

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ

Москва 1979

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ**

Москва 1979

УДК 624.21-462.014.7-417.2:592.542.001.24

Редактор Н.И.Шкуренко
Корректор О.Д.Сухова

Подп. к печ. 22.у1.79г. Объем 5,75 печ.л.
Заказ 407. Тираж 180 экз.
Ротапринт ИГИМСа



Военсоветский научно-исследовательский институт
транспортного строительства, 1979

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое распространение в практике транспортного строительства металлических гофрированных труб, обладающих существенно большей шероковатостью, чем технически гладкие, вызвало необходимость выполнения ряда расчетов, учитывающих особенности их гидравлической работы: возможность работы гофрированных труб с любыми типами оголовков в напорном или частично-напорном режимах, ограничение (по условиям прочности конструкции) предельного уклона укладки труб ($\ell_{np} = 0,05$), целесообразность применения многоярусных труб и др.

Настоящие методические рекомендации предназначены для определения пропускной способности одноярусовых и многоярусовых металлических гофрированных труб и расчета их линий обводов.

Методические рекомендации рассмотрены и одобрены Госгипротрансом, Мостгипротрансом и Совдорпроектом и рекомендованы Главтранспроектом для использования в проектной практике при выполнении гидравлических расчетов металлических гофрированных водопропускных труб во железнодорожных и автомобильных дорогах.

Методические рекомендации разработаны на основе экспериментальных и теоретических исследований в лаборатории мостовой гидравлики и гидрологии отделения изысканий и проектирования железных дорог ЦНИИСа канд.техн.наук Г.И. Волчаковим при участии канд.техн.наук В.И.Алтунина (ЦНИИС) и инженеров Н.В.Невской (ЦНИИС) и А.А. Александрова (Мостгипротранс) под общим руководством канд.техн.наук В.В.Невского.

Зам.директора института

Н.Б.СОКОЛОВ

Руководитель отделения изысканий
и проектирования железных дорог

А.М.РОВЛОВ

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.1. Согласно настоящим Методическим рекомендациям рассчитываются металлические гофрированные трубы с наиболее распространенным в отечественной практике типом гофра 130 x 32 мм. С некоторым приближением могут выполняться такие расчеты труб с другими типами гофров.

I.2. В работе даются рекомендации по выполнению гидравлических расчетов, характерных для гофрированных труб. Гидравлические расчеты, общие для всех типов водопропускных труб, в ней не приводятся, а излагается лишь последовательность таких расчетов и в необходимых случаях даются ссылки на источник, где можно найти отсутствующие в настоящих Методических рекомендациях виды расчетов.

I.3. Гофрированные трубы отличаются от "гладких" в гидравлическом отношении существенно большими критическими уклонами, величина которых при безнапорном режиме достигает 0,02–0,03. Для обеспечения максимальной водопропускной способности уклоны гофрированных труб должны быть не меньше указанных значений и в крайнем случае не меньше 0,01.

В каждом конкретном случае предварительно устанавливается критический уклон сооружения i_k . Учитывая критический уклон сооружения и уклон местности, назначают уклон труб i_t с соблюдением условия

$$i_t \geq i_k \quad (I)$$

В случае несоблюдения условия (I) пропускная способность трубы понижается, причем при $i_t > 0,01$ этим можно пренебречь, при $i_t < 0,01$ реальная пропускная способность сооружения должна устанавливаться в соответствии с "Руководством по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" (М., Транспорт, 1974), а с некоторым приближением – настоящими Методическими рекомендациями.

I.4. Пропускная способность труб согласно данным Методическим рекомендациям определяется исходя из условий

входа равнинного типа, при котором перед сооружением обравяется винкость, характеризующаяся подпиркой глубиной. При этом поток поступает в трубу в спокойном состоянии.

Вход указанного типа имеют все водопропускные трубы без подводных быстротоков, подводящих поток к сооружению в бурном состоянии.

Для труб, имеющих на входе быстротоки, проверяют возможность всегда появления в трубе в бурном состоянии. Порядок расчета приводится в "Руководстве по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений".

Если в результате расчета оказается, что имеется место вход равнинного типа, то гидравлические расчеты производятся согласно настоящим Методическим рекомендациям, как для равнинных труб. В противном случае трубы по условиям входа являются когорными и их гидравлические расчеты производятся в соответствии с требованиями "Руководства по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений".

1.5. Настоящими Методическими рекомендациями предусматривается выполнение гидравлических расчетов в двух вариантах: при наличии гладкого ложка и при его отсутствии.

1.6. Рекомендации даются для гофрированных труб без оголовков со срезом перпендикулярно оси трубы, с оголовком, срезанным параллельно откосу, с оголовком типа "выплюшон" и расщупоном с углом раствора $\delta = 20^\circ$ (рис.1).

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРУБ

"длинные" и "короткие" трубы. Учет влияния нижнего бьефа

2.1. Трубы, на пропускную способность которых при однапорном и полунапорном режимах оказывает влияние их длина, называют "длинными" в гидравлическом отношении. У "коротких" это влияние отсутствует.

2.2. "Короткими" считаются трубы, для которых соотношение условие

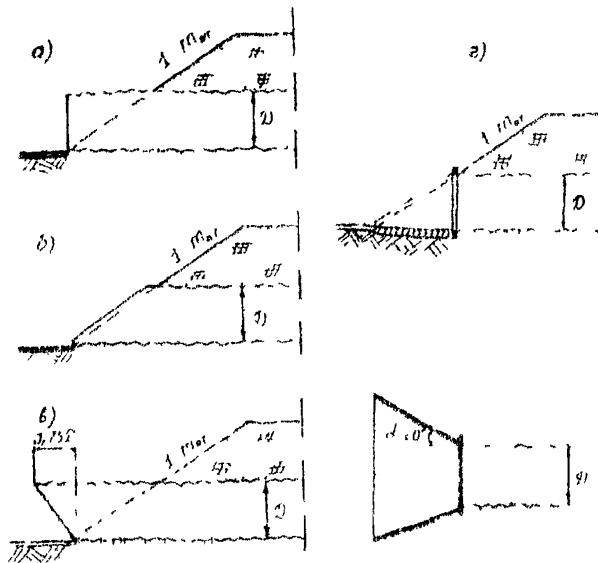


Рис.1. Типы оголовков труб:
а - труба без оголовка со срезом перпендикулярно оси трубы; б - то же со срезом параллельно откосу; в - оголовок типа "кошечка"; г - расстребный оголовок

2.3. Критический уклон для прибояов речеопротрансовых отверстий труб с гладкими лотками диаметром 1,5 или 2,0 м определяют по графику рис.2 в функции параметра расхода

$$H_a = \frac{Q}{\pi \sqrt{g} D}$$

где Q - расход в сооружении;

D - диаметр трубы;

g - ускорение силы тяжести.

Для остальных отверстий критический уклон вычисляют по формуле

$$t_k \approx t_{k(1,5)} \sqrt{\frac{D_{fp}}{D}} \quad (2)$$

где $t_{k(1,5)}$ и D_{fp} - соответственно критический уклон и диаметр трубы, представляемой на рис.2. Это может быть $D = 1,5$ или $2,0$ м.

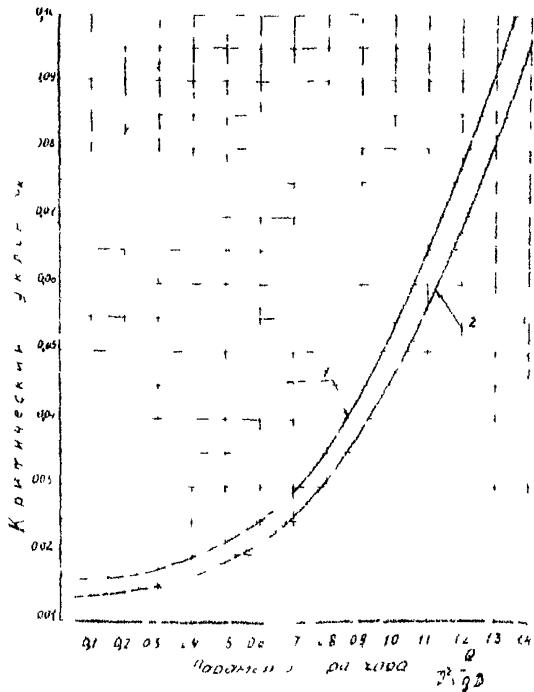


Рис.2. График для определения критического уклона (γ_r) для круглых гофрированных труб с гладкими лотками ($H_{1,0} = 0,025$):

1 - $D \approx 1,5$ м; 2 - $D \approx 2,0$ м

При $\gamma_r > \gamma_k$ с некоторым приближением "короткими" можно считать трубы при обследовании критерия относительной длины

$$\frac{\ell_r}{D} \leq 20,$$

где ℓ_r - длина трубы.

2.4. Пригодные ниже в настоящей главе зависимости для определения пропускной способности труб при безанпорном и полунапорном режимах относятся к "коротким" трубам.

2.5. Глубины на входе и подпартные глубины перед "длинными" трубами определяют по формулам, полученным из аналогичных зависимостей для гладких труб, приведенных в

"Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений", с введением в них корректива для учета повышенной шероховатости гофрированных труб:

$$\frac{h_{\text{шс(шн)}}}{D} = \frac{h_{\text{шс}}}{D} + 0,007 \left(\frac{\ell_T}{D} - 20 \right) \left(\frac{h_{\text{шс}}}{D} \right)^2 \frac{H_{\text{шфп}}}{H} \quad (3,8)$$

$$\frac{H_{\text{шн}}}{D} = \frac{H}{D} + 0,005 \left(\frac{\ell_T}{D} - 20 \right) \left(\frac{H}{D} \right)^2 \frac{H_{\text{шфп}}}{H}, \quad (3,9)$$

где $\frac{h_{\text{шс}}}{D}$ и $\frac{H}{D}$ — соответственно относительная глубина на входе и относительная подпорная глубина для "коротких" труб;

$H = 0,615$ и $H_{\text{шфп}}$ — коэффициенты шероховатости соответственно для гладких и гофрированных труб.

2.6. При значительной бытовой глубине водогода происходит затопление труб со стороны нижнего бьефа, что также снижает их пропускную способность.

С некоторым приближением можно считать, что критерии затопления труб со стороны нижнего бьефа, полученные для гладких труб, склоняются и для гофрированных, т.е. не затопленными будут трубы при соблюдении условий

$$h_{\text{нз}} \geq 1,25 h_K \quad \text{и} \quad h_{\text{нз}} > 1,1 h_1, \quad (4)$$

где $h_{\text{нз}}$ — глубина в нижнем бьефе над нижней точкой дна трубы в выходном сечении;

h_K — критическая глубина в трубе;

h_1 — высота трубы.

Критическую глубину в круглых трубах определяют по графику (рис.3).

Более точно учет затопления производится согласно "Руководству по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений".

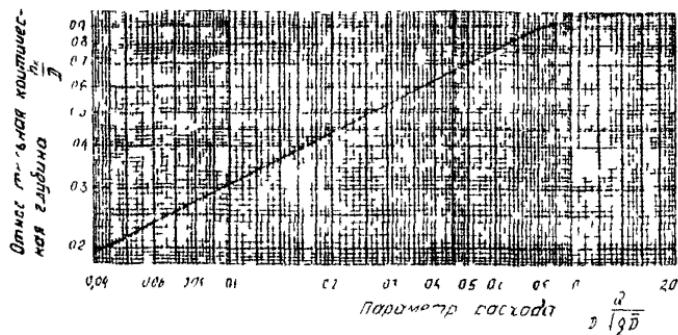


Рис.3. График для определения критической глубины в круглых трубах

Режимы протекания потока

2.7. Рассмотрим следующие режимы работы гофрированных труб:

безнапорный, когда входное сечение не затоплено и на всем протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис.4,а);

полунапорный, когда входное сечение трубы затоплено, т.е. на входе труба работает полным сечением, а на остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (см.рис.4,б);

частично-напорный режим, когда входное сечение трубы затоплено и на какой-то части, примыкающей к входу, труба работает полным сечением (см.рис.4,в);

напорный режим, когда труба на всем своем протяжении работает полным сечением (см.рис.4,г).

2.8. Безнапорный режим протекания в трубах сохраняется до полного затопления входного сечения, что характеризуется условием

$$\frac{h_{ex}}{D} < 1 ,$$

где h_{ex} - глубина на входе в трубу;

D - диаметр входного сечения, считая по впадинам гофра (наименьший диаметр).

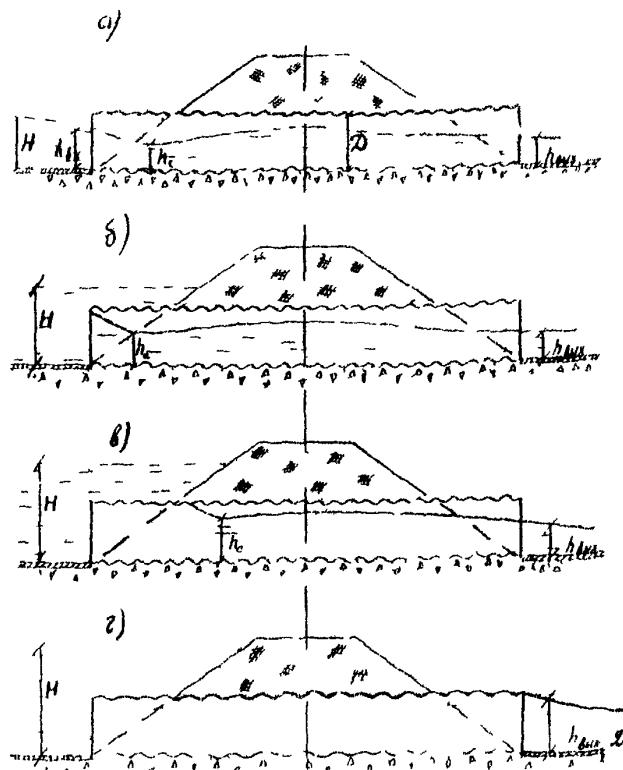


Рис.4. Режимы протекания потока в трубе:
 а - базисный; б - полунапорный; в - частично-
 напорный; г - напорный
 h_{ex} , h_{out} , h_c - соответственно глубины на
 входе в трубу, на выходе из нее и сечения

2.9. Возможность существования базисного режима и заполнение трубы на входе в "короткие" трубы определяют по графику (рис.5), на котором приведена зависимость относительной глубины потока на входе в трубу $\frac{h_{ex}}{D}$ от параметра расхода, $P_0 = \frac{Q}{D^2 \sqrt{2g}}$. Этот же график позволяет по заданному заполнению установить соответствующую ему величину расхода.

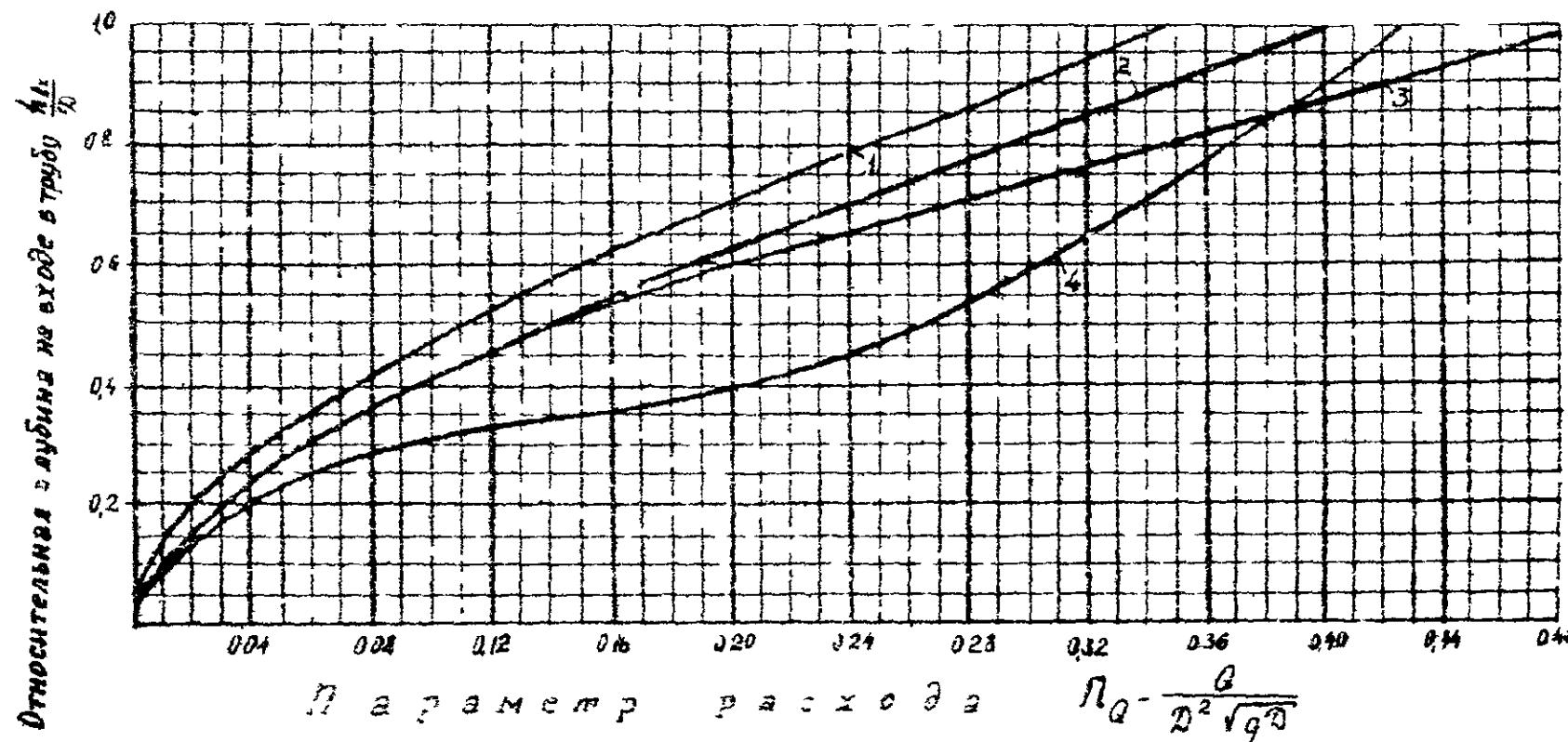


Рис.5. График для определения глубины потока за
вихре в трубу при различных типах сопловиков:
1 - оголовок типа "канюль"; 2 - труса без ого-
ловка с вертикальным срезом; 3 - разорванный
оголовок ($\chi = 20^\circ$); 4 - оголовок "с срезом
параллельно откосу насыпи"

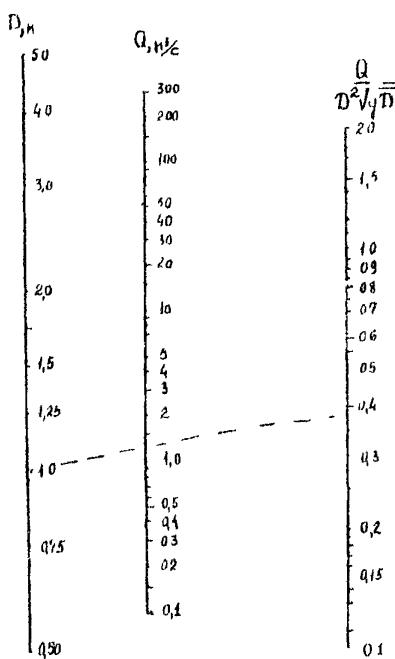


Рис.6. Номограмма для определения безразмерного параметра расхода для круглых труб

$$H_d = \frac{Q}{D^2 \sqrt{g} / D}$$

где $\left(\frac{H_d}{D}\right)^l$ - относительная граничная подпёртая глубина для труб без гладких лотков, определяемая по графику (рис.7) в зависимости от относительной длины трубы $\frac{\ell}{D}$ и ее уклона ι_t ,
 K_s - коэффициент увеличения относительной граничной подпёртой глубины в трубах с гладкими лотками, который вычисляется по формуле

$$K_s = \frac{l}{0.98 + 0.1} . \quad (6)$$

Параметр расхода может быть определен по номограмме (рис.6).

2.I. При $\frac{H_d}{D} > 1,35$ в трубе возникает напорный режим протекания потока.

2.II. При $\frac{H_d}{D} < 1,35$ в трубе с ограждениями всех типов возможен полунапорный или частично-напорный режим. В этом случае режим протекания определяют в такой последовательности:

1. Вычисляют подпёртую глубину перед трубой H_f при полунапорном режиме (см. п. 2. Iб).

2. Находят относительную граничную подпёртую глубину потока $\frac{H_f}{D}$, соответствующую верхней границе полунапорного режима (началу возникновения частично-напорного режима), по формуле

$$\frac{H_f}{D} = K_s \left(\frac{H_f}{D} \right)^l, \quad (5)$$

Здесь δ — доля, занимаемая гофрированной поверхностью в поперечном сечении трубы (вся поверхность за вычетом части ее, занимаемой гладким лотком, отнесенная ко всей поверхности);
 m — показатель степени.

При $0,01 \leq t_r \leq 0,05$

$$m = 5\sqrt{t_r} \quad (7)$$

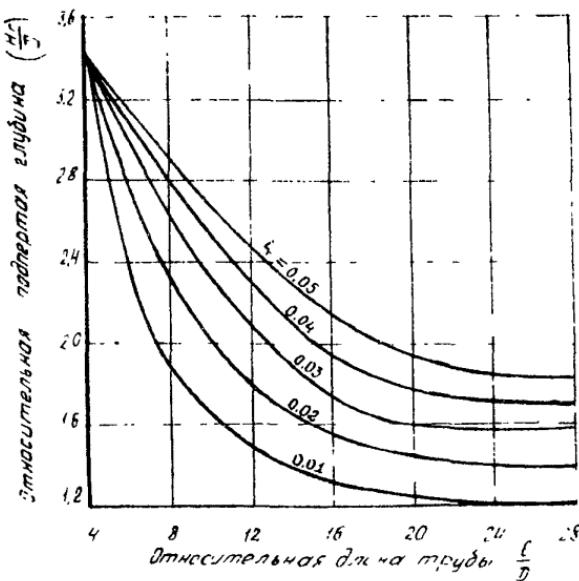


Рис.7. График для определения относительной граничной подпертой глубины $\frac{H_r}{D}$ для гофрированной трубы без гладкого лотка при разных ее уклонах

Коэффициент K_g можно также определить по графику (рис.8).

3. Сравнивают относительную подпертую глубину $\frac{H}{D}$ с относительной граничной подпертой глубиной $\frac{H_r}{D}$ и устанавливают режимы протекания потока:

при $\frac{H}{D} < \frac{H_r}{D}$ полунапорный;

при $\frac{H}{D} \geq \frac{H_r}{D}$ частично-напорный.

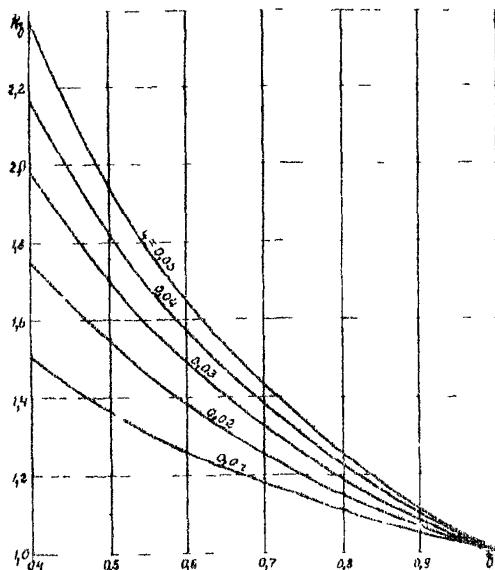


Рис.8. График для определения коэффициента K_s

2.12. В трубах с оголовками типа "капюшон" при $\frac{h_{\text{ex}}}{D} \geq 1$ и $\frac{Q}{D^2 \sqrt{g} D} \leq 0,645$ возникает полунапорный режим, при $\frac{h_{\text{ex}}}{D} \geq 1$ и $\frac{Q}{D^2 \sqrt{g} D} > 0,645$ – частично-напорный.

2.13. После установления режима протекания выполняют расчеты пропускной способности труб, в результате которых устанавливают:

- по расходу в сооружении – заполнение на входе ; подпружину губки перед трубой, чо которой назначают возвышение бровки полотна ; скорость на выходе для назначения типа укрепления;
- по заданной подпружиной глубине – расход в сооружении.

безнапорные и полунапорные трубы

2.14. Подпружину глубину перед овальнапорными трубами определяют по формуле

$$H = \left(\frac{Q}{m b_k \sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (8)$$

где m - коэффициент расхода, определяемый по табл. I в зависимости от типа входного оголовка;
 b_k - средняя ширина потока при критической глубине, определяемая по табл. 2.

Таблица I

Тип оголовка	Коэффициент расхода m
Без оголовка (вертикальный срез)	0,33
Срезанный параллельно откосу	0,33
"Капюшон"	0,33
Раструбный ($\alpha = 20^\circ$)	0,365

2.15. При несовершенном сжатии потока на входе в трубу (ширина по подпружному уровню высоких вод ПУВВ перед входом в трубу менее шести ее отверстий) коэффициент расхода определяют по формуле

$$m = m_{\text{табл}} \frac{(0,385 - m_{\text{табл}}) \omega_n}{3 \Omega - 2 \omega_n}, \quad (9)$$

где $m_{\text{табл}}$ - значение коэффициента расхода по табл. I;
 Ω - площадь поперечного сечения потока в подводящем русле;
 ω_n - площадь поперечного сечения трубы до отметки подпружного уровня.

2.16. Подпружную глубину перед гофрированными трубами при полуизпорожном режиме определяют по формуле

$$H = \frac{Q}{2g \omega_{\text{коор}}^2 \mu_p^2} + \varepsilon_p D, \quad (10)$$

где $\omega_{\text{коор}}$ - площадь поперечного сечения трубы;
 μ_p и ε_p - соответственно коэффициент расхода и коэффициент сжатия в определяющем сечении при полуизпорожном режиме, вычисляемые по табл. 3.

Т а б л и ц а 2

$\Pi_a = \frac{Q}{D \sqrt{4D}}$	$\frac{\delta_k}{D}$	ℓ_k	при диаметрах труб D , м					
			1,0	1,25	1,5	2,0	3,0	5,0
0,02	0,49	0,49	0,61	0,73	0,98	1,47	2,45	
0,03	0,52	0,52	0,65	0,78	1,04	1,56	2,60	
0,04	0,57	0,57	0,71	0,85	1,14	1,71	2,85	
0,05	0,59	0,59	0,73	0,88	1,18	1,77	2,95	
0,06	0,62	0,62	0,77	0,93	1,24	1,86	3,10	
0,07	0,63	0,63	0,78	0,94	1,26	1,89	3,15	
0,08	0,64	0,64	0,80	0,96	1,28	1,92	3,20	
0,09	0,66	0,66	0,82	0,99	1,32	1,98	3,30	
0,10	0,67	0,67	0,83	1,00	1,34	2,01	3,35	
0,12	0,69	0,69	0,86	1,03	1,38	2,07	3,45	
0,14	0,72	0,72	0,90	1,08	1,44	2,16	3,60	
0,16	0,74	0,74	0,92	1,10	1,47	2,20	3,68	
0,18	0,76	0,76	0,94	1,13	1,51	2,26	3,78	
0,20	0,77	0,77	0,96	1,15	1,54	2,31	3,85	
0,25	0,79	0,79	0,99	1,18	1,58	2,37	3,95	
0,30	0,81	0,81	1,01	1,21	1,62	2,43	4,05	
0,35	0,82	0,82	1,02	1,23	1,64	2,46	4,10	
0,40	0,83	0,83	1,03	1,24	1,66	2,49	4,15	
0,45	0,84	0,84	1,04	1,25	1,67	2,50	4,18	
0,50	0,84	0,84	1,05	1,26	1,68	2,52	4,20	
0,55	0,84	0,84	1,05	1,26	1,68	2,52	4,20	
0,60	0,84	0,84	1,05	1,26	1,68	2,52	4,20	
0,65	0,84	0,84	1,05	1,26	1,68	2,52	4,20	
0,70	0,83	0,83	1,03	1,24	1,66	2,49	4,15	

Т а б л и ц а 3

Тип оголовка	$\eta_{\text{ог}}$	C_p	$C_{\text{вых}}$
Без оголовка (с вертикальным срезом)	0,56	0,64	0,70
Скошенный параллельно относку насыпи	0,52	0,59	1,10
"Капюшон"	0,53	0,64	1,10
Раструбный ($\alpha = 20^\circ$)	0,65	0,64	0,35

Напорные и частично-напорные трубы

2.17. Подпортую группу перед гофрированными трубами при напорном режиме определяют по формуле

$$\frac{Q^2}{2g \eta_{\text{ог}} M_n} - \ell_1 + \eta_n D, \quad (11)$$

где η_n — коэффициент, учитывающий характер распределения давления в определяющем сечении при напорном режиме, принимаемый равным

$$\eta_n = 0,5;$$

M_n — коэффициент расхода при напорном режиме, определяемый по формуле

$$M_n = \sqrt{C_{\text{вых}} + \lambda \frac{\ell}{D} + C_{\text{ог}}}, \quad (12)$$

Здесь $C_{\text{вых}}$ — коэффициент сопротивления на выход, принимаемый по табл. 3;

$C_{\text{ог}}$ — коэффициент сопротивления на вход;

λ — коэффициент гидравлических сопротивлений по длине, определяемый по формуле

$$\lambda = \frac{8q}{R^{0.5}}, \quad (13)$$

где $R = \frac{D}{4}$ — гидравлический радиус при полном заполнении трубы.

Коэффициент шероховатости $\eta_{\text{ог}}$, для труб с принятой в науке стране гофром при отсутствии в трубе покрытия

(гладкого лотка) составляет около 0,03, при наличии лотка, покрывающего 1/4-1/3 внутренней поверхности трубы, - 0,025.

В общем случае при гладком лотке, покрывающем любую часть поперечного сечения трубы, коэффициент шероховатости можно определить по формуле

$$\Pi_{гофр} = \sqrt{\frac{\chi \Pi^2 + \chi_{гофр} \Pi_{гофр}^2}{\chi + \chi_{гофр}}}, \quad (14)$$

где χ и $\chi_{гофр}$ - части поперечного сечения трубы, покрытые соответственно гладким лотком и гофрированной поверхностью;

Π и $\Pi_{гофр}$ - коэффициенты шероховатости соответственно для гладкого лотка ($\Pi = 0,015$) и гофрированной поверхности ($\Pi_{гофр} = 0,03$).

При распространном в практике типе поперечного сечения гофрированной трубы с гладким лотком на 1/3 части периметра сечения коэффициент расхода μ_H можно определить по графику (рис.9).

При затоплении входа вместо $\eta_H D$ в формулу (Л) представляют глубину воды в нижнем бьефе.

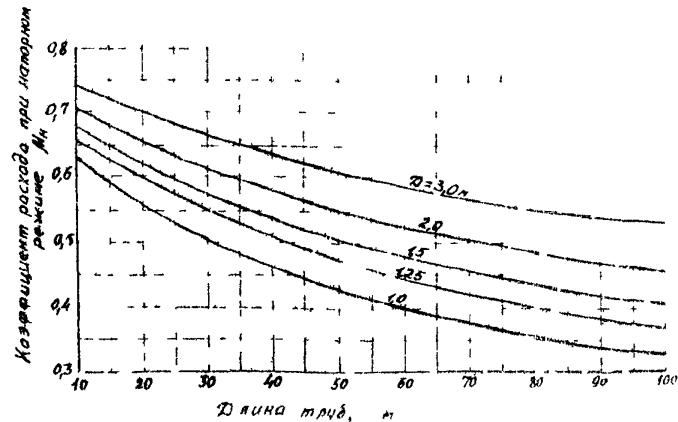


Рис.9. График для определения коэффициента расхода μ_H гофрированных труб с гладким лотком на 1/3 периметра поперечного сечения трубы

2.18. Подпорту глубину перед трубами при частично-напорном режиме определяют по формуле (II), принимая η_n по графику (рис.10) в зависимости от параметра расхода. При этом в качестве расчетной длины трубы принимают

$$\ell_r' = \ell_r - \ell_o , \quad (15)$$

где ℓ_r — расстояние от конца трубы до створа, где труба работает полным сечением; ℓ_o определяют по параметру расхода $\Pi_a = \frac{Q}{D^2 \sqrt{g} D}$ с помощью графика (рис.11).

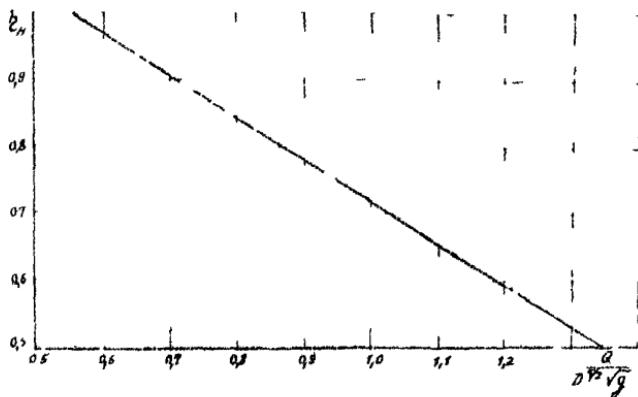


Рис.10. График зависимости $\eta_n = f\left(\frac{Q}{D^2 \sqrt{g} D}\right)$

2.19. Проверяют возможность сохранения частично-напорного режима.

В трубах с головками всех типов, кроме типа "канюн", частично-напорный режим сохраняется при соблюдении условия $H \geq 1,4 D$ в противном случае труба "разрывается", и в ней возникает полунапорный режим. При этом подпорту глубину определяют по формуле (10).

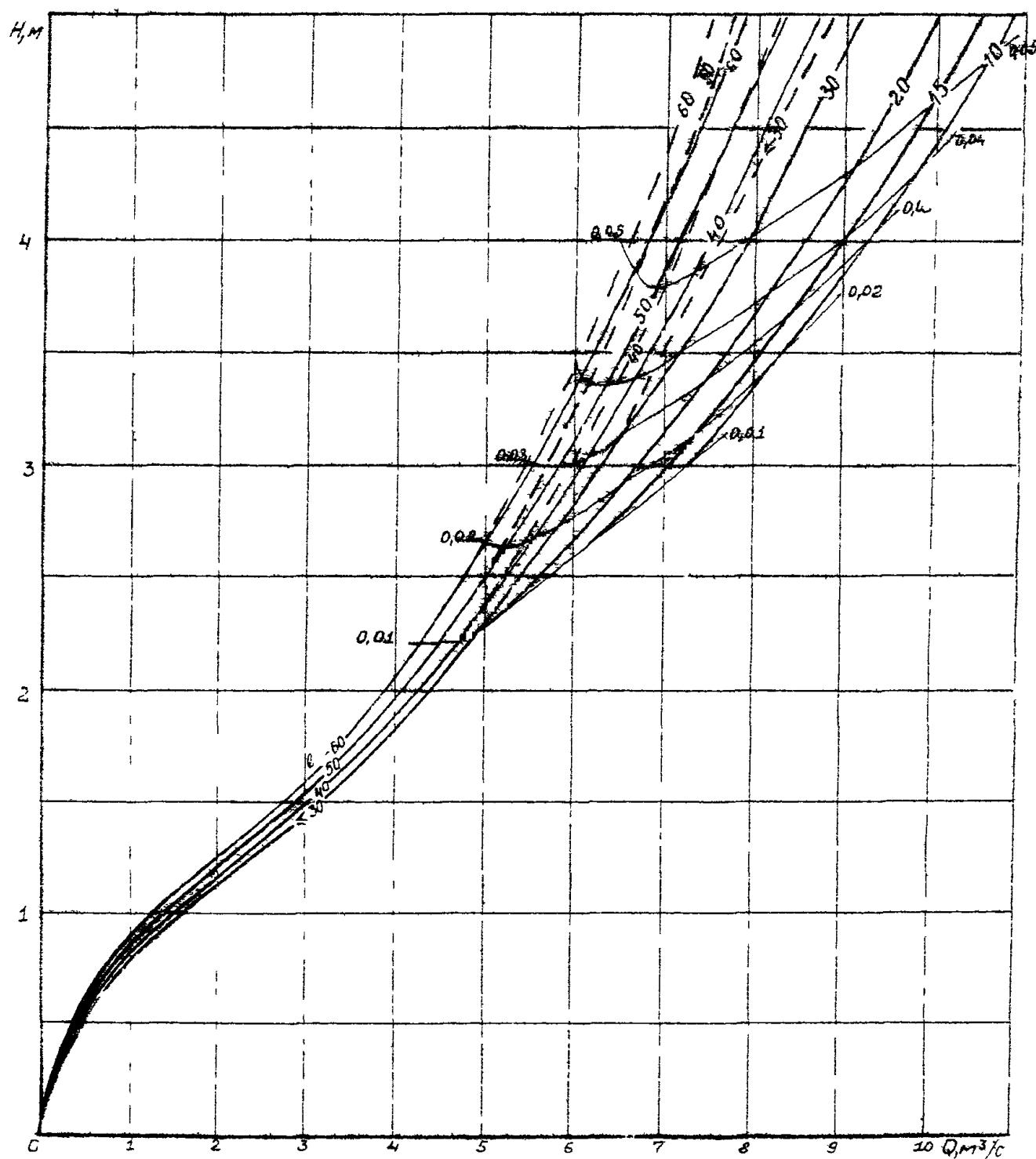


Рис. I2. Зависимости $H = f(Q)$ для труб
 $D = 1,5 \text{ м}$ при $\epsilon = 0,01$

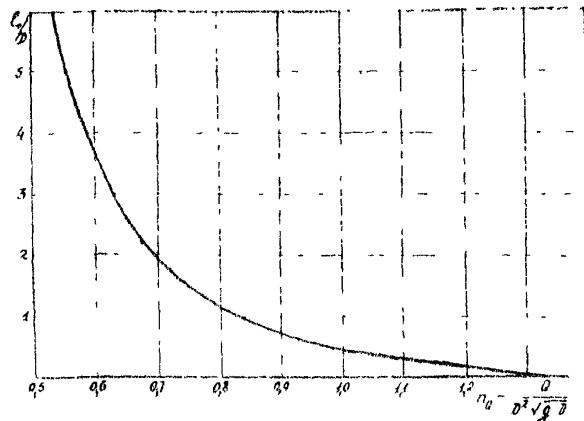


Рис. II. График для определения C_0^2

В трубах с оголовком типа "капюшон" возможен переход частично-напорного режима в его особую форму. Для установления возможности сохранения частично-напорного режима в этом случае подпружину H сравнивают с H' , вычисляемой по формуле

$$H' = (1 + 0,155 \frac{D}{D^2 \sqrt{g} D}) D \quad (16)$$

При $H > H'$ частично-напорный режим сохраняется, и дальнейшего пересчета подпружиной H , определяемой по формуле (II), не требуется.

При $H < H'$ наблюдается особая форма частично-напорного режима, и в качестве искомой подпружиной глубины принимают H' .

2.20. Для определения расчетной подпружиной глубины перед трубами с оголовками всех типов, кроме типа "капюшон", сравнивают подпружину H с граничной H_f , определяемой по формуле (5). При $H > H_f$ в качестве расчетной глубины принимают H , при $H < H_f$ — глубину H_f .

для труса с оголовками типа "калюшон" сравнивают подпёртую глубину, принятую в п. 2.19 для дальнейших расчётов, с подпёртой глубиной H'' , определяемой по формуле (16) при $\frac{Q}{B^2 \sqrt{g} L} = 0,645$.

При $H > H''$ в качестве расчетной глубины принимают H , при $H < H''$ — глусиву H'' .

2.21. Для безоголовочных труб с гладкими лотками, расположеннымными на $1/3$ (или $1/4$) периметра поперечного сечения сооружения, в целях упрощения вычислений рекомендуется пользоваться графиками, приведенными на рис. I2 и I3. На графиках зависимости $H = f(Q)$ при частично-напорном и напорном режимах соответствуют уклону $i_t = 0,01\%$. При иных уклонах в значения H для указанных режимов вводятся поправки по формуле

$$\Delta H = i_t (i_t - 0,01). \quad (I7)$$

Подпёртая глубина в этом случае равна

$$H = H_{ГРАФ} - \Delta H, \quad (I8)$$

где $H_{ГРАФ}$ — подпёртая глубина, определяемая по графикам (см.рис. I2 и I3).

Зависимости $H = f(Q)$ даны на графиках для разных длин и отверстий труб. Они пересечены кривыми, соответствующими различным уклонам труб. Точки пересечения их соответствуют минимальным значениям расхода и подпёртой глубины H , при которых труба, установленная с данным уклоном, работает в частично-напорном режиме. При меньших значениях Q и H в трубе имеет место обнапорный или полуобнапорный режим протекания, при которых пропускная способность труса не зависит от их уклона.

На указанных графиках зависимости $H = f(Q)$ для полуобнапорного режима выше кривой $i_t = 0,01$ (пояснения см.ниже) изображены пунктиром.

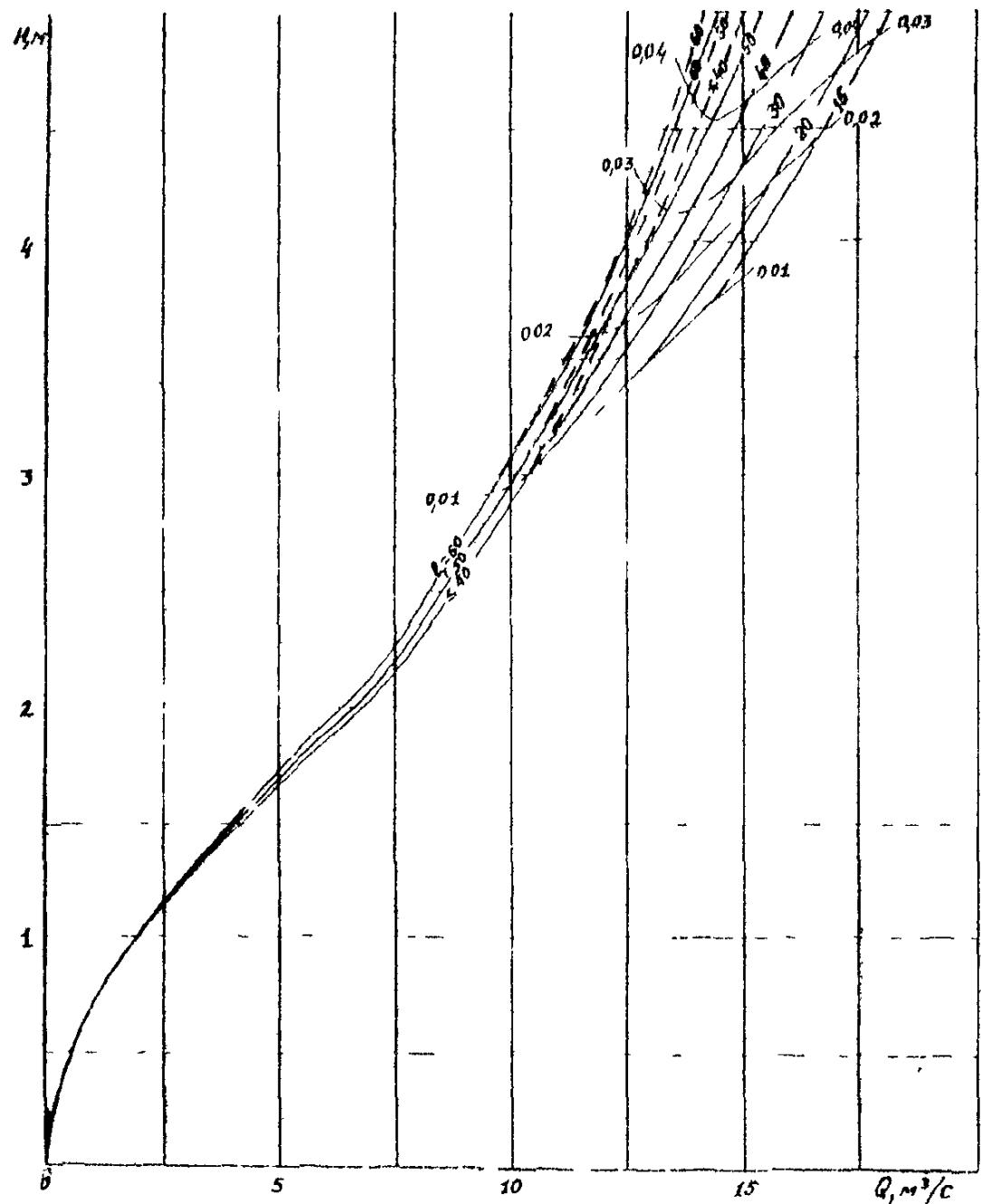


Рис. 13. Зависимости $H = f(Q)$ для трубы $D = 2,0 \text{ м}$
при $i_r = 0,01$

Порядок подъязвания графиком следующий.

На графике, соответствующем принятому отверстию трубы, находят кривую $H = f(Q)$ для заданной длины трубы ℓ_T . На этой кривой по величине расхода находят подпартую глубину H .

Интерполируя кривые, пересекающие зависимости $H = f(Q)$, находят уклон для кривой, проходящей через точку, соответствующую заданному расходу (подпартой глубине H).

Сравнивая фактический уклон трубы с уклоном указанной кривой ℓ_T , устанавливают возможность возникновения частично-напорного (или напорного) режима в трубе.

При $\ell_T < \ell_r$ в трубе возникает частично-напорный (напорный) режим, при $\ell_T > \ell_r$ - полунашорный.

При частично-напорном (напорном) режиме в получении по графику значение H граф вводят поправку ΔH согласно формуле (17).

Сравнивая установленное значение H с $1,4 D$ определяют возможность существования частично-напорного режима.

При $H \geq 1,4 D$ частично-напорный режим сохраняется, и полученное значение H принимается к дальнейшему расчету. При $H < 1,4 D$ возникает полунашорный режим, и H определяют по зависимости $H = f(Q)$ для данного режима трубы заданной длины.

В качестве расчетной подпартой глубины перед трубами, работающими в частично-нашорном режиме, принимают большее из значений H и H_r .

H_r на графиках (см.рис.12 и 13) определяют следующим образом:

находят точку пересечения зависимости $H = f(Q)$ для трубы заданной длины с линией заданного уклона (при отсутствии на графике линии соответствующего уклона ее положение определяют интерполяцией);

через полученную точку проводят линию, параллельную оси ординат, и доводят ее до пересечения с пунктирной линией для трубы заданной длины; ордината этой точки и будет искомой граничной глубиной H_r .

При полунапорном режиме подпорту глубину определяют непосредственно по зависимости $h = f(A)$ для данного режима (на графиках она изображена пунктиром).

Глубины и скорости потока на выходе из труб

2.22. Глубины потока на выходе из гофрированных труб $h_{\text{вых}}$ (в том числе и с гладкими лотками) при $0,01 \leq i_r \leq 0,05$ и параметрах расхода $\frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} < 1,35$ определяют по следующим формулам (при $i_r, \%$):

$$\text{при } \frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} \leq 0,8 \quad h_{\text{вых}} = \frac{0,86}{i_r^{0,06}} \left(\frac{A}{D^2 \sqrt{g_D}} \right)^{0,6} ; \quad (19)$$

при $0,8 < \frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} < 1,35$

$$h_{\text{вых}} = \frac{0,86}{i_r^{0,06}} \left(\frac{A}{D^2 \sqrt{g_D}} \right)^{0,52} \quad (20)$$

при $\frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} \geq 1,35$ труба на выходе заполнена, и глубины в выходных сечениях равны диаметру трубы, т.е. $h_{\text{вых}} = D$. Для упрощения расчетов можно пользоваться графиком (рис. I4).

2.23. Скорости потока на выходе из труб $V_{\text{вых}}$ определяют из выражения (при $i_r, \%$):

$$\frac{V_{\text{вых}}}{\sqrt{g_D}} = 1,45 i_r^{0,04} \left(\frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} \right)^{\frac{1}{3i_r}} \quad (21)$$

или по графику (рис. I5).

При $\frac{Q}{D^2 \sqrt{g_D}} > 1,35$ скорости потока на выходе из труб определяют по формуле

$$V_{\text{вых}} = \frac{Q}{CJ_{\text{коор}}} \quad (22)$$

Особенности расчета многоочковых и многоярусных труб

2.24. Пропускную способность гофрированных многоочковых и многоярусных труб при условии их раздвижки на величину не менее $0,25 D$ определяют как сумму отдельно работающих одноочковых труб.

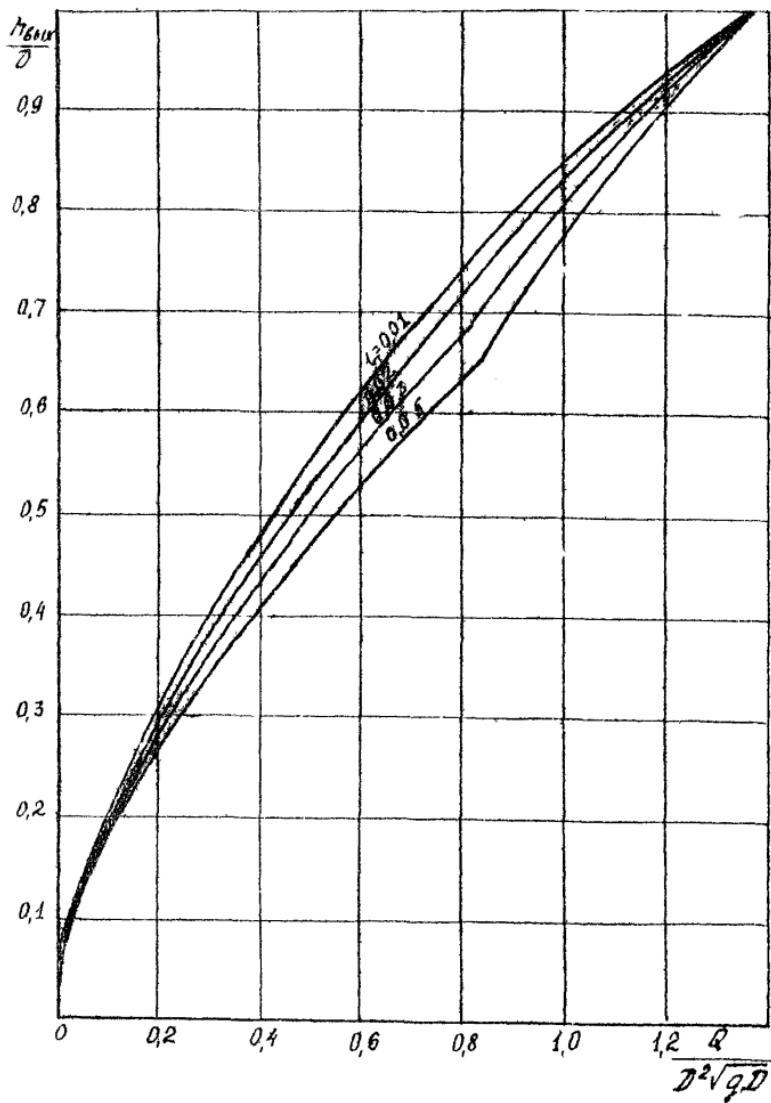


Рис. I4. График для определения глубин потока
на выходе из труб при разных уклонах

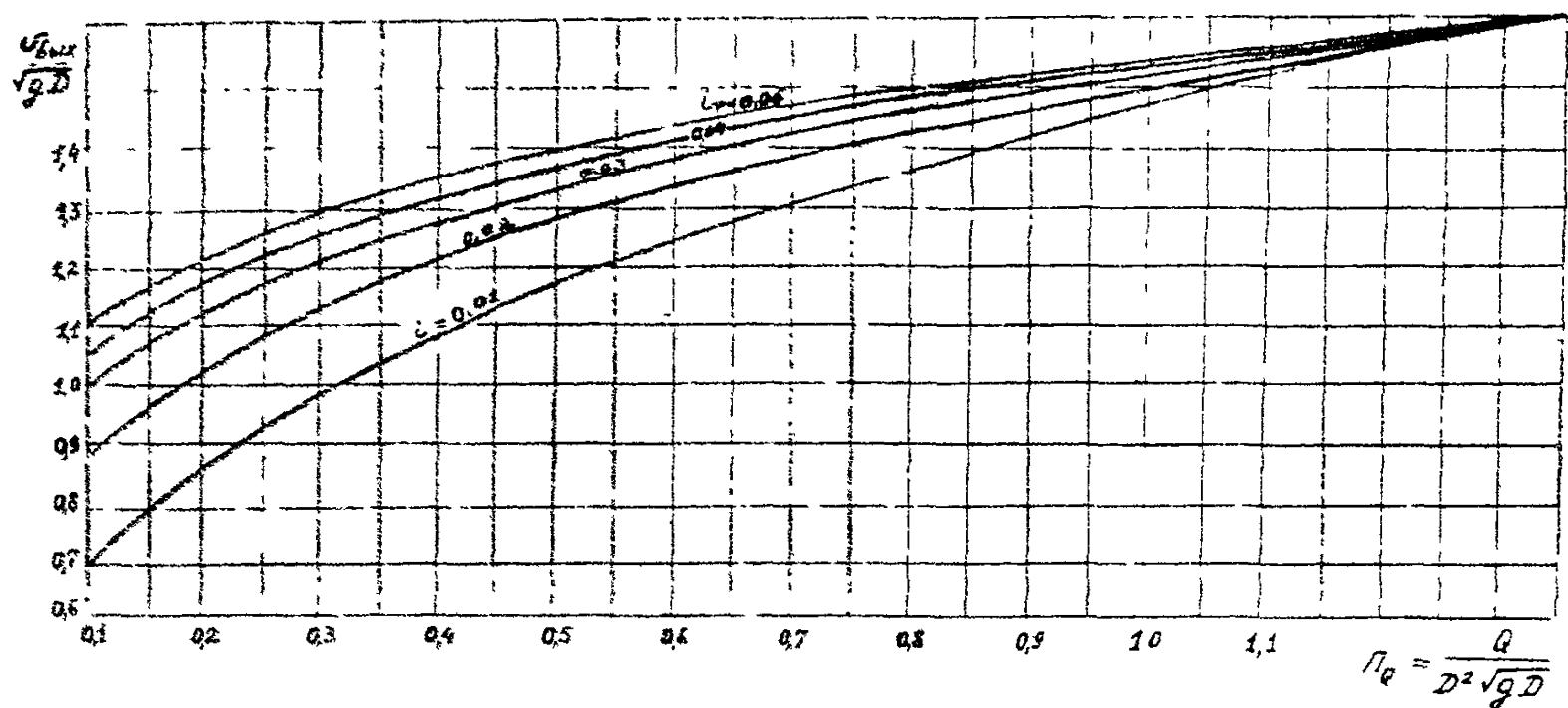


Рис.15. График для определения скоростей потока на выходе из труб при разных уклонах

2.25. Расчет многоочковых труб аналогичен расчету одноочковых, при этом расход каждой трубы принимают равным $\bar{Q}_n = \frac{Q}{N_T}$, где N_T - число труб.

2.26. Многоярусные трубы целесообразно устраивать без оголовка. Расчет многоярусных труб (рис. I6) начинают с определения подпертой глубины перед трубой в предположении, что весь расход проходит через трубы нижнего яруса. Для этого весь расход делят на число труб нижнего яруса и производят расчет отдельной трубы согласно рекомендациям для одноочковых труб, изложенным выше. Установив подпертую глубину перед трубой, ее сравнивают с расстоянием между лотками труб первого и второго ярусов. Если она меньше указанного расстояния, второй ярус не работает, и расчет на этом заканчивают, принимая в качестве искомой полученную подпертую глубину.

В противном случае расчет продолжают, для чего строят зависимости $H = f(Q)$ в такой последовательности.

1. Задают ряд расходов в трубах верхнего яруса и для каждого из них определяют подпертые глубины, пользуясь рекомендациями для одноочковых труб. При этом расход отдельной трубы определяют путем деления общего расхода на число труб N_T .

2. Устанавливают подпертые уровни перед многоярусной трубой при пропуске каждого из заданных расходов путем прибавления к отметке лотка труб верхнего яруса соответствующих подпертых глубин.

3. Определяют подпертые глубины перед трубами всех нижерасположенных ярусов, вычитая из отметок подпертых уровней для каждого из заданных расходов, пропускаемых трубами верхнего яруса, отметки их лотков.

4. Устанавливают режимы протекания в трубах каждого из ярусов, определяя относительные подпертые глубины перед ними $\frac{H}{D}$ при пропуске заданных расходов в трубах верхнего яруса и сравнивая их с относительными граничными напорами, которые вычисляются согласно рекомендациям для одноочковых труб.

При $\frac{H}{D} < \frac{H_c}{D}$ в трубах данного яруса возникает полунапорный режим, при $\frac{H}{D} > \frac{H_c}{D}$ - частично-напорный или напорный

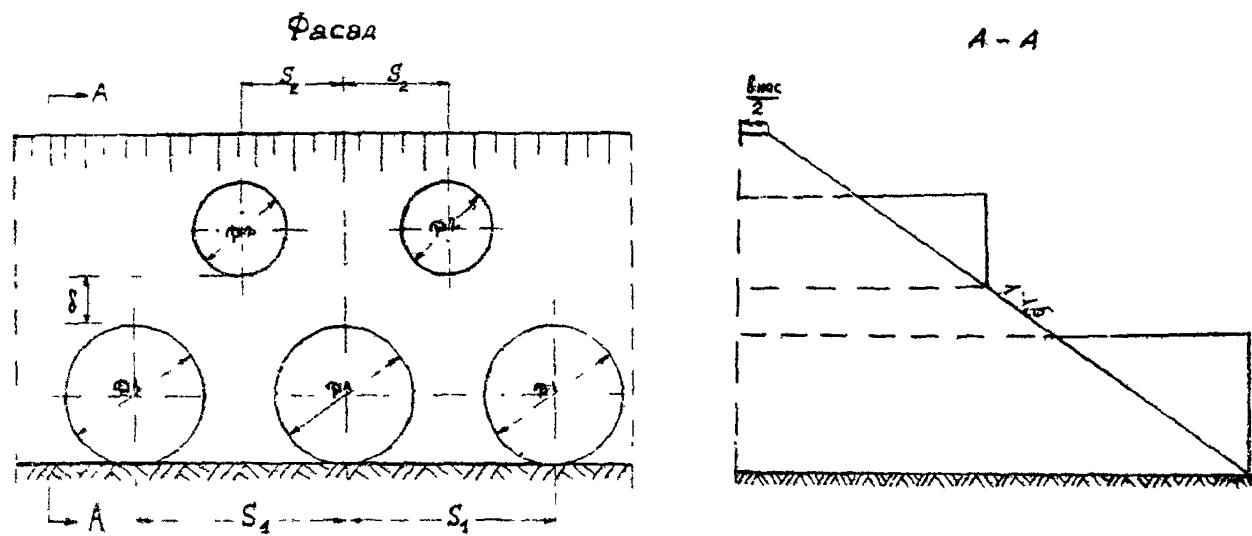


Рис. I6. Схема многоярусной трубы

5. Для полунапорного режима ($\frac{H}{D} < \frac{H_r}{D}$) определяют расходы, пропускаемые трубой соответствующего яруса по формуле (10).

При $\frac{H}{D} \geq \frac{H_r}{D}$ определяют расходы труб каждого яруса по формуле (11) при $\eta_n = 0,75$ и находят параметры расхода $\frac{Q}{n_r D^2 \sqrt{g} \bar{v}}$ (n_r - число труб в данном ярусе).

При $\frac{H}{n_r D^2 \sqrt{g} \bar{v}} > 1,35$ режим напорный и расход должен быть пересчитан по формуле (10) при $\eta_n = 0,5$.

При $\frac{H}{n_r D^2 \sqrt{g} \bar{v}} < 1,35$ по графику (см. рис. 10) определяют η_n и вновь вычисляют расход по формуле (7) с полученным значением η_n . Если он отличается от исходного не более чем на 3%, расчет заканчивают, в противном случае расчет продолжают до указанной точности.

6. Проверяют возможность сохранения частично-напорного режима согласно рекомендациям п. 2.19.

7. Определяют расчетные подпerteые глубины перед трубами в соответствии с рекомендациями п. 2.20.

8. Определяют расходы всех труб данного яруса по формуле

$$Q_{ap} = Q_n \eta_r \quad (23)$$

где Q_n - расход отдельной трубы данного яруса.

9. Для каждого из расходов, пропускаемых верхним ярусом, определяют полный расход многоярусной трубы путем сложения расходов всех ярусов при соответствующем подпertoм уровне.

По указанным данным строятся зависимости $H = f(Q)$ для труб каждого из ярусов и всей трубы в целом, причем подпerteые глубины для труб всех ярусов считают от отметки лотков труб данного яруса.

10. По зависимости $H = f(Q)$ для многоярусной трубы находят по известному расходу подпertoую глубину перед трубой, а затем скорости на выходе из труб. К расчету принимают скорости на выходе из труб нижнего яруса.

3. РАСЧЕТ НИЖНЕГО БЬЕФА ТРУБ В РАВНИННЫХ УСЛОВИЯХ

Типы выходных русел

3.1. Согласно рекомендациям, изложенным в настоящей главе, рассчитывают нижние бьефы труб, уложенных с уклонами $i_r \leq 0,03$.

3.2. Расчет нижнего бьефа труб заключается в определении скоростей потока на укреплении, выборе типов выходных русел, под которыми понимается комплекс устройств, находящихся за выходными оголовками, определении глубин размыва за укреплениями и назначении их размеров.

3.3. Рекомендуются выходные русла следующих типов:
для районов, расположенных вне зоны вечной мерзлоты, - укрепления из бетонных плит или набольших блоков, завершаемые предохранительным откосом с каменной рисбермой согласно типовому проекту укреплений (инв. № 937); обязательным условием для применения укреплений данного типа является устойчивость основания, поэтому их можно назвать недеформируемыми;

для районов вечной мерзлоты - укрепления из каменной наброски, используемые для скоростей потока на выходе из труб до 3,5 м/с, и укрепления, сочетающие наброску с бетонными блоками, для скоростей от 3,5 м/с до 5,5 м/с; укрепление этого типа сохраняет свои защитные свойства даже при деформации основания, и его можно назвать деформируемым.

3.4. В настоящей главе изложены рекомендации по расчету нижних бьефов труб, выходные русла которых имеют укрепления из каменной наброски или каменной наброски и не связанных между собой бетонных блоков. Расчет нижних бьефов гофрированных труб при недеформируемых укреплениях (плитных, блочных или в виде каменного мощения) в равнинных условиях не отличается от расчета труб других типов, и его выполняют в соответствии с рекомендациями "Руководства по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений". Размеры укреплений принимают по "Гипсовому проекту укреплений русел и откосов водопропускных труб" (инв. № 937), 1972.

**Выходные русла с укреплениями
из каменной наброски**

3.5. При расчете выходных русел с укреплениями из каменной наброски исходят из конструкции, приведенной на рис. I7.

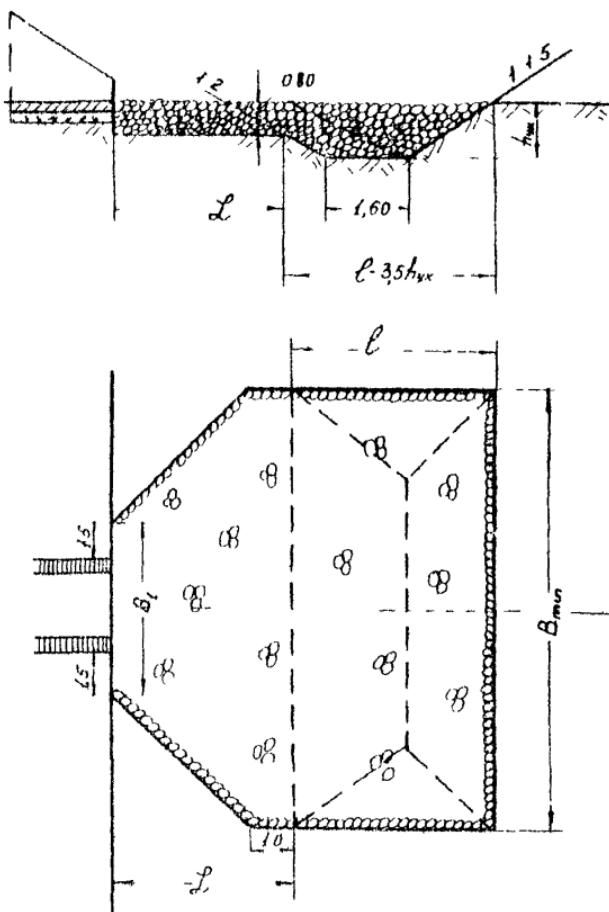


Рис. I7. Схема выходных русел с укреплением
из каменной наброски

Длину укрепления из наброски принимают равной $L_{min} = (1,5 \pm 2) D_3$, где $D_3 = 1,13 \sqrt{CQ_{loop}}$ эквивалентный диаметр трубы.

Толщину укрепления назначают $\delta = 75 \pm 30$ см, исходя из глубины заложения трех слоев камня размером $d = 25 \pm 30$ см. В конце укрепления устраивается рисберма из камней тех же размеров, что и укрепление.

Глубину размыва, глубину заложения рисбермы h_{up} объем камня в ней W_n и ширину укрепления определяют расчетом.

3.6. Расчет глубины размыва за трубами выполняют в такой последовательности.

I. Определяют предельную глубину размыва в грунте, слагающем русло:

$$\Delta h_{up} = \delta_m \Psi D_3 \left(\frac{Q}{Q_k} \right)^{0,6} \left[\frac{D_3^3}{\left(\frac{W_n}{B} + 1 \right) B \ell_p d} \right]^{0,2}, \quad (24)$$

где δ_m - масштабный коэффициент, значения которого приведены в табл.4.

Т а б л и ц а 4

$D_{3,m}$	δ_m	$D_{3,m}$	δ_m
1,0	0,85	3,0	0,79
1,25	0,83	4,0	0,77
1,50	0,82	5,0	0,76
2,0	0,81	6,0	0,75

Ψ - коэффициент, учитывающий тип залегания; для укреплений из каменной наброски $\Psi = 0,6$, для сочетания ее с блоками $\Psi = 1,0$;

$$Q_k = 1,6 D_3^{1,2} m^3/c - эталонный расход;$$

B - отверстие сооружения; для круглых одноочковых труб принимается равным диаметру сооружения, для многоочковых - сумме отверстий очков, для многоярусных труб - сумме отверстий труб нижнего яруса;

b_p - ширина сечения в конце выходного сполюбка;

d - расчетный диаметр частиц грунта;

D_3 - эквивалентный диаметр; для одноочковой трубы
 $D_3 = D$, т.е. диаметру трубы; для многочковых и
многоярусных труб

$$D_3 = \sqrt{P_{1(1)} D_1^2 + P_{1(2)} D_2^2 + P_{1(3)} D_3^2 + \dots + P_{1(n)} D_n^2}. \quad (25)$$

Здесь $P_{1(1)}, P_{1(2)}, \dots, P_{1(n)}$ - соответственно число труб и диаметр
их от первого до n -го яруса.

Расчетный диаметр частиц d (в м) вычисляется по
формулам:

для несвязного грунта

$$d = \frac{\sum d_i P_i}{100}, \quad (26)$$

где d_i - средний диаметр частиц отдельной фракции;

P_i - весовая доля фракции, %;

для связанного грунта

$$d = 4,5(0,15 + C_P), \quad (27)$$

где C_P - расчетное оцеление грунта, $\text{тс}/\text{м}^2$, определяемое
по данным анализа грунтов.

2. Определяют максимальную глубину размыва (в м) в
грунте русла по формуле

$$\Delta h_{max} = \eta \Delta h_{np}, \quad (28)$$

где η - доля предельной глубины размыва за данное время;
с некоторым приближением для несвязных грунтов
можно принять $\eta = 0,6$, для связных - $\eta = 0,75$.

3. Определяют максимальную глубину размыва (в м) в
руслах с каменной наброской

$$\Delta h_{max(np)} = \Delta h_{np} \left(\frac{d}{d_H} \right)^{1/3} + A d_H \frac{\Delta h_{max}}{W_K}, \quad (29)$$

где d_H - средний диаметр частиц каменной наброски;

W_K - объем каменной наброски на единицу ширины укрепления, $\text{м}^3/\text{м}$;

A - коэффициент; в выходных русла с каменной наброской $A = 0,5$; при наличии бетонных блоков
 $A = 0,1, 1'$.

При определении объема наброски в рисорме λ_K следует исходить из условия, что глубина размыя Δh_{\max} равна глубине заложения рисбермы, обрушение рисбермы происходит с откосом 1:2, в низовой откос имеет крутизну 1:1,5. При этом если глубина заложения рисбермы h_{yK} , в форме поперечного сечения треугольная, то $\lambda_K = 1,15 h_{yK}^2$. Глубину заложения рисбермы находят из уравнения

$$h_{yK}^3 - M h_{yK}^2 - \lambda' = 0. \quad (30)$$

где $M = \Delta h_{\max} \left(\frac{\alpha}{\alpha_n} \right)$ и $\lambda' = 0,0715 \Delta h_{\max}$.

3.7. Расчет размеров укреплений в плане выполняют следующим образом;

длину укрепления назначают $L = (1,5+2,0) D$;

ширину укрепления у подошвы насыпи принимают равной ширине оголовка на выходе с залесом 1,5 м в каждую сторону;

ширину укрепления в остальной его части определяют учитывая ширину растекания (не всей длине укрепления, кроме концевой части) и ширину коронки размыя (в концевой части укрепления).

Ширину растекания (в м) вычисляют по формуле

$$B_{\text{раст}} = b \left[\left(\frac{x}{D_g} + \left\{ \frac{n}{l} - 1 \right\} \right) + b_p \right], \quad (31)$$

где x – расстояние от конца оголовка до рассматриваемого створа;

$$n = 0,78 + 0,36 \frac{b_p}{D_g} - \frac{U_K}{Q} \quad (32)$$

Минимальную ширину укрепления (в м) в конце его определяют по формуле

$$B_{\min} = \frac{3,6}{K} \Delta h_{\max} \quad (33)$$

где K – коэффициент, определяемый по графику (рис.18).

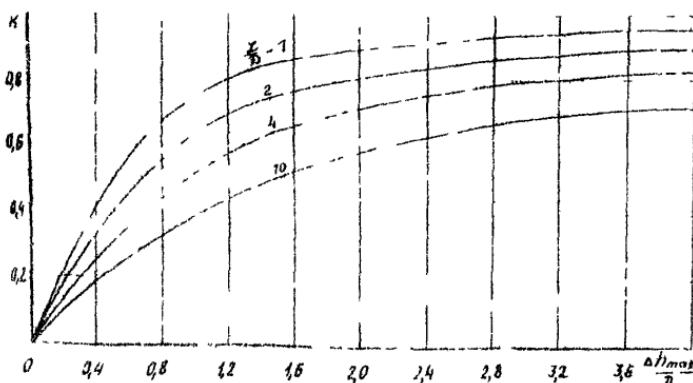


Рис.18. График для определения коэффициента К

Выходные русла с укреплениями из каменной наброски и бетонных блоков

3.8. Укрепления этого типа (рис.19) состоят из не связанных между собой блоков размером 1,0x1,0x0,4 м, расположенных на ширине растяжения потока и каменной наброски, укладываемой в водоворотной зоне и концевой части.

Габариты блоков, приведенных к шару, определяют по формуле

$$(l_H = \frac{d_{Hk}}{45}) \quad (34)$$

где d_{Hk} — диаметр элемента, приведенного к шару, м.

Укрепление из бетонных блоков устраивают однослойным. Исключение составляет лишь концевая часть, где число рядов блоков по вертикали определяется глубиной размыва. Блоки укладываются на каменную наброску, глубина заложения которой на всей ширине укрепления равна 75–80 см (соответствует толщине трех слоев наброски).

Концевая часть укрепления выполняется в виде вертикальной стены, состоящей в плане из одного ряда бетонных

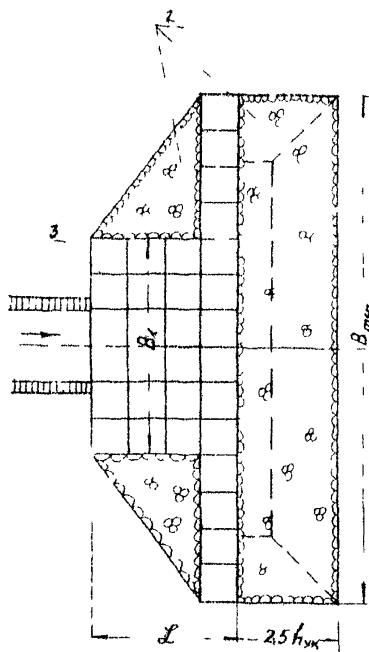
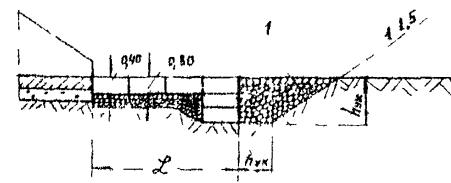


Рис. 19. Схема выходных русел с укреплением из бетонных блоков:
1 - каменная рисберма; 2 - каменная наброска
($z_H = 25 \pm 30$ см); 3 - бетонные блоки

блоков. Число рядов блоков по вертикали зависит от глубины вероятного размыва. Суммарная высота блоков не должна быть меньше этой глубины.

За стенкой сооружается рисберма трапециoidalной формы глубиной $h_{\text{вык}} = \Delta h_{\text{разм}}$

Расчет размыва в выходных руслах этого типа можно выполнить в соответствии с рекомендациями, изложенными в п.3.6, введя в них некоторые корректины. В формуле (29) коэффициент $A = 0,13$, в формуле (30) коэффициент $N = 0,0186 \Delta h_{\text{разм}}^2$, а коэффициент M принимается тот же, что и при расчете выходных русел с укреплениями из одной наброски.

В соответствии с изложенными рекомендациями были определены размеры укреплений в выходных руслах указанных типов. В табл.5 приведены основные размеры укреплений из каменной наброски и соответствующие им претельные значения расчетных Q_p и наибольших Q_{max} расходов при скорости течения на выходе из труб $V_{\text{вык}} \leq 3,5 \text{ м/с}$. В табл.6 приведены размеры укреплений из бетонных блоков каменной наброски при $V_{\text{вык}} \leq 5,5 \text{ м/с}$.

Таблица 5

Отверстие D, м	Число очков	Расход, м ³ /с		Длина укреп- ления, м	Ширина ук- репления, м	Глубина заложения концевой части ук- репления $h_{\text{вык}}, \text{м}$	
		Q_p	Q_{max}			B_1	$B_{\text{шт}}$
I, 1,5	I	1,2	-	2,25	2,80	6,0	0,80
		1,8	-		2,80	6,7	0,80
		2,2	-		2,80	6,9	0,80
		-	3,0		2,80	7,8	0,80
		-	3,7		2,80	8,3	0,80
I, 2	2	2,6	-	3,2	2,80	6,0	0,80
		3,6	-		2,80	8,8	0,80
		4,4	-		2,80	9,0	0,80
		-	6,0		2,80	9,9	0,80
		-	7,4		2,80	10,3	0,80

Продолжение табл. 5

Утверждение		Гвоздь, м/с		Длина укрепления, м		Ширина укрепления, м		Глубина заложения концевой части укрепления, м
D, м	Число очков	Q _p	Q _{max}	L	C	B ₁	B _{min}	
1,0	3	3,9	-	-	2,80	9,9	9,9	0,80
		5,4	-	-	2,80	10,2	10,2	0,80
		6,6	-	3,9	2,80	II,1	II,1	0,80
		-	9,0	-	2,80	II,5	II,5	0,80
		-	II,1	-	3,00	I2,I	I2,I	0,85
		2,7	-	-	2,80	8,5	8,5	0,80
2,0	2	4,5	-	-	2,80	9,5	9,5	0,80
		-	6,0	3,0	3,00	I0,6	I0,6	0,85
		-	7,5	-	3,30	II,2	II,2	0,95
		5,4	-	-	2,80	II,3	II,3	0,80
		9,0	-	4,2	2,80	I2,4	I2,4	0,80
		-	I2,0	-	3,30	I3,6	I3,6	0,95
3,0	3	-	I5,0	-	3,70	I4,2	I4,2	1,05
		8,1	-	-	2,80	I3,4	I3,4	0,80
		I3,5	-	-	3,00	I4,8	I4,8	0,85
		-	I8,0	5,2	3,70	I5,8	I5,8	1,05
		-	22,5	-	4,00	I6,5	I6,5	1,15
		3,5	-	-	2,80	II,5	II,5	0,80
3,0	1	6,7	-	4,5	2,80	I2,4	I2,4	0,80
		-	I0,0	-	3,0	I3,5	I3,5	0,95
		-	I6,9	-	3,70	I6,6	I6,6	1,05
		7,0	-	-	2,80	I5,8	I5,8	0,80
		I2,4	-	6,3	2,80	I6,3	I6,3	0,80
		-	20,0	-	3 I5	I7,8	I7,8	0,90
3,0	2	-	33,8	-	4,00	20,0	20,0	1,15
		10,5	-	7,8	2,80	I8,4	I8,4	0,80
		20,1	-	-	3,00	I2,0	I2,0	0,65
		-	30,0	-	3,50	20,9	20,9	1,00
		-	50,7	-	4,75	24,I	24,I	1,35

Таблица 6

Си- звер- стие хрн к	Рас- стояние между блоками м	Размеры крепления в плане, м		Донная часть ук- репления		Объем камня в рядах на 1 м ширины крепления W_k , м ³ /м	
		длина, м	ширина 5, 8 мес	глубина затопления укрепления, м	число рядов блоков		
1,5	3,0	-	-	0,30	30	0,72	
	4,0	-	-	0,30	30	0,72	
	5,0	-	-	0,30	30	0,72	
	6,0	-	-	0,30	30	0,72	
	8,0	-	-	0,30	30	0,72	
	10,0	-	-	0,30	30	0,72	
	12,0	-	-	0,30	30	0,72	
2,0	3,0	-	-	0,30	30	1,20	
	4,0	-	-	0,30	30	1,20	
	5,0	-	-	0,30	30	1,20	
	6,0	-	-	0,30	30	1,20	
	8,0	-	-	0,30	30	1,20	
	10,0	-	-	0,30	30	1,20	
	12,0	-	-	0,30	30	1,20	
	15,0	-	-	0,30	30	1,20	
	18,0	-	-	0,30	30	1,20	
2,5	4,0	-	-	0,20	20	1,44	
	5,0	-	-	0,20	20	1,44	
	6,0	-	-	0,20	20	1,44	
	8,0	-	-	0,20	20	1,44	
	10,0	-	-	0,20	20	1,44	
	12,0	-	-	0,20	20	1,44	
	15,0	-	-	0,20	20	1,44	
3,0	4,0	-	-	0,20	20	1,44	
	5,0	-	-	0,20	20	1,44	
	6,0	-	-	0,20	20	1,44	
	8,0	-	-	0,20	20	1,44	
	10,0	-	-	0,20	20	1,44	
	12,0	-	-	0,20	20	1,44	
	15,0	-	-	0,20	20	1,44	
	18,0	-	-	0,20	20	1,44	
	24,0	-	-	0,20	20	1,44	
	30,0	-	-	0,20	20	1,44	
	36,0	-	-	0,20	20	1,44	

4.ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАЗМЫВА И НАЗНАЧЕНИЯ РАЗМЕРА УКРЕПЛЕНИЙ ЗА КОСОГОРНЫМИ ТРУБАМИ

Основные положения

4.1. Возможны следующие принципиальные варианты укладки гофрированных труб на косогорах.

1. Укладка гофрированных труб с уклоном лога. Этот вариант возможен при уклонах местности $\beta \leq 0,05$ (предельный уклон укладки гофрированных труб по условиям прочности). В зависимости от применяемых типов укреплений возможны две подварианты:

трубы с типовыми конструкциями укреплений - для недеформируемых оснований;

трубы с укреплениями из специальных блоков (предложение Мосгипротранса) - для деформируемых оснований.

2. Укладка труб непосредственно в теле насыпи на насыпной грунт (трубы на подсыпке). Этот вариант имеет подварианты, отличающиеся условиями сброса потока в нижний бьеф:

сброс потока непосредственно на откос насыпи (рис.20а,б), при этом насыпь может быть из камня или иметь укрепленные откосы;

сброс потока по лоткам, установленным на откосе; для этой цели могут быть использованы элементы металлических гофрированных труб (см.рис.20,в);

консольный сброс (см.рис.20,г); поток сбрасывается по лотку, установленному на специальных опорах, за пределы подошвы насыпи на расстояние, при котором возникающий размыв не угрожает устойчивости сооружения.

3. Шахтный сброс (рис.21), при котором на входе в трубу устраивается вертикальная шахта, сопрягающаяся с трубой, заглубленной в лог.

4.2. Каждый из указанных вариантов может отличаться условиями входа.

Конструкции входа в косогорные гофрированные трубы не имеют принципиальных отличий от железобетонных и бе-

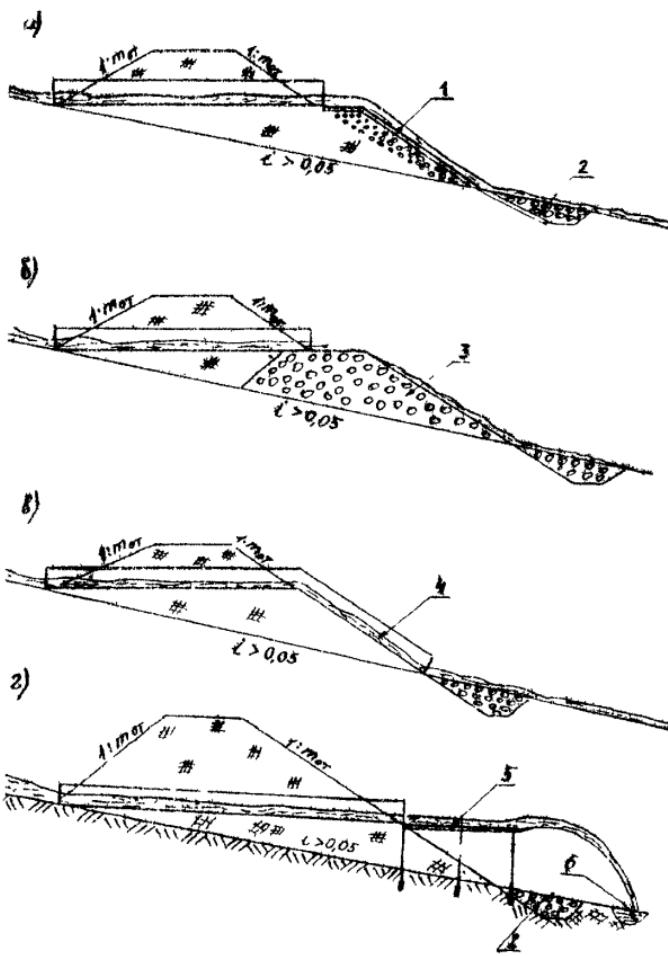


Рис.20. Типы укладки гофрированных косогорных труб на насыпной грунт в теле насыпи:
1 - укрепленный откос; 2 - рисберма; 3 - каменная отсыпка; 4 - лоток; 5 - консольный оброс; 6 - зонка размыва

тонных труб, и их гидравлические расчеты выполняют в соответствии с "Типовым проектом унифицированных косогорных водопропускных труб" (инв. № 538) и "Руководством по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений".

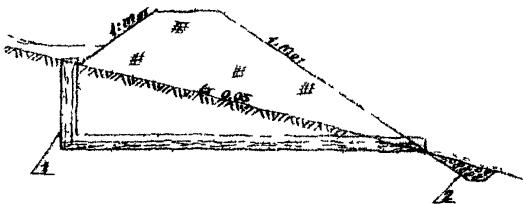


Рис. 21. Гофрированная косогорная труба с
мактным сбросом:
1 - мактный сброс; 2 - рисберма

4.3. В настоящих Методических рекомендациях приводятся методы расчета нижних бьефов труб, уложенных на подсыпке в теле насыпи при сбросе воды непосредственно на подсыпку или специальные лотки, расположенные не откосе, а также методы расчета нижних бьефов труб, уложенных непосредственно в логе при укреплениях из крупных блоков.

Расчет нижних бьефов косогорных сооружений, уложенных непосредственно в логе при применяемых в настоящее время конструкциях выходных русел, а также при сбросе воды консольными или шахтными сбросами, производят в соответствии с "Руководством по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений".

4.4. В качестве лотков целесообразно использовать элементы гофрированных труб ближайшего большого диаметра по отношению к отверстия водопропускной трубы.

Лоток укладывается непосредственно за выходным сечением трубы. Берма в насыпи при лотковом сопряжении не устраивается.

4.5. Расчет нижних съевов труб, уложенных из подсыпки, производится в зависимости от условий отвода воды с откоса применительно к соответствующему типу отвода.

Укладка труб с уклоном лога при укреплениях из крупных бетонных блоков

4.6. Выходные русла этого типа применяют при деформируемых основаниях. Они имеют две конструктивные разновидности:

с укреплением боковых откосов и отсыпкой, в котором укладывается укрепление (рис.22);
без их укрепления (рис.23).

4.7. Размеры выходных русел данного типа определяют согласно "Руководству по гидравлическим расчетам жёлтых искусственных сооружений" (гл.У1), учитывая некоторые особенности (см.рис.22 и 23):

длина укрепления принимается равной $\mathcal{L} = 0$ (неклонная часть укрепления считается как предохранительный откос);

коэффициент $\Psi = 1,0$ (имеется предохранительный откос);

максимальная глубина размыва и соответствующая ей минимальная ширина укрепления определяются в створе, проходящем через конец блоков;

слой камня в рисберме принимается равным $\delta_{pc} \approx 0,7\Delta h_l$, где Δh_l – расстояние по вертикали от подошвы укрепления до точки пересечения откосов рисбермы и косогора (см.рис.22 и 23);

ширина рисбермы по дну равна $\Delta h_{plak(n)}$

часть плоскости откоса за пределами ширины растекания укрепляется каменной наброской.

Отвод воды по укрепленному откосу насыпи и берме

4.8. Назначают коэффициент заложения низового откоса M_{ot} . По условиям устойчивости откоса с учетом воздействия на него потока целесообразно принимать $M_{ot} = 2$.

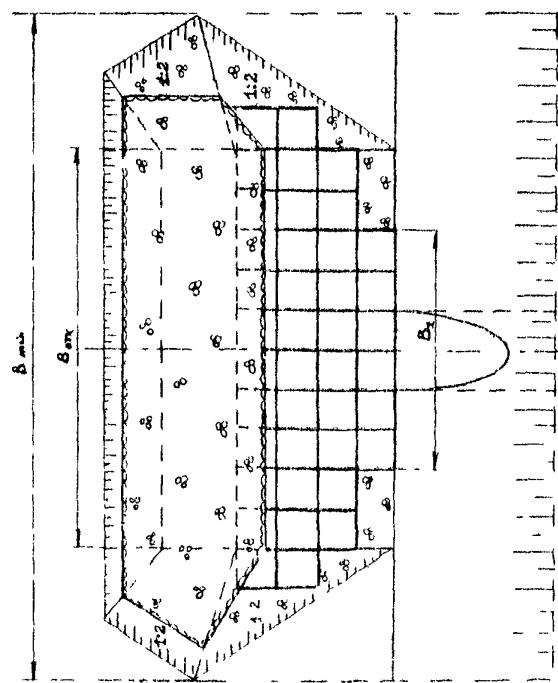
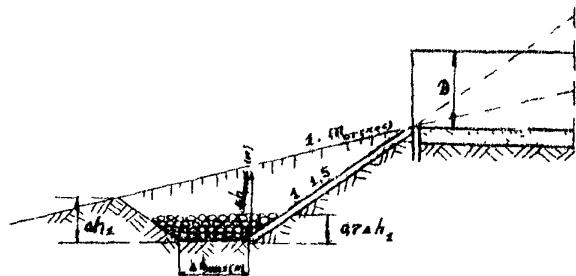


Рис.22. Схема выходных русел из бетонных блоков и каменной наброски на косогорах при укреплении откосов котлована

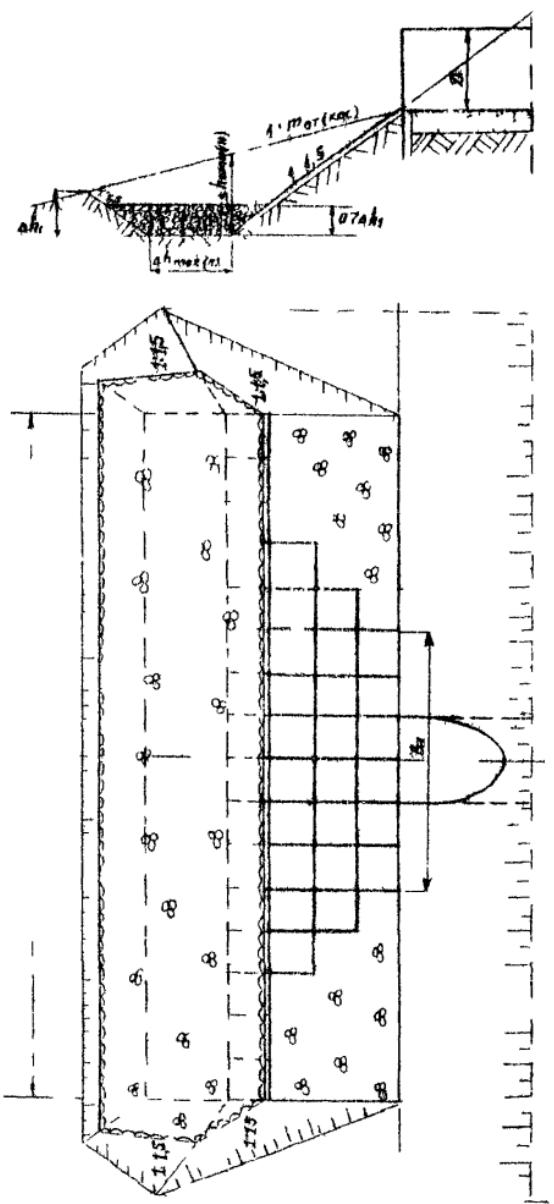


Рис.23. Схема выходных русел из бетонных блоков и каменной наброски на косогорах без укрепления откосов котлована

4.9. Определяют глубины и скорости потока на выходе из трубы согласно рекомендации пп. 2.22 и 2.23.

4.10. Определяют минимальный размер бермы вдоль потока по формуле, полученной из уравнения свободного падения тела:

$$L_{\delta(\min)} = 1,2 V_{\text{брызг}} \sqrt{\frac{\rho h_{\text{брызг}}}{g}}, \quad (35)$$

где 1,2 - коэффициент запаса.

4.11. По скорости $V = 1,3 V_{\text{брызг}}$ (учитывается увеличение скорости на берме за счет растекания) определяют тип укрепления согласно "Руководству по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" (табл. П-6, стр. 28).

4.12. Определяют ширину растекания потока на берме по формуле (эта ширина сохраняется и на откосе насыпи)

$$B_{\text{раст}} = 16 \frac{D^2}{L_\delta} \left(\frac{A}{A_K} \right)^{\frac{D}{L_\delta}} \left(\frac{x}{D} \right)^{0.8 \left(\frac{u}{A_K} \right)^{0.5}}, \quad (36)$$

где $B_{\text{раст}}$ - ширина растекания потока в створе, проекция расстояния которого от выхода из трубы равна x

L_δ - размер бермы вдоль потока.

4.13. Определяют среднюю глубину потока на откосе у подошвы насыпи из уравнения Шеши, считая (в запас), что на откосе установится равномерный режим течения, и заменяя истинное поперечное сечение потока равновеликим прямоугольником:

$$h_{ng} = \left(\frac{Q n \sqrt{m_{\text{от}}}}{B_{\text{раст}}} \right)^{2/3}, \quad (37)$$

где n - коэффициент шероховатости, принимаемый для бетонных укреплений равным 0,015.

4.14. Находят среднюю скорость потока у подошвы откоса

$$V_{ng} = \frac{Q}{h_{ng} B_{\text{раст}}}. \quad (38)$$

4.15. По скоростям у подошвы насыпи V_{py} определяют тип укрепления откоса бермы (насыпи) и укрепления, расположенного у подошвы насыпи, согласно "Руководству по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" (табл. II-6, стр. 28).

4.16. Назначают тип выходного рулона, определяют глубину размыва и размеры укреплений за подошвой насыпи: для недеформируемых русел согласно "Руководству по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" (гл. II), для деформируемых русел – согласно рекомендациям настоящей главы. При этом для учета запаса расчетный расход увеличивается на 30%. Для недеформируемых русел при расчете размыва по формуле (24) принимают $\Psi = 1$, а длину укрепления – равной длине откоса и бермы.

Отвод воды на берму и откос насыпи отсыпанной из камня

4.17. Определяют скорости потока на выходе из трубы V_{byk} согласно рекомендациям п. 2.23.

4.18. Устанавливают минимальный средний диаметр частиц наброски d_H , из которой может быть отсыпана нижняя часть насыпи, по формулам:

для однородных частиц $(\frac{d_{max}}{d_H} \leq 2)$

$$d_H = \frac{V_{byk}^2}{45}; \quad (39)$$

для горной массы $\frac{d_{max}}{d_H} > 2$

$$d_H = \frac{V_{byk}^2}{25}, \quad (40)$$

где d_{max} – диаметр наиболее крупных частиц, которых в наброске более 5%;

d_H – средний диаметр частиц наброски.

4.19. Определяют минимальный размер бермы вдоль потока, при которой поток, вытекающий из трубы, не попадает непосредственно на откос, по формуле (35).

4.20. Вычисляют ширину растекания потока на берме по формуле (36) с введением в нее понижающего коэффициента

0,6, учитывающего особенности работы каменной наброски по сравнению с бетонным укреплением. На откосе эта ширина растекания сохраняется.

4.21. Назначают протяженность участка насипы, отсыпанного из камня, — ширину фильтрующей части подсыпки. В первом приближении ее принимают равной $b_{cr} = B_{раст}$.

Далее каменная подсыпка рассматривается как фильтрующая насиль (переливаемая или непереливаемая). Гасчет ее производится согласно "Руководству по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" (гл. II).

4.22. Определяют нормальную глубину фильтрационного потока, предполагая, что весь расход профильтруют через подсыпку, по формуле

$$h_0 = \frac{U \sqrt{M_{\text{откос}}}}{b_f K_f}, \quad (41)$$

$M_{\text{откос}}$ — коэффициент заложения откоса косогора;

K_f — коэффициент фильтрации, м/с.

Для однородной наброски K_f определяется по табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Средний диаметр камней d_n , приведенный к шару, см	K_f для наброски из камней, м/с			Средний диаметр камней d_n , приведенный к шару, см	K_f для наброски из камней, м/с		
	круглых	ромбических	остроугольных		круглых	ромбических	остроугольных
при их пористости	0,40	0,45	0,50	при их пористости	0,40	0,45	0,50
5	0,15	0,17	0,19	30	0,43	0,48	0,53
10	0,23	0,26	0,29	35	0,46	0,52	0,58
15	0,30	0,33	0,37	40	0,50	0,56	0,62
20	0,35	0,39	0,43	45	0,53	0,60	0,66
25	0,39	0,44	0,49	50	0,56	0,63	0,70

Для неоднородной наброски коэффициент фильтрации определяется согласно "Руководству по расчету турбулентной фильтрации в каменно-набросочных гидротехнических сооружениях" (М., "Энергия", 1976) по формуле

$$K_{\text{фильтрации}} = K_{\text{фильтрации}} \frac{\Pi_{\text{неодн}}}{\Pi_{\text{одн}}} \sqrt{\frac{(1-\Pi_{\text{одн}}) \Pi_{\text{неодн}}}{(1-\Pi_{\text{неодн}}) \Pi_{\text{одн}}}}, \quad (42)$$

где $K_{\text{фильтрации}}$ – коэффициент фильтрации для однородной наброски, имеющей средний диаметр частиц фракции d_n , равный эквивалентному диаметру частиц неоднородной наброски;

$\Pi_{\text{одн}}$ и $\Pi_{\text{неодн}}$ – пористость соответственно однородной и неоднородной наброски.

Средний диаметр частиц наброски d_n определяется по формуле

$$d_n = \frac{\sum d_{n(i)} P_i}{\sum P_i},$$

где $d_{n(i)}$ – средний диаметр частиц отдельной фракции;
 P_i – весовая доля фракции.

Пористость неоднородной наброски определяют опытным путем, засливая поры водой. Толщина исследуемого слоя должна быть не менее $5 d_{\text{млх}}$.

Для грубых приближений можно считать, что в неоднородной наброске, имеющей небольшой процент мелких частиц (5-7%), коэффициент фильтрации по сравнению с однородной наброской уменьшается на 25-30%.

4.23. Определяют глубину фильтрационного потока H в створе конца трубы (рис.24) из уравнения

$$f(\xi) = \frac{\frac{2}{n} \sqrt{\Pi_{\text{огр.кос}}^2 + l^2}}{h_o \Pi_{\text{огр.кос}}} - f(\xi_s), \quad (43)$$

где l_n – проекция расстояния от конца трубы до точки пересечения откосов отсыпки и косогора в случае отсутствия подтопления со стороны нижнего бьефа (см.рис.24) или до створа, проходящего через урез воды в нижнем бьефе, при подтоплении;

$f(\xi)$ и $f(\xi_s)$ – функции относительных глубин соответственно в створе конца трубы $\xi = \frac{H}{h_o}$ и конца подсыпики $\xi_s = \frac{h_{\text{под}}}{h_o}$. определяемые при прямоугольном сечении наброски по табл. 8; иные формы сечений приводят к прямоугольным.

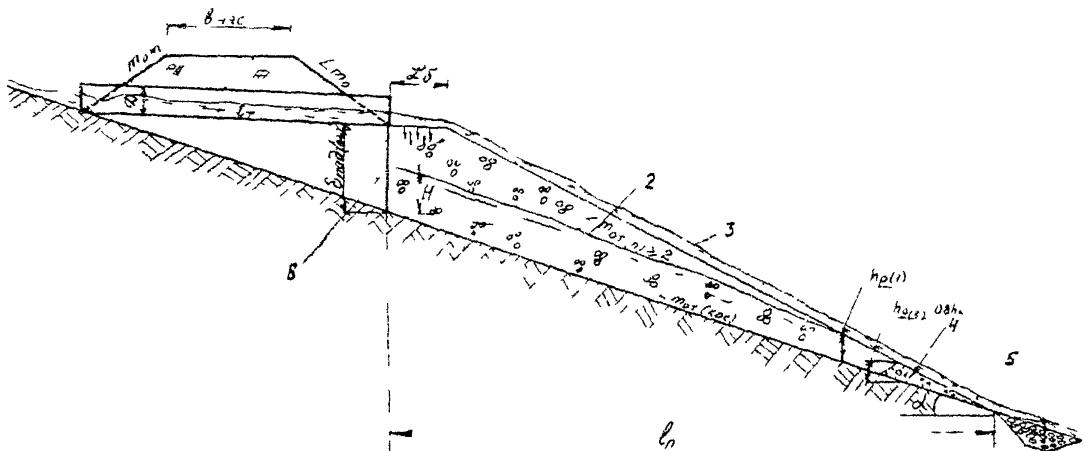


Рис.24. Расчетная схема нижнего бьефа гофрированной трубы, уложенной на подсыпке: 1 - фильтрующий погон; 2 - поверхность воды для случая, когда весь расход фильтрует через подсыпку; 3 - то же, когда часть расхода слидается по откосу стоянки; 4 - обратный фильтр; 5 - рисберме; 6 - экран

При отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа ($h_{H\delta} = 0$) уравнение имеет вид

$$\frac{\ell_n \sqrt{m_{ot(kos)}^2 + l}}{h_o m_{ot(kos)}^2} = f(\xi). \quad (44)$$

Т а б л и ц а 8

ξ	$f(\xi)$	ξ	$f(\xi)$	ξ	$f(\xi)$
0,00	0,0000	0,69	0,1579	0,900	0,5722
0,05	0,0000	0,70	0,1673	0,905	0,5942
0,10	0,0000	0,71	0,1772	0,910	0,6175
0,15	0,0011	0,72	0,1876	0,915	0,6442
0,20	0,0027	0,73	0,1988	0,920	0,6690
0,25	0,0051	0,74	0,2105	0,925	0,6976
0,30	0,0095	0,75	0,2230	0,930	0,7284
0,35	0,0151	0,76	0,2362	0,935	0,7617
0,40	0,0236	0,77	0,2503	0,940	0,7980
0,45	0,0347	0,78	0,2654	0,945	0,8378
0,50	0,0493	0,79	0,2814	0,850	0,8818
0,55	0,0684	0,80	0,2986	0,755	0,9307
0,60	0,0931	0,81	0,3170	0,960	0,9859
0,61	0,0989	0,82	0,3368	0,965	I,0489
0,62	0,1050	0,83	0,3581	0,970	I,1223
0,63	0,1114	0,84	0,3812	0,975	I,2097
0,64	0,1182	0,85	0,4062	0,980	I,3176
0,65	0,1253	0,86	0,4333	0,985	I,4573
0,66	0,1323	0,87	0,4631	0,990	I,6566
0,67	0,1407	0,88	0,4958	0,995	I,9995
0,68	0,1491	0,89	0,5319	I,000	∞

4.24. Определяют устойчивость низового откоса подсыпки из условия

$$\xi < \xi_{pr} \quad (45)$$

где \mathcal{L} — разность бьефов;
 \mathcal{L}_{pr} — предельная разность уровней бьефов, при превышении которой нарушается устойчивость низового откоса подсыпки.

\mathcal{L} и \mathcal{L}_{pr} определяют по формулам

$$\mathcal{L} = H + \frac{\ell_n}{m_{ot(kos)}} - h_{n\beta}; \quad (46)$$

$$\mathcal{L}_{pr} = 2,3(tg \varphi_H - tg \beta) \ell_n \sqrt{\frac{m_{ot(kos)}^2 + 1}{m_{ot(kos)}}} \sqrt{\frac{d_n}{H}}, \quad (47)$$

где φ_H — угол естественного откоса каменной наброски, равный 35° – 36° ;

$$tg \varphi = 0,695 \pm 0,725;$$

β — угол наклона низового откоса к горизонту.

При соблюдении условия (45) расчет заканчивают, в противном случае уполаживают откос и вновь производят проверку условия (45) и так продолжают до его удовлетворения.

4.25. Проверяют устойчивость основания насыпи против ламинарной фильтрации. Для этого сравнивают глубину H с предельной глубиной H_{pr} , обеспечивающей устойчивость против ламинарной фильтрации

$$H_{pr} = \frac{\ell_n \sqrt{m_{ot(kos)}^2 + 1}}{8 m_{ot(kos)}}, \quad (48)$$

где δ — коэффициент, определяемый по табл. 9.

При $H < H_{pr}$ устойчивость против ламинарной фильтрации обеспечена, в противном случае или увеличивают ширину фильтрующей прослойки b_ϕ и повторяют расчет, или устраивают в основании обратный фильтр.

4.26. Сравнивают глубину потока H с толщиной подсыпки в сечении, проходящем через конец лотка трубы из выходе $b_{pog(byl)}$.

При $H \leq b_{pog(byl)}$ весь поток профильтрует внутрь подсыпки, при $H > b_{pog(byl)}$ часть расхода попадет на откос подсыпки.

4.27. Для случая $H < b_{pog(byl)}$ устанавливают, не выходит ли поток на откос подсыпки. Для этого делят расстояние

Т а б л и ц а 9

Грунты основания	δ для оснований		Грунты основания	δ для оснований	
	не защищенных обратным фильтром	защищенных обратным фильтром		не защищенных обратным фильтром	защищенных обратным фильтром
Листные	I2	8	Правовистые	7	4-3,5
Мелкопесчаные	9-10	6	Суглинистые	7-6	3,5-3
Средне- и крупно- песчаные	8	5-4	Галечниковые	6	3
Лессовидные	8-7	4-3,5	Торф	7-12	6-5

и на 4-й равных частей и в конце каждой из них (отсчитая от конца подсыпки) определяют глубину потока h , что уравнению (43) или (44), подставляя вместо h_0 расстояния от конца подсыпки (уравнение 44) и от узла в членом бьефе (уравнение 43) до рассматриваемых створов. Затем в каждом из сечений устанавливают течения подсыпки $\delta_{\text{под}}(x)$. При очертанном углом кросинга для этой цели можно воспользоваться формулой

$$\frac{\delta_{\text{под}}(x)}{\delta_{\text{под}}(0)} = \frac{H_{\text{под}}(x)}{H_{\text{под}}(0)} \quad (49)$$

при этом возможны два случая:

A. $\delta_{\text{под}}(x) \geq h$ — весь поток фильтрует через подсыпку (безнапорный или проникающий подсыпка);

B. $\delta_{\text{под}}(x) < h$ — часть потока выходит из поверхности откоса (напорная фильтрующая подсыпка).

Случай A ($\delta_{\text{под}}(x) \geq h$)

4.28. Находят расчетную глубину фильтрационного потока, определяющую максимальные скорости турбулентной фильтрации;

а) при отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа

$$h_p = 0,8 \quad h_k = 0,8 \sqrt[3]{\frac{\alpha U}{g p^2 \varepsilon^2 \delta^2}}, \quad (40)$$

где $\alpha \approx 2,5$ — коэффициент кинетической энергии;

p — пористость наброски;

$\varepsilon = 0,9$ — коэффициент, учитывающий образование в порах каменной наброски вспомогательной воды;

б) при наличии подтопления

$$h_p = h_{hd},$$

где h_{hd} — глубина в нижнем объеме в конце подошвы.

4.29. Определяют максимальную скорость турбулентной фильтрации

$$U_m = \frac{1.27}{h_p b_q} \frac{\partial}{\rho E}, \quad (51)$$

4.30. Сравнивают U_m с допускаемыми скоростями для грунтов основания насыпи v_c .

При $U_m < U_{cp}$ устойчивость основания от гидроударной фильтрации обеспечивается, в противном случае — нет.

Для достижения устойчивости делают вырезку грунта и заменяют его грунтом с $v_{cp} > v_c$. Толщина вырезки должна обеспечить возможность ухватки не менее трех слоев частиц грунта, но не менее 6-10 см.

4.31. Устраивают обратный фильтр у подошвы подсыпки высотой не менее h_p

Служебный ($\delta_{подж}$, h_t)

4.32. Устанавливают расстояние от конца подошвы до места выклинивания потока на откос:

$$\ell_{tr} = \frac{\alpha_{откос} \cdot \delta_{подж}}{(\eta_{откос} - \eta_{откос}) \cdot \theta_f K_f \sqrt{\frac{H}{C_n} + \frac{L}{\eta_{откос}}}} \quad (52)$$

4.33. Определяют толщину фильтрующей подсыпки, равную турбулентной фильтрационной потоки, в месте выклинивания потока на откос:

$$\delta_{tr} = \frac{\eta_{откос} - \eta_{откос}}{\eta_{откос} - \eta_{откос}} \ell_{tr} \quad (53)$$

4.34. Делают расстояние ℓ_{tr} на 3-4 равные части и в конце каждого зечения подсыпки (считая от конца ее) определяют фильтрационный расход:

$$\{U_{tr}\} = \frac{\alpha_{подж}}{\delta_{подж} \eta_{tr}} U, \quad (54)$$

где $\delta_{подж}$ — толщина подсыпки в рассматриваемом сечении;

U — полный расход створа.

4.35. Определяют средние скорости турбулентной фильтрации:

$$V_F = K_F \sqrt{\frac{H}{\xi_n} + \frac{1}{M_{\text{от(ков)}}}} \quad (55)$$

4.36. Определяют максимальную скорость турбулентной фильтрации:

$$V_M = \frac{1,7 V_F}{\rho \epsilon_3}. \quad (56)$$

4.37. Сравнивают V_M с допускаемыми скоростями для грунтов основания подсыпки,

При $V_M \leq V_{\text{доп}}$ устойчивость основания подсыпки от турбулентной фильтрации обеспечивается, в противном случае - нет.

Для обеспечения устойчивости требуется произвести вырезку грунта и заменить его грунтом с $V_{\text{доп}} > V_M$. Толщина вырезки должна быть не менее трех слоев частиц грунта, но не менее 8-10 см.

4.38. Устанавливают расход потока $Q_{2(u)}$, протекающего на откосе подсыпки в различных сечениях на участке от места выклинивания потока до конца подсыпки:

$$Q_{2(u)} = Q - Q_{1(u)}. \quad (57)$$

4.39. Определяют глубину потока на откосе подсыпки из уравнения Шёви при $C = \frac{1}{n}$ (как для быстроточного режима):

$$h_{\text{отк}(u)} = \left(\frac{Q_{2(u)}}{B_{\text{раст}}} \cdot \frac{n \sqrt{M_{\text{от(ков)}}}}{V_{\text{раст}}} \right)^{2/3}, \quad (58)$$

где $M_{\text{от(ков)}}$ - коэффициент заложения низового откоса подсыпки;

n - коэффициент шероховатости откоса.

При $n = 0,05$ (для камни)

$$h_{\text{отк}} = 0,135 \cdot M_{\text{от(ков)}}^{1/3} \left(- \frac{Q}{B_{\text{раст}}} \right)^{2/3} \quad (59)$$

4.40. Вычисляют скорость потока на откосе:

$$V_{\text{отк}(u)} = \frac{Q_{2(u)}}{h_{\text{отк}(u)} B_{\text{раст}}}. \quad (60)$$

4.41. Проверяют устойчивость камней наброски на откосе:

для однородной наброски

$$V_{\text{дан(отк)}} \leq 6,7 \sqrt{d_H}; \quad (61)$$

для горной массы

$$V_{\text{дан(отк)}} \leq 5 \sqrt{d_H}; \quad (62)$$

При несоблюдении этих условий крупность камня на поверхности откоса увеличивают (укладываются не менее трех слоев).

4.42. Назначают конструктивно обратный фильтр у подошвы откоса высотой 0,5 м и шириной понизу 1 м.

Последующий расчет является общим для случаев А и Б.

4.43. Назначают у подошвы откоса укрепление из каменной наброски, размеры которого определяют в соответствии с Рекомендациями, изложенными в гл.3, учитывая следующие особенности.

При определении глубины размыва по формуле (24) расход принимают равным расходу в ооружении $Q_{\text{сост}}$, длину укрепления - равной сумме длии откоса подсыпки, укрепления у ее подошвы и ширины бермы.

Ширину воронки размыва вычисляют по формуле

$$B'_{\text{раз}} = B_{\text{раз}} + 2 \Delta h_{\text{раз}}, \quad (63)$$

где $B_{\text{раз}}$ определяют по формуле (33), приемная длина укрепления равной сумме ширины бермы и длины укрепления у подошвы откоса.

Сравнивая $B'_{\text{раз}}$ с $B_{\text{раст}}$, устанавливают ширину укрепления по большей из них величине.

Сброс потока в лотки, уложенные на откосе насыпи

4.44. Определяют глубину и скорость потока на выходе из трубы по графикам (см. рис. 14 и 15).

4.45. Назначают вношу стенок лотка (считая от дна по оси его):

$$1 = h_{\text{вых}} + 0,35,$$

(44)

где 0,35 - величина возвышения стенок лотка над уровнем воды в нем.

4.46. Определяют проекцию расстояния от выхода из трубы до сечения падения струй в лотке:

$$x = \frac{U_{\text{вых}}^2}{g \cdot \mu_{\text{от}}} \sqrt{\frac{U_{\text{вых}}^2}{g \cdot \mu_{\text{от}}} + 2 h_{\text{вых}} \frac{U_{\text{вых}}^2}{g}}, \quad (65)$$

где $\mu_{\text{от}}$ - коэффициент зашемления низового откоса насыпи. Разность отметок дна в сечениях падения струй и выхода из трубы равна

$$S = \frac{x}{m_{\text{от}}}$$

4.47. Определяют потери энергии потока в сечении падения струй согласно "Руководству по гидравлическим расчетам в магистральных искусственных сооружениях"

$$l_0 = h_{\text{вых}} + \frac{1,1 \cdot U_{\text{вых}}^2}{2 g} \quad (66)$$

4.48. Находят подошвой из приведенного ниже уравнения глубину погружения в сечении падения струй, принимая ее равной сжатой глубине

$$T_0 = h_t + \frac{1,1 U^2}{2 g \psi^2 (\omega)_t} \quad (67)$$

где $(\omega)_t$ - площадь потока в сжатом сечении;

ψ - коэффициент скорости, определяемый по табл. 10.

Т а б л и ц а 10

$\frac{h}{D}$	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
ψ	0,75	0,80	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,93	0,94

Для этого задаваясь относительной сжатой глубиной $\frac{h}{D}$ определяют площадь живого сечения потока в лотке круглого очертания по формуле, справедливой при $0,15 < \frac{h}{D} < 0,7$

$$\omega = D^2 \left(-\frac{h}{D} \right)^{4/3} \quad (68)$$

4.4^o. Устанавливают глубину потока в конце лотка у подошвы откоса из уравнения неизмеримого движения (метод В.И.Черномского)

$$\ell = \frac{h_{ng} + \frac{\ell Q^2}{24} \left(\frac{1}{\omega_c^2} - \frac{1}{\omega_t^2} \right) - h_c}{\frac{1}{\omega_c} - \frac{1}{\omega_t}} \quad (69)$$

где ℓ — расстояние между сечениями со скатой глубиной h_c и у подошвы откоса h_{ng} имеющим соответствие площади живого сечения потока ω_c и

$$\ell_f = \left(\frac{Q}{K_{cp}} \right)^2 - \text{средний угол трения между сечениями};$$

$$K_{cp} = \omega_{cp} C_{cp} \sqrt{R_{cp}},$$

$\omega_{cp}, C_{cp}, R_{cp}$ соответственно средние для участка площадь сечения потока, коэффициент Шеви и гидравлический радиус; их можно определить как полусуммы соответствующих величин в рассматриваемых сечениях.

Коэффициент Шеви для быстроточного режима (имеет место в лотке) определяют по формуле

$$C = \frac{1}{n} \quad (70)$$

При $n = 0,025$ (для гофрированных элементов трубопроводов лотком) $C = 40$.

Гидравлический радиус R определяют по формуле, справедливой при $0,05 \leq \frac{h}{d} \leq 0,50$:

$$R = 0,5 D \left(\frac{h}{D} \right)^{8/9} \quad (71)$$

Расчет ведут следующим образом:

а) Задается глубиной у подошвы откоса h_{ng} и вычисляют относительную глубину $\frac{h_{ng}}{D}$. Для неё находят по формулам (68), (70) и (71) ω_{ng}, C, H_{ng} .

Затем по значению $\frac{h_c}{D}$ находят ω_c, C, R_c

б) Вычисляют $\omega_{cp} = \frac{\omega_c + \omega_{ng}}{2}$ и $R_{cp} = \frac{R_c + R_{ng}}{2}$

в) Вычисляют $K_{cp} = \omega_{cp} C \sqrt{R_{cp}}$ и $\ell_f = \left(\frac{Q}{K_{cp}} \right)^2$

г) По формуле (69) определяют расстояние ℓ между сечениями с глубинами h_c и h_{ng}

д) Сравнивают полученные расстояние ℓ с расстоянием от симметрического сечения до подошвы откоса (считая по откосу) ℓ_{c-n_g} определяемым по формуле

$$\ell_{c-n_g} = (P - S) \sqrt{t + m_{or}^2}, \quad (72)$$

где P — разность отметок дотка в месте падения струй и у подошвы откоса.

е) Если $\ell \neq \ell_{c-n_g}$, то h_{ng} изменяют до тех пор, пока $\ell = \ell_{c-n_g}$. Полученное при этом значение h_{ng} будет искомым.

4.50. Вычисляют относительную глубину у подошвы откоса $\frac{h_{ng}}{P}$ и по ее значению площадь поперечного сечения потока в конце дотка (у подошвы откоса) по формуле (68).

Приближенно при $0,05 \leq \frac{h}{P} \leq 0,5$ можно принять глубину потока в дотке у подошвы откоса равной нормальной глубине и определять ее по формуле

$$h_{ng} = h_o = 1,12 \sqrt{0,1 P} \sqrt{\frac{m_{or}}{P}} \quad (73)$$

Затем по $\frac{h_{ng}}{P}$ находят согласно формуле (68) площадь поперечного сечения потока $A_{T_{ng}}$. Скорость на выходе из дотка в этом случае будет несколько завышенной.

4.51. Вычисляют скорость потока на выходе из дотка (у подошвы откоса)

$$V_{ng} = \frac{Q}{A_{T_{ng}}} \quad (74)$$

4.52. Подоидают по скорости V_{ng} тип укрепления у подошвы откосов. Далее этого находят тип укрепления, для которого соблюдается условие $V_{ng} \leq V_{\text{дел}}$

4.53. В соответствии с изложенным выше рекомендациями определяют глубину размыва и размеры укреплений в зависимости от принятых типов укреплений учитывая следующие особенности.

1. В формуле (24) для определения предельной глубины принимают:

$\beta = D$;
 $\beta_p = D_l$, где D_l - диаметр круговых элементов лотка;
 D_3 , d_k - находят по диаметру трубы;
 $L > 3D$ - соответствует длине укрепления у подошвы откоса.

В формулу (24) вводят коэффициент K_{np} , учитывающий неравномерность распределения удельных расходов в лотке, определяемый по формуле, справедливой при $P_c \leq 0,6$,

$P_{ot} \geq 1,5$:

$$K_{np} = \frac{1,3}{\sqrt{P_a P_{ot}}} , \quad (75)$$

где $P_a = \frac{Q}{D^2 \sqrt{g D}}$ - параметр расхода в трубе диаметра D

2. При применении ребра в конце укрепления длиной $4,6 D$ и сечением $0,1D \times 0,1D$, расположенного симметрично относительно оси лотка, в выражение для определения предельной глубины размыва¹ вводят коэффициент K_{rb} , учитывающий пониженную кинетичность потока в конце лотка:

$$K_{rb} = \frac{0,8}{\frac{V_{byp(l)}}{\sqrt{g D_l}}} , \quad (76)$$

где $V_{byp(l)}$ - скорость на выходе из лотка.

Формула (70) справедлива при условии

$$0,8 \leq \frac{V_{byp(l)}}{\sqrt{g D_l}} \leq 2,0 .$$

Формула для определения предельной глубины размыва в выходных руслах с ребром приобретает вид

$$\Delta h_{nprpb} = 0,6 D_3 \left(\frac{D}{d_k} \right)^{0,4} K_{rb} \left[\frac{D_3^2}{\left(\frac{L}{D} + 1 \right) D_l} \right]^{0,2} . \quad (77)$$

При $\frac{D}{d_k} \gg 1$ принимают $\frac{D}{d_k} = 1$.

¹ См. "Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений", стр. 18.

3. максимальную глубину размыва определяют по формулам:

в выходных руслах без гасителя

$$\Delta h'_{max} = 0,6 \Delta h_{pr} K_{hp}; \quad (78)$$

выходных руслах с ребром

$$\Delta h'_{max} = 0,6 \Delta h_{pr(\rho\delta)} K_{p\rho\delta} \quad (79)$$

4. Ширину укрепления в конце его вычисляют по формуле (33), в которую подставляют Δh_{max} , т.е. коэффициенты K_{hp} и $K_{p\rho\delta}$ не учитываются.

Приложение

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Примеры назначения отверстий и определения пропускной способности круглых гофрированных труб

Пример I. Гофрированная труба без оголовков (с вертикальным срезом) расположена на железной дороге. Высота насыпи $H_{нас} = 3,5$ м, ширина поверху $\theta_{нас} = 6,5$ м, крутизна откосов 1:1,5. Уклон лотка трубы соответствует уклону лога и равен $i_t = 0,03$. Гладкий лоток разположен на 1/3 периметра поперечного сечения трубы.

Расходы притока с бассейна $Q_p = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}, Q_{max} = 4,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сток снеговой - аккумуляция не учитывается.

Требуется подобрать отверстие трубы и определить подпёртые глубины, а также глубины и склоны на выходе из неё.

Решение. I. Определяем длину трубы $\ell_t = 6,5 + 3 \times 3,5 = 17$ м.

2. Находим отверстие трубы.

Согласно "Инструкции по проектированию и строительству металлических гофрированных водопропускных труб" (ВСН 176-78) гофрированные трубы на железных дорогах должны пропускать расчетные и наибольшие расходы при безнапорном режиме и иметь при этом заполнение на входе при пропуске расчетного расхода $(\frac{h_{ax}}{d})_p \leq 0,75$, при пропуске наибольшего расхода $(\frac{h_{ax}}{d})_{max} \leq 0,9$.

По графику рис. 5 настоящих Методических рекомендаций находим для трубы без оголовка с вертикальным срезом (кривая 2) параметры расхода, соответствующие указанным выше заполнениям:

$$\text{при } (\frac{h_{ax}}{d})_p = 0,75 \quad \Pi_{Q(p)} = \frac{Q_p}{D^2 \sqrt{g \cdot D}} = 0,265;$$

$$\text{при } (\frac{h_{ax}}{d})_{max} = 0,90 \quad \Pi_{Q(max)} = \frac{Q_{max}}{D^2 \sqrt{g \cdot D}} = 0,347.$$

Зная параметры расхода, находим по заданным расходам минимальные диаметры трубы по формуле

$$D = \left(\frac{Q_p}{\pi a \sqrt{g}} \right)^{2/3}$$

$$\text{При } Q_p = 2,4 \text{ м}^3/\text{с} \quad D_p = \left(\frac{2,4}{0,265 \sqrt{9,81}} \right)^{2/3} = 1,53$$

$$\text{При } Q_{max} = 4,0 \text{ м}^3/\text{с} \quad D_{max} = \left(\frac{4,0}{0,347 \sqrt{9,81}} \right)^{2/3} = 1,67 \text{ м.}$$

Принимаем к расчету ближайшее большее типовое отверстие $D = 2,0 \text{ м.}$

3. Устанавливаем, будет ли труба "длинной" или "короткой" в гидравлическом отношении.

Сравниваем уклон трубы i_T с критическим i_K .

Находим i_K по графику (см.рис.2) для трубы $D=2,0 \text{ м.}$:

при $Q_p / \Pi_{ap} = 0,265 \quad i_K = 0,015 < i_T = 0,03$;

при $Q_{max} / \Pi_{ap} = 0,347 \quad i_K = 0,046 < i_T = 0,03$.

Следовательно, труба "короткая".

Проверка по критерию относительной длины трубы не требуется.

4. Определяем подпорные глубины перед трубой по формуле (8) для безнапорного режима

$$H = \left(\frac{a}{mb_K \sqrt{2g}} \right)^{2/3}$$

Предварительно находим коэффициент расхода для трубы без оголовка по табл. I ($\eta_1 = 0,33$) и b_K по табл.2 настоящих Методических рекомендаций.

для расчетного расхода $Q_p = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}$

$$\Pi_{ap} = \frac{2,4}{2,0^2 \sqrt{9,81} \cdot 2} = 0,135; \quad b_{K(p)} = 1,40 \text{ м}, \quad H_p = \left(\frac{2,4}{0,33 \cdot 1,4 \sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{2/3} =$$

= 1,11 м

для наибольшего расхода $Q_{max} = 4,0 \text{ м}^3/\text{с}$

$$\Pi_{Gmax} = \frac{4,0}{2^2 \sqrt{9,81} \cdot 2} = 0,23; \quad b_{K(max)} = 1,56 \text{ м};$$

$$H_{max} = \left(\frac{4,0}{0,33 \cdot 1,56 \sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{2/3} = 1,46 \text{ м.}$$

5. Находим возвышение бровки полотна над подпорным уровнем $\Delta_{\text{бп}}$

При высоте насыпи $H_{\text{нас}} = 3,5 \text{ м}$

$$\Delta_{\text{бп}} = 3,5 - 1,11 = 2,39 \text{ м} > 1,0,$$

$$\Delta_{\text{бп}} = 3,5 - 1,46 = 2,04 \text{ м} > 1,0 \text{ м.}$$

Требования технических условий выполнены.

6. Определяем глубины и скорости на выходе из трубы соответственно по графикам рис. 14 и 15 при $C_T = 0,03$.

При $Q_p = 2,4 \text{ м}^3/\text{с}$ $\Pi_{2p} = 0,135$; $\left(\frac{h_{\text{вых}}}{D}\right)_p = 0,21$;

$$h_{\text{вых}(p)} = 0,21 \cdot 2 = 0,42 \text{ м}; \quad \frac{V_{\text{вых}(p)}}{\sqrt{gD}} = 1,04; \quad V_{\text{вых}(p)} = 1,04\sqrt{9,81} \cdot 2 = 4,6 \text{ м/с.}$$

При $Q_{\text{макс}} = 4,0 \text{ м}^3/\text{с}$ $\Pi_{\text{макс}} = 0,23$; $\left(\frac{h_{\text{вых}}}{D}\right)_{\text{макс}} = 0,335$;

$$h_{\text{вых(макс)}} = 0,335 \cdot 2 = 0,67 \text{ м.}$$

$$\frac{V_{\text{вых(макс)}}}{\sqrt{gD}} = 1,14; \quad V_{\text{вых(макс)}} = 1,14\sqrt{9,81} \cdot 2 = 6,06 \text{ м/с.}$$

Пример 2. Гофрированная труба расположена на автомобильной дороге. Гладкий лоток расположен на $1/3$ периметра поперечного сечения трубы. Высота насыпи 4,0 м, ширина поверху $b_{\text{нас}} = 12 \text{ м}$, крутизна откосов 1:1,5, уклон лотка грубы $C_T = 0,02$. Расчетный расход притока с бассейна $Q_p = 5,0 \text{ м}^3/\text{с}$, сток снеговой - аккумуляции не учитывается.

Требуется подобрать отверстие трубы и определить подпорные глубины, а также глубины и скорости на выходе из нее.

Решение I. Определяем длину трубы ℓ , $12,3 \times 4 = 24 \text{ м}$.

2. Задаемся минимально принятым в практике проектирования отверстием гофрированной трубы $D = 1,5 \text{ м}$,

3. Устанавливаем, будет ли труба "длинной" или "короткой" в гидравлическом отношении.

а) Сравниваем уклон трубы ℓ_t с критическим ℓ_K . Предварительно определяем параметр расхода по nomogramme (см.рис.6). При $Q = 8,0 \text{ м}^3/\text{s}$ он равен $\Pi_Q = 0,94$.

По графику рис. 2 для $D = 1,5 \text{ м}$ и $\Pi_Q = 0,94$ находим $\ell_K = 0,0475$. Таким образом, $\ell_t = 0,02 < \ell_K = 0,0475$.

Требуется проверка по критерию относительной длины.

б) Производим проверку по критерию относительной длины: $\frac{\ell_t}{D} = \frac{24}{1,5} = 16 < 20$. Следовательно, труба "короткая".

4. Определяем подпорные глубины перед трубой согласно рекомендациям гл.2.

а) Устанавливаем режим протекания потока. Для этого определяем вначале относительную глубину на входе в трубу $\frac{h_{bx}}{D}$ по графику (см.рис.5). Для трубы без оголовка (кривая 2) при $\Pi_Q = 0,94 < 1,35$ находят $\frac{h_{bx}}{D} > 1$. Следовательно, в трубе возможны полунапорный или частично-напорный режимы.

Для установления режима протекания в этом случае определяем подпорную глубину перед трубой H при полунапорном режиме по формуле (10) для "коротких" труб

$$H = \frac{Q^2}{2g M_n^2 \cos^2 \phi_{\text{коор}}} + \varepsilon_n D .$$

Предварительно находим коэффициент расхода M_n и коэффициент сжатия ε_n в определяющем сечении при полунапорном режиме по табл. 3: $M_n = 0,56$ и $\varepsilon_n = 0,63$.

$$H_p = \frac{g^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,56^2 \cdot 1,77^2} + 0,63 \cdot 1,5 = 4,28 \text{ м.}$$

Следовательно, относительная подпорная глубина

$$\frac{H}{D} = \frac{4,28}{1,5} = 2,85.$$

Затем находим относительную граничную подпорную глубину потока $\frac{H_r}{D}$ по формуле (5)

$$\frac{H_r}{D} = K_d \left(\frac{H_r}{D} \right)^l$$

для этого определяем коэффициент K_f по графику (см.рис.8) при $\delta = 0,67$:

$$K_f = 1,26.$$

Далее находим относительную граничную подпertiaю глубину для труб из гладких лотков по графику (см.рис. 7) в зависимости от относительной длины трубы $\frac{\ell_x}{D} = 16$ и ее уклона $C_T = 0,02$

$$\left(\frac{H_r}{D}\right)^1 = 1,48 .$$

$$\text{Откуда } \frac{H_r}{D} = 1,26 \cdot 1,48 = 1,86 .$$

Сравнивая относительную подпertiaю глубину $\frac{H_r}{D}$ с $\frac{H_r}{D}$, устанавливаем режим протекания $\frac{H}{D} = 2,85 > \frac{H_r}{D} = 1,86$. Режим частично-напорный так как $\Pi_A = 0,94 < 1,35$.

б) Находим подпertiaю глубину при частично-напорном режиме из формулы (II).

Так как $\frac{\ell_x}{D} = 16 < 20$, то изменять длину не требуется и в расчет вводится полная длина ее ℓ_T .

Расчет начинаем с определения по графику (см.рис.9) при $C_T = 24$ и $M_H = 0,60$ и по графику (см.рис.10) при $\Pi_A = 0,94$ $\eta_H = 0,75$.

Подпertiaя глубина

$$\begin{aligned} H &= 2g \frac{Q^2}{M_H^2 \alpha_{\text{коэф}}^2} - C_T \ell_T + \eta_H D = \\ &= \frac{8,0^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,60^2 \cdot 1,77^2} - 0,02 \cdot 24 + 0,75 \cdot 1,5 = 2,92 - 0,48 + 1,12 = \\ &= 3,56 \text{ м.} \end{aligned}$$

5. Определяем воавышение бровки полотна над подпertiaем уровнем.

При высоте насыпи $H_{H,c} = 4,0 \text{ м } \Delta_{BH} = 4,0 - 3,56 = 0,44 < 0,5 \text{ м.}$

Требования Технических условий не выдерживаются.

Увеличиваем отверстие трубы до $D = 2,0 \text{ м}$ и повторим расчеты начиная с п.3.

6. Устанавливаем, будет ли труба "длинной" или "короткой" в гидравлическом отношении.

а) Сравниваем уклон трубы C_T с критическим C_k .

Предварительно определим параметр расхода по nomogramme (см.рис.6).

При $A = 8,0 \text{ м}^2/\text{с}$ имеем $\Pi_A = 0,45$.

По графику рис.2 для $D = 2,0 \text{ м}$ и $\Pi_A = 0,45$ находим $\zeta_K = 0,0175$.

Таким образом, $\zeta_T = 0,02 > \zeta_K = 0,0175$ — труба "короткая".

Проверка по критерию относительной длины не требуется.

7. Определяем подпорные глубины перед трубой согласно требованиям гл.2.

Устанавливаем режим протекания потока.

Для этого определяем вначале относительную глубину на входе в трубу $\frac{h_{in}}{D}$ по графику (см.рис.5).

Для трубы без оголовка (кривая 2) при $\Pi_A = 0,45 < 1,35$ находим $\frac{h_{in}}{D} > 1$ — в трубе возможны полуизапорный или частично-изапорный режимы.

Для установления режима протекания определяем подпорную глубину перед трубой H . При полуизапорном режиме из формулы (10) при тех же коэффициентах M_n и ξ_n , что и при расчете трубы $D = 1,5 \text{ м}$,

$$H = \frac{8^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,56^2 \cdot 3,14^2} + 0,63 \cdot 2 = 2,31 \text{ м.}$$

Следовательно, относительная подпорная глубина

$$\frac{H}{D} = \frac{2,31}{2} = 1,16.$$

Затем находим относительную граничную подпорную глубину потока по формуле (5) при $\delta = 0,67$ и $K_\delta = 1,26$.

Для этого сначала находим относительную граничную подпорную глубину для труб без гладких лотков по графику (см. рис.7) в зависимости от относительной длины трубы

$$\frac{\zeta_T}{D} = 12 \text{ и ее уклона } \zeta_T = 0,02 \text{ (2%)}$$

$$\left(\frac{H_r}{D}\right)' = 1,42.$$

$$\text{Откуда } \frac{H_r}{D} = 1,26 \cdot 1,42 = 1,79.$$

Сравнивая относительную подпорную глубину $\frac{H}{D}$ с величиной $\frac{H_r}{D}$, устанавливаем режим протекания

$$\frac{H}{D} = 1,16 \quad \frac{H_f}{D} = 1,79 - \text{режим полунапорный.}$$

Принимаем к расчету $H = 2,31$ м.

8. Определяем возвышение бровки над подножным уровнем. При высоте насыпи $H_{нас} = 4,0$ м $\Delta_{бп} = 4,00 - 2,31 = 1,69 > 1,0$ м. Следовательно, требования технических условий выдержаны.

9. Определяем глубины и скорости на выходе из трубы соответственно по графикам (см. рис. I4 и I5) при $\tau = 0,02$.

При $Q = 8,0 \text{ м}^3/\text{с}$ $\Pi_Q = 0,45$;

$$\frac{h_{вых}}{D} = 0,49; \quad h_{вых} = 0,49 \cdot 2 = 0,98 \text{ м};$$

$$\frac{v_{вых}}{D} = 1,24; \quad v_{вых} = 1,24 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 2,0} = 5,49 \text{ м/с.}$$

При мер 3. Двухъярусная гофрированная труба без оголовков с гладкими лотками на 1/3 ширины поперечного сечения расположена на железной дороге

Первый ярус состоит из трех труб $D = 2,0$ м, второй — из двух труб $D = 1,5$ м. Сток снеговой. Расходы притока с бассейна: $Q_p = 40 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{пак} = 55,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Высота насыпи 10 м, ширина поверхку $\ell_{нас} = 6,5$ м.

Уклоны труб $\ell_1 = 0,01$. Остальные данные приведены на рис. Г приложения.

Требуется определить подножный уровень перед двухъярусной трубой, скорости на выходе и подобрать тип укрепления.

Решение. Так как сток снеговой, то аккумуляцию воды перед сооружением не учитываем и принимаем расходы притока в качестве расходов в сооружении. Расчет ведем согласно рекомендациям гл. 2.

Предварительно определяем длину труб обоих ярусов: длина труб первого яруса $\ell_{1(1)} = 6,5 + 3 \cdot 10 = 36,5$ м, второго яруса $\ell_{1(2)} = 0,5 + 3 \cdot 7,5 = 29$ м.

Далее устанавливаем, работают ли трубы второго яруса. Для этого определяем расход, пропускаемый трубами первого яруса при уровне, соответствующем отметке лотка на входе в трубы второго яруса.

Согласно данным, приведенным на рис. Г, подножная глубина перед трубами первого яруса в том случае будет равна разности отметок лотков второго ($\ell_{\Lambda(2)}$) и первого ярусов ($\ell_{\Lambda(1)}$):

70

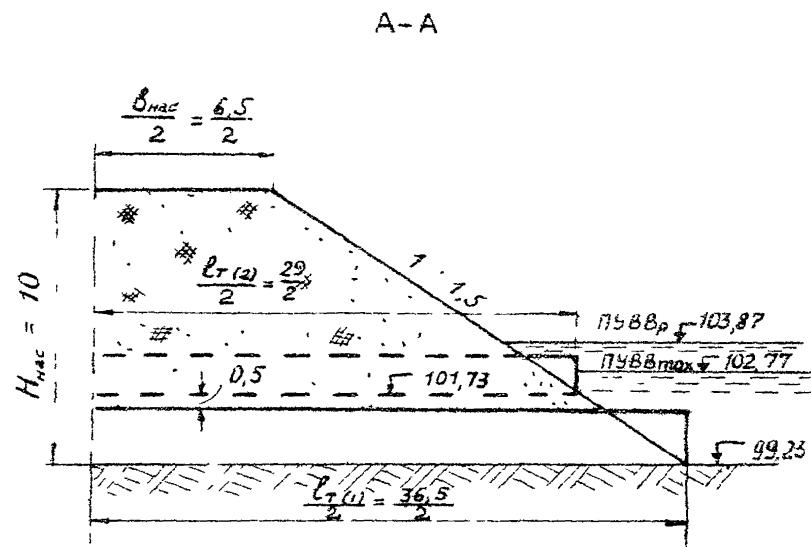
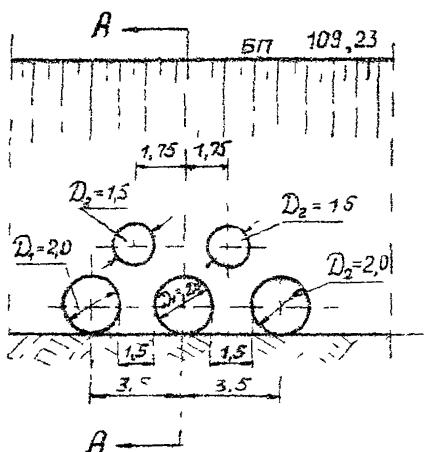


Рис.1. Схема многоярусной трубы (размеры в метрах)

$$H_t = E_{A(2)} - E_{A(1)} = 101,73 - 99,23 = 2,5 \text{ м.}$$

Определяем расход, пропускаемый трубами первого яруса при $H_t = 2,5 \text{ м}$, предполагая полунапорный режим протекания.

По формуле (10) находим

$$Q = n_r M_n c_{\text{кор}} \sqrt{2g} (1 - \varepsilon_{\text{кор}} D),$$

где n_r — число труб в ярусе; в первом ярусе $n_r = 3$.

коэффициенты M_n и $c_{\text{кор}}$ берем по табл. 3 настоящих

методических рекомендаций для трубы без отводов с вертикальным срезом ($M_n = 0,56$ и $c_{\text{кор}} = 0,63$).

$$Q = 3 \cdot 0,56 \cdot \frac{3 \cdot 14 \cdot 2^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 (2,5 - 0,63 \cdot 2)} = 26,0 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Полученный расход меньше расчетного и наибольшего расходов трубы. Следовательно, работают трубы обоих ярусов.

Дальнейший расчет выполняем в табличной форме (табл. I). Сущность расчета заключается в следующем. Задаемся расходами второго яруса и по ним находим расходы первого яруса и всей трубы. Затем строим зависимость $H = f(Q)$ и по заданным Q_p и $A_{\text{труб}}$ находим соответствующие им H_p и

$H_{\text{труб}}$.

Таблица I

№/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго яруса Q м/с		
		1,0	3,0	5,0
Второй ярус				
1	Диаметр трубы D_2 , м	1,5	1,5	1,5
2	Параметр расхода $\Pi_{Q(2)}$ $\frac{Q_2}{D_2^2 \sqrt{g} D_2}$	0,115	0,345	0,578
3	Уклон трубы i_r	0,01	0,01	0,01
4	Критический уклон i_k по графику (см. рис. 2)	0,016	0,018	0,024
5	Длина трубы l , м	29	29	29
6	Относительная длина трубы $\frac{l}{D^2}$	19,3	19,3	19,3

Продолжение табл. I

№ п/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго яруса		
		Q ₁ , м ³ /с	Q ₃ , м ³ /с	Q ₅ , м ³ /с
7	Труба "короткая" или "длинная"	"Короткая", так как $\frac{L_{\text{рас}}}{D_2} = 19,3 < 20$	"Короткая"	"Короткая"
8	Относительная глубина на входе в трубу $\frac{h_{\text{рас}}}{D_2}$ (см. рис. 5)	0,43	0,87	I
9	Режим протекания	Безнапорный	Безнапорный	Полунапорный или частично-напорный
10	Подпертая глубина $H_2(б)$ при безнапорном режиме - формула (8)	0,76	I,42	-
II	Подпертая глубина $H_2(п)$ при полунапорном режиме - формула (10)	-	-	2,23
12	Относительная подпертая глубина при полунапорном режиме $\frac{H_{2(п)}}{D_2}$	-	-	I,56
13	Граничная подпертая глубина для гофрированных труб без гладкого лотка ($\frac{H_2}{D}$)' - см. рис. 7	-	-	I,26
14	Коэффициент K_d , учитывающий влияние гладких лотков, - см. рис. 8	-	-	I,20
15	Граничная подпертая глубина для труб с гладкими лотками $\frac{H_2}{D_2} = K_d \left(\frac{H_2}{D} \right)'$	-	-	I,48
16	Режим протекания	Безнапорный	Безнапорный	$\frac{H_2}{D_2} = I,56 >$ $\frac{H_2}{D} = I,48$ $n_a = 0,578 < 1,35$ частично-напорный
72				

Продолжение табл. I

№/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго яруса Q , м ³ /с		
		1,0	3,0	5,0
17	Длина концевого участка трубы, на котором имеется отрыв потока от верха трубы ℓ_o , м - см. рис. II	-	-	6
18	Расчетная длина трубы, м $\ell'_t = \ell_t - \ell_o$	-	-	23
19	Коэффициент расхода при из- порном или частично-изпор- ном режимах - см. рис. 9	-	-	0,60
20	$i_t \ell_t$	-	-	0,23
21	Коэффициент η_h - см. рис. 10	-	-	0,97
22	Подпертая глубина при частич- но-изпорном режиме $H_2(\text{чн})$, м, - формула (II)	-	-	2,36
	Относительная подпертая глубина $\frac{H_2(\text{чн})}{D_2}$	-	-	$I,57 > \frac{H_c}{D_2} = I,48 > 1,4$ Подпертая глубина сох- раниется
23	Отметка лотка на входе в трубу 101,73	101,73	101,73	
24	Отметка подпертого уровня ПУВВ, \mathcal{Z}_2	102,49	103,15	104,09
	Трубы первого яруса			
25	Отметка лотка на входе в трубу $\mathcal{Z}_{L(1),M}$	99,23	99,23	99,23
26	Подпертая глубина $H_1 = \mathcal{Z}_2 - \mathcal{Z}_{L(1),M}$, м	33,26	3,92	4,86
27	Относительная подпертая глубина $\frac{H_1}{D_1}$	1,63	1,96	2,43
28	Длина трубы $\ell_{T(1)}$, м	36,5	36,5	36,5
29	Относительная длина трубы $\frac{\ell_{T(1)}}{D_1}$	18,25	18,25	18,25
30	$\left(\frac{H_c}{D}\right)^l$ - см. рис. 7	1,26	1,26	1,26

Продолжение табл. I

№ п/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго прусса Q , м ³ /с		
		1,0	3,0	5,0
31	K_d - см. рис. 3	1,2	1,2	1,2
32	$\frac{H_f}{D} = \left(\frac{H_f}{B_1} \right) K_d$	1,51	1,51	1,51
33	Режим протекания	1,63 > 1,51 частично напорный	1,96 > 1,51 частично-напорный	2,43 > 1,51 частично-напорный
34	$M_{H(1)}$ - см. рис. 9	0,59	0,59	0,59
35	ℓ_t, ℓ_r	0,36	0,36	0,36
36	$Q_{(1)} -$ формула (II) при $\eta_{(1)} = 0,75$	12	13,7	15,5
37	$\Pi_{Q(1)} = \frac{Q_1}{D^2 \sqrt{g D}}$	0,68	0,78	0,88
38	$\ell_{o(1)} -$ см. рис. II при $\Pi_{Q(1)}$	4,2	2,5	1,2
39	Расчетная длина трубы $\ell'_r = \ell_r - \ell_{o(1)}$	32,3	34	35,3
40	$M_{H(2)} -$ см. рис. 9 в функции ℓ'_r	0,60	0,60	0,59
41	$\eta_{(1,2)} -$ см. рис. IO при $\Pi_{Q(1)}$	0,92	0,85	0,79
42	ℓ_t, ℓ_r	0,32	0,34	0,35
43	$Q_{(2)} -$ формула (II) при $\eta_{(1,2)}$ и $M_{H(2)}$	11	13,2	15,3
44	Отклонение $\frac{\Omega_{(1,2)} - \Omega_{(1)}}{\Omega_{(1,2)}} \cdot 100\%$	8,3 > 3	1,5 < 3	1,3 < 3
45	$\Pi_{Q(2)} = \frac{Q_{(1,2)}}{D^2 \sqrt{g D}}$	0,62	-	-
46	$\ell_{o(2)} -$ см. рис. II при $\Pi_{Q(2)}$	6,5	-	-
47	$\ell'_{r(2)} = \ell_r - \ell_{o(2)}$	30	-	-
48	$M_{H(3)} -$ см. рис. 9	0,61	-	-
49	$\eta_{(1,3)} -$ см. рис. IO при $\Pi_{Q(2)}$	0,97	-	-
50	$\ell_t, \ell'_{r(2)}$	0,30	-	-
51	$\Omega_{(2)} -$ формула (II) при $M_{H(3)}$	10,3	-	-
52	Отклонение $\frac{\Omega_{(2)} - \Omega_{(1,2)}}{\Omega_{(1,2)}} \cdot 100\%$	1,3 < 3	-	-

Продолжение табл. I

№ п/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго яруса G , м ³ /с		
		1,0	3,0	5,0
53	Принятые расходы каждой трубы первого яруса	II	13,7	15,5
54	Расход всех труб первого яруса ΣQ_1 м ³ /с	33	41,1	46,5
55	Расход всех труб второго яруса ΣQ_2 м ³ /с	2	6	10
56	Расход многоярусной трубы, м ³ /с	35	47,1	56,5

Для существенного ускорения расчета многоярусных труб, состоящих из гофрированных труб $D = 1,5$ и $D = 2,0$ м, можно пользоваться графиками рис. I2 и I3.

Порядок расчета следующий.

Определяют по графикам (см.рис.I2 и I3) расход многоярусной трубы при подпертой глубине, соответствующей отметке лотка трубы второго яруса.

При $H = 2,50$ м (см.рис. I приложения) находим по графику (см.рис. I3) для $D_1 = 2,0$ м $Q_1 = 8,7$ м³/с и $\Sigma Q_1 = 3 \cdot 8,7 = 26,1$ м/с. Этот расход меньше $Q_p = 40$ м/с и $Q_{max} = 55$ м³/с. Следовательно, трубы второго яруса работают.

Далее расчет аналогичен приведенному выше и отличается от него тем, что выполняется полностью по графикам. Расчет производят в табличной форме (табл.2).

Разница в расходах, определяемых по графикам и формулам, получается небольшая (не более 3%).

Искомые подпертые глубины (уровни) определяем путем построения зависимости $Q = f(H)$ для многоярусной трубы (рис.2 приложения).

На рис.2 для $Q_p = 40,0$ м/с находим $H_p = 3,54$ м и $HWB_p = 99,23 + 3,54 = 102,77$ м.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Элементы расчета	Расходы каждой трубы второго яруса Q , м ³ /с		
		1,0	3,0	5,0
Второй ярус				
I	Диаметр трубы D_2 , м	1,5	1,5	1,5
2	Длина трубы $\ell_{T(2)}$, м	29,0	29,0	29,0
3	H_2 , м — см. рис. I2	0,76	1,42	2,33
4	Отметка лотка на входе в трубу второго яруса $Z_{2,11}$	101,73	101,73	101,73
5	Отметка подпорного уровня ПУВВ = $Z_{2,11} + H_2$, м	102,49	103,15	104,06
первый ярус				
6	Отметка лотка на входе в трубу	99,23	99,23	99,23
7	Подпорная глубина H_1 = ПУВВ — $- Z_{2,11}$	3,26	3,92	4,83
d	Расход Q_1 — см. рис. I2	II,1	I3,3	I5,7
	Расход всех труб первого яруса $\Sigma Q_1 = 3 Q_1$	33,3	39,9	47,1
10	Расход всех труб второго яруса $\Sigma Q_2 = 2 Q_2$	2,0	6,0	10,0
11	Расход двухъярусной трубы $Q = \Sigma Q = 3 Q_1 + 2 Q_2$	35,3	45,9	57,1
12	Разница в расходах при расчете по графикам по сравнению с рас- четом по формуле $\frac{Q_{граф} - Q_{форм}}{Q_{форм}} \%$	0,8	2,6	1,0

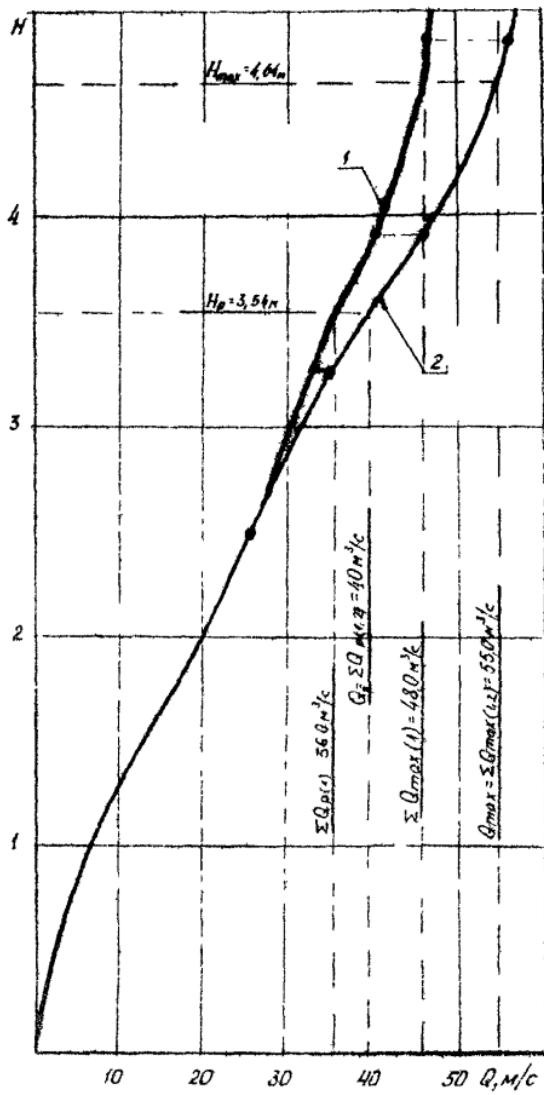


Рис.2. Графическое определение пропускной способности многогрунтовой трубы:

1 - $\Sigma Q_i = f(H)$, трубы первого яруса; 2 - $\Sigma Q = f(H)$, многоярусная труба

для $Q_{\text{рас}} = 55,0 \text{ м}^3/\text{с}$ $H_{\text{рас}} = 4,64 \text{ м}$ и $\Delta H_{\text{рас}} = 99,23 + 4,64 = 103,87 \text{ м}$.

Определяем скорости потока на выходе из труб первого яруса, по которым устанавливаем тип укрепления на выходе.

Предварительно находим по графику (см. рис. 2 приложения) расходы труб первого яруса при установленных подпорных глубинах

$$\sum Q_{\text{рас}} = 36,0 \text{ м}^3/\text{с}; \sum Q_{\text{рас,н}} = 45,5 \text{ м}/\text{с}.$$

Затем по графику (см. рис. 15) определяем:

$$\text{при } \Pi_{\text{рас}} = \frac{\sum Q_{\text{рас}}}{\pi r^2 D^2 \sqrt{gH}} = \frac{36}{3,22^2 \sqrt{9,81 \cdot 2}} = 0,68 \text{ и } l_t = 0,01$$

$$\frac{V_{\text{выход,рас}}}{\sqrt{gD}} = 1,29 \text{ и } V_{\text{выход,рас}} = 1,29 \sqrt{9,81 \cdot 2} = 5,7 \text{ м}/\text{с};$$

$$\text{при } \Pi_{\text{рас,н}} = \frac{\sum Q_{\text{рас,н}}}{\pi r^2 D^2 \sqrt{gH}} = \frac{45,5}{3,22^2 \sqrt{9,81 \cdot 2}} = 0,86$$

$$\frac{V_{\text{выход,рас}}}{\sqrt{gD}} = 1,40 \text{ и } V_{\text{выход,рас}} = 1,40 \sqrt{9,81 \cdot 2} = 6,15 \text{ м}/\text{с}.$$

Согласно Техническим условиям допускаемые скорости при пропуске $Q_{\text{рас}}$ увеличивают на 35% или фактические скорости уменьшают на эту же величину.

Поэтому $V'_{\text{выход,рас}} = 6,15 : 1,35 = 4,58 \text{ м}/\text{с}$.

Принимаем и расчету $V_{\text{выход,рас}} = 5,7 \text{ м}/\text{с} > V'_{\text{выход,рас}} = 4,58 \text{ м}/\text{с}$.

По скорости $V_{\text{выход,рас}} = 5,7 \text{ м}/\text{с}$ подбираем по табл. II-6 "Руководства по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" тип укрепления - монолитное укрепление из бетона марки 140.

Примеры расчета нижних бьефов труб

Приимер I. Гофрированная труба без оголовков с гладким лотком на 1/3 периметра поперечного сечения $D = 1,5 \text{ м}$ расположена на автомобильной дороге. Уклон лотка трубы $l_t = 0,01$. Расчетный расход в сооружении $Q_p = 3,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Основание неустойчивое: возможны пучение грунта, просадки.

Требуется определить глубину размыва и размеры укреплений в нижнем бьефе.

Решение. Так как основание сооружения неустойчиво, то укрепление может быть лишь из каменной наброски /3

или ее сочетания с блоками. Расчет ведем в такой последовательности.

1. Увеличиваем расчетный расход на 30% для учета возможной ошибки в расходе:

$$1,3 Q_p = 1,3 \times 3,0 = 3,9 \text{ м}^3/\text{с}$$

2. Определяем скорости потока на выходе из сооружения при пропуске $1,3 Q_p$. Для этого предварительно вычисляем параметр расхода

$$\Pi_Q = \frac{Q}{D^2 \sqrt{g} D} = \frac{3,9}{1,52 \sqrt{9,81} \cdot 1,5} = 0,455$$

и по графику (см.рис. I5) находим $\frac{U_{\text{вых}}}{\sqrt{g} D} = 1,12$.

Скорость потока на выходе будет равна $U_{\text{вых}} = 1,12 \times \sqrt{9,81} \cdot 1,5 = 4,3 \text{ м/с}$.

Так как $3,5 \text{ м/с} < U_{\text{вых}} = 4,3 \text{ м/с} < 5,5 \text{ м/с}$, то возможно применить лишь укрепление из каменной наброски и бетонных блоков.

3. Назначаем длину укрепления

$$2 \cdot 1,5 D_3 = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ м.}$$

Принимаем $L = 3 \text{ м.}$

4. Определяем эталонный расход

$$Q_k = 1,6 D_3^{3/2} = 1,6 \cdot 1,5^{5/2} = 4,3 \text{ м}^3/\text{с.}$$

5. Определяем масштабный коэффициент δ_m по табл.4 – $\delta_m = 0,82$.

6. Принимаем $\Psi = 0,6$ – предохранительный откос отсутствует.

7. Определяем предельную глубину размыва по формуле (24), которая при $D = D_3$ имеет вид

$$\Delta h_{np} = \delta_m \Psi D \left(\frac{Q}{Q_k} \right)^{0,6} \left[\frac{D}{\left(\frac{L}{D} + 1 \right) d} \right]^{0,2}$$

Принимаем средний диаметр частиц грунта $d = 0,5 \text{ мм}$, тогда

$$\Delta h_{np} = 0,82 \cdot 0,6 \cdot 1,5 \left(\frac{3,9}{4,3} \right)^{0,6} \left[\frac{1,5}{\left(\frac{2,25}{1,5} + 1 \right) 0,0005} \right]^{0,2} = 2,77 \text{ м.}$$

8. Определяем максимальную глубину размыва по формуле (28) при $\eta = 0,6$

$$\Delta h_{\max} = \eta \Delta h_n \cdot 0,6 \cdot 2,77 = 1,66 \text{ м.}$$

9. Определяем глубину размыва в руслах с каменной наброской и блоками, соответствующую глубине заложения концевой части (рисбермы) по формуле (30)

$$h_{y_k}^3 - M h_{y_k}^2 - N = 0.$$

Вычисляем коэффициенты M и N :

$$M = \Delta h_{np} \left(\frac{d}{d_n} \right)^{1/3} = \Delta h_{np} \left(\frac{0,5}{2,50} \right)^{1/3} = 0,126 \Delta h_{np} = 0,126 \cdot 2,77 = 0,35,$$

$$N = \frac{\Delta h_n \Delta h_{\max}^2}{1,75} = 0,0186 \Delta h_{\max}^2 = \frac{0,13 \cdot 0,25}{1,75} \cdot 1,66^2 = 0,051;$$

Определяем подбором глубину размыва, равную глубине заложения рисбермы h_{y_k} из уравнения:

$$h_{y_k}^3 - 0,35 h_{y_k} - 0,051 = 0; \\ h_{y_k} = 0,52 \text{ м.}$$

Принимаем, что концевая часть состоит из двух рядов блоков (по вертикали), т.е. $h_{y_k} = 0,80 \text{ м.}$

10. Определяем удельный объем камня в рисберме

$$W_k = 1,75 h_{y_k}^2 = 1,75 \cdot 0,80^2 = 1,12 \text{ м}^3 / \text{м.}$$

II. Вычисляем размеры укрепления в плане: длина укрепления $\mathcal{L} = 3,0 \text{ м}$; ширина укрепления в конце оголовка B_1 .

Принимая форму укрепления из блоков (за исключением концевой части) прямоугольной, находим ширину укрепления у оголовка B_1 по ширине растекания в конце укрепления $B_{\text{раст}}$ по формуле (31).

Предварительно определяем по формуле (32) показатель степени

$$n = 0,78 + 0,36 \lg \frac{B_k}{Q} = 0,78 + 0,36 \lg \frac{4,3}{2,9} = 0,78 + 0,05 = 0,81.$$

$$B_{\text{раст}} = 1,5 \left[\left(\frac{3,0}{1,5} + 1 \right)^{0,81} - 1 \right] + 1,5 = 3,5 \text{ м.}$$

При диаметре трубы $D = 1,5$ м и обеспечении заласа в размере укрепления по $1,0$ м с каждой стороны трубы имеем ширину укрепления у оголовка $B_1 = 3,5$ м = $B_{\text{расч}}$.

Исходя из размера блоков в плане ($1,0 \times 1,0$ м) принимаем ширину укрепления $B_1 = 4,0$ м.

Ширину укрепления в конце его по условиям разыма определяем по формуле (35).

$$\text{Предварительно по } \frac{\Delta h_{\text{раз}}}{D} = \frac{1,66}{1,5} = 1,11 \text{ и } \frac{L}{D} = \frac{5,0}{1,5} = 2,0$$

с помощью графика (т.м.рис.18) находим коэффициент $K=0,68$. Откуда $B_{\text{раз}} = \frac{3,5}{0,68} \times 1,66 = 8,7$ м. Принимаем $B_{\text{раз}} = 9$ м.

Полученные размеры укреплений приведены на рис.3 приложения.

Пример 2. Гофрированная косогорная труба расположена на железной дороге. Отверстие трубы $D = 1,5$ м. Уклон лота $i_A = 0,25$ (соответствует заложению откосов косогора $M_{\text{откос}} = 4$). Высота насыпи по оси трубы $H_{\text{нас}} = 5,0$ м. Ширина поверху $6,5$ м, верховой откос крутизной $1:1,5$. Расходы в сооружении $Q_p = 2,5 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{макс}} = 5,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Подтопление со стороны нижнего бьефа отсутствует. В основании насыпи залегают пески среднезернистые со средним диаметром $d = 0,50$ мм.

Требуется назначить тип выходных русел указанной косогорной трубы и произвести соответствующие гидравлические расчеты.

Решение. Так как труба расположена на крутом косогоре, то укладываем ее в теле насыпи на подсыпке (рис.4 приложения). Уклон трубы назначаем равным $i_r = 0,01$. Откосы и форму насыпи отсыпаем из камня. Низовой откос отсыпки назначаем $M_{\text{откос}} = 2$ (на рис.4 приложения этот откос показан пунктиром).

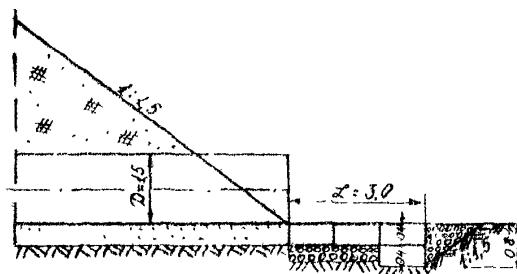
Расчет выполняем в соответствии с рекомендациями гл.4 применительно к рассматриваемому случаю.

Предварительно увеличиваем расчетный расход на 30% для учета возможной ошибки и обеспечения необходимого заласа:

$$1,3 \cdot Q_p = 1,3 \cdot 2,5 = 3,0 \text{ м}^3/\text{с} = Q_{\text{расч}} = 3,0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчет водопада расходом $Q_{\text{вод}} = 5,0 \text{ м}^3/\text{с}$.

Вид сбоку



План

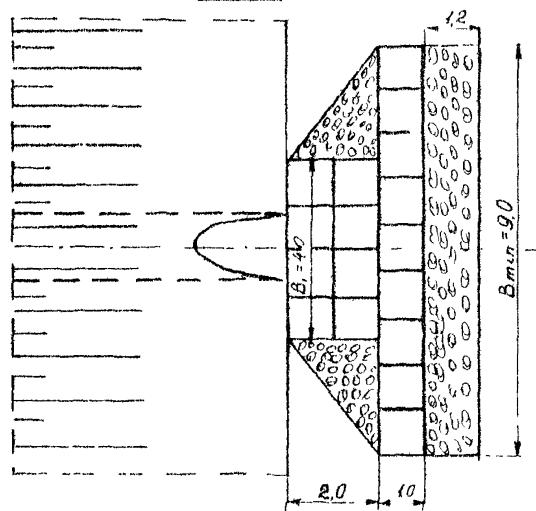


Рис.3. Размеры выходных русел из
блоков и каменной наброски
(в метрах)

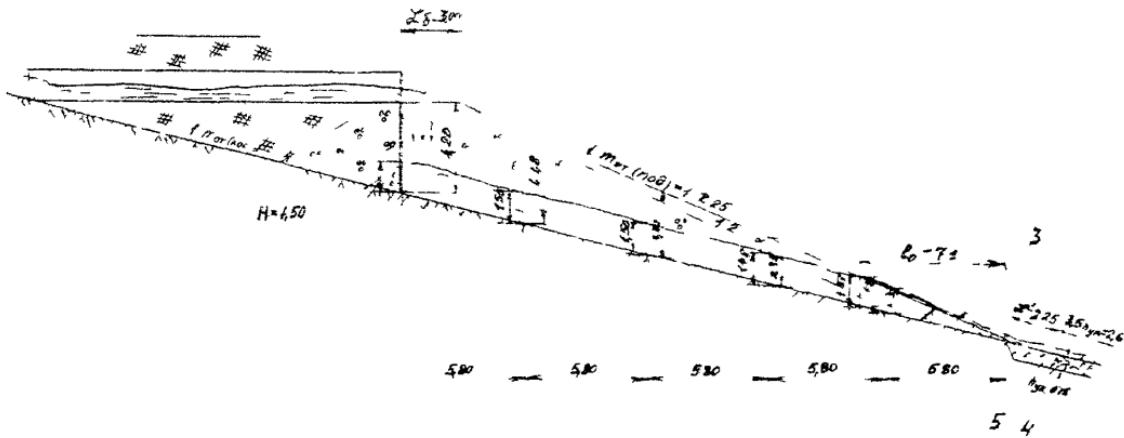


Рис.4. Низкий бьеф косогорной газированной трубы при сбросе потока на каменную подсыпку:

1 - экран; 2 - фильтрующий поток; 3 - обратный фильтр высотой
 $\delta_f = 0,5$ м; 4 - рисберма; 5 - укрепление из каменной наброски

Порядок расчета следующий.

1. Определяем глубины и скорости потока на выходе из трубы по графиком (см. рис. I4 и I5).

Предварительно находим параметр расхода

$$P_Q = \frac{Q}{D^2 g D} = \frac{3,0}{1,5 \sqrt{9,81 \cdot 1,5}} = 0,347.$$

Делая по P_Q и $\zeta_r = 0,01$ находим $\frac{h_{\text{вых}}}{D} = 0,44$ и

$$h_{\text{вых}} = 0,44 \cdot 1,5 = 0,66 \text{ м}, \quad \frac{V_{\text{вых}}}{\sqrt{g D}} = 1,02 \text{ и}$$

$$V_{\text{вых}} = 1,02 \sqrt{9,81 \cdot 1,5} = 3,01 \text{ м/с.}$$

2. Устанавливаем по формуле (39) средний диаметр наброски, считая ее однородной

$$d_n = \frac{V_{\text{вых}}}{45} = \frac{3,01^2}{45} = 0,34 \text{ м.}$$

Принимаем $d_n = 35 \text{ см.}$

Отсыпаем на берме и откосе три слоя камня крупностью $d_n = 35 \text{ см}$, оставльную часть - из горной массы (средний диаметр частиц $d_n = 25 \text{ см}$) с содержанием молких частиц 5-7%.

3. Определяем по формуле (35) минимальный размер бермы вдоль потока, при которой поток, вытекающий из трубы, не попадает непосредственно на откос

$$L_{\text{безоп}} = 1,2 l_{\text{вых}} \sqrt{\frac{2 h_{\text{вых}}}{g}} = 1,2 \cdot 3,0 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,66}{9,81}} = 1,7 \text{ м.}$$

Принимаем с запасом $\chi_d = 3,0 \text{ м.}$

4. Определяем ширину растекания потока на берме по формуле (36) с введением в нее понижающего коэффициента 0,6, учитывавшего особенности каменной наброски по сравнению с бетонным укреплением $0,8 \left(\frac{Q}{Q_n} \right)^{0,5}$

$$B_{\text{раст}} = 9,6 \frac{D}{\chi_d} \left(\frac{Q}{Q_n} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{D} \right),$$

где $\chi_d = 3,0 \text{ м}$, а $Q_n = 1,6 D^3 = 1,6 \cdot 1,5^{3/2} = 1,41 \text{ м}^3/\text{с.}$

$$\text{Откуда } B_{\text{раст}} = 9,6 \cdot \frac{1,5^2}{3} \left(\frac{3,0}{4,41} \right)^{2/3} \left(\frac{3,0}{1,5} \right)^{0,8} \left(\frac{3,0}{4,41} \right)^{0,5} = 9,4 \text{ м.}$$

5. Назначаем длину участка насыпи, отсыпанной из камня, т.е. ширину фильтрующей прослойки b_f

Принимаем $b_f = b_{\text{рас}} = 10 \text{ м.}$

Далее ведем расчет фильтрующей подсыпки как фильтрующей насыпи.

6. Определяем по формуле (41) нормальную глубину фильтрационного потока, предполагая, что весь расход профильтрует через подсыпку.

Предварительно находим коэффициент фильтрации для горной массы $K_{\phi(f)}$ со средней крупностью камней $d_h = 25 \text{ см}$. Расчет можно произвести по формуле (42), но из-за отсутствия данных о пористости горной массы приближенно (согласно п.4.22 настоящих методических рекомендаций) находим по табл. 7 коэффициент фильтрации для однородной наброски и уменьшаем его на 25%

$$K_{\phi(f)} = \frac{0,49}{1,25} = 0,40 \text{ м/с.}$$

$$\text{Тогда } h_0 = \frac{Q_{\text{рас}}}{b_f K_f} = \frac{3,0 \sqrt{4}}{10 \cdot 0,40} = 1,50 \text{ м.}$$

7. Определяем глубину фильтрационного потока H в створе, проходящем через конец трубы, из уравнения (44) – подтождение снизу отсутствует. Для этого предварительно находим проекцию расстояния от конца трубы до точки пересечения откосов отсыпки и косогора (см. рис.4 приложения) – $\ell_n = 23,4 \text{ м.}$

Затем вычисляем

$$\frac{\ell_n \sqrt{17l_{\text{откос}} + l}}{n_0 H_{\text{откос}}} = f(\xi) = \\ \frac{23,4 \sqrt{42 + 1}}{1,50 \cdot 42} = 4,02.$$

Согласно табл.3 по $f(\xi) = 4,02$
находим $\xi = \frac{H}{h_0} = 1,0 \quad \text{и} \quad H = h_0 = 1,50 \text{ м.}$

8. Определяем устойчивость низового откоса подсыпки из условия (45).

Предварительно определяем разность отметок бьефов по формуле (45)

$$Z = H + \frac{\ell_n}{M_{\text{от}}(\text{кос})} = 1,5 + \frac{23,4}{4} = 7,35 \text{ м.}$$

Вычисляем $Z_{\text{пр}}$ по формуле (47) при крутизне откоса подсыпки 1:2 ($\operatorname{tg}\beta = 0,5$) и $d_H = 0,35 \text{ м}$

$$\begin{aligned} Z_{\text{пр}} &= 2,3 (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\beta) \frac{\sqrt{m_{\text{откос}}^2 + 1} \sqrt{\frac{d_H}{H}}}{M_{\text{от}}(\text{кос})} \\ &= 2,3 (0,725 - 0,500) 23,4 \frac{\sqrt{4^2 + 1} \sqrt{0,35}}{1,50} = \end{aligned}$$

$= 6,04 < Z = 6,35 \text{ м. Следовательно, откос неустойчив и требуется сделать его пологий.}$

Принимаем $M_{\text{от}}(\text{пол}) = 2,25$ ($\operatorname{tg}\beta = 0,444$) и по рис.4 приложения находим $\ell_n = 28,9 \text{ м}$ (откос 1:2,25 изображен сплошной линией).

Тогда имеем

$$Z_{\text{пр}} = 2,3 (0,725 - 0,444) \frac{28,9 \sqrt{4^2 + 1}}{4} \sqrt{\frac{0,35}{1,50}} = 9,3 \text{ м.}$$

$$\text{При этом } Z = 1,5 + \frac{28,9}{4} = 8,72 \text{ м} < 9,3 \text{ м.}$$

Следовательно, устойчивость низового откоса обеспечена.
9. Проверяем устойчивость основания насыпи от ламинарной фильтрации. Для этого определяем $H_{\text{пр}}$ по формуле (48), причем входящий в нее коэффициент находим по табл.9.

Для средневзвешенных песков, не засыпанных обратным фильтром, $\delta' = 8$. Откуда $H_{\text{пр}} = \frac{\ell_n \sqrt{m_{\text{откос}}^2 + 1}}{\delta M_{\text{от}}(\text{кос})} = \frac{28,9 \sqrt{4^2 + 1}}{8 \cdot 4} = 3,72 \text{ м.}$

$H = 1,50 \text{ м} < H_{\text{пр}} = 3,72 \text{ м. Следовательно, устойчивость основания насыпи против ламинарной фильтрации обеспечена.}$

10. Сравниваем глубину потока H с толщиной подсыпки $\delta_{\text{под}}(\text{вык})$ в сечении, проходящем через конец лотка трубы на выходе. На рис.4 приложения $\delta_{\text{под}}(\text{вык}) = 4,2 \text{ м} > H = 1,50 \text{ м}$. Итак, весь поток, выходящий из трубы, профильтровывает через подсыпку.

11. Устанавливаем, не выходит ли поток в каком-либо из сечений подсыпки на поверхность. Для этого делим расстояние $\ell_n = 28,9 \text{ м}$ на пять равных частей $\ell_i = \frac{28,9}{5} = 5,8 \text{ м}$.

и в конце каждой из них (считая от конца подсыпки) определяем глубину потока h_i из уравнения (44). Затем в каждом из сечений устанавливаем толщину подсыпки $\delta_{\text{под}i}$, для чего можно воспользоваться формулой (49).

Сравнивая h_i с $\delta_{\text{под}i}$, устанавливаем, выходит ли поток на откос. Это случится при $h_i > \delta_{\text{под}i}$.

Расчет выполняем в табличной форме (табл.3).

Т а б л и ц а 3

Номер участка	Проекция расстояния от конца подсыпки до данного отверстия ℓ , м	$f(\xi) = \frac{\xi}{h_0 t_{\text{откос}}^2}$	ξ (по табл. 8)	$h_i - \xi h_0$, м	$\delta_{\text{под}i}$ (по рис. 4 приложе- ния)	$\delta_{\text{под}i} - h_i$	Вид потока
I	5,80	1,0	0,96	1,43	1,13	< 0	Поверхн поток
2	11,60	2,0	1,00	1,48	2,25	> 0	Фильтра- ционный поток
3	17,40	3,0	1,00	1,50	3,38	> 0	То же
4	23,10	3,98	1,00	1,50	4,48	> 0	-"-
5	28,90	4,98	1,00	1,50	4,20	> 0	-"-

Анализ результатов расчета показывает, что фильтрационный поток на части откоса выходит на поверхность.

Нанеся глубины фильтрационного потока на чертеж (см.рис.4 приложения), устанавливаем, что поток выклинивается на откос на втором участке.

Устанавливаем расстояние от конца подсыпки до места выклинивания потока по формуле (52)

$$\ell_{RP} = \frac{M_{\text{откос}} M_{\text{от(под)}}}{(M_{\text{откос}} - M_{\text{от(под)}}) b_F K_F \sqrt{\frac{H}{\ell_n} + \frac{1}{t_{\text{от(кос)}}}}} = \frac{3,0 \cdot 4 \cdot 2,25}{(4 - 2,25) \cdot 10 \cdot 0,4 \sqrt{\frac{1,2}{28,8} + 0,25}} = 7,1 \text{ м.}$$

12. Определяем толщину подсыпки в этом сечении, равную глубине потока, по формуле (49)

$$\delta_{\text{под}i} = \frac{M_{\text{откос}} - M_{\text{от(под)}}}{M_{\text{от(под)}} M_{\text{от(кос)}}} \cdot \frac{h_i}{4 \cdot 2,25} = \frac{4 - 2,25}{4 \cdot 2,25} \cdot 7,1 = 1,37 \text{ м.}$$

Выше этого сечения имеется лишь фильтрационный поток (безнапорная фильтрующая подсыпка), ниже его часть потока выходит на откос (напорная фильтрующая подсыпка).

13. Определяем фильтрационные расходы в различных секторах напорной фильтрующей подсыпки. Для этого делим расстояние от конца подсыпки до сечения, где поток выклинивается на поверхность откоса на три части длиной ℓ , $= \frac{3,4}{3} = 2,37$ м каждая и в конце каждого сечения подсыпки (считая от конца ее) определяем фильтрационный расход по формуле (54) при глубине потока $h = \delta_{\text{под}}$. Эту глубину можно вычислить по формуле (49).

Расчет производим в табличной форме (табл. 4).

Номер участка	Расстояние от конца подсыпки до заданного сечения ℓ , м	$h_\ell = \delta_{\text{под}}, \text{м}$, по формуле (49)	Фильтрационный расход $Q_\ell = \frac{h_\ell}{n} A$
Подошва откоса	0	0	0
I	2,37	0,46	14,0
2	4,74	0,92	2,0
3	7,1	1,37	3,0

14. Определяем средние скорости турбулентной фильтрации по формуле (55)

$$V_f = K_f \sqrt{\frac{H}{\ell_n} + \frac{l}{\tau_{\text{турб}}}} = 0,4 \sqrt{\frac{1,5}{28,9} + \frac{1}{4}} = 0,22 \text{ м/с.}$$

15. Находим максимальную скорость турбулентной фильтрации по формуле (56)

$$V_m = \frac{1,7 V_f}{P \epsilon_3} = \frac{1,7 \cdot 0,22}{0,40 \cdot 0,9} = 1,04 \text{ м/с.}$$

Пористость горной массы $P = 0,40$ либо принимаем по табл. 7 для камня той же крупности, что и однородный камень, но для круглых частиц, либо уменьшаем $K_{\phi(\text{доп})} = 0,49$ на 25%.

16. Сравниваем V_m с допускаемыми скоростями для среднезернистых песков. Для этого находим $V_{\text{доп}} = 0,35 \text{ м/с}$ по табл. II-6 "Руководства по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений": $V_m = 1,04 \text{ м/с} > V_{\text{доп}} = 0,35 \text{ м/с}$. Следовательно, устойчивость основания подсыпки от турбулентной фильтрации не обеспечена.

Вырезаем грунт основания и заменяем его материалом, допускаемая скорость которого больше или равна V_m .

По табл. II-6 "Руководства по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений" находим, что этому условию удовлетворяет галька (или щебень) с частицами крупностью 1,5-2,0 см.

Укладываем ее не менее трех слоев, поэтому вырезку надо делать на глубину 8-10 см (для условия БАМ этот материал можно уложить в основание насыпи без вырезки естественного грунта).

17. Определяем расходы потока, протекающего по откосу подсыпки в квадрате из створов $Q_2 = Q - Q_1$, а также глубины и скорости течения на откосе по формулам (59) и (60).

Затем сравниваем полученные скорости с допускаемыми для камня по формуле (61) и устанавливаем устойчивость его. Расчет ведем в табличной форме (табл. 5) для тех же сечений что и в II.12, принимая установленную ранее крупность камня на откосе $d_H = 0,35 \text{ м}$.

Таблица 5

Номер участка	Расстояние от конца подсыпки, м	$Q_2 = Q - Q_1, \text{м}^3/\text{с}$	$h_{\text{отк}}, \text{м},$ по формуле (59)	$\omega_{\text{отк}} =$ $= \beta_{\phi} h_{\text{отк}}$	$V_{\text{отк}}, \text{м/с},$ по формуле (60)	$V_{\text{фильт}}, \text{м/с},$ по формуле (61)
Подсыпка откоса	0	3,0	0,081	0,8	3,75	4,0
I	2,37	2,0	0,061	0,6	3,32	4,0
2	4,74	1,0	0,04	0,4	2,5	4,0
3	7,1	0	0	0	0	4,0

Анализ результатов расчета показывает, что устойчивость камня $d_n = 0,35$ м на откосе обеспечена.

18. Назначаем у подошвы укрепление из каменной наброски, размеры которого определяем в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл.3 (тип укрепления см.на рис.17).

а) Назначаем длину укрепления из наброски у подошвы откоса $\mathcal{L}' = I,5 D = I,5 \times I,5 = 2,25$ м.

б) Определяем расчетную длину укрепления, которая складывается из ширины бермы \mathcal{L}_δ , длины откоса подошвы $\frac{\mathcal{L}_{\text{подошвы}}}{\text{подошв}}$ и длины укрепления у подошвы откоса \mathcal{L}' :

$$\mathcal{L}_\delta = 3 + \frac{20,9 \sqrt{4^2} + I}{4} + 2,25 = 35,85 \text{ м}$$

в) Определяем предельную глубину размыва в грунте дюга по формуле (24).

Предварительно находим величины, входящие в эту формулу:

$J_m = 0,82$ (по табл.4 настоящих Методических рекомендаций);

$$Q_K = I,6 \cdot \Phi^{5/2} = 1,6 \cdot I,5^{5/2} = 4,42 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\psi = 0,6;$$

$$\beta = \beta_p = I,5 \text{ м};$$

$$d = 0,50 \text{ мм} = 0,0005 \text{ м};$$

$$\Delta h_{np} = 0,82 \cdot 0,6 \cdot I,5 \left(\frac{3,0}{4,42} \right)^{0,6} \left[\frac{I,5^3}{\left(\frac{35,85}{I,5} + I \right) I,5 \cdot I,5 \cdot 0,0005} \right]^{0,2} = 1,51 \text{ м}.$$

г) Определяем максимальную глубину размыва

$$\Delta h_{max} = 0,6 \Delta h_{np} = 0,6 \cdot 1,51 = 0,91 \text{ м}.$$

д) Определяем коэффициенты M и N в уравнении (30):

$$M = \Delta h_{np} \left(\frac{d}{d_n} \right)^{1/3} \left(\frac{\alpha \beta}{\gamma \delta} \right)^{1/3} = 0,19,$$

$$N = 0,0715 \Delta h_{max} = 0,0715 \cdot 0,91^2 - 0,06$$

$$h_{yK} - 0,19 h_{yK}^2 - 0,06 = 0.$$

Решив это уравнение, находим $h_{yK} = 0,46 \text{ м}$.

Так как укрепление из каменной наброски должно быть трехслойным, а диаметр греки в верхнем слое

$d_n = 25 \text{ см}$, то назначаем его состоящим из трех слоев:

верхний слой d_n равен 35 см, а остальные два по 20 см. Общая толщина укрепления в концевой части составляет

$$h_{yk} = 0,20 \times 2 + 0,35 = 0,75 \text{ см.}$$

ж) Определяем ширину воронки размыва по формуле (33). Предварительно находим коэффициент K по графику (рис. 18).

$$\text{При } \frac{\Delta h_{max}}{n} = \frac{0,9I}{1,5} = 0,6I \text{ и } \frac{x+z'}{D} = \frac{2,25+3}{1,5} = 3,5 \\ K = 0,40. \text{ Тогда } B_{min} = \frac{3,6}{0,40} \cdot 0,9I = 8,2 \text{ м.}$$

з) Определяем ширину воронки размыва у подошвы по формуле (63)

$$B_{min} = B'_{min} + 2\Delta h_{max} = 8,2 + 2 \cdot 0,9I \approx 10 \text{ м} > B_{act} = 9,4 \text{ м.}$$

Принимаем ширину укрепления $B = 10 \text{ м.}$

В конце укрепления устраиваем каменную рисберму треугольной формы глубиной 75 см с откосами: верховым I:2 и низовым I:I,5.

Для дополнительной гарантии от выноса мелких частиц из-под основания насыпи устраиваем у ее подошвы обратный фильтр на высоту 0,5 м.

Основные размеры выходного русла заданной трубы, полученные в результате расчета, приведены на рис. 4 приложения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРУБ	
"Длиннцев" и "коротких" трубы. Учет влияния нижнего бьефа	5
Режимы протекания потока	3
Безнапорные и полунапорные трубы	14
Напорные и частично-напорные трубы	17
Глубины и скорости потока на выходе из труб	24
Особенности расчета многоочковых и многоярусных труб	24
3. РАСЧЕТ НИЖНЕГО БЬЕФА ТРУБ В РАВИЛНЫХ УСЛОВИЯХ	30
Типы входных русел	30
Выходные русла с укреплениями из каменной наброски	31
Выходные русла с укреплениями из каменной наброски и бетонных блоков	35
4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАЗМЫВА И ПАЗИНАЧЕНИЯ РАЗМЕРА УКРЕПЛЕНИЙ ЗА КОСОГОРЦЫМИ ТРУБАМИ	40
Основные положения	40
Укладка труб с уклоном лога при укреп- лениях из крупных бетонных блоков	43
Отвод воды по укрепленному откосу насыпи в берме	43
Отвод воды на берму и откос насыпи отсыпанной из камня	47
Сброс потока в лотки, уложенные на откосе насыпи	57
ПРИЛОЖЕНИЕ. Примеры расчетов	63