

ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ

В статье излагаются актуальные проблемы строительства гладкостенных стальных водопропускных труб большого диаметра на линии Обская–Бованенково в условиях заполярной тундры. Приведены полученные сотрудниками лаборатории «Мосты» СГУПС в 2008 г. основные результаты обследования технического состояния указанных труб, а также рекомендации по их проектированию и строительству, обеспечивающие предупреждение возникновения недопустимых деформаций труб в процессе эксплуатации.

На полуострове Ямал ведется строительство железной дороги протяженностью 560 км к газовому месторождению (ст. Обская — ст. Бованенково). Более 70 % искусственных сооружений составляют водопропускные трубы, из которых 90 % металлические. Основная масса металлических труб представлена толстостенными газовыми магистральными трубами диаметром 1,42 м, для пропуска расчетного расхода на некоторых водотоках количество очков достигает 3–5. Пятиочковые трубы, как правило, уложены по уровню в два ряда, в нижнем ряду 3 очка, в верхнем — 2. Многоочковые трубы неудобны как в строительстве, так и в эксплуатации. Во-первых, сложно выполнить противофильтрационные мероприятия. Во-вторых, в паводок перед трубой образуется значительный подпор в сочетании с высокой скоростью излива воды в низовой части, что создает опасность размывов. В-третьих, в многоочковых трубах значительно возрастают теплопотери водотоком в зимний период, что увеличивает вероятность образования наледей.

В последние годы стали шире использовать металлические трубы больших отверстий (2,6–3,4 м) как из гофрированного металла (до 3,0 м), так и из гладкого толстостенного металла толщиной 21 мм.

В связи с большими деформациями гофрированных труб строители отказались от их применения и перешли на трубы больших отверстий из гладкого толстостенного листа. Трубы изготавливаются на Курганском заводе мостовых конструкций секциями 3,0–6,5 м с фланцами по торцам, которые на строительной площадке соединяются на болтах.

Металлические трубы по сравнению с железобетонными трубами значительно менее подвержены таким дефектам, как растяжка звеньев, разрушение оголовков, неравномерные осадки. Кроме того, металлические трубы не требуют дорогостоящих фундаментов и менее материалоемки по сравнению с типовыми железобетонными конструкциями.

Сплошное обследование водопропускных труб на линии Обская — Бованенково, результаты которого приведены в [6], выявило наличие в некоторых из них следующих видов дефектов:

- неравномерная осадка основания под трубой с образованием зазоров (пустот) между концевыми участками труб и поверхностью основания;
- застои воды в трубах;
- просадки труб;
- нарушение положения берм и откосов насыпи рядом с трубами;
- разрывы труб в швах.

Основной причиной деформаций и дефектов водопропускных труб (помимо строительного брака и отсутствия должного содержания при эксплуатации) является нарушение температурного режима грунтов в основании и теле насыпи в зоне расположения водопропускной трубы.

В 2007–2008 гг. по договору с Мостостроем-13 авторами статьи были выполнены обследования опытных труб с целью совершенствования конструкции и повышения их эксплуатационной надежности. Были выполнены следующие работы:

- систематизация и оценка состояния ранее построенных труб по материалам выполненных обследований;
- гидравлические расчеты труб диаметром 2,6; 3; 3,4 м с оголовками воротникового типа и безоголовочных для использования в различных режимах (безнапорный, полунанпорный, напорный);
- разработка принципиальных технологических решений по строительству водопропускных труб в условиях Ямала;
- разработка конструкции противоналедных сооружений в трубах;
- разработка конструкций укрепления откосов насыпи вблизи оголовков, а также подводящих и отводящих и русел.

Техническое состояние опытных труб, построенных на 268 км, 271 км и 290 км линии Обская—Бованенково было определено в ходе обследований, выполненных авторами летом и зимой 2007 г. (ноябрь), а также весной 2008 г. (апрель). Отверстие всех труб круглое, диаметром 2,6 м. Трубы стальные гладкие с толщиной стенки 21 мм, изготовлены на заводе секциями, длиной 3,0...6,5 м. Секции между собой соединяются с помощью наружных фланцев на высокопрочных болтах. После сборки стыковые швы между секциями дополнительно свариваются. Строительный подъем конструкцией труб не предусмотрен. Концы труб имеют срез под углом, соответствующим крутизне откосов насыпи (1 : 2). Для увеличения жесткости труб они снаружи через 1,5 м усилены ребрами жесткости по образующей. Общий вид секций представлен на рис. 1.

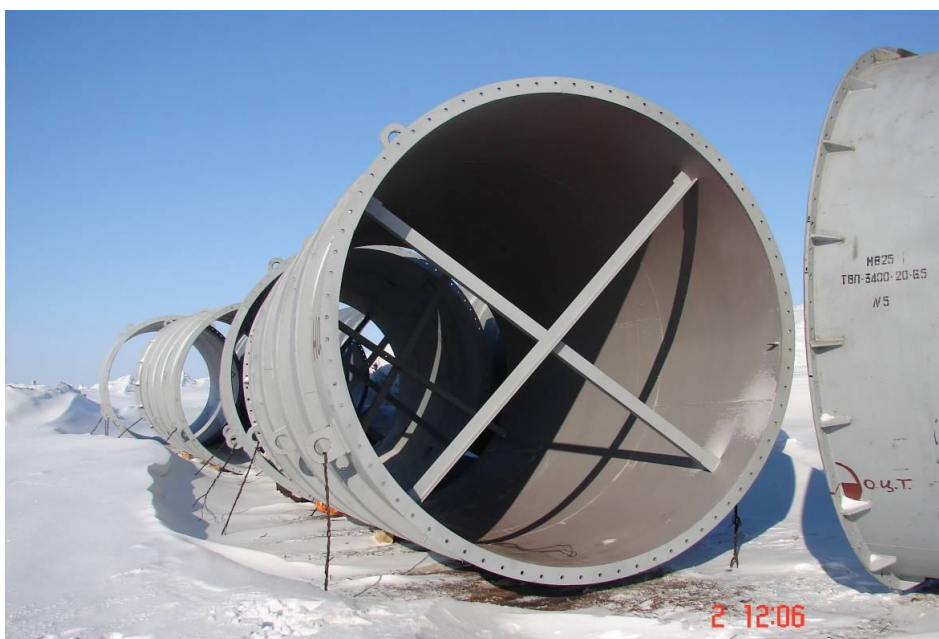


Рис. 1. Общий вид секций металлических водопропускных труб

Водопропускные трубы по проекту укладываются на слой щебня толщиной 200 мм с прослойкой пеноплекса толщиной 100 мм. Обратная засыпка производится твердомерзлым песком до высоты 1 м над сводом. Укрепление откосов насыпи предусмотрено каменной наброской, крупностью 150...200 мм, толщиной слоя 700 мм на длине 30 м. На концах труб по руслу предусмотрены укрепленные площадки размерами 10×10 м. Основные конструктивные размеры сооружений и дефекты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные размеры и дефекты обследованных труб

Показатель		268-й км	271-й км	290-й км
Длина трубы, м		46,31	49,81	35,71
Высота насыпи, м		9,6	10,3	6,0
Расчетный расход, м/с		5,67	12,8	9,66
Измеренные расходы, л/с	Июль 2007 г.	12	20	—
	Ноябрь 2007 г.	6	12	75
	Апрель 2008 г.	0	0	0
Продольный уклон лотка	Проектный	0,01	0,01	0,01
	Действительный	0,01	0,017	0,003
Разрыв трубы по стыку		Стык 3–4	Стык 3–4	Нет
Осадка в середине трубы, см		9,0	8,0	3,5
Осадка в месте излома труб, см		14,8	12,1	—
Уменьшение вертикального диаметра, %		11	10	4
Площадь растекания (пруда) перед трубой, м ²		70	900	30

Таким образом, техническое состояние построенных на 268-м км, 271-м км и 290-м км водопропускных труб может быть охарактеризовано следующим образом:

1. При строительстве труб на 271-м км и 290-м км не выдержан проектный продольный уклон лотков (0,01), только на трубе 268-го км он соответствует проектному.

2. Разрыв труб на 268-м км и 271-м км произошел в одном и том же месте на третьем стыке от выхода на расстоянии 18,65 м. Образовавшийся зазор увеличивается от свода к лотку и достигает 15 мм. Основной причиной разрыва труб явилась неравномерная и значительная по величине осадка основания.

3. На всех трубах отмечается овальность отверстий, увеличивающаяся от концов труб к середине, где уменьшение вертикального диаметра было до 11 %. Основной причиной овальности труб является использование для обратной засыпки малокондиционного местного грунта с высоким содержанием льда в сочетании с недостаточным его уплотнением, что приводит к разжижению грунта обратной засыпки в летний период. В соответствии с требованиями ВСН [4] допускаемое уменьшение вертикального диаметра трубы не должно превышать 5 % от номинального значения, в противном случае труба может потерять устойчивость.

4. В конце зимнего периода все трубы погребены под слоем снега толщиной 2–4 м. Водотоки в этот период не функционируют. Размеры наледей в трубах достигают 0,5 м.

5. В ходе обследования установлено несоответствие фактического укрепления откосов и русел водотоков на концах труб принятому по проекту. Перед трубами, а также за ними водотоки протекают неорганизованно, образуя значительные пруды вдоль насыпей.

Таким образом, на построенных трубах обнаружены неисправности, связанные как с конструктивными и технологическими недостатками проектов, так и нарушениями технологии строительства.

Для разработки мероприятий по предупреждению размывов насыпи, а также входных и выходных русел необходимо знать скорость и глубину водного потока. С этой целью авторами была выполнена серия гидравлических расчетов труб разного диаметра, различной длины и уклона, как с оголовками воротникового типа, так и безоголовочных, для различных величин подпора. Методика расчета основывалась на требованиях и рекомендациях, изложенных в [2]. В табл. 2 приведены результаты расчета круглой трубы отверстием 2,6 м с уклоном 0,006 длиной 45 м с оголовком воротникового типа с раструбностью 0°.

Водопропускные трубы на линии Обская – Бованенково эксплуатируются в сложных инженерно-геологических и природно-климатических условиях, которые характеризуются следующими основными факторами:

- широким распространением легкоразмываемых легких и пылеватых песков и супесей, склонных к тиксотропному разжижению при переувлажнении;
- наличием вечномерзлых льдистых грунтов в основании насыпей;
- значительным расходом воды и высокой скоростью выходного потока в трубах в паводковый период, обусловленных обилием выпадаемого зимой снега;
- значительным подтоплением входного и выходного оголовков в паводковый период из-за слабого общего уклона местности, что вызывает застой воды вблизи труб;
- растеплением основания труб летом из-за большой продолжительности светового дня и интенсивного прогрева воды в питающих водоемах.

Таблица 2

Результаты гидравлического расчета трубы

Подпор на входе, м	Параметр расхода	Расход, м ³ /с	Скорость излива, м/с	Глубина на выходе, м	Критич. глубина, м	Глубина сжат. сечения, м	Режим
0,832	0,046	1,57	2,481	0,261	0,576	0,362	Безнапорный
1,201	0,092	3,141	3,206	0,521	0,823	0,524	Безнапорный
1,495	0,138	4,711	3,574	0,698	1,015	0,653	Безнапорный
1,754	0,184	6,282	3,901	0,856	1,179	0,767	Безнапорный
1,99	0,23	7,852	4,159	0,973	1,326	0,871	Безнапорный
2,213	0,276	9,423	4,38	1,068	1,458	0,968	Безнапорный
2,425	0,322	10,993	4,597	1,158	1,581	1,061	Безнапорный
2,63	0,368	12,564	4,811	1,242	1,694	1,151	Безнапорный
2,831	0,414	14,134	5,016	1,323	1,8	1,239	Безнапорный
3,028	0,46	15,705	5,201	1,4	1,898	1,326	Безнапорный
3,371	0,506	17,275	5,389	1,475	1,989	1,135	Полунапорный
3,641	0,552	18,845	5,599	1,544	2,072	1,143	Полунапорный
3,934	0,598	20,416	5,809	1,613	2,148	1,151	Полунапорный
4,169	0,782	26,698	6,69	1,816	—	—	Напорный
4,439	0,828	28,268	6,901	1,861	—	—	Напорный
4,724	0,874	29,839	7,113	1,906	—	—	Напорный
5,025	0,92	31,409	7,351	1,946	—	—	Напорный

В указанных условиях существует опасность размыва выходных русел, а также их деформирования из-за просадок, вызванных как вытаиванием льда в основании, так и выносом мелкозема, а также опасность размыва откосов насыпей вблизи труб, подверженных подтоплению в период паводка. Для

оценки опасности размыва выходных русел и проверки предложений по их укреплению авторами были выполнены расчеты выходных русел водопропускных труб на линии Обская — Бованенково.

Методика расчета выходных русел труб основывалась на рекомендациях, изложенных в [2], и включала следующие этапы:

1. Определение гидравлических характеристик потока на участках укреплений.

2. Определение расчетной глубины размыва на выходе из трубы исходя из степени размываемости грунта и параметров потока на выходе (расход, глубина, скорость).

3. Предварительное назначение типа укрепления русла (в случае если параметры воронки размыва представляют опасность для нормальной эксплуатации сооружения) с учетом условий эксплуатации и строительства.

При определении гидравлических характеристик потока на укреплении в качестве исходных данных для расчета были приняты условия на выходе из труб, обследованных в ноябре 2007 г., в ходе которых было установлено, что уклоны логов на выходе из труб не превышают 0,02. При этих значениях уклонов расчет русел, а также назначение ширины укрепления производится на основе эмпирических зависимостей, приведенных в [2].

Максимальную скорость потока в русле принимают равной:

$$v_{\max} = 1,2v_{\text{вых}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{вых}}$ — скорость потока на выходе из трубы, м/с.

Средние глубины потока в конце выходного русла, имеющего длину L :

$$L = (2...6)D_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{э}}$ — эффективный диаметр (для круглых труб он совпадает с диаметром), вычисляют по формуле

$$h_{\text{укр(К)}} = 0,2\Pi_Q D_{\text{э}}, \quad (3)$$

Π_Q — параметр расхода, определяют для круглых труб по формуле

$$\Pi_Q = Q/D^2/(gD)^{0,5}, \quad (4)$$

где Q — расход воды в трубе, л/с; D — диаметр трубы; g — ускорение свободного падения.

Ширину растекания потока в створе, расположенном на расстоянии X от конца оголовка, определяют на основе зависимости

$$B_{\text{раст}} = b[(1 + X/D_{\text{э}})^2 - 1] + b_p, \quad (5)$$

где b_p — ширина оголовка в конце трубы.

Показатель степени Z определяют по формуле

$$Z = 1,8\lg[1/K - \Delta h_{\max}/D_{\text{э}}(Q_K/Q)^{0,2}], \quad (6)$$

где K — коэффициент формы воронки размыва, определяемый по номограмме, приведенной на рис. 7.2 [2]; $\Delta h_{\max}$ — максимальная глубина размыва на данное время; $Q_K = 0,51g^{0,5}D_{\text{э}}^{2,5}$ — эталонный расход.

Результат расчета параметров потоков в выходных руслах для трубы отверстием 2,6 м уклоном 0,003 при длине выходного русла, равной 10 м, с воротниковым оголовком приведен в табл. 3.

Расчетное определение глубины размыва на выходе из трубы производилось исходя из степени размываемости грунта и параметров потока на выходе. В качестве основного параметра для расчета размыва использовалась предельная глубина размыва $\Delta h_{\text{пр}}$, соответствующая неограниченному по времени прохождению заданного расхода.

В соответствии с инженерно-геологическими условиями района строительства грунт основания труб относится к группе однородных. В этом случае максимальная глубина размыва в условиях затопленного растекания, соответствующего уклонам менее 0,02, определяется по формуле

$$\Delta h_{\max} = \Delta h_{\text{пр}} \eta, \quad (7)$$

где $\Delta h_{\text{пр}}$ и $\Delta h_{\max}$ — предельная и максимальная глубины размыва в заданном выходном русле при отсутствии каменной наброски; η — коэффициент, учитывающий время прохождения паводка.

Таблица 3

Результат расчета выходного русла

№ п/п	Q	v , м/с	H , м	Π_Q	Z	$B_{\text{раст}}$	$h_{\text{укр(к)}}$
1	1,57	2,37	0,287	0,046	1,156	16,122	0,024
2	3,141	3,021	0,574	0,092	1,048	13,586	0,048
3	4,711	3,346	0,752	0,138	0,984	12,293	0,072
4	6,282	3,636	0,908	0,184	0,939	11,451	0,096
5	7,852	3,904	1,027	0,230	0,905	10,837	0,120
6	9,423	4,159	1,126	0,276	0,876	10,360	0,144
7	10,993	4,393	1,218	0,322	0,852	9,974	0,167
8	12,564	4,602	1,303	0,368	0,831	9,650	0,191
9	14,134	4,804	1,387	0,414	0,813	9,374	0,215
10	15,705	4,99	1,468	0,460	0,796	9,134	0,239
11	17,275	5,179	1,548	0,506	0,781	8,921	0,263
12	18,845	5,388	1,618	0,552	0,768	8,732	0,287
13	20,416	5,597	1,687	0,598	0,755	8,561	0,311
14	21,986	5,806	1,747	0,644	0,744	8,406	0,335
15	23,557	6,015	1,807	0,690	0,733	8,264	0,359
16	25,127	6,242	1,857	0,736	0,723	8,133	0,383
17	26,698	6,475	1,905	0,782	0,713	8,013	0,407
18	28,268	6,676	1,949	0,828	0,704	7,900	0,431
19	29,839	6,857	1,991	0,874	0,696	7,796	0,454
20	31,409	7,071	2,028	0,920	0,688	7,698	0,478

Предельная глубина размыва при уклоне лога менее 0,02 определяется по формуле

$$\Delta h_{\text{пр}} = r \delta_M \psi D_{\text{э}} (Q/Q_K)^s [D_{\text{э}}^3 / (L/D_{\text{э}} + 1)^{s_1} b b_p d]^{0,2}, \quad (8)$$

где r , s — коэффициент и показатель степени для различных типов выходных русел (приведены в табл. 7.2 [2]. Для существующих конструкций выходных русел величины r и s составляют соответственно 0,9 и 0,6); s_1 — показатель степени, равен 1 для типов, приведенных в табл. 7.2 [2] (для каменной наброски он определяется в подразд. 1.2.3); δ_M — масштабный коэффициент: $\delta_M = 0,85(D_0/D_{\text{э}})^{0,075}$, также определяется по табл. 7.3 [2]. Для трубы диаметров 2,6 м значение δ_M равно 0,8, для трубы диаметром 3 м — 0,79; ψ — коэффициент, учитывающий тип концевой части выходных русел, при наличии предохранительного откоса $\psi = 1$, при его отсутствии или наличии вертикальной стенки $\psi = 0,6$. Для выходных русел с ребром $\psi = 1$ независимо от наличия стенки; $D_{\text{э}}$ — эквивалентный диаметр, м; Q — максимальный расчетный расход паводка, м³/с; L — длина укрепления, м; b — отверстие сооружения, м (для круглых труб равно их диаметру); b_p — ширина сечения (раструба), м; d — расчетный диаметр связного грунта, м, определяемый по формуле

$$d = 7,5(0,1 + 100C_p), \quad (9)$$

где C_p — удельное сцепление, МПа, связного грунта (для пылеватых песков и супесей $C_p = 0,002 \dots 0,004$).

Коэффициент η , учитывающий время прохождения паводка, определяют по формуле

$$\eta = 1 - 1 / (3(t/t_0)^{0,5} + 1), \quad (10)$$

где, в свою очередь:

$$t_0 = 540(Q/Q_K)^{0,25}(\Delta h_{\text{пр}}^3/Q + 11(100C_p)^3/Q). \quad (11)$$

Для связных грунтов η может быть принят равным 0,75.

Пример результатов расчета максимальной глубины размыва, выполненной по изложенной методике, приведен в табл. 4.

Учитывая, что максимальная глубина размыва, согласно формуле (7), составляет $0,75\Delta h_{\text{пр}}$, можно оценить величины расходов в трубах, при которых размыв в конце выходных русел является опасным и требует принятия специальных мер по предотвращению нежелательных деформаций труб.

В результате выполненных расчетов было установлено, что предельная глубина размыва выходного русла существенно зависит от расхода воды в трубе, диаметра и практически не зависит от уклона труб. При этом для труб диаметром 2,6 м предельная глубина размыва становится значительной (свыше 1 м, что соответствует максимальной глубине размыва 0,75 м) уже начиная с величины расхода около 7 м/с. Для труб диаметром 3 м опасная величина расхода составляет около 7,5–8 м/с.

Таблица 4

**Результат расчета максимальной глубины размыва на выходе из трубы
отверстием 2,6 м, уклоном 0,003 с воротниковым оголовком**

№ п/п	r	s	δ_M	ψ	Q	Q_K	s_1	d	$\Delta h_{\text{пр}}$
1	0,900	0,600	0,800	1,000	1,570	17,412	1,000	3,000	0,402
2	0,900	0,600	0,800	1,000	3,141	17,412	1,000	3,000	0,609
3	0,900	0,600	0,800	1,000	4,711	17,412	1,000	3,000	0,776
4	0,900	0,600	0,800	1,000	6,282	17,412	1,000	3,000	0,923
5	0,900	0,600	0,800	1,000	7,852	17,412	1,000	3,000	1,055
6	0,900	0,600	0,800	1,000	9,423	17,412	1,000	3,000	1,177
7	0,900	0,600	0,800	1,000	10,993	17,412	1,000	3,000	1,291
8	0,900	0,600	0,800	1,000	12,564	17,412	1,000	3,000	1,398
9	0,900	0,600	0,800	1,000	14,134	17,412	1,000	3,000	1,501
10	0,900	0,600	0,800	1,000	15,705	17,412	1,000	3,000	1,599
11	0,900	0,600	0,800	1,000	17,275	17,412	1,000	3,000	1,693
12	0,900	0,600	0,800	1,000	18,845	17,412	1,000	3,000	1,783
13	0,900	0,600	0,800	1,000	20,416	17,412	1,000	3,000	1,871
14	0,900	0,600	0,800	1,000	21,986	17,412	1,000	3,000	1,956
15	0,900	0,600	0,800	1,000	23,557	17,412	1,000	3,000	2,039
16	0,900	0,600	0,800	1,000	25,127	17,412	1,000	3,000	2,119
17	0,900	0,600	0,800	1,000	26,698	17,412	1,000	3,000	2,198
18	0,900	0,600	0,800	1,000	28,268	17,412	1,000	3,000	2,275
19	0,900	0,600	0,800	1,000	29,839	17,412	1,000	3,000	2,350
20	0,900	0,600	0,800	1,000	31,409	17,412	1,000	3,000	2,423
21	0,900	0,600	0,800	1,000	32,980	17,412	1,000	3,000	2,495

Таким образом, для труб, в которых максимальный расчетный расход превышает приведенные значения, необходимо принятие мер по недопущению опасного размыва грунта в конце укреплений. Такой мерой, в соответствии с рекомендациями, приведенными в [2], может являться устройство каменной рисбермы или устройство укрепления в виде каменной наброски.

В условиях Ямала устройство рисбермы, по нашему мнению, нецелесообразно, поскольку это сооружение сравнительно дорогое, многодельное и требует существенных затрат каменного материала. Более рациональным представляется устройство каменной наброски в выходном русле (рис. 2).

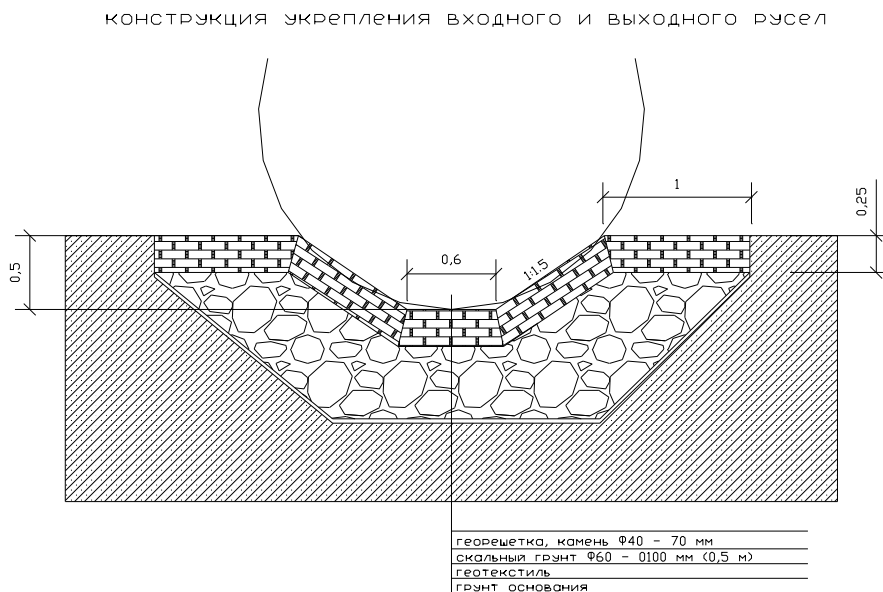


Рис. 2. Конструкция укрепленной канавы на входе и выходе из труб

На основе данных расчетов глубин размыва в конце укреплений выходных русел труб необходимо было выполнить расчеты, подтверждающие обоснованность предлагаемой меры. Для этого сначала определяют, является ли наброска условно однородной в отношении размыва из соотношения

$$d_{\max}/d_n \leq 2, \quad (12)$$

где $d_{\max}$ — средний диаметр крупных частиц, которые составляют не менее 5 % от общей массы наброски, мм; d_n — средний диаметр частиц наброски, мм.

В дальнейших расчетах наброска считалась условно однородной, поскольку в этом случае конструкция получается более экономичной благодаря меньшему использованию камня. Для однородной наброски минимальный диаметр частиц, при которых она будет устойчивой к размыву, составляет:

$$d_{n(\text{доп})} \geq (v_{\text{вых}} K_{\text{ог}})^2 / 43, \quad (13)$$

где $v_{\text{вых}}$ — скорость на выходе из сооружения; $K_{\text{ог}}$ — коэффициент, учитывающий влияние оголовка на размывающую скорость для частиц наброски. Для безоголовочной трубы $K_{\text{ог}} = 1$, для труб с портальными и раструбными оголовками $K_{\text{ог}} = 0,8$. Для труб с воротниковыми оголовками величина данного коэффициента в литературе не приводится. Однако, учитывая, что по степени влияния оголовков на режим протекания в трубах воротниковые оголовки занимают промежуточное положение между безоголовочными трубами и портальными оголовками, величину данного коэффициента можно принять для них равной 0,9.

Вычисленные значения скорости потока позволили определить крупность частиц каменной наброски (табл. 5).

Таблица 5

Допускаемые размеры частиц однородной каменной наброски при различных скоростях излива воды из трубы

$v_{\text{вых}}, \text{ м/с}$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
$d_{\text{н(доп)}}, \text{ м}$	0,08	0,12	0,17	0,23	0,30	0,38	0,47	0,57	0,68	0,80	0,92	1,06	1,21	1,36

Таким образом, для предотвращения размыва наброски, крупность камня должна быть не менее указанной в табл. 5 с учетом скорости излива воды из трубы.

Предельную глубину деформации укрепления за счет выноса мелкозема из-под него определяют по формуле (для однородной наброски):

$$\Delta h_{\text{пр(л)}} = 0,85D_{\text{э}}(d_{\text{н}}/d)^{1/8} - 1,93\delta + 2D_{\text{э}}(1,15v_{\text{вых}}K_{\text{ог}}/(gD_{\text{э}})^{0,5} - 1), \quad (14)$$

где δ — толщина наброски, м.

Таблица 6

Значения предельных деформаций каменной наброски труб 2,6 и 3,0 м

$v_{\text{вых}}, \text{ м/с}$	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50
$d = 2,60$	—	—	—	—	0,12	0,65	1,19	1,72	2,25	2,79	3,32	3,85	4,38	4,92
$d = 3,00$	—	—	—	—	0,01	0,58	1,15	1,73	2,30	2,87	3,44	4,02	4,59	5,16

Как видно из данных табл. 5 и 6, режимы протекания, характеризующиеся скоростью потока более 4,5 м/с, являются неблагоприятными ввиду опасности размыва каменной наброски. Поэтому авторами для укрепления выходных русел была предложена комбинированная конструкция, включающая георешетку, ячейки которой заполнены каменным материалом (см. рис. 2).

Назначение ширины укрепления с верховой стороны производилось на основе расчета, выполненного по методике, изложенной в [2]. При назначении ширины укрепления скорость течения воды по оси подводящего лога определялась по формуле

$$v_{\text{ось}} = v_{\text{л}} + (1,2v_{\text{р}} - v_{\text{л}})e^{(-x/b_{\text{р}})}, \quad (15)$$

где $v_{\text{л}}$ — скорость на оси потока в рассматриваемом створе, соответствующая равномерному течению, м/с; $v_{\text{р}}$ — средняя скорость потока в расчетном створе, м/с; x — расстояние от расчетного сечения до рассматриваемого створа (для расчета укрепления откоса x принимается равным 0), м; $b_{\text{р}}$ — ширина расчетного сечения, м.

В свою очередь, скорость на оси потока в рассматриваемом створе, соответствующая равномерному течению, определяется по формуле

$$v_{\text{л}} = Q/(H_{\text{л}}(B'_{\text{л}} - 0,25H_{\text{л}}m_{\text{от}})), \quad (16)$$

где Q — расход воды, м³/с; $H_{\text{л}}$ — глубина потока по оси сооружения при отметке подпертого уровня в рассматриваемом створе, м; $B'_{\text{л}}$ — средняя ширина лога в рассматриваемом створе, м; $m_{\text{от}}$ — коэффициент заложения откоса (0,5 для труб 268, 271 и 290 км).

Средняя скорость потока в расчетном створе определяется по формуле

$$v_{\text{р}} = Q/(H_{\text{р}}b_{\text{р}}), \quad (17)$$

где $H_{\text{р}}$ — глубина потока в расчетном сечении, м.

Глубина потока по оси сооружения при отметке подпертого уровня в рассматриваемом створе определяется по формуле

$$H_{\text{л}} = H - (i_{\text{л}}x + i_{\text{р}}l_{\text{р}}), \quad (18)$$

где H — подпертая глубина, м; $i_{\text{л}}$, $i_{\text{р}}$ — уклоны лога и оголовка; $l_{\text{р}}$ — длина

оголовка, м; $\omega_{\text{л}}$ — площадь сечения потока в рассматриваемом створе при глубине $H_{\text{л}}$, м².

Средняя ширина лога в рассматриваемом створе определяется по формуле

$$B'_{\text{л}} = \omega_{\text{л}} / H_{\text{л}}. \quad (19)$$

Скорость течения v , м/с, в точке рассматриваемого створа, расположенной на расстоянии y , м, от оси трубы, определяется по формуле

$$v = v^* - (v^* - v_{\text{ст}})((2y/b_{\text{р}}) - 1)/((b_{\text{дн}}/b_{\text{р}}) - 1), \quad (20)$$

где $b_{\text{дн}}$, $b_{\text{р}}$ — ширины лога по дну и по урезу соответственно, м; v^* , $v_{\text{ст}}$ — скорости потока при $y = b_{\text{р}}/2$ и $y = b_{\text{дн}}/2$ соответственно, м/с.

Скорости потока v^* и $v_{\text{ст}}$ определяются по формулам:

$$v^* = v^{*''} + (v^{*'} - v^{*''})(1 - 2x/B_{\text{л}})^5, \quad (21)$$

$$v_{\text{ст}} = v_{\text{ст}}'' + (v_{\text{ст}}' - v_{\text{ст}}'')(1 - 2x/B_{\text{л}})^2, \quad (22)$$

где $v_{\text{ст}}'$ — определяется по формуле

$$v_{\text{ст}}' = v^{*'}(B_{\text{л}} - b_{\text{дн}})/(B_{\text{л}} - b_{\text{р}}), \quad (23)$$

где $v^{*'} = 0,5v_{\text{р}}$.

Расчетная скорость $v^{*''}$ определяется по формуле

$$v^{*''} = (v_{\text{л}} B'_{\text{л}} - 2b_{\text{р}} v_{\text{ось}}/3)/(B_{\text{л}}' - 2b_{\text{р}}/3 - H_{\text{л}} m_{\text{от}}/4), \quad (24)$$

где $v_{\text{ось}}$ определена из условия $x = 0,5B_{\text{л}}$.

Методика определения ширины укрепления заключается в последовательном расчете скоростей потока воды (v , м/с) при различных значениях расстояния от оси трубы до створа (y , м). При получении величины скорости, соответствующей допускаемой по условиям размыва, равной 1 м/с, назначают ширину укрепления с запасом, равным 1 м в каждую сторону от оси трубы.

Допускаемая скорость определяется по формуле

$$v_{\text{доп}} = 6,6k_{\text{от}}(d_{\text{н}})^{0,5}, \quad (25)$$

где $d_{\text{н}}$ — размер фракции однородной наброски (0,05 м); $k_{\text{от}}$ — коэффициент снижения устойчивости:

$$k_{\text{от}} = (1 - (m_{\text{о}}/m_{\text{от}})^2)^{0,25}, \quad (26)$$

где $m_{\text{о}}$, $m_{\text{от}}$ — коэффициенты заложения естественного откоса (1,2) и откоса насыпи. При указанных значениях $m_{\text{о}}$, $m_{\text{от}}$ величина $k_{\text{от}}$ составляет 0,894, а величина допускаемой скорости $v_{\text{доп}} = 1,32$.

В табл. 7 приведены значения расчетных ширин укрепления откосов (b) для труб, построенных на 268, 271 и 290 км соответственно.

Таблица 7

Расчетные величины ширины укрепления откосов насыпей возле входных отверстий водопропускных труб (с учетом уширения на 1 м в каждую сторону)

№ п/п	км	Q , м ³ /с	$v_{\text{ось}}$, м/с	$B_{\text{л}}'$, м	$B_{\text{л}}$, м	$H_{\text{р}}$, м	y , м	v , м/с	b , м
1	268	5,67	4,61	14	20	0,75	4,0	1,30	6,0
2	271	12,8	6,36	18	28	1,18	7,0	1,27	9,0
3	290	9,66	5,02	25	38	1,13	5,3	1,29	7,5

На основании выполненных расчетов укрепления русел и откосов насыпи можно сделать следующие выводы. Скорости водного потока на выходе из обследованных водопропускных труб в режиме пропуска расчетных расходов могут быть значительными и при отсутствии укрепления повлекут размыв местного грунта в основании, опасный для эксплуатируемых сооружений. Так, например, для трубы 268 км при расчетном расходе в водотоке, равном 5,67 м³/с, и фактическом уклоне 0,01 скорость на выходе будет равна 3,84 м/с.

Размыв основания выходного русла при указанных параметрах водотока составит 0,85 м. Для трубы 271 км при расчетном расходе $12,8 \text{ м}^3/\text{с}$ и фактическом уклоне 0,015 скорость воды будет равна $5,30 \text{ м/с}$, а глубина размыва составит 1,44 м. Для трубы 290 км при расчетном расходе $9,66 \text{ м}^3/\text{с}$ и фактическом уклоне 0,003 скорость воды на выходе будет равна $4,18 \text{ м/с}$, а глубина размыва — 1,20 м.

Таким образом, с целью предотвращения размыва требуется укрепление выходных русел в виде каменной наброски толщиной до 0,7 м. Для труб, скорость воды на выходе из которых менее 4 м/с , толщина наброски может быть уменьшена до 0,5 м.

Для усиления защитных свойств наброски и уменьшения потребности в камне крупных фракций предлагается верхний слой наброски толщиной 0,2...0,25 м армировать георешеткой с заполнением ее ячеек камнем фракции 40...70 мм (см. рис. 2).

Для труб, скорость воды на выходе из которых превышает $4,5 \text{ м/с}$, в качестве меры, уменьшающей опасность суффозионного выноса мелкозема из грунта основания, предлагается устройство по низу наброски разделительного слоя из геотекстиля. С целью повышения надежности укрепления выходного русла в ее конце предлагается устройство упорного зуба с заглублением в грунт основания на 1 м (рис. 3).

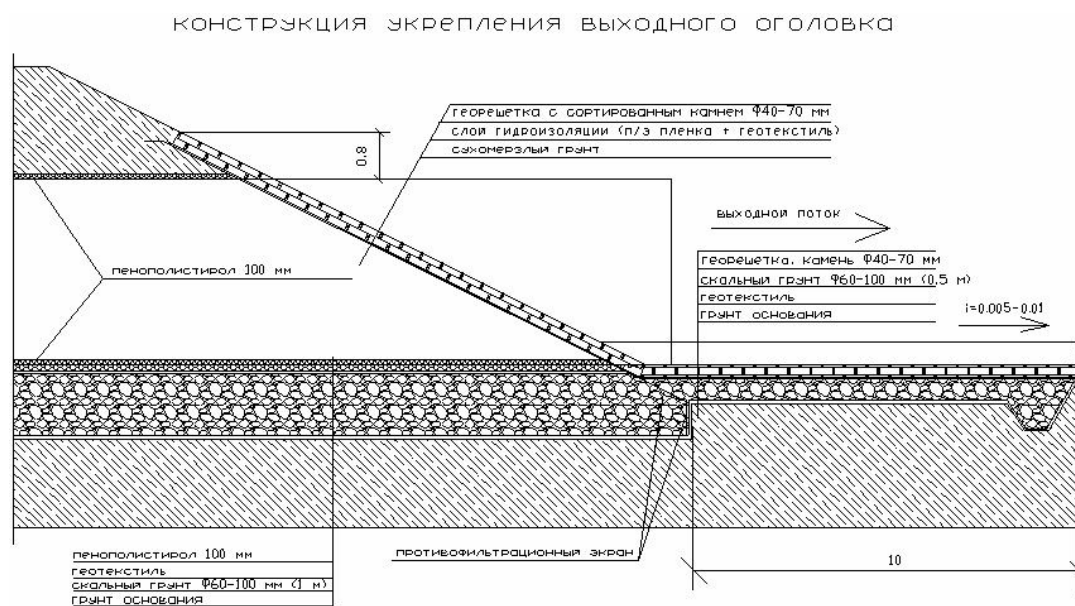


Рис. 3. Конструкция укрепления выходного оголовка трубы

Ширину укрепления откоса насыпи возле труб на входе рекомендуется назначать на основании расчета, но не менее 4 м в каждую сторону от оси трубы. На выходе из трубы ширину укрепления следует назначать конструктивно, но также не менее 4 м в каждую сторону от оси трубы. При ширине лога, превышающей ширину укрепления, необходимо предусмотреть со стороны входного и выходного оголовков защиту насыпи от подтопления и, как следствие, развития термокарста вблизи подошвы насыпи. В качестве такой меры может служить отсыпка на всю ширину лога водозащитных берм из местного грунта высотой на 1 м выше уровня высокой воды (2 % повторяемости)

с шириной по верху не менее 4 м и приданием верху бермы уклона в полевую сторону, равного $1/20 \dots 1/30$.

По материалам обследований и наблюдений на водотоках Ямала установлено, что в естественных условиях образование наледей, как правило, не происходит. Причинами тому являются: отсутствие зимнего стока из-за срабатывания питающего источник бассейна, промерзание малodeбитных водотоков по всей длине или наличие мощного снежного покрова (особенно в долинах рек), препятствующего промерзанию постоянных водотоков. Поэтому мероприятия по задержанию наледей перед водопропускными сооружениями не рассматриваются, поскольку очагами наледеобразования являются сами трубы. Авторами были предложены инженерные способы, обеспечивающие уменьшение теплопотерь водотоком и организованное протекание его по участку.

Первым вариантом являются сооружения, выполненные в виде углубленной открытой канавы, обеспечивающей сосредоточенное протекание водотока на рассматриваемом участке. Теплотехнические расчеты показали, что при имеющихся условиях функционирования водотоков (температура воды 0° , высокий снежный покров), обеспечить его безналедное протекание за счет уменьшения ширины русла представляется возможным в начале зимы (ноябрь) только с расходами водотоков свыше 70 л/с, а при формировании снежного покрова высотой свыше 1,5 м безналедный пропуск по канавам возможен на всех рассматриваемых объектах. Конструкция потивоналедных канав представлена на рис. 2. Таким образом, устройство противоналедных канав целесообразно на водотоках с зимним расходом свыше 70 л/с, а также на трубах с высоким снежным покровом (наличие снега в трубе) на периодически действующих водотоках (лето, начало зимы), где противоналедные канавы сведут к минимуму размеры образующихся наледей.

Вторым вариантом, принятым к разработке, рассмотрен безналедный пропуск водотока в закрытых утепленных лотках (рис. 4).

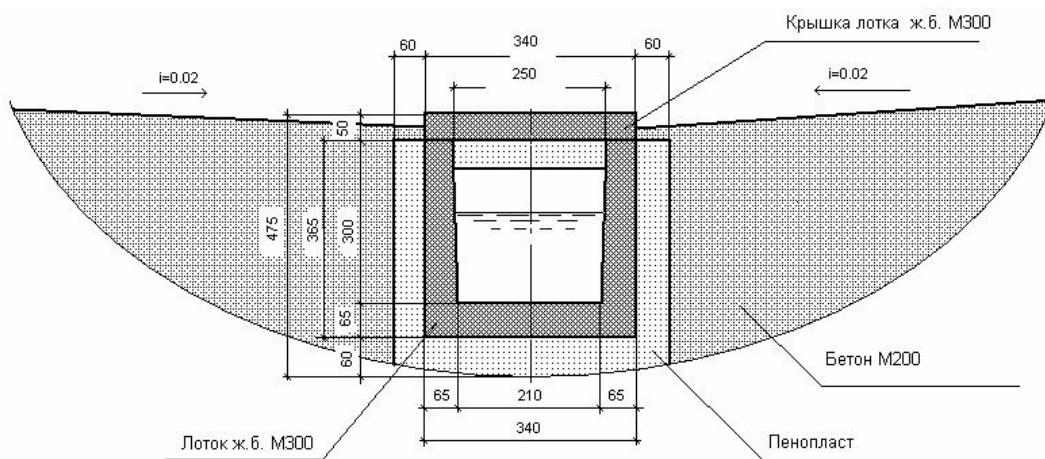


Рис. 4. Конструкция утепленного лотка в трубе

Конструкция лотков, их размеры и материал выбираются в зависимости от характеристик водотока и возможностей строителей. Размеры внутреннего сечения лотка из-за условия его очистки и пропуска меженных вод должны быть не менее $0,2 \times 0,3$ м. Принятый в расчетах лоток способен пропустить 65 л/с при

уклоне 0,01, что является достаточным для многих объектов. Утепление лотка выполнено пенопластом толщиной 60 мм. Понижение температуры водотоком на длине 50 м и расходом свыше 6 л/с составит не более 0,01 °С, что вполне допустимо. При малых зимних расходах (1 л/с и менее) понижение температуры воды составит 0,1 °С и более и может привести к наледообразованию. Поэтому на малобежитных водотоках надо проектировать трубы с учетом частичного их заполнения наледью.

Таким образом, противоналедные сооружения по второму варианту найдут применение на постоянных малобежитных водотоках, а также на объектах, где необходимо предохранить основание трубы от деградации многолетней мерзлоты протекающим водотоком.

Библиографический список

1. *Особенности* проектирования и строительства транспортных сооружений в условиях сурового климата. М.: ЦНИИС, 1992. 103 с.
2. *Пособие* по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений / ВНИИ транспортного строительства (ЦНИИС), главное управление проектирования и капитального строительства (ГУПиКС) Минтрансстроя СССР. М.: Транспорт, 1992. 408 с.
3. *Методические* указания по проектированию и расчету противоналедных устройств и дорожных сооружений на наледных участках. М.: Союздорнии, 1974. 88 с.
4. *Проектирование*, строительство и эксплуатация противоналедных сооружений и устройств. ВСН 210–91. М., 1992. 137 с.
5. *Альбом* конструкций противоналедных сооружений и устройств / НИИТС. М., 1994. 126 с.
6. *Обследование* малых искусственных сооружений (труб) на ж.-д. линии Обская—Бованенково: заключительный отчет по НИР / ЗАО СибЦНИИТС, рук. А.С. Потапов. Новосибирск, 2003.