ОДМ 218.2.110-2020

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

РОСАВТОДОР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКИМ РАСЧЕТАМ СПИРАЛЬНОВИТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1. РАЗРАБОТАН: Обществом с ограниченной ответственностью «Мегатех инжиниринг» совместно с Обществом с ограниченной ответственностью «ДорГеоТех» в соответствии с государственным контрактом от 18.02.2019 № ФДА 47/12

2. ВНЕСЕН: Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства

3. ИЗДАН распоряжением Федерального дорожного агентства от «11» сентября 2020 г. № 2849-р

4. ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

5. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© Издательство ФГУП «Информавтодор», 2020 г.

Содержание

1 Область применения. ... 1
2 Нормативные ссылки ... 1
3 Термины, определения ... 1
4 Общие положения ... 2
5 Классификация водопропускных труб на автомобильных дорогах общего пользования ... 3
6 Гидравлические расчеты равнинных труб. ... 3
6.1. Исходные данные ... 3
6.2. Порядок расчета. ... 4
7 Гидравлические расчеты косогорных труб ... 11
8 Гидравлические расчеты нижнего бьефа ... 12
8.1. Классификация выходных русел и принципы их расчета ... 12
8.2. Определение гидравлических характеристик потока на укреплении. 16
8.3. Расчеты размыва ... 22
8.4. Назначение основных размеров выходных русел ... 31
8.5. Особенности гидравлического расчета выходных русел с укреплениями из каменной наброски ... 33
8.6. Выходные русла гофрированных труб, расположенных на подсыпке42
9 Гидравлические расчеты труб, расположенных каскадом. ... 52
Приложение А Пример назначения отверстия и определения пропускной способности спиральновитых металлических гофрированных труб ... 54
Приложение Б Пример расчета выходного русла с укреплениями из связанных между собой элементов (бетонных) ... 57
Приложение В Пример расчетов выходных русел с укреплениями из каменной наброски ... 61
Приложение Г Пример расчета нижнего бьефа гофрированных труб, расположенных на подсыпке ... 65
Библиография ... 74

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

Методические рекомендации по гидравлическим расчетам спиральновитых металлических гофрированных труб

1 Область применения.

Настоящий отраслевой дорожный методический документ распространяется на водопропускные трубы автомобильных дорог и содержит методику гидравлических расчетов водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб с размерами гофра 125 х 26 мм и 68 х 13 мм.

2 Нормативные ссылки

В настоящем методическом документе использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ТР ТС 014/2011 Технический регламент Таможенного союза "Безопасность автомобильных дорог"

ГОСТ 32871-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Трубы дорожные водопропускные. Технические требования

ГОСТ Р 58654-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Трубы металлические гофрированные спиральновитые. Технические условия

СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*

СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*

СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция. СНиП 2.05.03-84*

СП 100.13330.2016 Мелиоративные системы и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85

3 Термины, определения

В настоящем ОДМ применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **гидравлические расчеты:** комплекс расчетных действий с целью определения основных конструктивных и геометрических характеристик водопропускного сооружения.

3.2 **отверстие трубы:** диаметр по внутренней поверхности трубы.

3.3 **гидрологические характеристики:** кличественные оценки элементов гидрологического режима.

3.4 **расчетный расход:** расход воды заданной вероятности превышения, принимаемый в качестве исходного значения для определения параметров проектируемого сооружения.

3.5 **пропускная способность:** способность трубы пропустить расчетный расход.

3.6 **подпор:** местное повышение уровня воды в реке вследствие стеснения потока водопропускным сооружением, изменяющего естественные условия протекания.

3.7 **безнапорный режим:** движение потока жидкости со свободной поверхностью; определяется постоянным давлением на свободную поверхность, обычно равным атмосферному.

3.8 **коэффициент шероховатости:** величина, численно характеризующая сопротивление, оказываемое поверхностью трубы протекающему потоку, интегральная характеристика гидравлических сопротивлений.

3.9 **критическая глубина:** глубина потока, при которой удельная энергия сечения для заданного расхода достигает минимального значения.

3.10 **нижний бьеф:** бьеф с низовой стороны водоподпорного сооружения. (бьеф - часть водотока, примыкающая к водоподпорному сооружению).

4 Общие положения

4.1 Настоящий ОДМ рекомендуется применять при проектировании нового строительства, реконструкции и ремонта водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб на автомобильных дорогах общего пользования.

4.2 В результате гидравлических расчетов водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб должны быть назначены основные размеры сооружения, обеспечивающие пропуск воды, надёжность конструкции трубы, оголовков, русел и насыпи, реализация которого обеспечивает выполнение требований ГОСТ 32871, ГОСТ Р 58654, ТР ТС 014/2011, СП 35.13330.2011, СП 34.13330.2012, а также требования [1], [2].

4.3 Для водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб следует предусматривать безнапорный режим работы.

5 Классификация водопропускных труб на автомобильных дорогах общего пользования

Водопропускные трубы являются наиболее распространенным типом малых водопропускных сооружений. Ниже представлена классификация водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб [3].

По условиям гидравлической работы:

- равнинные трубы;
- косогорные трубы.

По характеру шероховатости внутренней поверхности:

- с гладким лотком;
- гофрированные, без лотка.

По влиянию длины трубы на пропускную способность:

- «короткие» в гидравлическом отношении;
- «длинные» в гидравлическом отношении.

6 Гидравлические расчеты равнинных труб

6.1. Исходные данные

Для проведения гидравлических расчетов необходимы следующие исходные данные:

- расчетный расход;

- объем стока для гидрографа с наибольшим расходом;
- топографический план и поперечный профиль автодороги в месте проектируемой водопропускной трубы;
- информация о наличии существующих водопропускных сооружений на рассматриваемом водотоке;
- Расчетный расход принимается с вероятностью превышения по СП 35.13330.2011:
- для автомобильных дорог I категории – 1%;
- для автомобильных дорог II, III, III-п, III-с категорий и городских дорог – 2 %;
- для автомобильных дорог IV, IV-п, V категорий и внутренних хозяйственных дорог – 3 %;
- В районах с развитой сетью автомобильных дорог для труб при технико-экономическом обосновании вероятность превышения допускается принимать 2 вместо 1 %, 3 вместо 2 %, 5 вместо 3 %, а для труб на дорогах II-с и III-с категорий – 10 %.

Возвышение высшей точки внутренней поверхности трубы в любом поперечном сечении над поверхностью воды в трубе при максимальном расходе расчетного паводка и безнапорном режиме работы должно быть в свету, согласно СП 35.13330.2011 в круглых трубах высотой до 3,0 м – не менее 1/4 высоты трубы, свыше 3,0 м – не менее 0,75 м.

При определении глубины размыва и размеров укреплений расчетные расходы (для учета флуктуации исходных данных) увеличиваются на 30%.

6.2. Порядок расчета

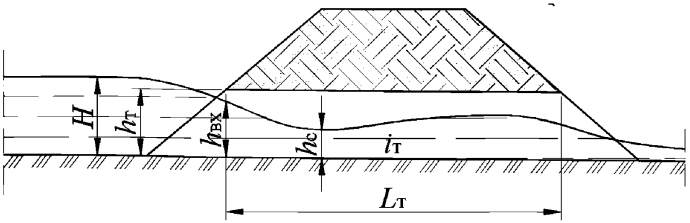
6.2.1. Минимальный диаметр трубы D, м, определяется по следующей формуле (1) [4]:

$$D = \left(\frac{Q_{\text{р}}}{\Pi_Q \sqrt{g}}\right)^{2/5}, \qquad (1)$$

где $Q_р$ – расчетный расход принятой вероятности превышения, м^3/с;

$П_Q$ – параметр расхода, принимаемый по таблице 1;

g – ускорение свободного падения, м/с^2.



H – подпор, $h_т$ – высота трубы, $h_{вх}$ – глубина воды на входе, $h_с$ – глубина в сжатом сечении, $i_т$ – уклон трубы, $L_т$ – длина трубы

Рисунок 1 – Схема протекания воды в трубе при безнапорном режиме

Параметр расхода $П_Q$ принимается по таблице 1 для соотношения $\frac{h_{вх}}{D} \leq 0,75$ (условие безнапорного режима работы) в зависимости от принятого типа оголовка.

Таблица 1 – Значение параметра расхода труб

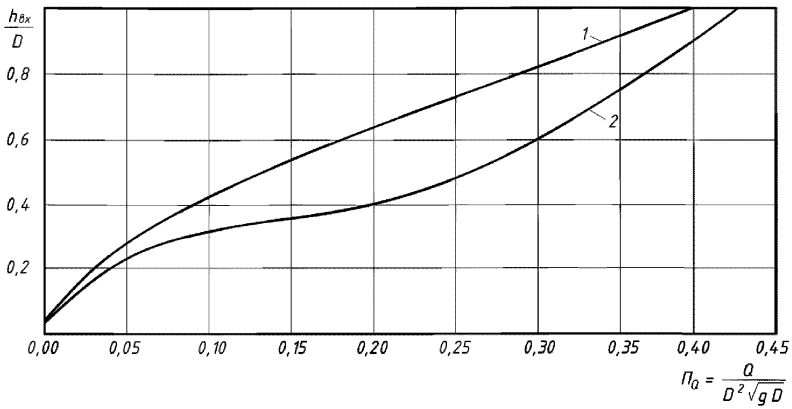
Формула параметра расхода $П_Q$	Заполнение входного сечения $\frac{h_{вх}}{D}$	Значение параметра расхода труб при типах входных оголовков		
		Без оголовка (вертикальный срез)	Без оголовка (срез параллельно откосу)	Портальный с конусами
$\frac{Q}{D^2\sqrt{gD}}$	0,75	0,275	0,355	0,275
	1,0	0,415	-	0,440

Вычисленный по формуле (1) диаметр D округляется в большую сторону до 0,1 и принимается с учетом требований СП 35.13330.2011 о минимальном отверстии трубы.

6.2.2. В зависимости от принятого диаметра уточняется параметр расхода по формуле (2):

$$П_Q = \frac{Q_р}{D^2\sqrt{gD}}. \quad (2)$$

6.2.3. Определяется глубина воды на входе в трубу по графику на рисунке 2.



1 – без оголовка с вертикальным срезом; 2 – без оголовка со срезом параллельно откосу насыпи

Рисунок 2 – График для определения глубины потока на входе в трубу

6.2.4. Определяется тип трубы в гидравлическом отношении:

Для определения типа трубы в гидравлическом отношении необходимо определить критический уклон по формуле (3):

$$i_{кр} = \frac{Q_р^2}{\omega_к^2 C_к^2 R_к} = \frac{g\chi_к}{\alpha C_к^2 b_к}, \quad (3)$$

где $Q_р$ – расчетный расход, м^3/с;

$\omega_к$ – площадь живого сечения потока (м^2) при критической глубине $h_к$, м;

$b_к$ – средняя ширина потока при критической глубине $h_к$, $b_к = \omega_к / h_к$,определяется по графику (рисунок 4), м;

$R_к$ – гидравлический радиус сечения потока при критической глубине $h_к$, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

α – коэффициент Кориолиса, принимаемый равным 1,1;

$\chi_к$ – смоченный периметр сечения потока при критической глубине $h_к$, м;

$C_к$ – коэффициент Шези, определяемый по формуле Павловского (4):

$$C_к = \frac{1}{n} R_к^y, \quad (4)$$

где

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R_к}\left(\sqrt{n} - 0.1\right), \quad (5)$$

где n – коэффициент шероховатости, принимаемый по таблице 2.

Таблица 2 – коэффициенты шероховатости СВМГТ

Размер гофра СВМГТ, мм	125х26	68х13	Другие
Коэффициент шероховатости (n)	0,0254	0,0203	0,030

При наличии гладкого лотка n определяется по формуле (6):

$$n = \sqrt{\frac{\chi_{лот} \cdot n_{лот}^2 + \chi \cdot n^2}{\chi_{лот} + \chi}}, \quad (6)$$

где $\chi_{лот}$, χ – части смоченного периметра сечения трубы, занимаемые лотковой частью и гофром соответственно, м;

$n_{лот}$, n – коэффициенты шероховатости материала лотка ($n_{лот}$=*0,015)* и трубы соответственно (таблица 2).

Критическая глубина потока определяется по графику на рисунке 3.

6.2.5. В зависимости от влияния длины трубы на пропускную способность различают «короткие» и «длинные» трубы. У «коротких» труб сжатое сечение не затоплено $h_с < h_к$, и общая длина их не оказывает влияния на пропускную способность. В «длинных» трубах сжатое сечение затоплено $h_с > h_к$, и на протяжении всей длины трубы сохраняется спокойный поток, вследствие чего сопротивления по длине трубы влияют на пропускную способность:

- при $i_Т \geq i_{кр}$, а также, с некоторым приближением, при $i_Т < i_{кр}$ в случае, если $l_Т/D \leq 20$ труба считается гидравлически «короткой»;

- при $i_Т < i_{кр}$ в случае, если $l_Т/D \geq 20$ труба считается гидравлически «длинной».

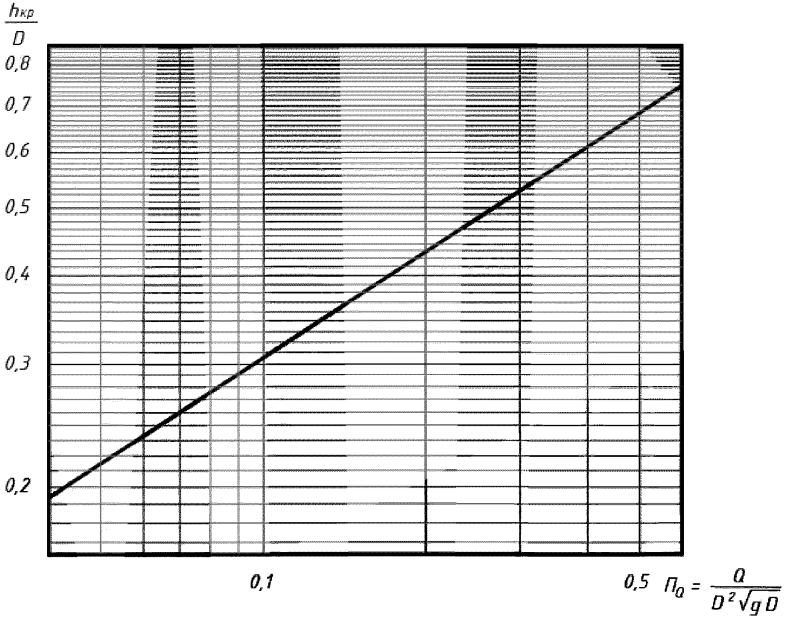


Рисунок 3 – График для определения критической глубины потока

6.2.6. Подпор перед гидравлически «короткой» трубой определяется по формуле (7):

$$H_{\text{кор}} = \left(\frac{Q_{\text{р}}}{m b_{\text{к}} \sqrt{2g}}\right)^{2/3}, \qquad (7)$$

где m – коэффициент расхода при совершенном сжатии потока на входе, m=0,33;

$b_{\text{к}}$ – средняя ширина потока в сечении с критической глубиной определяется по графику на рисунке 4.

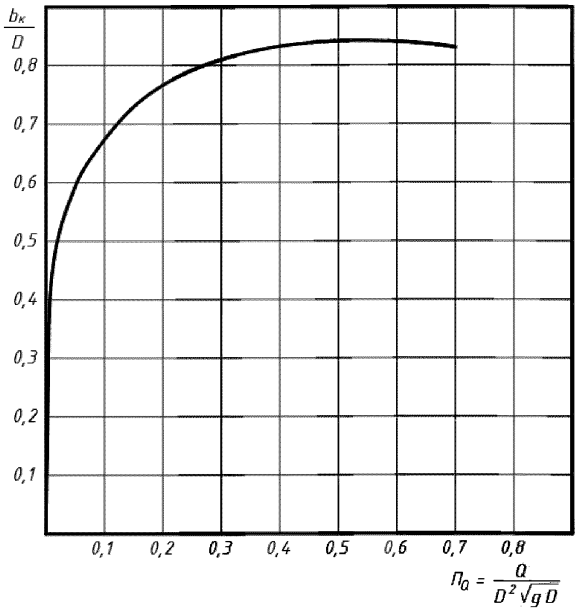


Рисунок 4 – График для определения средней ширины потока в сечении с критической глубиной в СВМГТ

Значение коэффициента расхода, указанное выше, приведено для уклона трубы $i_Т$ = 0,01. При уклоне, отличном от 0,01, для более точного расчета значение m следует увеличивать при $i_Т$ >0,01 или уменьшать при $i_Т$ <0,01 на 2% на каждую 0,01 уклона.

6.2.7. Подпор перед гидравлически «длинной» трубой в безнапорном режиме определяется по формуле (8):

$$\frac{H_{дл}}{D} = \frac{H_{кор}}{D} + 0.005\left(\frac{l_Т}{D} - 20\right)\left(\frac{H_{кор}}{D}\right)^2, \quad (8)$$

где $H_{кор}$ – подпертая глубина перед аналогичной гидравлически «короткой» трубой, м.

6.2.8. Выполняются следующие проверки уровня подпора:

а) возвышение бровки земляного полотна по продольному профилю трассы в границах бассейна водосбора: не менее чем на 0,5 м;

б) отсутствие перелива воды в соседний бассейн – проверяется по поперечному профилю земляного полотна автодороги в местах водоразделов;

в) при наличии вблизи труб инженерных сооружений, зданий и сельскохозяйственных угодий необходимо проверить их безопасность от подтопления вследствие подпора воды перед сооружением, при этом целесообразно проверить влияние повышенного уровня грунтовых вод;

г) при наличии в непосредственной близости автомобильной или железной дороги с водопропускным сооружением, расположенном на том же водотоке, проверить взаимное влияние уровней подпертых вод на режим работы соседнего сооружения. Расчет взаимного влияния труб, расположенных каскадом, приведен в главе 9.

В случае невыполнения проверок производится увеличение отверстия трубы, и расчет повторяется.

6.2.9. Определяется глубина воды на выходе из трубы по формуле (9) либо по графику (рисунок 5):

$$\frac{h_{\text{вых}}}{D} = \frac{0.54}{i_{\text{т}}^{0.1}} \Pi_Q^{0.6}. \qquad (9)$$

6.2.10. Скорости на выходе из труб $\upsilon_{\text{вых}}$, м/с, определяются по формуле (10):

$$\upsilon_{\text{вых}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вых}}}, \qquad (10)$$

где Q – расчетный расход, м^3/с;

$\omega_{\text{вых}}$ – площадь живого сечения потока на выходе из трубы, м^2.

6.2.11. Пропускную способность гофрированных многоочковых труб при условии их раздвижки на величину не менее 0,25D определяют как сумму отдельно работающих одноочковых труб. Расчет многоочковых труб аналогичен расчету одноочковых, при этом расход каждой трубы принимают $Q = \frac{Q_{\text{р}}}{N_{\text{т}}}$, где $N_{\text{т}}$ – число труб.

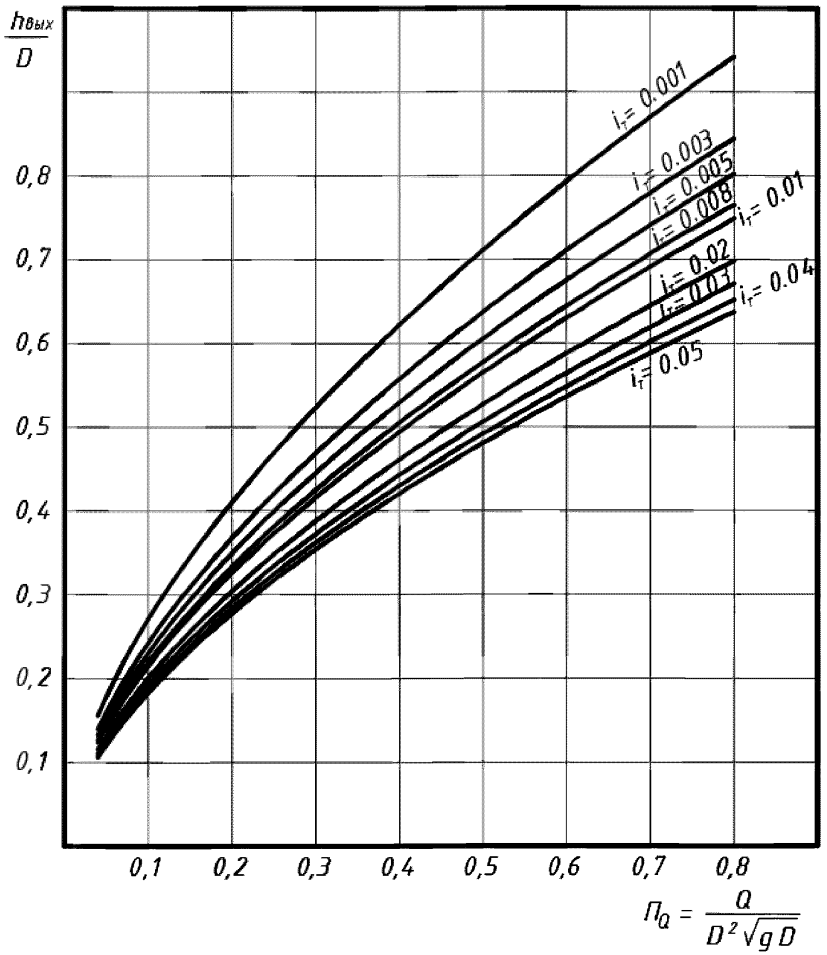


Рисунок 5 – График для определения глубины потока на выходе из трубы

7 Гидравлические расчеты косогорных труб

К косогорным относятся трубы, устраиваемые при пересечении дорогами логов и водотоков со средним уклоном на участке трубы, от 0,02 и более. Укладку металлических гофрированных труб рекомендуется производить с уклонами не более 0,03. Для обоснования индивидуальных проектных решений по увеличению уклона СВМГТ свыше 0,03 до 0,05 необходимо выполнять технико-

экономические расчеты. Уклон по лотку СВМГТ не должен превышать 0,05 [1].

На косогорах СВМГТ надлежит укладывать на естественное основание с уклоном, близким уклону лога, либо на отсыпке земляного полотна из скального грунта, устойчивого против выветривания в теле насыпи, с расположением выхода из трубы выше дна лога с устройством бермы из скального грунта.

Исходя из этого, возможны несколько вариантов проектирования косогорных труб:

1) трубы уложены на местности с уклоном более 0,02 до 0,03, на входе в которые поток находится в спокойном состоянии. Это возможно либо при отсутствии подводящих быстротоков, либо при наличии за быстротоком перед трубой водоприемного колодца. Для такого типа косогорных труб пропускная способность определяется как для равнинных (глава 6);

2) при больших уклонах лога трубы укладывают на подсыпке со сбросом потока на укрепленные откосы насыпи или на отсыпку из камня, расположенную в низовой части насыпи. Пропускная способность определяется как для равнинных (глава 6). Отличие заключается в расчетах нижнего бьефа (раздел 8.6).

8 Гидравлические расчеты нижнего бьефа

8.1. Классификация выходных русел и принципы их расчета

8.1.1. Под расчетами нижнего бьефа дорожных водопропускных сооружений понимают расчет комплекса устройств, находящихся за выходными оголовками труб. Эти устройства будут в дальнейшем определены как выходные русла в отличие от естественного выходного лога. Выходные русла включают укрепления с концевыми частями, гасители и каменную наброску [4].

8.1.2. При расчете нижних бьефов могут встретиться два основных случая:

- выходное русло размываемое, т.е. сопряжение его с бытовым логом происходит с образованием воронки размыва в конце сравнительно короткого укрепления;
- выходное русло неразмываемое на всем протяжении потока до створа с бытовыми характеристиками. В этом случае за выходным сечением сооружения устраивают укрепленный канал.

Наиболее распространенным в практике проектирования является размываемое выходное русло.

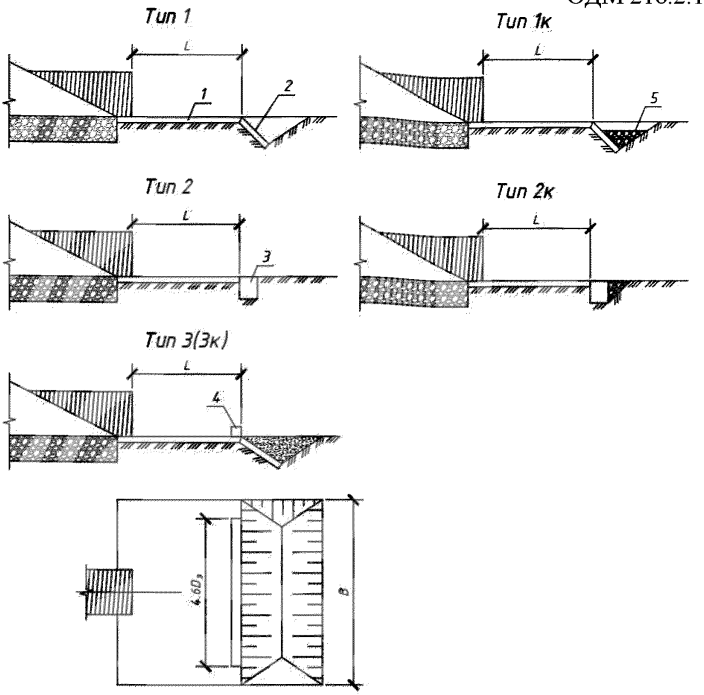
8.1.3. Выходные русла, которые используются или могут быть использованы в малых дорожных водопропускных сооружениях, по характеру связи между элементами делят на две основные группы:

- с укреплениями из связанных между собой элементов;
- с укреплениями из не связанных между собой элементов.

В свою очередь по возможности деформаций под воздействием потока выходные русла первой группы подразделяются на следующие: выходные русла с жесткими (недеформируемыми) укреплениями; выходные русла с гибкими (деформируемыми) укреплениями.

В качестве примеров выходных русел из связанных между собой элементов с жесткими недеформируемыми укреплениями можно привести выходные русла из монолитного бетона, омоноличенных бетонных или железобетонных плит, блоков и мощения. Примером выходных русел той же группы, но с гибкими деформируемыми укреплениями, могут служить габионные конструкции.

Выходные русла из не связанных между собой элементов в основном имеют укрепления из каменной наброски, состоящей как из однородных, так и неоднородных элементов. Можно также использовать и специально изготовленные не связанные между собой элементы из достаточно прочных морозостойких материалов. Сюда же относятся выходные русла без укреплений.



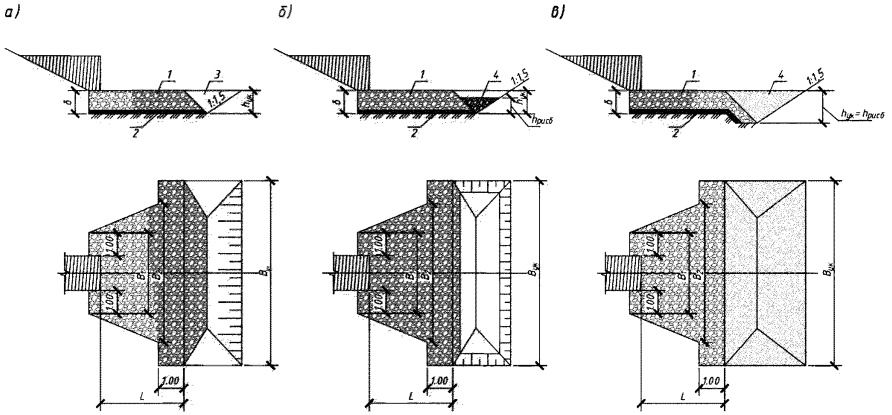
1 – укрепление; 2 – предохранительный откос; 3 – вертикальная стенка; 4 – ребро в конце укрепления; 5 – каменная наброска

Рисунок 6 – Типы выходных русел

8.1.4. Для расчета все выходные русла, приведенные в классификации, должны быть отнесены к определенному типу, позволяющему конкретизировать расчетную схему, устанавливать гидравлические характеристики (глубины и скорости) и определить возможность деформаций укрепления и глубину размыва за ним.

8.1.5. Для защиты нижних бьефов от размыва при применении выходных русел из связанных между собой элементов с жесткими укреплениями рекомендуется использовать следующие 3 основных типа выходных русел (рисунок 6). Они в основном и используются в практике дорожного строительства [4, 5].

8.1.6. Для расчета выходных русел с укреплениями, состоящими из не связанных между собой элементов, рекомендуются три типа выходных русел (рисунок 7) [4, 6].



а – тип I; б – тип II; в – тип III; 1 – укрепление из наброски; 2 – щебеночная подготовка; 3 – обратная засыпка грунта; 4 – рисберма; δ – толщина наброски; $h_{ук}$ – глубина заложения укрепления; $h_{рисб}$ – высота рисбермы; B_1, B_2 и $B_{ук}$ – ширина соответственно в начале, в конце и у концевой части укрепления; L – длина укрепления до концевой части

Рисунок 7 – Типы выходных русел из каменной наброски

Последовательность применения выходных русел, представленных на рисунке 7, также соответствует нумерации I, II и III. При этом тип I используют, если глубина размыва не превышает толщины укрепления (толщины слоя наброски). В противном случае уменьшают глубину размыва размещением за укреплением каменной наброски из более мелкого материала, чем камень укрепления, т. е. применяют тип II. При этом вновь добиваются условия, чтобы глубина размыва не превышала толщины укрепления. Если и в этом случае указанное условие не выдержано, то применяют тип III выходных русел.

Обычно эта группа выходных русел используется при скоростях течения на выходе из труб $v_{вых} \approx 3{,}0 \div 4{,}0$ м/с.

8.1.7. Исходными данными для расчетов нижних бьефов СВМГТ являются:

а) характеристики водопропускного сооружения (отверстие, тип выходного оголовка, уклон лотка);

б) расходы в сооружении;

в) гидравлические характеристики на выходе из сооружений (глубины и скорости потока);

г) характеристика бытового лога – форма сечения, уклон, грунты (связные или несвязные); для связных приводится величина сцепления, для несвязных – гранулометрический состав; пробы грунтов должны обеспечить получение указанных выше грунтовых характеристик по всей глубине, но не менее 2 м;

д) наличие нижерасположенных сооружений на соседних дорогах или на других объектах, влияющих на гидравлическую работу рассчитываемых сооружений;

е) другие данные, оказывающие влияние на гидравлический расчет сооружений.

8.1.8. Расчеты нижних бьефов водопропускных спиральновитых металлических гофрированных труб для принятого типа выходных русел включают следующее:

а) определение гидравлических характеристик потока в выходных руслах и за ними – глубин, скоростей и характера растекания потока на укреплении;

б) оценку устойчивости укреплений и величину их деформаций (для выходных русел из несвязанных между собой элементов);

в) определение глубин размыва за укреплениями;

г) определение размеров укреплений и глубин заложения их концевых частей.

8.2. Определение гидравлических характеристик потока на укреплении

8.2.1. При уклонах лога $i_л \leq 0{,}02$ гидравлические характеристики потока на укреплении определяют по следующим зависимостям.

Принимают максимальную скорость на укреплении по формуле (11):

$$v_{max} \approx 1{,}2 \cdot v_{\text{вых}}. \quad (11)$$

Средние глубины потока в конце укрепления длиной $L = (2 \div 6)D_э$ вычисляют по формуле (12)

$$h_{\text{укр(к)}} = 0{,}2\Pi_Q D_э, \quad (12)$$

где $D_э = 1{,}13\sqrt{\omega_{\text{соор}}}$ – эквивалентный диаметр (эквивалентное отверстие), м, представляющий собой диаметр круга, равновеликого по площади поперечному сечению сооружения $\omega_{\text{соор}}$, для многоочковых труб эквивалентный диаметр определяют по суммарной площади очков,

$\omega_{\text{соор}}$ – площадь поперечного сечения сооружения, м^2.

Ширину растекания потока на укреплении в створе, расположенном на расстоянии x от конца оголовка (при безоголовочном исполнении от конца трубы), находят по зависимости (13):

$$B_{\text{раст}} = b_{\text{р}} \left[\left(\frac{x}{D_э} + 1\right)^z - 1\right] + b_{\text{р}}, \quad (13)$$

где $b_{\text{р}}$ – ширина оголовка в конце, м.

z – показатель степени, определяется по формуле (14):

$$z = 1{,}8 \lg\left[\frac{1}{K}\frac{\Delta h_{max}}{D_э}\left(\frac{Q_k}{Q}\right)^{0{,}2}\right], \quad (14)$$

где K – коэффициент формы воронки размыва, определяемый по графику на рисунке 8;

Δh_{max} – максимальная глубина размыва на данное время (п. 8.3.5), м;

$Q_k = 0{,}51\sqrt{g}D_э^{5/2}$ – эталонный расход, м^3/с.

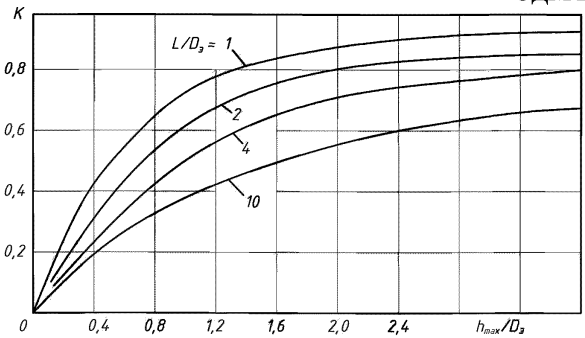


Рисунок 8 – График для определения коэффициента формы воронки размыва К

Приближенно в средних условиях показатель степени можно определять по формуле (15):

$$z = 0{,}78 + 0{,}36 \cdot \lg\frac{Q_k}{Q}, \tag{15}$$

полученной из формулы (14) при К = 0,8 и $\Delta h_{max}/D_э = 2$.

8.2.2. Гидравлические характеристики потока на укреплении при уклонах лога $i_л$ > 0,02 определяют по приводимым ниже формулам лишь при коэффициенте шероховатости укрепления $n_{укр}$ = 0,013÷0,016. В остальных случаях расчет следует проводить с помощью программных средств, основанных на математической модели протекания потока, приведенной в [4].

Принимают максимальную скорость на укреплении (16):

$$v_{max} \approx v_{вых} \tag{16}$$

Скорости v на укреплении определяют из уравнения (17):

$$\frac{v}{v_{ось}} = exp\left[-\left(5{,}6 - 0{,}25\frac{x}{D_э}\right)\left(\frac{y}{B'_{раст}}\right)^{2{,}25}\right], \tag{17}$$

где $v_{ось}$ – скорость на оси потока на расстоянии x от конца оголовка, м/с;

у – расстояние от оси потока (середины укрепления) до данной точки, м;

$B'_{раст} = \frac{B_{раст}}{2}$ – половина ширины растекания, м.

Осевая скорость задается соотношением (18):

$$\frac{v_{\text{ось}}}{v_{\text{вых}}} = exp\left[-0{,}004\left(\frac{x}{D_{\text{э}}}\right)^2\right]. \quad (18)$$

Формулами (17), (18) можно пользоваться в диапазоне $0 \leq \frac{x}{D_{\text{э}}} \leq 20$.

Глубины на укреплении при $0{,}5 \leq \frac{x}{D_{\text{э}}} \leq 20$ определяют из формул (19) и (20):

$$\frac{h}{h_{\text{ось}}} = exp\left[-\frac{7{,}0\left(\frac{y}{B'_{\text{раст}}} - 0{,}03\frac{x}{D_{\text{э}}}\right)}{\left(\frac{x}{D_{\text{э}}} + 1\right)^{4/9}}\right] - 0{,}07\frac{x}{D_{\text{э}}}\left(\frac{y}{B'_{\text{раст}}} - 0{,}7\right); \quad (19)$$

$$\frac{h_{\text{ось}}}{h_{\text{вых}}} = \sqrt{\frac{1{,}5\, i_{\text{л}}^{2/3}}{\frac{x}{D_{\text{э}}} + 1{,}5\, i_{\text{л}}^{2/3}}}. \quad (20)$$

Для упрощения расчетов величины v(x, y), h(x, y) можно определять по графикам. Графики для определения глубины потока h и глубин по оси потока $h_{ось}$ на укреплении приведены на рисунках 9 и 10, скоростей потока v – на рисунке 11.

Ширина растекания потока на укреплении определяется по формуле (21):

$$B_{\text{раст}} = M \cdot N + b_{\text{р}}. \quad (21)$$

Здесь параметры M и N определяются соотношениями (22) и (23):

$$M = \frac{26{,}5 D_{\text{э}}}{\sqrt[6]{i_{\text{т}}}} \sqrt[4]{\frac{g}{i_{\text{укр}} C_{\text{укр}}^2}} \sqrt[8]{\Pi_Q}; \quad (22)$$

$$N = exp\left(-\frac{1{,}75}{\Pi_Q^{0{,}22}\sqrt{x/D_{\text{э}}}}\right), \quad (23)$$

где $C_{\text{укр}}$ – коэффициент Шези на укреплении, определяемый по формуле (24).

$$C_{\text{укр}} = \frac{1}{n_{\text{укр}}} h_{\text{укр}}^{1/6}, \quad (24)$$

где $h_{\text{укр}}$ — средняя глубина потока в конце укрепления, принимаемая по формуле (12), м.

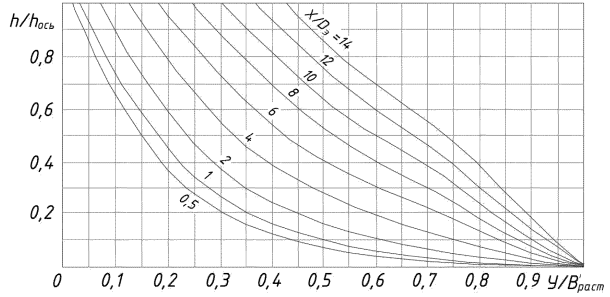


Рисунок 9 – График для определения глубины потока h на укреплении

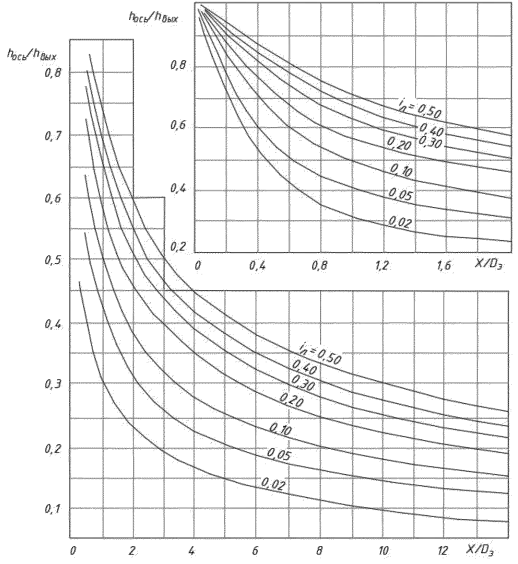


Рисунок 10 – График для определения глубин по оси потока $h_{ось}$ на укреплении

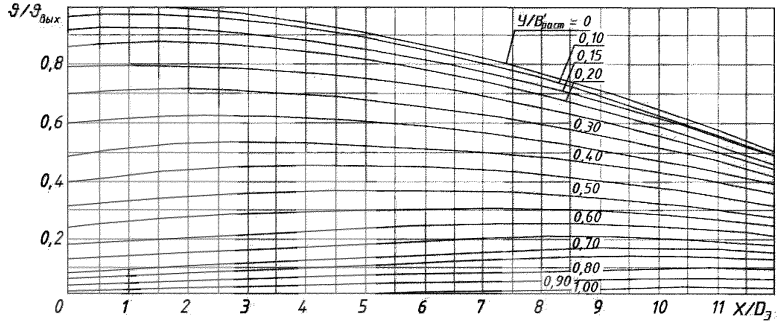


Рисунок 11 – График для определения скоростей потока v на укреплении

Для упрощения расчетов формулу (21) можно записать следующим образом (25):

$$B_{\text{раст}} = \sqrt{\frac{n_{\text{д}}}{0{,}015}}\,\overline{M} \cdot N \cdot \text{К}_{\text{М}} + b_{\text{р}}, \qquad (25)$$

где $\overline{M}, N, \text{К}_{\text{М}}$ – параметры, определяемые соответственно по графикам (рисунки 12, 13) и таблице 3;

$n_{\text{д}}$ – коэффициент шероховатости дна;

0,015 – принятый в графике коэффициент шероховатости.

Таблица 3 – Поправочный коэффициент $\text{К}_{\text{М}}$

$D_{\text{э}}$	Поправочный коэффициент $\text{К}_{\text{М}}$ при Π_Q, равном				$D_{\text{э}}$	Поправочный коэффициент $\text{К}_{\text{М}}$ при Π_Q, равном			
	0,1	0,2	0,4	0,8		0,1	0,2	0,4	0,8
1,0	0,91	0,93	0,96	0,99	3,00	2,49	2,55	2,63	2,71
1,25	1,12	1,14	1,18	1,22	3,50	2,87	2,93	3,02	3,12
1,50	1,32	1,34	1,39	1,44	4,00	3,24	3,32	3,42	3,52
2,00	1,72	1,75	1,81	1,87	4,50	3,61	3,69	3,81	3,93
2,50	2,11	2,16	2,23	2,30	5,00	3,98	4,06	4,20	4,33

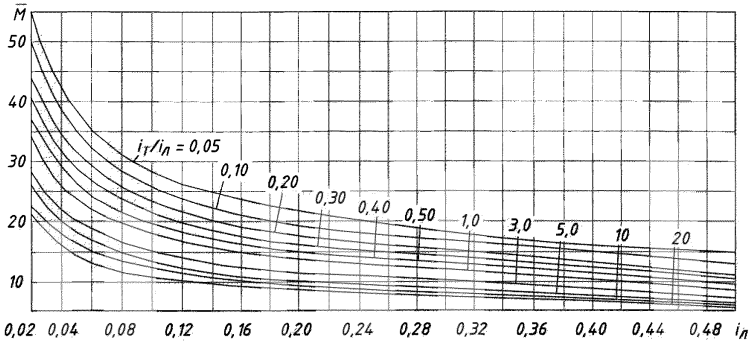


Рисунок 12 – График для определения параметра $\overline{M}$

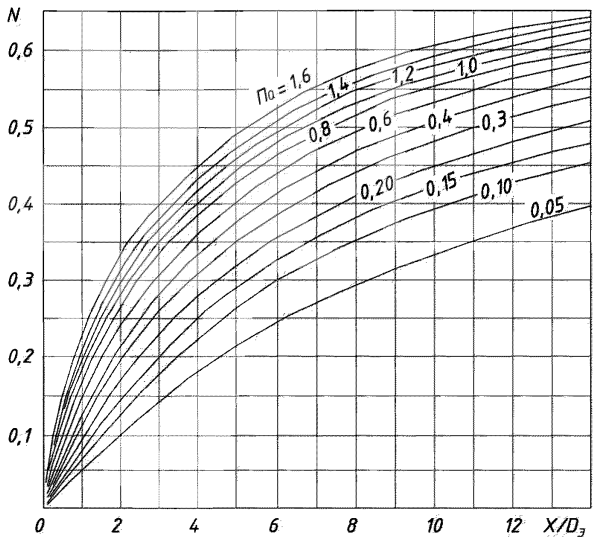
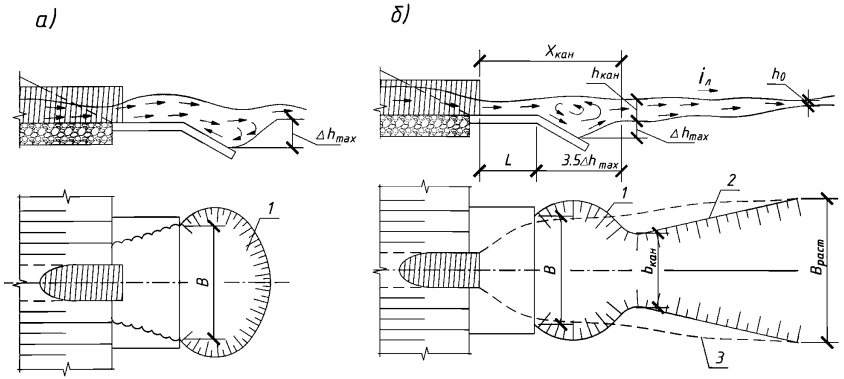


Рисунок 13 – График для определения параметра N

8.3. Расчеты размыва

8.3.1. Поток, попадая с укрепления на размываемый грунт лога, образует в нем воронку, приближенно имеющую в плане форму эллипса, в пространстве - форму эллиптического конуса (рисунок 14, а). Высота этого конуса, равная максимальной глубине размыва Δh_{max} за данное время, зависит от уклона, формы и размеров трубы; величины и продолжительности паводка; уклона, формы и характеристик грунтов лога. С увеличением продолжительности паводка $\Delta h_{укр}$

возрастает, достигая своей предельной величины $\Delta h_{пр}$ лишь за бесконечно большое время.



а - поверхностный; б - донный; 1 - контур воронки размыва; 2 - контур канавы; 3 - границы растекания

Рисунок 14 – Характер деформаций и режимы протекания в нижних бьефах труб

В настоящих Методических рекомендациях Δh_{max} является основной расчетной величиной, определяющей тип и размеры укреплений, а $\Delta h_{пр}$ используется как параметр в формуле для нахождения Δh_{max}.

8.3.2. В ряде случаев при уклонах лога $i_л > 0{,}02$ за воронкой размыва ниже по течению возможно образование промоины (канавы), которое приводит к увеличению глубины размыва на величину, равную глубине канавы на ее входе (рисунок 14, б). В зависимости от гидравлических характеристик потока, уклона и грунтов лога промоина может иметь либо ограниченный характер, либо развиваться на всем протяжении лога. В последнем случае необходимы специальные меры защиты, так как это угрожает сохранности водопропускного сооружения.

8.3.3. В воронке размыва возможны два режима протекания потока: поверхностный (рисунок 14, а) и донный (рисунок 14, б).

Донный режим характеризуется наличием поверхностного вальца и донного транзитного потока. Глубина размыва при этом режиме наибольшая.

Поверхностный режим характеризуется наличием донного вальца и поверхностного транзитного потока. Размыв при этом режиме существенно (в 1,5 - 2 раза) меньше, чем при донном. Устойчивый поверхностный режим может быть обеспечен лишь специальными устройствами, к числу которых относится ребро в конце укрепления и гасители.

8.3.4. Для защиты нижнего бьефа от размывов рекомендуются следующие 3 основных типа выходных русел (рисунок 6). Тип 1 представляет собой укрепление с концевой частью в виде предохранительного откоса, тип 2 - то же с вертикальной стенкой. Тип 3 отличается от типа 1 наличием ребра в конце укрепления.

Во всех типах выходных русел эффективно применение каменной наброски в концевых частях. Соответствующие номера типов выходных русел помечены индексом «к».

8.3.5. Максимальные глубины размыва при уклонах лога $i_л \leq 0{,}02$ определяют по формулам:

а) в выходных руслах без каменной наброски (26)

$$\Delta h_{max} = \Delta h_{пр} \eta; \quad (26)$$

б) в выходных руслах с каменной наброской (27)

$$\Delta h_{max} = \Delta h_{пр} \left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3} + A d_н \frac{\Delta h_{max}^3}{\bar{W}_к}, \quad (27)$$

где $\Delta h_{пр}$ и Δh_{max} - соответственно предельная и максимальная глубины размыва в заданном выходном русле при отсутствии каменной наброски; ($\Delta h_{пр}$ п. 8.3.7);

η - коэффициент, учитывающий время прохождения паводка (п. 8.3.9);

$\bar{W}_к$ - удельный объем каменной наброски на единицу ширины укрепления, м^3/м, со средним диаметром камня $d_н$, мм;

A - коэффициент, принимаемый в выходных руслах с вертикальной стенкой или предохранительным откосом в конце укрепления равным 0,13, в выходных руслах без них - 0,5;

d - расчетный диаметр частиц грунта (п. 8.3.8), мм.

Для эффективной работы камня в наброске объем его следует задавать в пределах $\bar{W}_{к(min)} < \bar{W}_к < \bar{W}_{к(max)}$, а крупность – не менее полученной из выражения (28):

$$d_н = d^{1/4}\left[\frac{\Delta h_{пр}}{10 - A\frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}}\right]^{3/4} \quad (28)$$

Минимальный $\bar{W}_{к(min)}$ и максимальный $\bar{W}_{к(max)}$ удельные объемы камня определяют по формулам (29) и (30):

$$\bar{W}_{к(min)} = Ad_н\frac{\Delta h_{max}}{1 - \left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3}\frac{1}{\eta}} \quad (29)$$

$$\bar{W}_{к(max)} = 1{,}4\left(D_э\frac{Q}{Q_к}\right)^2 \quad (30)$$

При $\bar{W}_к < \bar{W}_{к(min)}$ расчет размыва следует производить без учета наброски.

При $\bar{W}_к > \bar{W}_{к(max)}$ глубину размыва определяют по формуле (31):

$$\Delta h_{max(н)} = \left[\Delta h_{пр}\left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3} + A\frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}\right]\left(\frac{\bar{W}_{к(max)}}{\bar{W}_к}\right)^{0,5} \quad (31)$$

8.3.6. Максимальные глубины размыва при уклонах лога $i_л$ > 0,02 определяют по формулам:

а) в выходных руслах без каменной наброски (32):

$$\Delta h'_{max} = \Delta h_{max} + \Delta h_{кан}; \quad (32)$$

б) в выходных руслах с каменной наброской (33):

$$\Delta h'_{max(н)} = \Delta h_{max(н)} + \Delta h_{кан}, \quad (33)$$

где $\Delta h_{кан}$ - глубины размыва выходного лога за счет возможного образования пробоины (канавы) в ее начале (пп. 8.3.10 – 8.3.14), м.

При $i_л$ > 0,02 минимальный объем камня в рисберме определяют по формуле (29); поправку на избыток камня не вводят.

8.3.7. Предельные глубины размыва определяют по формуле (34):

$$\Delta h_{\text{пр}} = r\delta_{\text{м}}\psi D_{\text{э}}\left(\frac{Q}{Q_{\text{к}}}\right)^{S}\left[\frac{D_{\text{э}}^{3}}{\left(\frac{L}{D_{\text{э}}}+1\right)^{S_1} bb_{\text{р}}d}\right]^{0,2}, \quad (34)$$

где Q – расчетный расход (раздел 6.1), м^3/с;

L – длина укрепления, м;

b – ширина отверстия сооружения, для одноочковых труб равна диаметру, для многоочковых труб – сумме отверстий очков, м;

$\delta_{\text{м}} = 0{,}85\left(\frac{D_0}{D_{\text{э}}}\right)^{0,075}$ – масштабный коэффициент; D_0 = 1 м;

$Q_{\text{К}} = 0{,}51\sqrt{g}D^{5/2}$ – эталонный расход;

ψ - коэффициент, учитывающий тип концевой части выходных русел; при наличии предохранительного откоса ψ = 1, при наличии вертикальной стенки ψ = 0,6, для выходных русел с ребром ψ = 1 независимо от наличия стенки, для укреплений в виде каменной наброски ψ = 0,6;

r, S - коэффициент и показатель степени, значения которых для различных типов выходных русел приведены в таблице 4;

S_1 – показатель степени, равный 1 для выходных русел из связных между собой элементов, 5/2 для недеформируемых русел и 10/3 для деформируемых и самоотмосток.

Таблица 4 –Значения коэффициента r и показателя степени S для различных типов выходных русел

Тип выходного русла	Коэффициент r	Показатель степени S	Относительный граничный расход $(Q/Q_{\text{к}})$гр
1, 1к	0,9	0,6	Без ограничений
2, 2к	0,9	0,6	То же
3, 3к	0,6	0,4	1,0
I, II, III	1,0	0,6	Без ограничений

В последнем столбце таблицы 4 выписаны граничные значения $(Q/Q_к)_{гр}$, при превышении которых в формулу (34) вместо Q/Qк должны подставляться эти значения.

8.3.8. При расчете размывов грунты в логе подразделяются на связные и несвязные. К несвязным грунтам относятся крупнообломочные и песчаные грунты, не обладающие свойством пластичности (раскатывания).

К связным относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты с числом пластичности более 0,01, а также глинистые и песчаные грунты при степени заторфованности (содержании растительных остатков) более 10 %.

Расчетный диаметр частиц однородного несвязного грунта определяют по формуле (35):

$$d = \frac{\Sigma d_i P_i}{100}, \qquad (35)$$

где P_i – содержание по массе в процентах i-й фракции со средним диаметром частиц d_i.

К однородным несвязным следует относить грунты, удовлетворяющие условию $d_{max}/d \leq 2$, где d_{max} – средний диаметр крупных частиц, которые составляют 5 % от массы грунта или диаметр самой крупной фракции, если она составляет не менее 5 % от массы грунта.

Расчетный диаметр связного грунта d, мм, определяют по формуле (36):

$$d = 7{,}5(0{,}1 + 100C_p), \qquad (36)$$

где C_p - расчетное сцепление, МПа, которое определяют на основании стандартных методов испытаний образцов в состоянии капиллярного водонасыщения при полной влагоемкости с учетом возможного (вероятного) отклонения значения сил сцепления от нормативных; для предварительных расчетов значение C_p для глинистых грунтов можно принимать по данным СП 22.13330.2016, а для торфов – по [4, таблица 5].

8.3.9. Коэффициент η в формуле (26) при пропуске постоянного расхода Q в течение времени рассчитывают по формулам (37) и (38):

$$\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{t}{t_0}+1}}, \quad (37)$$

где:

$$t_0 = 540\left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{0,25}\left[\frac{\Delta h_{пр}^3}{Q} + \frac{11}{Q}\left(100\, C_p\right)^3\right], \quad (38)$$

причем в случае наличия гасителей граничные значения $Q/Q_к$ определяют по таблице 4.

Для реальных гидрографов расчетное время определяется зависимостью (39):

$$t = 0{,}5W/Q, \quad (39)$$

где W - объем стока за время паводка.

Для более точного учета фактора времени, особенно при гидрографах сложной формы (многопиковых и т.п.), рекомендуется пользоваться методикой расчета, изложенной в [4, приложение 7.3].

Для определения значения η наряду с формулой (37) можно пользоваться графиком на рисунке 15. Для приближенных расчетов можно принимать: для несвязных грунтов $\eta = 0{,}6$; для связных – $\eta = 0{,}75$.

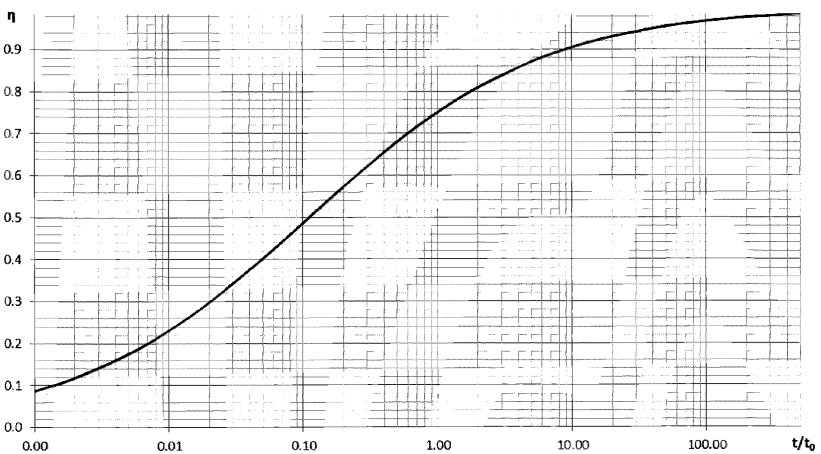


Рисунок 15 – График для определения относительной глубины размыва

8.3.10. Глубину промоины определяют в такой последовательности.

Вычисляют ширину потока $B_{нр}$, при которой скорость в логе равна неразмывающей по формуле (40):

$$B_{нр} = \frac{Q\, i^{3/4}}{\upsilon_н^{5/2}\, n_л^{3/2}}. \quad (40)$$

Коэффициент шероховатости лога $n_л$ определяется по СП 100.13330.2016 (приложение М).

Для одернованных логов принимают $\upsilon_н$ = 1,5 м/с, а во всех остальных случаях вычисляется по следующей зависимости (41):

$$\upsilon_н = 2{,}1\sqrt{g\, d_э}, \quad (41)$$

где $d_э$ - эквивалентный диаметр грунта лога (п. 8.3.8).

Величину $B_{нр}$ сравнивают с шириной лога $b_л$ (для явно выраженного лога) либо с предельной шириной растекания потока на наклонной плоскости (42):

$$B_{раст(пр)} = M + b_р, \quad (42)$$

где M находят по формуле (22).

Если $B_{нр} > b_л$ либо $B_{нр} > B_{раст(пр)}$, то размыв дна лога может происходить на большой длине и сопровождаться значительным понижением отметок, в том числе и у концевой части укрепления.

В этом случае необходимо принимать специальные меры защиты: устраивать перепады, укреплять лог до его подошвы или на значительном протяжении.

В противном случае определяют положение створа $x = X_{нр}$, в котором прекращается размыв, и глубину потока в нем - по формулам (43) и (44):

$$X_{нр} = \frac{0{,}57\, D_э}{\Pi_Q^{0{,}44} \lg^2 N}; \quad (43)$$

$$h_{нр} = \left(\frac{Q\, n_л}{B_{раст(пр)}\sqrt{i_л}}\right)^{3/5}, \quad (44)$$

где величину N определяют из формулы (21), приняв $B_{раст} = B_{нр}$ (45):

$$N = \frac{B_{нр} - b_р}{M} \quad (45)$$

8.3.11. Производят расчет параметров (ширины и глубины потока) на входе в канаву. Вначале определяют максимальную глубину размыва Δh_{max} для случая отсутствия промоины (канавы) по формуле (26). Затем находят (в первом приближении) расстояние от выхода из трубы до входа в канаву (46):

$$X_{кан} = \frac{L + (2 + m)\Delta h_{max}}{1 - m\, i_л}, \quad (46)$$

где m - коэффициент заложения откоса укрепления. Если $X_{кан} > X_{нр}$, то полагают $\Delta h_{кан} = 0$.

Вычисляют ширину растекания $B_{раст(кан)}$ в створе начала канавы $B_{раст(кан)}$=$B_{раст(Xкан)}$ по формулам (21) - (23).

Находят ширину $b_{кан}$ и глубину $h_{кан}$ потока на входе в канаву при стабилизации размыва по формулам (47) и (48):

$$b_{кан} = \frac{35\, Q^{0,528}\, i_л^{0,343}}{d^{0,32}\, g^{0,264}} \quad (47)$$

$$h_{кан} = \left(\frac{Q}{1{,}15\sqrt{g}\, d^{1/4}\, b_{кан}}\right)^{4/5} \quad (48)$$

Если $B_{раст(кан)} < b_{кан}$, то принимают $b_{кан} = B_{раст(кан)}$, а $h_{кан}$ вычисляют по формуле (48), в противном случае к расчету принимают $b_{кан}$ и $h_{кан}$, вычисленные по формулам (47) и (48).

8.3.12. Определяют среднюю глубину потока в канаве (49):

$$h_{кан(ср)} = \frac{1}{2}\left(h_{кан} + h_{нр}\right) \quad (49)$$

8.3.13. Определяют глубину размыва канавы по формуле (50):

$$\Delta h_{кан} = \left(X_{нр} + X_{кан}\right)\left(i_л - \frac{\upsilon_0^3}{C^2 Q}\frac{B_{нр} + b_{кан}}{2}\right) + h_{кан} - h_{нр}, \quad (50)$$

где коэффициент Шези C определяют при $h = h_{кан(ср)}$ по формуле (51):

$$C = \frac{1}{n_{кан}} h_{кан(ср)}^{1/6} \quad (51)$$

Коэффициент шероховатости канавы $n_{кан}$ определяется по СП 100.13330.2016 (приложение М).

8.3.14. Определяют уточненное расстояние от выхода из трубы до входа в канаву (52):

$$X'_{\text{кан}} = X_{\text{кан}} + \frac{m\ \Delta h_{\text{кан}}}{1 - m\, i_{\text{л}}} \qquad (52)$$

Если $(X'_{\text{кан}} - X_{\text{кан}})/X'_{\text{кан}} > 0{,}3$, то заменяют $X_{\text{кан}}$ на $X'_{\text{кан}}$ и производят повторный расчет канавы.

Если $\Delta h_{\text{кан}} > 3$ м, то либо увеличивают отверстие сооружения, либо принимают специальные меры защиты (устраивают перепады, консольные сбросы и т.п.).

8.4. Назначение основных размеров выходных русел

8.4.1. Исходными данными для назначения основных размеров выходных русел являются гидравлические характеристики потока в нижнем бьефе (глубины, скорости и границы растекания) и глубины размыва. В результате расчетов определяют длину и ширину укрепления на выходе из трубы, глубину заложения концевой части, мероприятия по уменьшению размывов за укреплением (гасители, размер каменной рисбермы и т.д.).

8.4.2. Расчет основных размеров выходных русел выполняют в такой последовательности:

1. Предварительно назначают тип выходного русла из числа рекомендованных (рисунок 6), исходя из следующих соображений:

а) для полностью загруженных труб (т.е. работающих при расчетных заполнениях) рекомендуются типы 1к и 2к;

б) для недогруженных труб применяют типы 1 или 2;

в) в качестве вариантов для труб при расчетном заполнении и особенно при больших уклонах лога ($i_{\text{л}}$ больших 0,05) применяют типы 3 (3к).

2. Определяют глубины и скорости потока на выходе из труб и на укреплении согласно рекомендациям главы 6.

3. Назначают тип и длину укреплений, принимая ее равной (из конструктивных соображений) $L = (1{,}5 \div 2)D_{\text{э}}$.

4. Определяют глубину размыва на выходе из труб. При глубине размыва $\Delta h_{max} > 2$ м переходят на другой тип выходного русла, обеспечивающий снижение размыва, и расчет повторяют. При $\Delta h_{кан} > 3$ м увеличивают отверстие сооружения либо принимают специальные меры защиты.

5. Определяют глубину заделки концевой части.

6. Определяют ширину растекания потока.

7. Определяют ширину укреплений и устанавливают их окончательные размеры.

8.4.3. Тип и материал укреплений устанавливают по величине максимальной скорости на укреплении, сравнивая ее с допускаемыми скоростями для укреплений, приведенными в [4, таблица 2.9].

8.4.4. Глубину заложения концевой части укрепления определяют по формуле (53):

$$\Delta h_{укр} = \frac{\Delta \tilde{h}_{max}(1 + 2\, i_л) + \Delta h_{кан}}{1 - m\, i_л}, \qquad (53)$$

где $\Delta \tilde{h}_{max}$ – максимальная глубина размыва в заданном выходном русле без учета размыва канавы применительно к конкретным гидравлическим условиям (характеру растекания, наличию каменной наброски, влиянию ширины лога);

m - коэффициент заложения откоса (для вертикальной стенки m = 0).

При $\Delta h_{укр} > 3{,}5$ изменяют тип выходных русел.

8.4.5. Ширину растекания потока при уклонах лога $i_л \leq 0{,}02$ определяют по формуле (13), при $i_л > 0{,}02$ - по формуле (21).

8.4.6. Ширину укрепления на всей длине, за исключением концевой части (длину ее принимают равной 1 м), устанавливают по ширине растекания потока с запасом в 1 м в каждую сторону.

Допускается уменьшать ширину укрепления из жестких бетонных элементов, ограничив ее либо изолиниями скоростей на укреплении, равных допускаемым скоростям для грунтов выходного лога, либо заменив часть укрепления наброской из щебня или камня определенной крупности на участке, где скорости потока не

превышают допускаемых для указанного материала. Такое сокращение ширины укрепления допускается на всей длине его, за исключением концевой части.

В качестве расчетной ширины укрепления в концевой его части принимают большую из величин: ширину растекания $B_{раст}$ в конце укрепления и B_{min}, определяемую по формуле (54):

$$B_{min} = \frac{\theta}{K}\Delta h'_{max} = \frac{\theta}{K}(\Delta h_{max} + \Delta h_{кан}), \quad (54)$$

где B_{min} - минимальная ширина укрепления, соответствующая ширине воронки размыва в створе конца укрепления;

K - коэффициент формы воронки размыва (рисунок 8);

θ - коэффициент, $\theta = 3$ при предохранительном откосе и $\theta = 3{,}6$ - при концевой части в виде вертикальной стенки.

После назначения ширины укрепления производят окончательную ее корректировку. Форма укрепления в плане может быть прямоугольной или трапецеидальной, причем с прямоугольными или ступенчатыми границами.

8.4.7. В выходных руслах с каменной наброской камень укладывают по всей ширине укрепления в приготовленный котлован так, чтобы верх его находился не менее чем на 0,5 м ниже поверхности земли. При уклонах лога $i_л > 0{,}02$ и возможности образования промоины в выходном логе камень следует укладывать на 0,5 м ниже дна промоины у концевой части.

При назначении удельного объема камня в рисберме следует учесть, что за счет его варьирования можно существенно сократить глубину размыва.

8.4.8. Рациональные типы и размеры укреплений выбирают на основе технико-экономического сравнения вариантов выходных русел.

8.5. Особенности гидравлического расчета выходных русел с укреплениями из каменной наброски

8.5.1. Гидравлические расчеты выходных русел с укреплениями из каменной наброски включают:

а) оценку однородности каменного материала;

б) определение минимальной крупности однородного камня или проверку устойчивости неоднородной наброски по ее гранулометрическому составу;

в) определение толщины наброски – для недеформируемых выходных русел;

г) определение деформаций укреплений и установление на их основе минимальных плановых размеров укреплений для деформируемых выходных русел.

Дальнейшие расчеты выходных русел с укреплениями из каменной наброски (определение глубин размыва за укреплениями, глубин заложения их концевых частей, а также окончательное определение ширины укрепления) являются общими для всех типов выходных русел и излагались выше (раздел 8.3). Однако в связи с некоторой спецификой указанных расчетов для выходных русел из каменной наброски они рассматриваются и в настоящем разделе с акцентированием на особенности расчета и ссылкой на общие формулы.

8.5.2. Рекомендуемые типы выходных русел с укреплениями из каменной наброски рассмотрены выше и изображены на рисунке 7.

8.5.3. Гидравлические расчеты указанных выходных русел, общие для всех типов, выполняют в изложенной ниже последовательности. Специфические особенности каждого из типов излагаются в соответствующих пунктах.

1. Устанавливают, является ли наброска однородной в отношении размыва из условия (55):

$$\frac{d_{н(max)}}{d_н} \leq 2, \qquad (55)$$

где $d_{н(max)}$ – средний диаметр крупных частиц, которые составляют не менее 5 % массы наброски, м;

$d_н$ — средний диаметр частиц наброски, м.

При несоблюдении условия (55) каменная наброска неоднородна.

2. Для однородной наброски определяют минимальный диаметр ее частиц (56), м, при котором укрепление будет устойчивым от размыва:

$$d_{н(доп)} \geq \frac{\upsilon_{вых}^2}{43}, \qquad (56)$$

где $\upsilon_{вых}$ – скорость на выходе из сооружений (раздел 6.2), м/с.

3. Для неоднородной наброски, заданной своим гранулометрическим составом, устанавливают, будут ли устойчивы ее частицы под воздействием потока исходя из любого из двух приведенных ниже условий (57) и (58):

$$Q \le Q_{\text{пр}} = 3{,}2\ \text{К}_{\text{ог}(Q)} D_{\text{э}} d_{\text{н(м)}}^{3/2} \sqrt{\text{g}} \text{К}_{\text{нр}} \tag{57}$$

$$\upsilon_{\text{вых}} \le \upsilon_{\text{пр}} = 2{,}1\ \text{К}_{\text{нр}}^{\tilde{n}} \sqrt{\text{g}\, d_{\text{н(м)}}}, \tag{58}$$

где Q – расход в сооружении, м^3/с;

$Q_{\text{пр}}$, $\upsilon_{\text{пр}}$ – соответственно предельный расход, м^3/с, и предельная скорость, м/с, при которой наброска сохраняет устойчивость против размыва;

$\text{К}_{\text{ог}(Q)} = 1{,}95$ – коэффициент, учитывающий влияние на величину предельного расхода, при котором сохраняется устойчивость наброски;

$K_{\text{нр}}$ – коэффициент неоднородности грунта, учитывающий влияние гранулометрического состава наброски на ее устойчивость;

$\tilde{n} = 1/3$ – показатель степени.

В свою очередь

$$\text{К}_{\text{нр}} = 1{,}15 \sqrt{\frac{d_{\text{н}} - d_{\text{н(м)}} \rho_{\text{н(м)}}}{d_{\text{н(м)}} \rho_{\text{н(м)}}}}, \tag{59}$$

где $d_{\text{н}}$ — средний диаметр частиц наброски, м.

В формулах (58) и (59) $d_{\text{н(м)}}$ и $\rho_{\text{н(м)}}$ – это соответственно диаметр частиц, м, и весовое содержание самой мелкой фракции, которой в наброске содержится не менее 10 %, т.е. $\rho_{\text{н(м)}} \ge 0{,}1$. В случае, если ее содержание составляет менее 10%, под $d_{\text{н(м)}}$ понимают средний диаметр частиц смеси, состоящей из самой мелкой фракции и последующих фракций, дополняющих ее до 10%, т. е. $\rho'_{\text{н(м)}} = \rho_{\text{н(м)}} + \sum \rho_{\text{н}(i)} = 0{,}1$;

$$d_{\text{н(м)}} = \frac{d_{\text{н(м)}} \rho_{\text{н(м)}} + \sum d_{\text{н}(i)} \rho_{\text{н}(i)}}{0{,}1}, \tag{60}$$

где $\rho_{\text{н}(i)}$, $d_{\text{н}(i)}$ – соответственно весовая доля и средний диаметр, м, фракций, дополняющих мелкую фракцию до 10 %.

Если по формуле (59), получают $K_{\text{нр}} < 1$,то принимают $K_{\text{нр}}=1$.

При соблюдении условий (57) и (58) укрепление из неоднородной наброски будет устойчивым и неразмываемым. В противном случае укрепление будет размываемым, и для определения его устойчивости выполняют дополнительные расчеты.

4. Определяют минимально допустимый диаметр частиц наброски $d_{н(доп)}$ по формуле (56), считая ее однородной.

5. Сравнивают полученный диаметр частиц наброски $d_{н(доп)}$ со средним диаметром частиц наиболее крупной фракции $d_{н(max)}$, содержащейся в ней.

При $d_{н(max)} > d_{н(доп)}$ укрепление может работать как самоотмостка, а возможность применения его для заданного сооружения может быть определена специальным расчетом для данного типа укреплений (п. 8.5.7).

При $d_{н(max)} < d_{н(доп)}$ наброска неустойчива и не может быть использована для защиты выходных русел сооружения от размыва. Ее требуется заменить наброской с частицами большей крупности или другим типом выходных русел.

8.5.4. Толщину слоя наброски δ, при которой укрепление будет недеформируемым, определяют по формулам:

а) для наброски, состоящей из нескольких фракций (61):

$$\delta = D_э \left[0{,}45 \sqrt[в]{\frac{d_н - d_{н(м)}\rho_{н(м)}}{d(d_{н(м)}\rho_{н(м)} + 1)}} + \left(\frac{1{,}15\upsilon_{вых} K_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{gD_э}} - 1 \right) \right], \quad (61)$$

где $K_{ог(\Delta h)} = 1$ – коэффициент, учитывающий влияние оголовка на глубину деформации наброски.

При $\rho_{н(м)} \geq 0{,}95$ наброску считают однородной со средним диаметром частиц $d_{н(м)}$, для чего в формуле (61) условно принимают $\rho_{н(м)}=0$.

б) для наброски, состоящей из одной фракции (62):

$$\delta = D_э \left[0{,}45 \sqrt[в]{\frac{d_н}{d}} + \left(\frac{1{,}15\upsilon_{вых} К_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{gD_э}} - 1 \right) \right] \quad (62)$$

Для несвязных грунтов средний диаметр частиц отдельной фракции (63), мм:

$$d = \frac{\sum d_i p_i}{100}, \quad (63)$$

где p_i, — весовая доля фракции, %.

Для связных грунтов расчетный диаметр d, мм, определяют по формуле (36).

Для наброски, состоящей из нескольких слоев различного гранулометрического состава (например, при наличии щебеночной подготовки), вместо $d_н$ подставляют эквивалентный диаметр (64):

$$d_{н(э)} = \left(d_{н(1)}\delta_1 + d_{н(2)}\delta_2 + \cdots + d_{н(n)}\delta_n\right)\frac{1}{\delta}, \quad (64)$$

где $d_{н(1)}$ и δ_1, $d_{н(2)}$ и δ_2, ..., $d_{н(n)}$ и δ_n – соответственно средний диаметр и толщина первого, второго, и n-го слоя наброски, м.

Полная толщина всех слоев наброски, м, $\delta = \sum_{i=1}^{n}\delta_i$.

По этой же формуле (64) вычисляют для каждого слоя средний диаметр мелкой фракции $d_{нм(э)}$, м.

8.5.5. Определяют размеры укрепления:

1) назначают длину укрепления согласно рекомендациям (п. 8.4.2)

$$L = (1{,}5 \div 2)\mathrm{D_э}$$

2) определяют ширину растекания потока $\mathrm{B_{раст}}$ по формуле (13) или (21);

3) назначают размеры укрепления в плане, м, с учетом принятой длины укрепления:

в створе на выходе из оголовка

$$B_1 = b_р + 2$$

в конце укрепления

$$\mathrm{B_2} = B_{раст} + 1$$

где 2 и 1 м – запас в ширине укрепления, назначаемый соответственно по 1 и 0,5 м с каждой стороны укрепления.

Далее определяют глубину размыва, глубину заложения концевой части и назначают ширину укрепления в этом месте согласно рекомендациям, изложенным ниже в п. 8.5.8.

8.5.6. Предельную глубину деформации укрепления $\Delta h_{пр(д)}$ на неразмываемых деформируемых выходных руслах за счет выноса грунта из-под него определяют по формулам (65) и (66):

а) для наброски, состоящей из нескольких фракций

$$\Delta h_{пр(д)} = 0{,}85 \cdot D_э \sqrt[в]{\frac{d_н - d_{н(м)}\rho_{н(м)}}{d\left(d_{н(м)}\rho_{н(м)} + 1\right)}} - 1{,}93 \cdot \delta + \\ +2 \cdot D_э\left(\frac{1{,}15\ \upsilon_{вых} K_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{gD_э}} - 1\right) \quad (65)$$

При $\rho_{н(м)}$>0,95 считают наброску однородной со средним диаметром частиц $d_{н(м)}$. Для чего в формуле (65) условно принимают $\rho_{н(м)}$=0;

б) для однородной наброски

$$\Delta h_{пр(д)} = 0{,}85 \cdot D_э \sqrt[в]{\frac{d_н}{d}} - 1{,}93 \cdot \delta + 2 \cdot D_э\left(\frac{1{,}15\ \upsilon_{вых} K_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{gD_э}} - 1\right) \quad (66)$$

При наличии в наброске слоев разного гранулометрического состава в формулу (65) вместо $d_н$ и $d_{н(м)}$ подставляют $d_{н(э)}$ и $d_{нм(э)}$, определяемые по формуле (64).

Толщиной слоя наброски δ задаются, принимая ее равной не менее $2d_н$.

Расстояние, м, от выхода из трубы до месторасположения предельной глубины деформации укрепления (67):

$$l_{пр(д)} = \upsilon_{вых} \sqrt{\frac{2 \cdot h_{вых} + \Delta h_{пр(д)}}{d}} \quad (67)$$

Устанавливают предельную глубину деформации укрепления у выходного сечения сооружения (68):

$$\Delta h_{пр(д)вых} = \Delta h_{пр(д)} - \frac{l_{пр(д)}}{2} \quad (68)$$

При $\Delta h_{пр(д)вых}$>0,5 м либо изменяют параметры укрепления из каменной наброски (толщину слоя, крупность камня и т. п.), либо применяют иной тип укрепления.

Определяют минимальные размеры укрепления в плане исходя из размеров воронки деформаций (69):

$$L = B = 4\Delta h_{пр(д)}, \quad (69)$$

где L и B — соответственно длина и ширина укрепления.

Длину укрепления L, вычисленную по формуле (69), принимают для дальнейшего расчета.

Назначают ширину укрепления, м:

а) в конце оголовка труб

$$B_1 = b_р + 2 \tag{70}$$

б) в конце укрепления при $\frac{\Delta h_{пр(д)}}{D_э} > 0{,}5$ принимают B_2 по большему из значений B_1 и B, определяемой по формуле (69); при $\frac{\Delta h_{пр(д)}}{D_э} < 0{,}5$ принимают B_2 по большему из значений B и $B_{раст}$, вычисляемой по формуле (13) или (21), но не менее B_1.

8.5.7. Расчеты выходных русел самоотмосток.

Последовательность расчетов следующая:

а) вычисляют параметр $N_{расч}$ (71):

$$N_{расч} = \frac{3\, h_{вых}\, D_э}{Ф^3} \tag{71}$$

$$\text{здесь } Ф = \psi \cdot r \cdot \delta_м \cdot D_э \left(\sqrt{\frac{D_э^3}{b \cdot b_р}}\right)^{0{,}2}, \tag{72}$$

где $\psi = 0{,}7$.

б) по гранулометрическому составу наброски вычисляют сначала средний диаметр первой (самой крупной) фракции (причем ее должно быть больше 5 %, т.е. $\rho_{от} > 0{,}05$), принимая его за $d_{от}$;

в) сравнивают $\rho_{от}/d_{от}^{1/6}$ с $N_{расч}$.

Если $N_{расч} > \rho_{от}/d_{от}^{1/6}$, то в расчет включают следующую фракцию (или ее часть) и так продолжают до тех пор, пока не будет соблюдено условие $\frac{\rho_{от}}{d_{от}^{1/6}} = N_{расч}$ с точностью до 5 %.

Если $\rho_{от}/d_{от}^{1/6}$ будет меньше $N_{расч}$ для всех фракций, то отмостка не образуется, и предельные глубины деформации определяют как для однородного грунта по формуле (34), принимая ψ = 0,6, а максимальные глубины – по формулам (26), (33).

Если для частиц самой крупной фракции, которых в наброске более 5 % , $\rho_{от}/d_{от}^{1/6} > N_{расч}$, то эти частицы определяют отмостку.

2. Определяют максимальную глубину размыва в неоднородной наброске (73):

$$\Delta h_{max(н)} = \sqrt[3]{\frac{1{,}8\, h_{вых(ог)}\, D_э\, d_{от}}{\rho_{от}} + \Delta h^3_{max(d_{от})}}, \qquad (73)$$

где $\Delta h_{max(d_{от})}$ – максимальная глубина размыва в наброске со средним диаметром частиц $d_{от}$, определяемая по одной из формул (27) или (33) при $\Delta h_{пр}=\Delta h_{пр(d_{от})}$; здесь $\Delta h_{пр(d_{от})}$ – предельная глубина размыва в наброске со средним диаметром частиц $d_{от}$, м, определяемая по формуле (34) при $\psi = 0{,}7$.

3. Принимают толщину слоя наброски в укреплении

$$\delta = \Delta h_{max(н)}$$

Дальнейший расчет деформируемых выходных русел ведут согласно п. 8.5.6, начиная с формулы (67), подставляя вместо $\Delta h_{пр(д)}$ глубину $\Delta h_{max(н)}$, вычисленную по формуле (73).

При значительных глубинах размыва в выходном сечении сооружения $\Delta h_{max(н)вых}>0{,}5$ м, вычисленных по формуле (68), целесообразно выходные русла самоотмостки заменять на иные типы выходных русел.

8.5.8. Размыв за укреплениями, определение их размеров и глубины заделки концевых частей в выходных руслах из каменной наброски.

Расчеты выполняют в следующей последовательности.

1. Определяют предельную глубину размыва в грунте лога за укреплением $\Delta h_{пр}$ по формуле (34).

2. Определяют максимальную глубину размыва Δh_{max} по формулам (26) или (33).

3. Сравнивают толщину наброски δ с максимальной глубиной размыва Δh_{max}.

При $\delta_{max}>\Delta h_{\max}$ назначают выходное русло типа I (рисунок 7), для которого принимается глубина заложения концевой части $h_{\text{ук}}=\delta$, и дальнейший расчет ведут, начиная с п. 8 настоящего раздела.

При $\delta >\Delta h_{\max}$ за укреплением назначают рисберму из камня крупностью $d'_{\text{н}} = (0{,}4 \div 0{,}5)d_{\text{н}}$, (выходное русло типа II) и продолжают расчет.

4. Определяют максимальную глубину размыва за укреплением при наличии там рисбермы из каменной наброски по формулам (31), (33). При этом принимают удельный объем камня в рисберме $\overline{W}_{\text{к}} = 1{,}25\delta^2$ (исходя из крутизны откосов рисбермы: верхового 1:1 , низового 1:1,5 и глубины $h_{\text{рисб}}= \delta$).

5. Сравнивают δ с $\Delta h_{\max(\text{н})}$

При $\delta > \Delta h_{\max(\text{н})}$ выходное русло типа II принято правильно, и глубина заложения концевой части укрепления равна δ.

При $\delta < \Delta h_{\max(\text{н})}$ указанный тип выходного русла будет неустойчив, и его заменяют выходным руслом типа III.

6. Для случая $\delta > \Delta h_{\max(\text{н})}$ (выходное русло типа II) пересчитывают глубину рисбермы $h_{\text{рисб}}$ при глубине ее заложения δ по формуле (74):

$$h_{\text{рисб}} = \sqrt{\frac{0{,}5\, d'_{\text{н}} \Delta h_{max}^2}{1{,}25\left(\delta - \Delta h_{\text{пр}} \dfrac{d}{d'_{\text{н}}}\right)^{1/3}}} \qquad (74)$$

Дальнейший расчет для этого типа русел ведут, начиная с п. 8 настоящего раздела.

7. Для случая $\delta < \Delta h_{\max(\text{н})}$ (выходное русло типа III) глубину заложения концевой части укрепления $h_{\text{ук}} = h_{\text{рисб}}$ в выходных руслах типа III находят из уравнения (75):

$$h_{\text{ук}}^3 - M h_{\text{ук}}^2 \quad - N = 0\,, \qquad (75)$$

где коэффициенты M и N определяют по формулам (76) и (77):

$$M = \Delta h_{\text{пр}} \left(\frac{d}{d'_{\text{н}}}\right)^{1/3} \qquad (76)$$

$$N = 0{,}4d'_{н}\Delta h^2_{max} \quad (77)$$

8. Определяют ширину воронки размыва B_{min} в конце укрепления для всех типов выходных русел по формуле (54) при $\theta = 3{,}6$.

9. Сравнивают ширину воронки размыва B_{min} с шириной в конце укрепления B_1 (п. 8.5.6) и в качестве расчетной ширины укрепления в концевой его части $B_{ук}$ принимают большее из этих значений.

Протяженность концевой части укрепления по длине (участок, имеющий ширину $B_{ук}$) принимают равной 1 м.

При длине оставшейся части укрепления (без концевой части) менее 1 м назначают укрепление трапецеидальной формы в плане шириной на выходе из трубы B_1 и в конце укрепления – $B_{ук}$.

8.6. Выходные русла гофрированных труб, расположенных на подсыпке

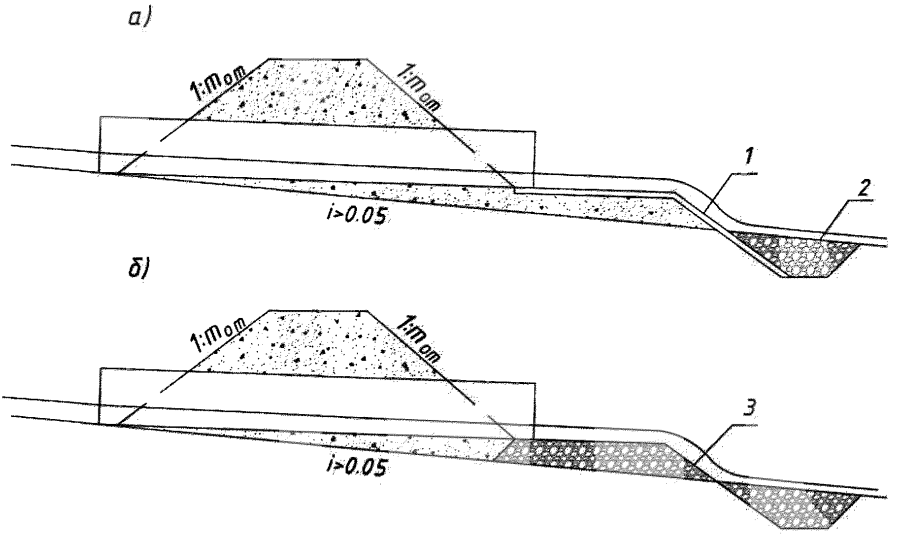
8.6.1. Поток, выходящий из гофрированных труб, расположенных на подсыпке, сбрасывается либо на низовой откос, либо отбрасывается за ее подошву путем устройства консольного сброса (или, как вариант, рассеивающего трамплина), либо, наконец, сбрасывается в нижний бьеф путем устройства шахтного сброса.

Расчет консольных сбросов и рассеивающих трамплинов приведен в [4, глава 4], а определение гидравлических характеристик потока в нижних бьефах шахтных сбросов может выполняться по тем же зависимостям, что и для укреплений за трубами, изложенным выше в настоящей главе.

Особенности определения гидравлических характеристик потока при сбросе воды на низовой откос насыпи излагаются ниже.

8.6.2. Возможны следующие варианты сброса потока на низовой откос насыпи:

а) сброс потока непосредственно на укрепленный монолитным бетоном или омоноличенными плитами откос насыпи (рисунок 16, а);



1 – укрепленный откос; 2 – рисберма; 3 – каменная отсыпка

Рисунок 16 – Схемы укладки гофрированных косогорных труб на насыпной грунт в теле насыпи

б) сброс потока на отсыпку из камня, расположенную в низовой части насыпи (рисунок 16, б).

При сбросе потока на укрепленный откос насыпи или на отсыпку из камня для снижения динамического воздействия потока устраивают берму.

8.6.3. При сбросе потока на укрепленные откосы насыпи расчеты выполняют в следующей последовательности.

1. Определяют минимальный размер бермы вдоль потока по формуле, полученной из уравнения свободного падения тела (78):

$$L_{б(min)} = 1.2 v_{вых} \sqrt{\frac{2h_{вых}}{g}}, \quad (78)$$

где 1,2 – коэффициент запаса.

2. Определяют ширину растекания потока на берме (эта ширина сохраняется на откосе насыпи) (79):

$$B_{раст(б)} = 16 \frac{D^2}{L_б} \left(\frac{Q}{Q_K}\right)^{D/L_б} \left(\frac{x}{D}\right)^{0.8} \left(\frac{Q}{Q_K}\right)^{0.5}, \quad (79)$$

где $\boldsymbol{B}_{\text{раст(б)}}$ – ширина растекания потока на берме в створе, проекция расстояния которого от выхода из трубы равна $\boldsymbol{x}$;

$\boldsymbol{D}$ – диаметр трубы;

$\boldsymbol{L}_{\text{б}}$ – длина бермы вдоль потока;

$\boldsymbol{Q_K = 0,51\sqrt{g}D^{5/2}}$ – эталонный расход, т.е. расход, при прохождении которого критическая глубина в сооружении равна 0,75 $\boldsymbol{D}$.

Ширину растекания потока на берме можно также определить по зависимости (21), соответствующей уклону лога $i_{\text{л}}$ >0,02, так как на берме, за которой следует откос насыпи, водоотводные зоны, сжимающие поток, не образуются, и кинематика потока соответствует указанному случаю.

По ширине растекания назначают ширину укрепления бермы.

3. Определяют скорости и глубины потока на сходе его с бермы по зависимости (17) – (19) и назначают по этим характеристикам тип укрепления [4, таблица 2.9].

4. Определяют глубины и скорости потока у подошвы откоса $h_{\text{пд}}$ либо на основе математической модели, либо с некоторым приближением находят среднюю глубину потока по уравнению неравномерного движения [4, глава 2], считая ширину потока на откосе равной ширине растекания на сходе с бермы $\boldsymbol{B}_{\text{раст(б)}}$. Можно также (дополнительно) принять среднюю глубину потока у подошвы откоса равной нормальной глубине, считая сечение потока прямоугольным (80):

$$\boldsymbol{h_{\text{пд}} = \left(\frac{Q\, n\sqrt{m_{\text{от}}}}{B_{\text{раст(б)}}}\right)^{3/5}}, \qquad (80)$$

где $\boldsymbol{m}_{\text{от}}$ и $\boldsymbol{n}$ – соответственно заложение и коэффициент шероховатости укрепленного откоса.

При расчете средних глубин у подошвы откоса по уравнению неравномерного или равномерного движения скорости у подошвы откоса определяют по формуле (81):

$$\boldsymbol{v_{\text{пд}} = \frac{Q}{h_{\text{пд}} B_{\text{раст(б)}}}}. \qquad (81)$$

5. По скоростям и глубинам у подошвы откоса назначают тип укрепления откоса [4, таблица 2.9].

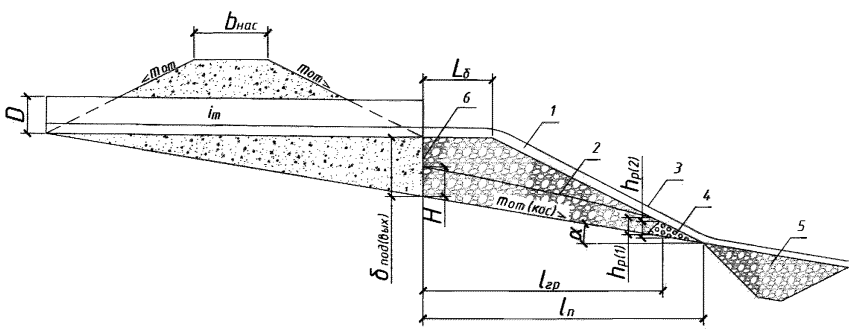
8.6.4. При отводе воды на берму и откос насыпи, отсыпанной из камня, гидравлические характеристики потока определяют, рассматривая подсыпку как фильтрующую насыпь, через которую сбрасывается поток в нижний бьеф (рисунок 17). Расчет ведут в следующем порядке:

1. Определяют скорости на выходе из трубы $\boldsymbol{v}_{\text{вых}}$ согласно рекомендациям главы 6.

2. Устанавливают, является ли наброска однородной или нет, и определяют ее устойчивость от размыва согласно п. 8.5.3 по формулам (55) – (60).

3. Определяют минимальный размер бермы вдоль потока, при котором поток, вытекающий из трубы, не попадает непосредственно на откос, по формуле (78).

4. Вычисляют ширину растекания потока на берме $\boldsymbol{B}_{\text{раст(б)}}$ по формуле (79) с введением в нее понижающего коэффициента 0,6, учитывающего особенности работы каменной наброски по сравнению с бетонным укреплением. На откосе эта ширина сохраняется. Можно также определить ширину растекания потока на основе двухмерной математической модели или по формуле (80).



1 – фильтрующий поток; 2 – поверхность воды для случая, когда весь расход фильтруется через

подсыпку; 3 – то же, когда часть расхода сливается по откосу подсыпки; 4 – обратный фильтр; 5 – рисберма; 6 – экран

Рисунок 17 – Расчетная схема нижнего бьефа гофрированной трубы, уложенной на подсыпке, при сбросе потока непосредственно на каменную наброску.

5. Назначают протяженность участка насыпи, отсыпанного из камня, – ширину фильтрующей части подсыпки $\boldsymbol{b}_{\text{ф}}$. В первом приближении принимают $\boldsymbol{b}_{\text{ф}} = \boldsymbol{B}_{\text{раст(б)}}$.

Далее каменная наброска рассматривается как фильтрующая насыпь (переливаемая или непереливаемая).

6. Определяют нормальную глубину фильтрационного потока, принимая его сечение прямоугольным и предполагая, что весь расход профильтруется через подсыпку (82):

$$\boldsymbol{h_0} = \frac{\boldsymbol{Q}\sqrt{\boldsymbol{m}_{\text{от(кос)}}}}{\boldsymbol{b}_{\text{ф}}\boldsymbol{K}_{\text{ф}}}, \tag{82}$$

где $\boldsymbol{m}_{\text{от(кос)}}$ – коэффициент заложения откоса косогора;

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации наброски.

Для однородной наброски коэффициент фильтрации $K_{\text{ф}}$ определяют [4, таблица 8.1], для неоднородной по формуле (83):

$$\boldsymbol{K}_{\text{ф(неодн)}} = \boldsymbol{K}_{\text{ф(одн)}} \frac{\boldsymbol{p}_{\text{неодн}}}{\boldsymbol{p}_{\text{одн}}} \sqrt{\frac{(1-\boldsymbol{p}_{\text{одн}})\boldsymbol{p}_{\text{неодн}}}{(1-\boldsymbol{p}_{\text{неодн}})\boldsymbol{p}_{\text{одн}}}}, \tag{83}$$

где $\boldsymbol{K}_{\text{ф(одн)}}$ – коэффициент фильтрации для однородной наброски, имеющей диаметр частиц $d_{\text{н}}$, равный среднему диаметру частиц неоднородной наброски;

$\boldsymbol{p}_{\text{одн}}, \boldsymbol{p}_{\text{неодн}}$ – пористость соответственно однородной и неоднородной наброски.

Средний диаметр частиц наброски:

$$\boldsymbol{d}_{\text{н}} = \frac{\sum \boldsymbol{d}_{\text{н}(i)}\boldsymbol{P}_i}{100},$$

где $\boldsymbol{d}_{\text{н}(i)}$ – средний диаметр частиц отдельной фракции;

$\boldsymbol{P}_i$ – весовая доля фракции.

7. Определяют глубину фильтрационного потока H в створе конца трубы (рисунок 17) из уравнения (84):

$$f(\xi) = \frac{l_{\text{п}}\sqrt{m^2_{\text{от(кос)}}+1}}{h_0 m^2_{\text{от(кос)}}} - f(\xi_{\text{б}}), \tag{84}$$

где $l_{\text{п}}$ – проекция расстояния от конца трубы до точки пересечения откосов отсыпки и косогора в случае отсутствия подтопления со стороны нижнего бьефа или до створа, проходящего через урез воды в нижнем бьефе, при подтоплении;

$f(\xi)$, $f(\xi_{\text{б}})$ – функции относительных глубин соответственно в створе конца трубы ($\xi = H/h_0$) и конца подсыпки ($\xi_{\text{б}} = h_{\text{нб}}/h_0$), определяемые при прямоугольном сечении наброски [4, по табл. 8.4]; иные формы сечений приводят к прямоугольным.

При отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа ($h_{\text{нб}} = 0$) уравнение (84) имеет вид (85):

$$f(\xi) = \frac{l_{\text{п}}\sqrt{m^2_{\text{от(кос)}}+1}}{h_0 m^2_{\text{от(кос)}}} \tag{85}$$

8. Определяют устойчивость низового откоса подсыпки из условия (86):

$$z < z_{\text{пр}}, \tag{86}$$

где z – разность отметок уровней в створах конца трубы и конца подсыпки;

$z_{\text{пр}}$ – предельная разность, при превышении которой нарушается устойчивость откоса подсыпки.

В свою очередь:

$$z = H + \frac{l_{\text{п}}}{m_{\text{от(кос)}}} - h_{\text{нб}}\ ; \tag{87}$$

$$z_{\text{пр}} = 2,3(tg\varphi_{\text{н}} - tg\beta) l_{\text{п}} \frac{\sqrt{m^2_{\text{от(кос)}}+1}}{m_{\text{от(кос)}}} \sqrt{\frac{d_{\text{н}}}{d}}, \tag{88}$$

где φ – угол естественного откоса каменной наброски, равный 35-36°;

$tg\varphi_{\text{н}} = 0,700 \div 0,725$;

β – угол наклона низового откоса к горизонту.

При соблюдении условия (86) расчет заканчивают, в противном случае уполаживают откос, вновь производят проверку условия (86) и так продолжают до его удовлетворения.

9. Проверяют устойчивость основания насыпи от размыва при ламинарной фильтрации. Для этого сравнивают глубину H с предельной глубиной $H_{пр}$, обеспечивающей устойчивость против ламинарной фильтрации (89):

$$\boldsymbol{H}_{пр} = \frac{\boldsymbol{l}_{п}\sqrt{\boldsymbol{m}^2_{от(кос)}+\boldsymbol{1}}}{\boldsymbol{\delta m}_{от(кос)}}, \qquad (89)$$

где $\boldsymbol{\delta}$ – коэффициент, определяемый по [4, таблица 8.2].

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

10. Сравнивают глубину потока H с толщиной подсыпки в сечении, проходящем через конец лотка трубы на выходе $\boldsymbol{\delta}_{под(вых)}$. При $H \le \boldsymbol{\delta}_{под(вых)}$ весь поток профильтрует внутрь подсыпки, при $H > \boldsymbol{\delta}_{под(вых)}$ часть расхода попадет на откос подсыпки.

11. Для случая $H < \boldsymbol{\delta}_{под(вых)}$ устанавливают, не выходит ли поток на откос подсыпки. Для этого делят расстояние $\boldsymbol{l}_{п}$ на 4 – 5 равных частей и в конце каждой из них (считая от конца подсыпки) определяют глубину потока h_0 по уравнению (84) или (85), подставляя вместо $\boldsymbol{l}_{п}$ расстояния $\boldsymbol{l}_{i}$ от конца подсыпки (84) до рассматриваемых створов. Затем в каждом из сечений устанавливают толщину подсыпки $\boldsymbol{\delta}_{под(i)}$. При однообразном уклоне косогора для этой цели можно воспользоваться формулой (90):

$$\boldsymbol{\delta}_{под(i)} = \frac{\boldsymbol{l}_{i}\boldsymbol{m}_{от(кос)} - \boldsymbol{m}_{от(под)}}{\boldsymbol{m}_{от(кос)}\boldsymbol{m}_{от(под)}} \qquad (90)$$

При этом возможны два случая:

1) $\boldsymbol{\delta}_{под(i)} \ge \boldsymbol{h}_{i}$ – весь поток фильтрует через подсыпку (безнапорная фильтрующая подсыпка);
2) $\boldsymbol{\delta}_{под(i)} < \boldsymbol{h}_{i}$ – часть потока выходит на поверхность откоса (напорная фильтрующая подсыпка).

Рассмотрим случай 1 $\boldsymbol{\delta_{под(i)} \geq h_i}$.

12. Находят расчетную глубину фильтрационного потока, определяющую максимальные скорости турбулентной фильтрации:

а) при отсутствии подтопления со стороны нижнего бьефа по формуле (91):

$$\boldsymbol{h_р = 0,8 h_к = 0,8 \sqrt[3]{\alpha Q^2 / \left(g p^2 \varepsilon_з^2 b_ф^2\right)}}, \quad (91)$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ – коэффициент кинетической энергии; $\boldsymbol{\alpha = 2,5}$;

$\boldsymbol{p}$ – пористость наброски;

$\boldsymbol{\varepsilon_з}$ – коэффициент, учитывающий образование в порах каменной наброски застоя воды; $\boldsymbol{\varepsilon_з = 0,9}$.

б) при наличии подтопления:

$$\boldsymbol{h_р = h_{нб}},$$

где $\boldsymbol{h_{нб}}$ – глубина в нижнем бьефе в конце подсыпки.

13. Определяют максимальную скорость турбулентной фильтрации по формуле (92):

$$\boldsymbol{v_м = \frac{1,7Q}{h_р b_ф p \varepsilon_з}} \quad (92)$$

14. Сравнивают $\boldsymbol{v_м}$ с допускаемыми скоростями для грунтов основания насыпи $\boldsymbol{v_{доп}}$.

При $\boldsymbol{v_м \leq v_{доп}}$ устойчивость основания от турбулентной фильтрации обеспечивается, в противном случае – нет. Для достижения устойчивости делают вырезку грунта и заменяют его грунтом с $\boldsymbol{v_{доп} \geq v_м}$. Толщина вырезки должна обеспечить возможность укладки не менее трех слоев частиц грунта общей толщиной не менее 8 – 10 см.

15. Устраивают обратный фильтр у подошвы подсыпки высотой не менее $\boldsymbol{h_р}$.

Рассмотрим случай 2 ($\boldsymbol{\delta_{под(i)} < h_i}$).

16. Устанавливают расстояние от конца подсыпки до места выклинивания потока на откос (93):

$$\boldsymbol{l_{гр} = \frac{Q m_{от(кос)} m_{от(под)}}{\left(m_{от(кос)} - m_{от(под)}\right) b_ф K_ф \sqrt{H / l_п + 1 / m_{от(кос)}}}} \quad (93)$$

17. Определяют толщину фильтрующей подсыпки, равную глубине фильтрации потока $\boldsymbol{h_{р1}}$, в месте выклинивания потока на откос (94):

$$\boldsymbol{\delta_{гр} = \frac{m_{от(кос)} - m_{от(под)}}{m_{от(кос)} m_{от(под)}} l_{гр}} \quad (94)$$

18. Делят расстояние $\boldsymbol{l_{гр}}$ на 3 – 4 равные части и в конце каждого сечения подсыпки (считая от ее конца) определяют фильтрационный расход (95):

$$\boldsymbol{Q_{1(i)} = \frac{\delta_{под(i)}}{\delta_{под(гр)}} Q}, \quad (95)$$

где $\boldsymbol{\delta_{под(i)}}$ – толщина подсыпки в рассматриваемом створе;

$\boldsymbol{Q}$ – полный расход сооружения.

19. Определяют средние скорости турбулентной фильтрации (96):

$$\boldsymbol{v_{ф} = K_{ф} \sqrt{\frac{H}{l_{п}} + \frac{1}{m_{от(кос)}}}} \quad (96)$$

20. Определяют максимальную скорость турбулентной фильтрации (97):

$$\boldsymbol{v_{м} = \frac{1{,}7 v_{ф}}{p \varepsilon_{з}}} \quad (97)$$

21. Сравнивают $\boldsymbol{v_{м}}$ с допускаемыми скоростями для грунтов основания подсыпки.

При $\boldsymbol{v_{м} \leq v_{доп}}$ устойчивость основания подсыпки от турбулентной фильтрации обеспечивается, в противном случае – нет.

Для обеспечения устойчивости требуется произвести вырезку грунта и заменить его грунтом с $\boldsymbol{v_{доп} > v_{м}}$. Толщина вырезки должна быть не менее трех слоев частиц грунта общей толщиной не менее 8 – 10 см.

22. Устанавливают расход потока $\boldsymbol{Q_{2(i)}}$, протекающего на откосе подсыпки в различных сечениях на участке от места выклинивания потока до конца подсыпки (98):

$$\boldsymbol{Q_{2(i)} = Q - Q_{1(i)}} \quad (98)$$

23. Определяют глубину потока на откосе подсыпки из уравнения Шези при $\boldsymbol{C = 1/n}$ (как для быстроточного режима) (99):

$$\boldsymbol{h_{отк(i)} = \left(\frac{Q_{2(i)} n \sqrt{m_{от(под)}}}{B_{раст}} \right)^{2/3}}, \quad (99)$$

где $m_{от(под)}$ – коэффициент заложения низового откоса подсыпки;

n – коэффициент шероховатости откоса.

При $n = 0,05$ (для камня) (100):

$$h_{отк(i)} = 0,135 m_{от(под)}^{1/3} \left(\frac{Q}{B_{раст}}\right)^{2/3} \quad (100)$$

24. Вычисляют скорость потока на откосе (101):

$$v_{отк(i)} = \frac{Q_{2(i)}}{h_{отк(i)} B_{раст}} \quad (101)$$

25. Определяют допускаемые скорости для камней наброски на откосе подсыпки по формулам п. 8.5.3:

а) при однородной наброске (102):

$$v_{доп(отк)} = 6,6 k_{от} \sqrt{d_н}; \quad (102)$$

б) при неоднородной наброске (103):

$$v_{доп(отк)} = 2,1 K_{нр}^{\breve{n}} \sqrt{g d_{н(м)}}\, k_{от}, \quad (103)$$

где $k_{от}$ – коэффициент, учитывающий снижение устойчивости камней на откосе, вычисляется по формуле (104):

$$k_{от} = \sqrt[4]{1 - \left(\frac{m_0}{m_{от}}\right)^2}, \quad (104)$$

где $m_{от}$ – коэффициент заложения откоса;

m_0 – коэффициент естественного заложения откоса; для камня $m_0 \approx 1,10 \pm 1,3$, причем меньшее значение относится к грубооколотым камням, большее – к окатанным.

Значения $K_{нр}$, $\breve{n}$ приведены в п. 8.5.3.

26. Определяют устойчивость каменной наброски на откосе подсыпки (105):

$$v_{отк(i)} \le v_{доп(отк)} \quad (105)$$

При несоблюдении условия (105) крупность камня на поверхности откоса увеличивается, причем укладывают не менее трех слоев требуемой крупности.

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

Последующий расчет одинаков для случаев а и б.

28. Назначают у подошвы откоса укрепление из каменной наброски, размеры приведены в разделе 8.5. При этом вычисляют глубины размыва, принимая длину укрепления равной сумме длин откоса подсыпки, укрепления у ее подошвы и ширины бермы.

9 Гидравлические расчеты труб, расположенных каскадом

При выполнении расчета равнинных труб в соответствии с алгоритмом, изложенным в главе 6, возможен случай расположения труб на одном водотоке. В этом случае необходимо учесть взаимное влияние гидравлической работы труб, выполнив расчет в указанном ниже порядке. Расчет начинается с низовой трубы.

В соответствии с главой 6 определяются все расчетные характеристики низовой трубы, в том числе и подпор перед трубой и соответствующая ему отметка ПУВВ.

При расчете верховой трубы выполняется проверка условия безнапорного протекания по отметке ПУВВ низовой трубы. При невыполнении проверки отверстие верховой трубы увеличивается.

Во избежание заиливания низовой трубы выполняется проверка минимального расстояния l_{min}, м, между концом укрепления верховой трубы и началом низовой по формуле (106):

$$l_{min} = \Delta h_{\max} \left[(m_{от} + m_{вн}) + 2(1{,}5 m_{вн} + 1) \left(1 - \frac{0{,}85 h_{п}}{h_{нб}}\right)^{5} \right], \qquad (106)$$

где Δh_{max} – максимальная глубина размыва на выходе из верхового сооружения (глава 8);

$m_{от}$ – заложение предохранительного откоса укрепления верхового сооружения;

$m_{вн}$ – заложение низового откоса воронки размыва верхового сооружения, определяется по таблице 5;

$h_{п}$ – предельная глубина потока в нижнем бьефе верхового сооружения, м;

$h_{нб}$ – глубина потока в нижнем бьефе верхового сооружения, м.

Таблица 5 – Заложение низового откоса воронки размыва верхового сооружения

$h_{нб}/0,85h_{п}$	$m_{вн}$
1	2,0
2	5,5
3	5,5
4	4,5
6	3,5
8	3,0
10	2,7
≥15	2,0

При невозможности выполнения данного условия устраивается укрепление всего русла на участке сопряжения верховой и низовой труб.

Приложение А

Пример назначения отверстия и определения пропускной способности спиральновитых металлических гофрированных труб

Спиральновитая металлическая гофрированная труба без оголовков (с вертикальным срезом). Высота насыпи $H_{нас}$ = 3,5 м, ширина поверху $b_{нас}$ = 6,5 м, заложение откосов 1:1,5. Уклон лотка трубы соответствует уклону лога $i_т$ = 0,03. Расчетный расход $Q_р$ = 3,0 м^3/с.

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

Решение

1. Определяем длину трубы $l_т = 6,5 + 3,5 \cdot 2 \cdot 1,5 = 17$ м.
2. Находим отверстие трубы.

Спиральновитые металлические гофрированные трубы должны пропускать расчетный расход при безнапорном режиме и иметь при этом заполнение на входе при пропуске расчетного расхода $\frac{h_{вх}}{D} \leq 0,75$.

По таблице 1 принимаем параметр расхода для трубы без оголовка с вертикальным срезом, соответствующий указанному выше заполнению:

при $\frac{h_{вх}}{D} = 0,75$ $\quad$ $П_Q = \frac{Q_р}{D^2\sqrt{gD}} = 0,275$.

Зная параметры расхода, находим по ним минимальные диаметры трубы по формуле (1):

$$D = \left(\frac{Q}{П_Q\sqrt{g}}\right)^{2/5} = \left(\frac{3,0}{0,275\sqrt{9,81}}\right)^{2/5} = 1,65 \text{ м}.$$

Вычисленный диаметр D округляется в большую сторону до 0,1. Принимаем к расчету отверстие трубы $D = 1,7$ м. Размер гофра принимаем 125х26 мм без гладкого лотка.

Уточняем параметр расхода для принятого диаметра по формуле (2):

$$П_Q = \frac{Q_р}{D^2\sqrt{gD}} = \frac{3,0}{1,7^2\sqrt{9,81 \cdot 1,7}} = 0,254$$

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

гидравлическом отношении. Для этого из соотношения (3) определяем значение критического уклона:

$$i_{кр} = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k},$$

где Q – расчетный расход потока, м^3/с;

$\omega_к$ – площадь живого сечения потока (м^2) при критической глубине h_k, м^2;

R_k – гидравлический радиус сечения потока, м;

C_k – коэффициент Шези, определяемый по формуле Павловского:

$$C_k = \frac{1}{n} R_k^y,$$

где n =0,0254– коэффициент шероховатости поверхности (таблица 2);

$$\boldsymbol{y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R_k}\left(\sqrt{n} - 0,1\right)}.$$

Критическую глубину потока определяют для известных значений $П_Q$ и D по графику на рисунке 3.

$$h_k = 0{,}49 \cdot D = 0{,}49 \cdot 1{,}7 = 0{,}83$$

Отсюда:

$\omega_к$=1,10 м^2, χ_k = 2,63 м, R_k =0,42, м, C_k = 31,95

Получаем:

$$i_{кр} = \frac{3{,}0^2}{1{,}1^2\ 31{,}95^2\ 0{,}42} = 0{,}017$$

Сравниваем уклон трубы $\boldsymbol{i_т}$ с критическим $\boldsymbol{i_к}$:

$$\boldsymbol{i_к = 0,017 < i_т = 0,03}.$$

Следовательно, трубы «короткая». Проверка по критерию относительной длины трубы не требуется.

4. Определяем подпертые глубины перед трубой из формулы (7):

$$\boldsymbol{H = \left(\frac{Q}{m b_к \sqrt{2g}}\right)^{2/3}}.$$

Предварительно находим $\boldsymbol{b_к}$ по графику на рисунке 4.

При $П_Q = 0,254$ $b_к = 1,33$ м;

$$H_р = \left(\frac{3,0}{0,31 \cdot 1,33\sqrt{2 \cdot 9,81}}\right)^{2/3} = 1,39 \text{ м}.$$

5. Находим возвышение бровки полотна над подпертым уровнем $\Delta_{бп}$ при высоте насыпи $H_{нас}$ = 3,5 м:

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

Требования технических условий выполнено.

6. Определяем глубины и скорости на выходе из трубы соответственно по формулам (9) и (10):

$$\frac{h_{вых}}{D} = \frac{0.54}{i_т^{0.1}} П_Q^{0.6} = \frac{0.54}{0,03^{0.1}} 0,254^{0.6} = 0,34;$$

$$h_{вых} = 0,34 \cdot 1,7 = 0,58 \text{ м};$$

$$\omega_{вых} = 0,68 \text{ м}^2$$

$$v_{вых} = \frac{Q}{\omega_{вых}} = \frac{3,0}{0,68} = 4,4 \text{ м/с}.$$

Приложение Б

Пример расчета выходного русла с укреплениями из связанных между собой элементов (бетонных)

Уклон лога $i_л = 0,02$. Спиральновитая металлическая гофрированная труба D = 1,5 м без оголовков (с вертикальным срезом) $b_р$ = 1,5 м расположена на автомобильной дороге; уклон трубы $i_т$ = 0,02, уклон лога $i_л$ = 0,01; расчетный расход в сооружении $Q_р$ = 2,3 м^3/с; объем стока $W_р = 21 \cdot 10^3$ м^3; лог широкий в виде наклонной плоскости; грунты лога – пески со средним диаметром частиц d = 1 мм. Требуется назначить тип выходного русла и определить размеры укреплений на выходе из трубы.

Решение

1. Предварительно увеличиваем расчетный расход на 30% для учета возможной ошибки и обеспечения необходимого запаса:

$$1,3Q_р = 1,3 \cdot 2,3 = 3,0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчет ведем на расход Q = 3,0 м^3/с.

2. Назначаем тип выходного русла. Труба практически полностью загружена, согласно указаниям п. 8.4.2 назначаем выходное русло типа 1к.

3. Определяем глубину на выходе из трубы $\boldsymbol{h_{вых}}$. Для этого находим параметр расхода по формуле $П_{\boldsymbol{Q}} = \boldsymbol{Q} / \left(\boldsymbol{D^2\sqrt{gD}}\right) = \frac{3,0}{1,5^2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 1,5}} = \boldsymbol{0,35}$ и по графику на рисунке 5 находим $\frac{\boldsymbol{h_{вых}}}{\boldsymbol{D}} = \boldsymbol{0,45}$, откуда $\boldsymbol{h_{вых} = 0,45 \cdot 1,5 = 0,68}$ м.

4. Определяем скорости на выходе из трубы $\boldsymbol{v_{вых}}$ по формуле (10) $\boldsymbol{v_{вых}} = \boldsymbol{Q} / \boldsymbol{\omega_{вых}} = \frac{3,0}{0,779} = \boldsymbol{3,85}$. Максимальные скорости на укреплении $\boldsymbol{v_{укр(max)}}$ при $i_т \le 0,02$ согласно п. 8.2.1 принимаем равными $\boldsymbol{v_{вых} = 1,2 \cdot 3,85 = 4,62}$ м/с.

5. Назначаем тип укрепления по [4, таблица 2.9] при $\boldsymbol{v_{укр(max)} = 4,62}$ м/с принимаем бетонное монолитное укрепление длиной $L = 2D = 2 \cdot 1,5 = 3$ м (см. п. 8.4.2).

4. Определяем глубину размыва в принятом выходном русле в следующей последовательности:

а) вычисляем предельную глубину размыва по формуле (34), для чего предварительно вычисляем $Q_к$ и $\delta_м$:

$$Q_К = 0,51\sqrt{g}D^{5/2} = 0,51\sqrt{9,81} \cdot 1,5^{5/2} = 4,4 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\delta_м = 0,85\left(\frac{1}{D}\right)^{0,075} = 0,85\left(\frac{1}{1,5}\right)^{0,075} = 0,82.$$

Для принятого выходного русла типа 1к ψ = 1 и для него по таблице 4 находим r = 0,9 и s = 0,6. Тогда имеем

$$\Delta h_{пр} = 0,9 \cdot 0,82 * 1,0 \cdot 1,5\left(\frac{3,0}{4,4}\right)^{0,6}\left[\frac{1,5^3}{(2,0+1)1,5 \cdot 1,5 \cdot 0,001}\right]^{0,2} = 3,05 \text{ м};$$

б) определяем продолжительность паводка по формуле (39):

$$t = 0,5\frac{W_p}{Q} = 0,5\frac{21 \cdot 10^3}{3,0} = 3500 \text{ с};$$

в) определяем эталонное время размыва по формуле (38) при $C_р$ = 0 (несвязные грунты):

$$t_0 = 540\left(\frac{Q}{Q_н}\right)^{0,25}\frac{\Delta h_{пр}^3}{Q} = 540\left(\frac{3,0}{4,4}\right)^{0,25}\frac{3,05^3}{3,0} = 4640 \text{ с};$$

г) определяем долю предельной глубины размыва, осуществляемую за время прохождения паводка, по формуле (37):

$$\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{t}{t_0}+1}} = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{3500}{4640}+1}} = 0,48;$$

д) определяем максимальную глубину размыва по формуле (26):

$$\Delta h_{max} = \Delta h_{пр}\eta = 3,05 \cdot 0,48 = 1,46 \text{ м};$$

е) назначаем расчетное значение удельного объема камня в рисберме исходя из условия $W_{к(min)} \le \overline{W}_к \le \overline{W}_{к(max)}$, для чего находим значения $W_{к(min)}$ и $\overline{W}_{к(max)}$ соответственно по формулам (29) и (30). В первом приближении крупность камня при этом принимаем $d_н$ = 0,1 м:

$$W_{к\,min} = Ad_н\frac{\Delta h_{max}}{1-\left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3}\frac{1}{\eta}} = 0,13 \cdot 0,1\frac{1,46}{1-\left(\frac{0,001}{0,1}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{1}{0,48}} = 0,035 \text{ м}^3/\text{м};$$

$$\overline{W}_{к(max)} = 1,4\left(D_э\frac{Q}{Q_к}\right)^2 = 1,4\left(1,5\frac{3,0}{4,4}\right)^2 = 1,46 \text{ м}^3/\text{м}.$$

Принимаем $\overline{W}_к$ = 0,25 м^3/м;

ж) уточняем принятую крупность камня в рисберме, исходя из формулы (28):

$$d_{\text{н}} \geq d^{1/4}\left(\frac{\Delta h_{\text{пр}}}{10-A\frac{\Delta h_{max}^2}{W_{\text{к}}}}\right)^{3/4}, \text{ т.е. } d_{\text{н}} \geq 0,001^{\frac{1}{4}}\left(\frac{3,05}{10-0,13\frac{1,46^2}{0,25}}\right)^{\frac{3}{4}} = 0,08 \text{ м}.$$

Следовательно, крупность камня $d_{\text{н}} = 0,1$ м принята правильно;

з) определяем глубину размыва в принятом выходном русле по формуле (27):

$$\Delta h_{\text{max(н)}} = \Delta h_{\text{пр}}\left(\frac{d}{d_{\text{н}}}\right)^{\frac{1}{3}} + Ad_{\text{н}}\frac{\Delta h_{max}^2}{\overline{W}_{\text{к}}} = 3,05\left(\frac{0,001}{0,10}\right)^{\frac{1}{3}} +$$

$$+0,13 \cdot 0,1\frac{1,46^2}{0,25} = 0,77 \text{ м} < 2,0 \text{ м, т.е. тип русла 1к назначен правильно.}$$

5. Назначаем глубину заделки концевой части укрепления для типа 1к – глубину заложения предохранительного откоса. Согласно указаниям п. 8.4.4 принимаем глубину заложения концевой части укрепления:

$$\Delta h_{\text{укр}} = 1,2\Delta h_{\text{max(н)}} = 1,2 \cdot 0,77 = 0,92 \text{ м} \approx 1,0 \text{ м}.$$

6. Определяем ширину растекания потока. При $i_{\text{л}} \leq 0,02$ расчет выполняем по формуле (13), предварительно вычислив показатель степени z по формуле (14) и коэффициент K по графику на рисунке 8.

При $\frac{L}{D} = 2$ и $\frac{\Delta h_{max}}{D} = \frac{1,46}{1,5} = 0,97$ $K = 0,62$;

$$z = 1,8lg\left[\frac{1}{K}\frac{\Delta h_{max}}{D_{\text{э}}}\left(\frac{Q_{\text{К}}}{Q}\right)^{0,2}\right];$$

$$z = 1,8lg\left[\frac{1}{0,62}\frac{1,46}{1,50}\left(\frac{4,4}{3,0}\right)^{0,2}\right] \approx 0,41;$$

$$B_{\text{раст}} = b\left[\left(\frac{x}{D_{\text{э}}}+1\right)^{z}-1\right] + b_{\text{р}} = 1,5\left[\left(\frac{x}{1,5}+1\right)^{0,41}-1\right]+1,5.$$

Результаты расчет приведены ниже:

x, м	0	1,0	2,0	3,0
x/D	0	0,67	1,33	2,0
$B_{\text{раст}}$, м	1,5	1,85	2,12	2,35

7. Определяем ширину укрепления. Расчет выполняем в такой последовательности:

а) назначаем ширину укрепления на всей ее длине, кроме концевой части, по ширине растекания с запасом, равным по 1 м с каждой стороны укрепления, т.е.

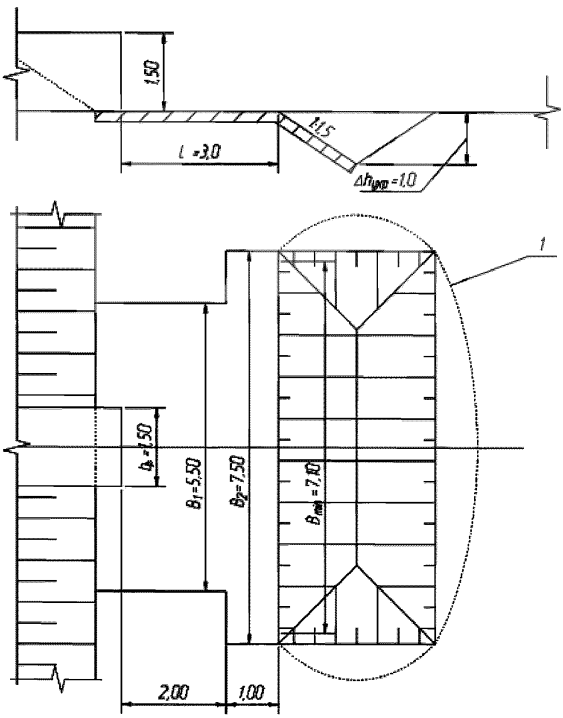
$\boldsymbol{B = B_{\text{раст}} + 2,0}$ м;

б) находим ширину укрепления в его конце по формуле (54) при θ = 3,0 и $\Delta \boldsymbol{h_{\text{кан}}}$ = 0:

$$\boldsymbol{B_{min} = \frac{\theta}{K}\Delta h_{max} = \frac{3,0}{0,62}1,46 = 7,1 > B_{\text{раст}(max)} + 2,0 = 2,35 + 2,0 = 5,35}$$

м;

в) принимаем окончательные размеры укрепления в плане, исходя из кратности их 0,5 м (рисунок Б.1).



1 – контур воронки размыва

Рисунок Б.1 – Конструкция и размеры укреплений, полученные в результате расчета нижнего бьефа трубы

Приложение В

Пример расчетов выходных русел с укреплениями из каменной наброски

Спиральновитая металлическая гофрированная труба D = 1 м без оголовков (с вертикальным срезом) $b_р$ = 1,0 м, расположена на автомобильной дороге; сток снеговой – аккумуляция не учитывается; расчетный расход в сооружении $Q_р$ = 1,5 м^3/с; грунты лога – пески со средний диаметром частиц d = 1 мм; уклон лога трубы $i_т$ = 0,01.

Требуется определить размеры неразмываемого недеформируемого выходного русла, изготавливаемого из однородного камня на щебеночной подготовке.

Решение

I. Определение лимитирующего расхода

Для обеспечения запаса устойчивости укрепления увеличиваем расчетный расход на 30%: $\boldsymbol{Q = 1,3Q_р = 1,3 \cdot 1,5 \approx 2,0}$ м^3/с и принимаем этот расход для дальнейших расчетов.

II. Определение размеров укреплений

1. Определяем глубину на выходе из трубы $\boldsymbol{h_{вых}}$. Для этого находим параметр расхода по формуле $\boldsymbol{П_Q = Q/\left(D^2\sqrt{gD}\right) = \frac{2,0}{1,0^2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 1,0}} = 0,63}$ и по графику на рисунке 5 находим $\boldsymbol{\frac{h_{вых}}{D} = 0,65}$, откуда $\boldsymbol{h_{вых} = 0,65 \cdot 1,0 = 0,65}$ м.

Определяем скорости на выходе из трубы $\boldsymbol{v_{вых}}$ по формуле (10) $\boldsymbol{v_{вых} = Q/\omega_{вых} = \frac{2,0}{0,54} = 3,7}$.

2. Определяем минимальный диаметр частиц наброски, при котором укрепление будет устойчивым от размыва. Для трубы без оголовка воспользуемся формулой (56):

$$\boldsymbol{d_н \leq \frac{v_{вых}^2}{43} = \frac{3,7^2}{43} = 0,32} \text{ м.}$$

Принимаем средний размер каменной наброски $\boldsymbol{d_н = 0,35}$ м.

3. Определяем по формуле (62) толщину слоя наброски, при котором

укрепление будет недеформируемым (расчет вначале ведем без учета подсыпки):

$$\boldsymbol{\delta = D_э\left[0,45\frac{\sqrt[8]{d_н}}{d} + \left(\frac{1,15v_{вых}K_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{gD_э}} - 1\right)\right]}.$$

В нашем случае $\boldsymbol{D_э = D = 1}$ м; $\boldsymbol{d_н = 0,35}$ м; $\boldsymbol{d = 0,001}$ м; $\boldsymbol{v_{вых} = 3,7}$ м/с; $\boldsymbol{K_{ог(\Delta h)} = 1,0}$.

Подставим эти значения в формулу, получим:

$$\boldsymbol{\delta = 1,0\left[0,45\sqrt[8]{\frac{0,35}{0,001}} + \left(\frac{1,15\cdot3,7\cdot1,0}{\sqrt{9,81\cdot1,0}} - 1\right)\right] = 0,45\cdot2,08 + 0,36 \approx 1,30} \text{ м}.$$

Примем, что 20% этой глубины составит подготовка из щебня со средней крупностью частиц $\boldsymbol{d_{н(щ)} = 0,05}$ м и повторим расчет по той же формуле, подставив в нее вместо $\boldsymbol{d_н}$ значение $\boldsymbol{d_{н(э)}}$, определяемое по формуле (64):

$$\boldsymbol{d_{н(э)} = \frac{0,80\cdot1,30\cdot0,35+0,20\cdot1,30\cdot0,05}{1,30} = 0,29} \text{ м}.$$

Тогда имеем:

$$\boldsymbol{\delta = 1,0\left[0,45\sqrt[8]{\frac{0,29}{0,001}} + 0,36\right] = 0,45\cdot1,95 + 0,36 \approx 1,25} \text{ м}.$$

Принимаем укрепление состоящим из каменной наброски толщиной $\boldsymbol{\delta_1 = 1,25\cdot0,80 \approx 1,00}$ м и щебеночной подготовки $\boldsymbol{\delta_2 = 0,25}$ м.

4. Принимаем длину укрепления $\boldsymbol{L = 1,5D_э = 1,5\cdot1,0 = 1,5}$ м.

5. Определять ширину растекания потока в конце укрепления ($x = L$ = 1,5 м) по формуле (13):

$$\boldsymbol{B_{раст} = b\left[\left(\frac{x}{D_э} + 1\right)^z - 1\right] + b_р}.$$

Предварительно вычисляем эталонный расход $\boldsymbol{Q_к}$ и показатель степени $\boldsymbol{z}$ по формуле (15):

$$\boldsymbol{Q_к = 1,6D_э^{5/2} = 1,6\cdot1 = 1,6} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\boldsymbol{z = 0,78 + 0,36lg\frac{Q_к}{Q} = 0,78 + 0,04 = 0,82}.$$

Остальные входящие в формулу (13) значения равны: $\boldsymbol{b = D = 1,0}$ м; $\boldsymbol{b_р = 1,0}$ м.

Отсюда имеем $\boldsymbol{B_{раст} = 1\left[\left(\frac{1,5}{1} + 1\right)^{0,82} - 1\right] + 1,0 = 2,1}$ м.

6. Назначаем ширину укрепления:

в створе на выходе из оголовка:

$$\boldsymbol{B_1 = b_р + 2,0 = 1,0 + 2,0 = 3,0}\ \text{м};$$

в створе конца укрепления:

$$\boldsymbol{B_2 = B_{раст} + 1,0 = 2,1 + 1,0 = 3,1}\ \text{м} = \boldsymbol{B_1}.$$

III. Расчеты размыва за укреплениями и определение размеров их концевых частей

1. Определяем глубину размыва в грунте лога за укреплениями по формуле (34):

$$\Delta \boldsymbol{h}_{пр} = \boldsymbol{r\delta_м\psi D_э}\left(\frac{\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{Q_к}}\right)^{\boldsymbol{s}}\left[\frac{\boldsymbol{D_э^3}}{\left(\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{D_э}}+1\right)^{\boldsymbol{s_1}}\boldsymbol{bb_р d}}\right]^{0,2}.$$

Находим величины, входящие в формулу.

Масштабный коэффициент $\boldsymbol{\delta_м}$ для трубы $\boldsymbol{D = 1}$ м: $\boldsymbol{\delta_м = 0,85}$.

По таблице 4 s = 0,6 и r = 1,0.

Показатель степени для недеформируемых укреплений $\boldsymbol{s_1 = 2,5}$ и коэффициент $\boldsymbol{\psi = 0,6}$.

Остальные значения определены выше.

Подставив все значения в формулу, получим:

$$\Delta \boldsymbol{h}_{пр} = \boldsymbol{1,0 \cdot 0,85 \cdot 0,6 \cdot 1,0}\left(\frac{\boldsymbol{2,0}}{\boldsymbol{1,6}}\right)^{\boldsymbol{0,6}}\left[\frac{\boldsymbol{1,0^3}}{\left(\frac{\boldsymbol{1,5}}{\boldsymbol{1,0}}+1\right)^{\boldsymbol{2,5}}\boldsymbol{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,001}}\right]^{0,2} = \boldsymbol{1,47}\ \text{м}.$$

2. Определяем максимальную глубину размыва за время паводка по формуле (26):

$$\Delta \boldsymbol{h_{max}} = \boldsymbol{\eta \Delta h}_{пр} = \boldsymbol{0,6 \cdot 1,47 = 0,8}\ \text{м} < \boldsymbol{\delta = 1,25}\ \text{м}.$$

Применяем выходное русло типа I. Концевая часть этого укрепления представляет собой часть наброски, уложенную за укреплением с откосом 1:1 и глубиной $\boldsymbol{h_{ук} = \delta}$. Рисберма за укреплением в этом типе выходных русел не устраивается.

3. Определяем ширину воронки размыва в конце укрепления по формуле

(54):

$$\boldsymbol{B_{min} = \frac{3{,}6\Delta h_{max}}{K}}.$$

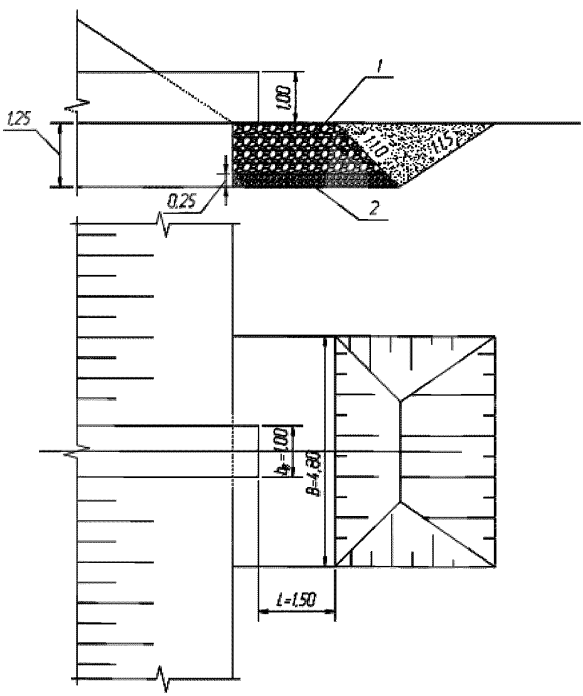
Предварительно определяем коэффициент $\boldsymbol{K}$ по графику на рисунке 8:

при $\boldsymbol{\frac{\Delta h_{max}}{D} = \frac{0{,}80}{1{,}0} = 0{,}8}$ и $\boldsymbol{\frac{L}{D} = 1{,}5}$ $\quad \boldsymbol{K = 0{,}60}$,

откуда $\boldsymbol{B_{min} = \frac{3{,}6 \cdot 0{,}80}{0{,}60} = 4{,}8}$ м > $\boldsymbol{B_2 = 3{,}1}$ м.

Ввиду относительно малой длины укрепления L = 1,5 м не устраиваем на концевом участке его полосу длиной 1 м и шириной $B_{ук}$, а назначаем укрепление прямоугольной формы шириной $B_{ук}$ = 4,8 м и длиной L = 1,5 м.

Конструкция укрепления представлена на рисунке В.1.



1 – каменная наброска; 2 – щебеночная подготовка

Рисунок В.1 – Основные размеры укреплений из каменной наброски

Приложение Г

Пример расчета нижнего бьефа гофрированных труб, расположенных на подсыпке

Спиральновитая металлическая гофрированная косогорная труба расположена на автомобильной дороге; отверстие трубы D = 1,5 м; уклон лога $i_л$ = 0,25 (соответствует заложению откосов косогора $m_{от(кос)}$ = 4); высота насыпи по оси труб $H_{нас}$ = 5,0 м; ширина насыпи поверху 6,5 м; верховой откос имеет крутизну 1:1,5; расход в сооружении $Q_р$ = 2,3 м^3/с; подтопление со стороны нижнего бьефа отсутствует. В основании насыпи залегают среднезернистые пески со средним диаметром частиц d = 0,5 мм.

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

Решение

Так как труба расположена на крутом косогоре, укладываем ее в теле насыпи на подсыпке (рисунок Г.1). Уклон трубы $i_т$ назначаем равным 0,01. Откосы и берму насыпи отсыпаем из однородного камня. Низовой откос насыпи назначаем $m_{от(под)}$ = 2 (на рисунке Г.1 этот откос показан штриховой линией).

Расчет выполняем в соответствии с рекомендациями п. 8.6.4 применительно к рассматриваемому случаю.

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

$$1{,}3Q_р = 1{,}3 \cdot 2{,}3 = 3{,}0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчет ведем на расход Q = 3,0 м^3/с.

1. Определяем глубины на выходе из трубы по графику на рисунке 5.

Предварительно находим параметр расхода:

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

Далее по Π_Q и $i_т$ = 0,01 находим:

$$\frac{h_{вых}}{D} = \mathbf{0{,}45} \text{ и } h_{вых} = \mathbf{0{,}45 \cdot 1{,}5 = 0{,}68} \text{ м}.$$

Определяем скорости на выходе из трубы $v_{вых}$ по формуле (10):

$$v_{вых} = Q/\omega_{вых} = \frac{3,0}{0,779} = 3,85.$$

2. Устанавливаем по формуле (56) средний диаметр наброски, считая ее однородной:

$$d_н = \frac{v_{вых}^2}{43} = \frac{3,85^2}{43} = 0,34 \text{ м}.$$

Принимаем $d_н$ = 35 см.

Отсыпаем на берме и откосе три слоя камня крупностью $d_н$ = 35 см, остальную часть – из горной массы (средний диаметр частиц $d_н$ = 25 см) с содержанием мелких частиц 5 – 7%.

3. Определяем по формуле (78) минимальный размер бермы вдоль потока, при которой поток, вытекающий из трубы, не попадает непосредственно на откос:

$$L_{бmin} = 1,2 v_{вых}\sqrt{\frac{2h_{вых}}{g}} = 1,2 \cdot 3,85\sqrt{\frac{2 \cdot 0,68}{9,81}} = 1,72 \text{ м}.$$

Принимает с запасом $L_б$ = 3,0 м.

4. Определяем ширину растекания потока на берме по формуле (79) с введением в нее понижающего коэффициента 0,6, учитывающего особенности каменной наброски по сравнению с бетонным укреплением (п. 8.6.4):

$$B_{раст} = 9,6\frac{D^2}{L_б}\left(\frac{Q}{Q_K}\right)^{\frac{D}{L_б}}\left(\frac{x}{D}\right)^{0,8\left(\frac{Q}{Q_K}\right)^{0,5}},$$

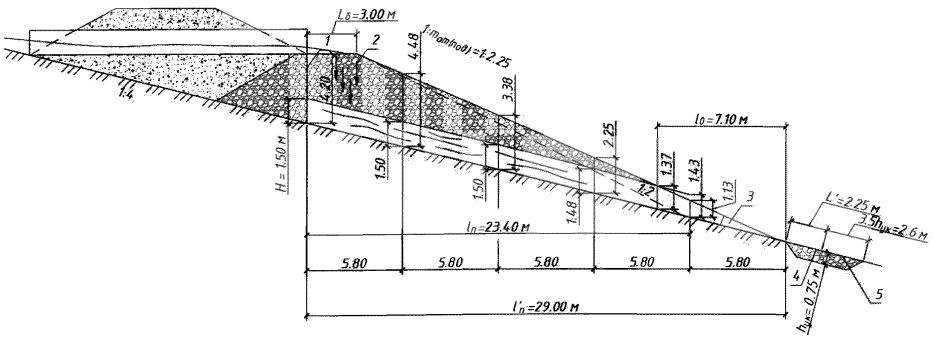
где $x = L_б = 3,0$ м, а $Q_K = 1,6D_э^{5/2} = 1,6 \cdot 1,5^{\frac{5}{2}} = 4,41$ м^3/с.

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

5. Назначаем длину участка насыпи, отсыпанной из камня, т.е. ширину фильтрующей насыпи прослойки $b_ф$. Принимаем $b_ф = B_{раст} \approx 10$ м.

Далее ведем расчет фильтрующей подсыпки как фильтрующей насыпи.

6. Определяем по формуле (82) нормальную глубину фильтрационного потока, предполагая, что весь расход профильтрует через подсыпку.



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

Рисунок Г.1 – Нижний бьеф косогорной гофрированный трубы при сбросе потока на каменную подсыпку

Предварительно находим коэффициент фильтрации для горной массы $K_{ф(г)}$ со средней крупностью камней $\boldsymbol{d}_н$ = 25 см. Расчет можно произвести по формуле (83), но из-за отсутствия данных о пористости горной массы приближенно находим по [4, таблица 8.1] коэффициент фильтрации для однородной наброски и уменьшаем его на 25%:

$$\boldsymbol{K}_{ф(г)} = \frac{0{,}49}{1{,}25} = \boldsymbol{0{,}40}\ \text{м/с}.$$

Тогда $$\boldsymbol{h_0} = \frac{\boldsymbol{Q}\sqrt{\boldsymbol{m}_{от(нас)}}}{\boldsymbol{b}_{нас}\boldsymbol{K}_ф} = \frac{3{,}0\sqrt{4}}{10{\cdot}0{,}40} = \boldsymbol{1{,}50}\ \text{м}.$$

7. Определяем глубину фильтрационного потока H в створе, проходящем через конец трубы, из уравнения (84). Подтопление снизу отсутствует. Предварительно находим проекцию расстояния от конца трубы до точки пересечения откосов отсыпки и косогора (рисунок Г.1) – $l_п$ = 23,4 м.

Затем вычисляем:

$$\frac{\boldsymbol{l}_п\sqrt{\boldsymbol{m}^2_{от(кос)}+1}}{\boldsymbol{h}_0\boldsymbol{m}^2_{от(кос)}} = \boldsymbol{f(\xi)} = \frac{23{,}4\sqrt{4^2+1}}{1{,}50{\cdot}4^2} = \boldsymbol{4{,}02}.$$

Согласно [4, таблица 8.4] по $\boldsymbol{f(\xi) = 4{,}02}$ находим $\boldsymbol{\xi} = \frac{\boldsymbol{H}}{\boldsymbol{h}_0} = \boldsymbol{1{,}0}$ и $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{h}_0 =$

$\mathbf{1,50}$ м.

8. Определяем устойчивость низового откоса подсыпки из условия (86).

Предварительно определяем разность отметок бьефов по формуле (87):

$$z = H + \frac{l_{\text{п}}}{m_{\text{от(кос)}}} = 1,5 + \frac{23,4}{4} = 7,35 \text{ м}.$$

Вычисляем $z_{\text{пр}}$ по формуле (88) при крутизне откосов подсыпки 1:2 (tgβ = 0,5), $d_{\text{н}}$ = 0,35 м и $tg\varphi_{\text{н}}$ = 0,725:

$$z_{\text{пр}} = 2,3(tg\varphi_{\text{н}} - tg\beta)l_{\text{п}}\frac{\sqrt{m^2_{\text{от(кос)}}+1}}{m_{\text{от(кос)}}}\sqrt{\frac{d_{\text{н}}}{d}} = 2,3(0,725 - 0,500)\cdot$$

$$\cdot 23,4\frac{\sqrt{4^2+1}}{4}\sqrt{\frac{0,35}{1,50}} = 6,04 < z = 7,35 \text{ м}.$$

Следовательно, откос неустойчив и требуется сделать его положе.

Принимаем $m_{\text{от(кос)}}$ = 2,25 (tgβ = 0,444) и по рисунку Г.1 находим $l_{\text{п}}$ = 29,0 м (откос 1:2,25 изображен сплошной линией).

Тогда имеем:

$$z_{\text{пр}} = 2,3 \cdot (0,725 - 0,444) \cdot 29 \cdot \frac{\sqrt{4^2+1}}{4} \cdot \sqrt{\frac{0,35}{1,50}} = 9,3 \text{ м}.$$

При этом $z = 1,5 + \frac{29,0}{4} = 8,75$ м < 9,3 м.

Следовательно, устойчивость низового откоса обеспечена.

9. Проверяем устойчивость основания насыпи от ламинарной фильтрации. Для этого определяем $H_{\text{пр}}$ по формуле (89), причем входящий в нее коэффициент δ находим по [4, таблица 8.2]. Для зернистых песков, не защищенных обратным фильтром, δ = 8.

Отсюда $H_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{п}}\sqrt{m^2_{\text{от(кос)}}+1}}{\delta m_{\text{от(кос)}}} = \frac{29,0\sqrt{4^2+1}}{8\cdot 4} = 3,72$ м; H = 1,50 м < $H_{\text{пр}}$ = 3,72 м.

Следовательно, устойчивость основания насыпи против ламинарной фильтрации обеспечена.

10. Сравниваем глубину потока H с толщиной подсыпки $\delta_{\text{под(вых)}}$ в сечении, проходящем через конец лотка трубы на выходе. На рисунке Г.1 $\delta_{\text{под(вых)}}$ = 4,2 м > H = 1,50 м, т.е. 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 $\boldsymbol{l_п}$ = 29,0 м на пять равных частей $\boldsymbol{l'_п = \frac{29,0}{5} = 5,8}$ м и в конце каждой из них (считая от конца подсыпки) определяем глубину потока h_i из уравнения (85). Затем в каждом из сечений устанавливаем толщину подсыпки $\delta_{под(i)}$, для чего можно воспользоваться формулой (90).

Сравниваем h_i с $\delta_{под(i)}$ и устанавливаем, выйдет ли поток на откос. Это случится при $h_i > \delta_{под(i)}$.

Расчет выполняем в табличной форме (таблица Г.1).

Таблица Г.1

Номер участка	Проекция расстояния от конца подсыпки до данного створа t, м	$\boldsymbol{f(\xi) = \frac{\sqrt{m^2_{от(кос)}+1}}{h_0 m^2_{от(кос)}}}$	$\boldsymbol{\xi}$ [4, таблица 8.4]	$\boldsymbol{h_1 = \xi h_0}$, м	$\delta_{под(i)}$	$\delta_{под(i)}$ - h_i	Вид потока
1	5,80	1,0	0,96	1,43	1,13	<0	Поверхностный
2	11,60	2,0	1,00	1,48	2,25	>0	Фильтрационный
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, устанавливаем, что поток выклинивается на откос на втором участке.

Устанавливаем расстояние от конца подсыпки до места выклинивания потока по формуле (93):

$$\boldsymbol{l_{гр} = \frac{Q m_{от(кос)} m_{от(под)}}{(m_{от(кос)} - m_{от(под)}) l_ф K_ф \sqrt{\frac{H}{l_п} + \frac{1}{m_{от(кос)}}}} = \frac{3,0 \cdot 4,0 \cdot 2,25}{(4-2,25) 10 \cdot 0,4 \sqrt{\frac{1,5}{29,0} + 0,25}} = 7,1} \text{ м.}$$

12. Определяем толщину подсыпки в этом сечении, равную глубине потока, по формуле (94):

$$\delta_{\text{под(гр)}} = \frac{l_i(m_{\text{от(кос)}} - m_{\text{от(под)}})}{m_{\text{от(кос)}} m_{\text{от(под)}}} = \frac{7{,}1(4-2{,}25)}{4 \cdot 2{,}25} = 1{,}37 \text{ м}.$$

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 створах напорной фильтрующей подсыпки. Для этого делим расстояние от конца подсыпки до сечения, где поток выклинивается на поверхность откоса, на три участка длиной $l = \frac{7{,}1}{3} = 2{,}37$ каждый и в конечном сечении каждого участка подсыпки (считая от ее конца) определяем фильтрационный расход по формуле (95) при глубине потока $h = \delta_{\text{под}}$. Эту глубину можно вычислить по формуле (94).

Расчет производим в табличной форме (таблица Г.2).

Таблица Г.2

Номер участка	Расстояние от конца подсыпки до заданного сечения l, м	$h = \delta_{\text{под}}$, м, по формуле (94)	Фильтрационный расход $Q_i = \frac{h_i}{h} Q$
Подошва откоса	0	0	0
1	2,37	0,46	1,0
2	4,74	0,92	2,0
3	7,1	1,37	3,0

14. Определяем средние скорости турбулентной фильтрации по формуле (96):

$$v_{\text{ф}} = K_{\text{ф}} \sqrt{\frac{H}{l_{\text{п}}} + \frac{1}{m_{\text{от(кос)}}}} = 0{,}4 \sqrt{\frac{1{,}5}{29{,}0} + \frac{1}{4}} = 0{,}22 \text{ м/с}.$$

15. Находим максимальную скорость турбулентной фильтрации по формуле (97):

$$v_{\text{м}} = \frac{1{,}7 v_{\text{ф}}}{p \varepsilon_{\text{з}}} = \frac{1{,}7 \cdot 0{,}22}{0{,}40 \cdot 0{,}9} = 1{,}04 \text{ м/с}.$$

Пористость каменной наброски p = 0,40 либо принимаем по [4, таблица 8.1] для камня той же крупности, что и однородный камень, но для круглых частиц, либо уменьшаем $K_{\text{ф(доп)}}$ = 0,49 на 25%.

16. Сравниваем $\boldsymbol{v}_{м}$ с допускаемыми скоростями для среднезернистых песков. Для этого по [4, таблица 2.7] находим $\boldsymbol{v}_{доп}$ = 0,35 м/с; $\boldsymbol{v}_{м}$ = 1,04 м/с > $\boldsymbol{v}_{доп}$ = 0,35 м/с. Следовательно, устойчивость основания подсыпки от турбулентной фильтрации не обеспечена.

Вырезаем грунт основания и заменяем его материалом, допускаемая скорость для которого больше или равна $\boldsymbol{v}_{м}$. По [4, таблица 2.7] находим, что этому условию удовлетворяет галька (или щебень) с частицами крупностью 1,5 – 2,0 см. Укладываем ее не менее чем в три слоя, поэтому вырезку надо делать на глубину 8 – 10 см.

17. Определяем расходы потока, протекающего по откосу подсыпки и в каждом из створов, по формуле (98): $\boldsymbol{Q_2 = Q - Q_1}$, а также глубины и скорости течения на откосе по формулам (99) и (101).

Затем сравниваем полученные скорости с допускаемыми для камня по формуле (102) и устанавливаем его устойчивость. Расчет ведем в табличной форме (таблица Г.3) для тех же сечений, что и в п. 13, принимая установленную ранее крупность камня на откосе $\boldsymbol{d}_{н}$ = 0,35 м.

Таблица Г.3

Номер участка	Расстояние от конца подсыпки, м	$\boldsymbol{Q_2 = Q - Q_1}$, м^3/с	$h_{отк}$, м, по формуле (99)	$\omega_{отк} = b_ф h_{от}$, м^2	$\boldsymbol{v}_{отк}$, м/с, по формуле (101)	$\boldsymbol{v}_{доп(отк)}$, м/с, по формуле (102)
Подошва откоса	0	3,0	0,083	0,83	3,61	3,65
1	2,37	2,0	0,063	0,63	3,17	3,65
2	4,74	1,0	0,040	0,40	2,5	3,66
3	7,1	0	0	0	0	3,65

Анализ результатов расчета показывает, что устойчивость камня $\boldsymbol{d}_{н}$ = 0,35 м на откосе обеспечена.

18. Устраиваем конструктивно обратный фильтр подошвы откоса высотой 0,5 м и шириной понизу 1 м.

19. Назначаем у подошвы отсыпки недеформируемое выходное русло из

каменной наброски, размеры которого определяем в соответствии с пп. 8.4.1, 8.4.2 с учетом специфических особенностей указанных типов выходных русел, изложенных в пп. 8.5.4, 8.5.5 и 8.5.8. Расчет ведем в следующей последовательности:

1) определяем толщину слоя однородной наброски, при которой укрепление будет недеформируемым, по формуле (62):

$$\boldsymbol{\delta = D_э\left[0,45\sqrt[в]{\frac{d_н}{d}} + \left(\frac{1,15 v_{вых} K_{ог(\Delta h)}}{\sqrt{g D_э}}\right) - 1\right] =}$$

$$\boldsymbol{= 1,5\left[0,45\sqrt[в]{\frac{0,35}{0,0005}} + \left(\frac{1,15 \cdot 3,75 \cdot 1,0}{\sqrt{9,81 \cdot 1,5}}\right) - 1\right] =}$$

$$\boldsymbol{= 1,5\left[1,02 + \left(\frac{4,31}{3,84} - 1\right)\right] = 1,35}\ \text{м;}$$

2) определяем размеры укрепления:

а) назначаем длину укрепления за подошвой откоса согласно рекомендациям п. 8.5.5: $\boldsymbol{L' = (1,5 \div 2,0) D_э}$. Принимаем $\boldsymbol{L' = 1,5 D_э = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25}$ м;

б) определяем расчетную длину укрепления, которая складывается из ширины бермы $L_б$ = 3,0 м, длины откоса подсыпки $\boldsymbol{l_{от(под)} = \frac{\sqrt{m^2_{от(кос)}+1}}{m_{от(кос)}}}$ и длины укрепления у подошвы косогора $\boldsymbol{L' = 2,25}$ м:

$$\boldsymbol{L = 3 + \frac{29,0\sqrt{4^2+1}}{4} + 2,25 = 35,85}\ \text{м.}$$

Далее расчет выполняем согласно п. 8.5.5;

в) определяем предельную глубину размыва в грунте лога по формуле (34) с введением в нее коррективов согласно указаниям п. 8.5.5.

Предварительно вычисляем величины, входящие в эту формулу: находим при $\boldsymbol{D_э = D = 1,50}$ м $\boldsymbol{\delta_м = 0,82}$, ψ = 0,6, показатель степени s_1 для недеформируемых выходных русел из каменной наброски равен 5/2 = 2,5. По таблице 4 для выходного русла (I, II или III) находим r = 1,0 и s = 0,6. Отверстие b = bр = 1,5 м. Средний диаметр грунта d = 0,0005 м, эталонный расход $\boldsymbol{Q_к =}$

$\mathbf{1,6}\boldsymbol{D}^{\mathbf{5/2}} = \mathbf{1,6 \cdot 1,5^{5/2} = 4,42}$ м^3/с.

Таким образом, имеем:

$$\Delta\boldsymbol{h}_{\text{пр}} = \boldsymbol{r}\boldsymbol{\delta}_{\text{м}}\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{D}_{\text{э}}\left(\frac{\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{Q}_{\text{к}}}\right)^{\mathbf{0,6}}\left[\frac{\boldsymbol{D}_{\text{э}}^{\mathbf{3}}}{\left(\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{D}_{\text{э}}}+\mathbf{1}\right)^{\boldsymbol{s}_{\mathbf{1}}}\boldsymbol{b}\boldsymbol{b}_{\text{р}}\boldsymbol{d}}\right]^{\mathbf{0,2}} = \mathbf{1 \cdot 0,82 \cdot 0,6 \cdot}$$

$$\mathbf{1,5}\left(\frac{\mathbf{3,0}}{\mathbf{4,42}}\right)^{\mathbf{0,6}}\left[\frac{\mathbf{1,5^3}}{\left(\frac{\mathbf{35,85}}{\mathbf{1,5}}+\mathbf{1}\right)^{\frac{\mathbf{2}}{\mathbf{5}}}\mathbf{1,5 \cdot 1,5 \cdot 0,0005}}\right]^{\mathbf{0,2}} = \mathbf{0,57}\text{ м};$$

г) определяем максимальную глубину размыва по формуле (26).

Учитывая, что данные об объеме стока W отсутствуют, расчет ведем приближенно, принимая η = 0,6 (как для несвязных грунтов). Отсюда:

$$\Delta\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{max}} = \Delta\boldsymbol{h}_{\text{пр}}\boldsymbol{\eta} = \mathbf{0,51 \cdot 0,6 = 0,34}\text{ м};$$

д) сравниваем толщину наброски δ с максимальной глубиной размыва: δ = 1,35 м > $\Delta\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{max}}$ = 0,34 м, следовательно, возможно назначить выходное русло типа I, для которого глубину заложения концевой части укрепления $h_{\text{ук}}$ принимаем равной δ = 1,35 м;

е) определяем ширину воронки размыва B_{min} в конце укрепления по формуле (54) при θ = 3,6:

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{min}} = \frac{\boldsymbol{\theta}}{\boldsymbol{K}}\Delta\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{max}}.$$

Так как $\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{D}_{\text{э}}} = \frac{\mathbf{35,85}}{\mathbf{1,5}} = \mathbf{23,9 > 10}$, то принимаем $\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{D}} = \mathbf{10}$.

Тогда при $\frac{\Delta\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{max}}}{\boldsymbol{D}} = \frac{\mathbf{0,34}}{\mathbf{1,5}} = \mathbf{0,2}$; $\frac{\boldsymbol{L}}{\boldsymbol{D}} = \mathbf{10}\boldsymbol{K} = \mathbf{0,10}$;

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{min}} = \frac{\mathbf{3,6}}{\mathbf{0,1}}\mathbf{0,34} = \mathbf{12,24}\text{ м}.$$

ж) сравниваем ширину воронки размыва B_{min} с шириной растекания $B_{\text{раст}}$: B_{min} = 12,8 > $B_{\text{раст}}$ = 9,4 м и к расчету принимаем ширину укрепления B = 12,24 м.

Результаты расчета нижнего бьефа гофрированной трубы с полученными размерами укреплений на подсыпке приведены на рисунке Г.1.

Библиография

[1]	Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.001-2009	Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)
[2]	Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.087-2017	Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из спиральновитых металлических гофрированных труб
[3]	Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.082-2017	Методические рекомендации по проведению гидравлических расчетов малых ИССО на автомобильных дорогах
[4]	Пособие	Пособие по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений. Под общей ред. Г. Я. Волченкова. Москва, «Транспорт», 1992 г.
[5]	Методические рекомендации	Методические рекомендации по определению деформаций дна и размеров укреплений за дорожными водопропускными трубами
[6]	Рекомендации	Рекомендации по расчету выходных русел дорожных водопропускных труб с укреплениями из каменной наброски

ОКС 93.100

Ключевые слова:

МАЛЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ, ВОДОПРОПУСКНЫЕ ТРУБЫ, ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ, СПИРАЛЬНОВИТЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ГОФРИРОВАННЫЕ ТРУБЫ

Руководитель организации-разработчика

ООО «Мегатех инжиниринг»

Генеральный директор _____ Девятилов А.Н.

подпись

gost.e-ecolog.ru