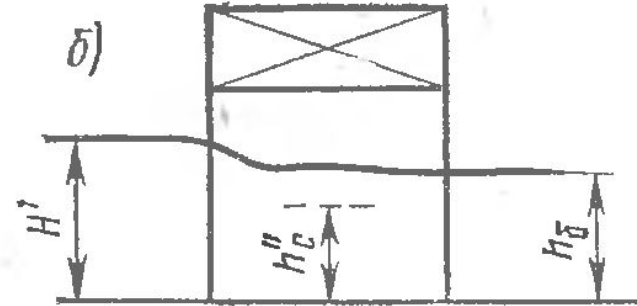
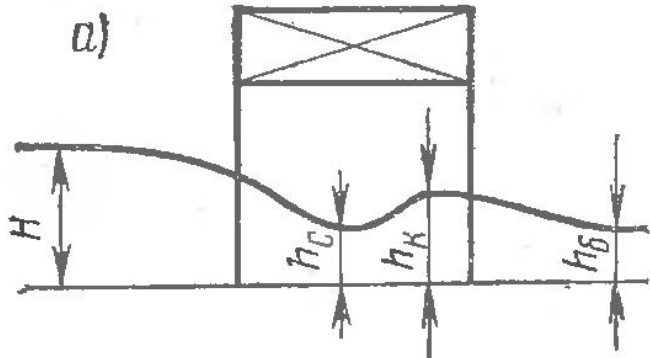
Для зоны $\lambda_p < 0,33$

Расчет отверстий малых мостов и определение высоты сооружений

$$Q_c = 1,33bH^{3/2}$$



$$b = \frac{Q_c}{1,33H^{3/2}}$$



Схемы протекания воды под малыми мостами:

а - при свободном истечении; б - при несвободном истечении

Зная, что ,
$$H \approx 2h_c = 1,45 \frac{V_c^2}{g}$$

Принимают последовательность расчета:

1. задают скорость v_c по желательному типу укрепления русла под мостом;
1. вычисляют напор H ;
2. вычисляют объем пруда $W_{пр} = aH^3$;
2. находят коэффициент λ

Тип укрепления	Допускаемая скорость, м/с	Тип укрепления	Допускаемая скорость, м/с
Засев травой	0,8	Укрепленный грунт толщиной:	1,0
Одериовка плашмя	1,0		
» в стенку	1,8	5 см	2,5
Однoчное мощение на щебне камнем 15—25 см	2,5—3,5	10 »	4—6
Двойное мощение камнем 15—25 см	3,5—4,5	Бетон низких марок	5—7
		Бетонные плиты	Более 5
		Икрепады	

$$Q_c = \lambda_p Q_{л}, \text{ или } Q_c = Q_T.$$

Принимая какое-либо типовое отверстие моста b , необходимо пересчитывать напор:

$$H = 0,83 \left(\frac{Q_c}{b} \right)^{2/3}$$

При очень глубоком потоке воды в отводящем русле отверстие моста рассчитывают **по схеме несвободного истечения**, наступающего после того, как прыжок, возникновение которого возможно в сжатом сечении, будет надежно затоплен бытовым уровнем, **т. е. при условии, что бытовая глубина** $h_b > 1,1h_c'' = 1,1 \times 0,61H = 0,7H$,

так как $h' = h_c = 0,5H = 0,9h_{кр}$, чему соответствует $h'' = 0,61H$. $b = \frac{Q_c}{h_b v_c}$.

При несвободном истечении необходимое отверстие мо

Величину сбросного расхода Q_c рассчитывают с вычислением объема пруда по ожидаемой глубине воды перед сооружением

$$H' = h_b + \frac{v_c^2}{2g\varphi_c^2}$$

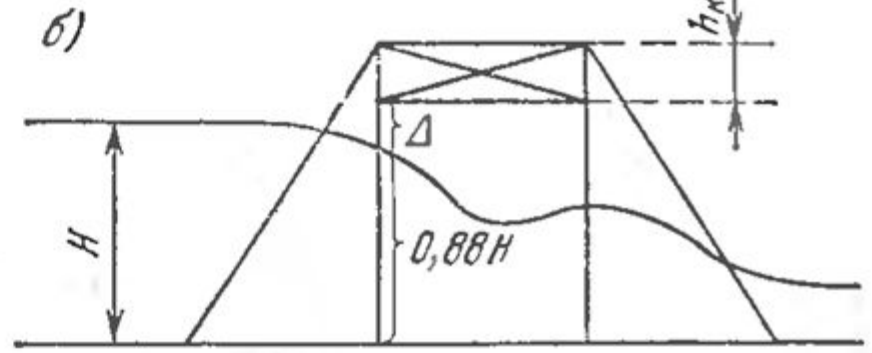
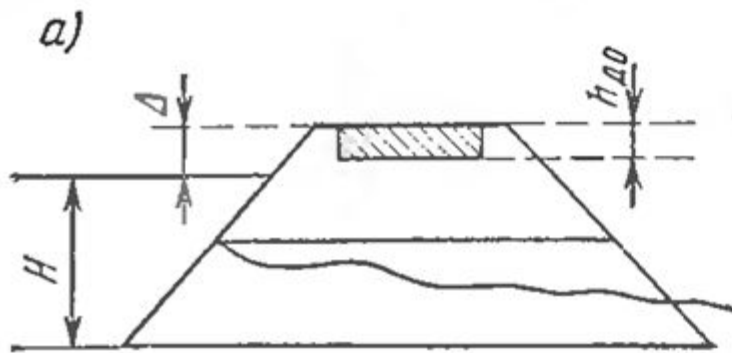


Схема определения высоты насыпи у водопропускных сооружений:
 а — у трубы; б — у малого моста

Отметка насыпи у труб **назначается не менее чем на 1 м выше подпертого уровня воды при полупапорном и напорном режимах и на 0,5 м — при безнапорном.**

Над верхом трубы отметка насыпи должна быть **выше, не менее чем на толщину дорожной одежды.**

Высота моста назначается по формуле

$$H_M = 0,88H + \Delta + h_{\text{кон}}$$

Где 0,88 - коэффициент, учитывающий некоторое понижение уровня воды при входе потока под мост;

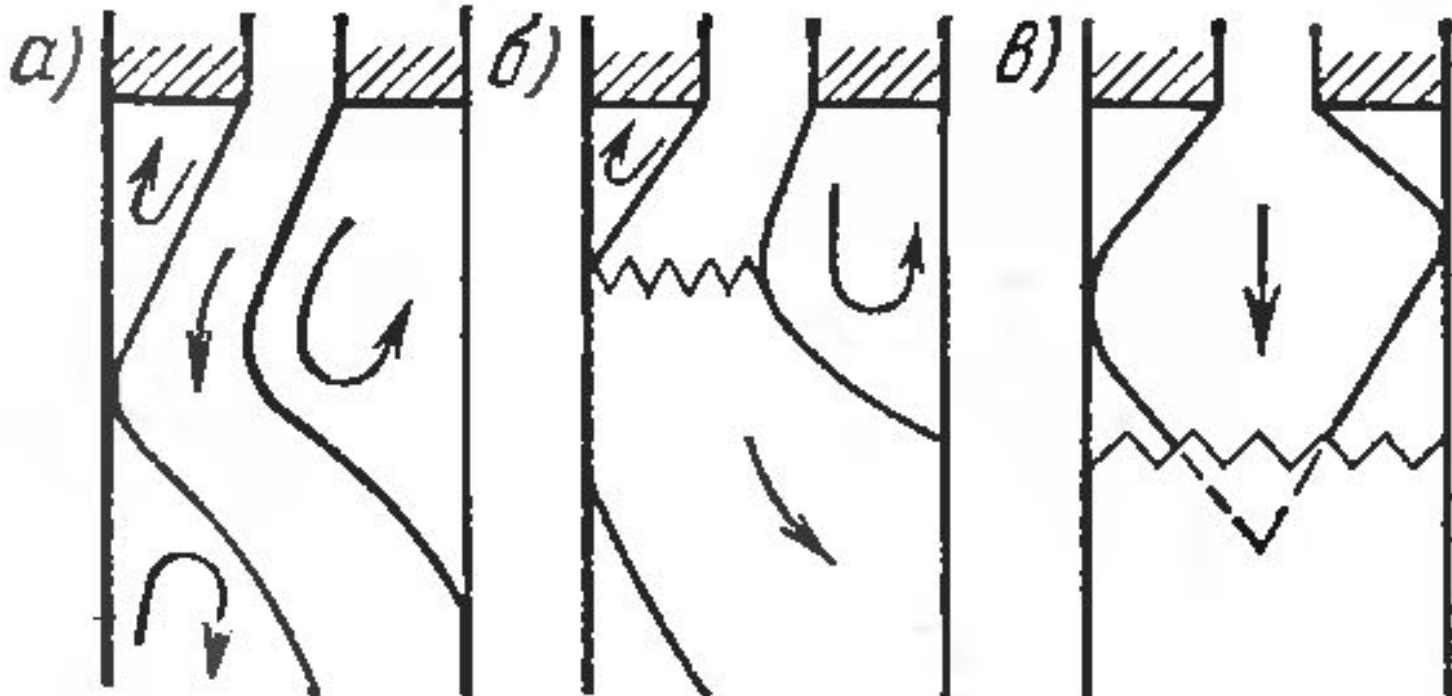
Δ - возвышение низа пролетного строения над уровнем воды ($\Delta \geq 0,25$ м);

$h_{\text{кон}}$ - конструктивная высота пролетных строений моста, м.

Расчет размывов и укреплений русел за малыми мостами и трубами

Три формы сопряжения потока, выходящего из водопропускного сооружения, с бытовым потоком в широком нижнем бьефе, когда $V_{русла} > 8 b_{соор}$:

1. Сопряжение по типу затопленной струи (см. рис. а).
2. Сопряжение по типу сбойного течения (см. рис. б).
3. Сопряжение по типу свободного растекания бурного потока (см. рис. в).



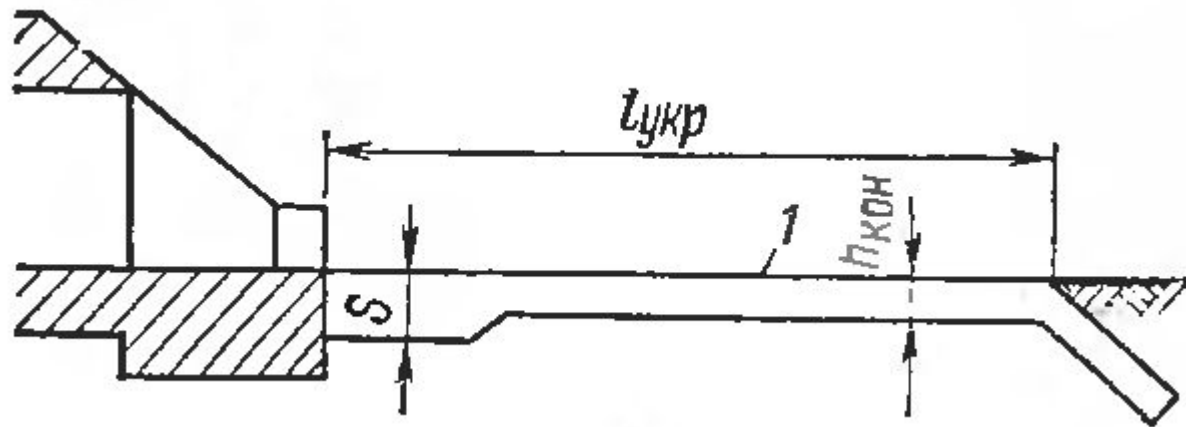
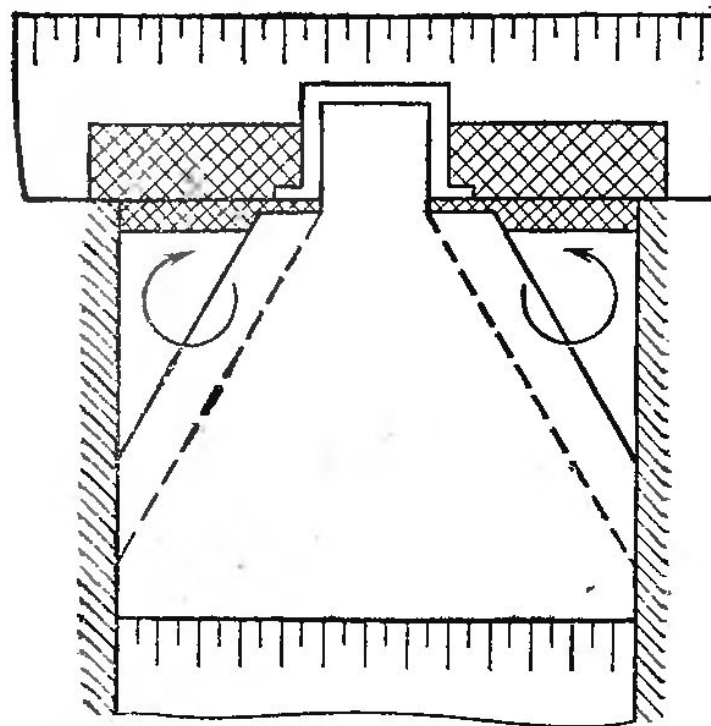


Схема продольного разреза укрепления за водопропускным сооружением



План укрепления за водопропускным сооружением

$(L_{\text{укр}} \operatorname{tg} \alpha)/b$	0	1	2	3	4	5	8	10
Δ_p/H	1,55	0,98	0,78	0,65	0,59	0,54	0,45	0,40

Здесь α - угол растекания, определяемый типом выходного оголовка, но не больший чем 45° ;

b — отверстие сооружения;

Δ_p/H — относительные глубины размыва (в долях глубины воды перед сооружением) в зависимости от относительной длины укрепления $L_{\text{укр}}/b$.