

ВОДООТВОД НА КОСОГОРЕ ПО СХЕМЕ БЫСТРОТОКА С ВОДОБОЙНЫМ КОЛОДЦЕМ

1 Общие положения

Нагорные каналы перехватывают воду, стекающую со склонов местности к автомобильной дороге. Воду из канав необходимо спускать на дно лога (рис. 1). Для этого проектируют быстротоки, перепады (ступенчатые русла), лейки, стенки падения, колодцы и другие сооружения, предотвращающие размыв русла [1, 2]. Наибольшее применение в дорожном строительстве получили стенки падения, колодцы, быстротоки и многоступенчатые перепады колодезного типа. Часто эти сооружения проектируют в комплексе. Условия применения различных сооружений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Искусственные водопропускные сооружения на косогорах

№	Наименование сооружений	Условия применения
1	Многоступенчатый перепад колодезного типа	При сбросе воды в овраг с пологой вершиной из нагорных и водоотводных канав и из искусственных сооружений при больших уклонах (10-20 ‰).
2	Стенка падения с водобойным колодцем на сбросе воды в овраг	Для сброса воды в глубокий овраг с вертикальным обрывом (например, в лёссовых грунтах) при расходах воды 1,0-1,5 м ³ /с и более. Гасители энергии в виде водобойных колодцев предпочтительно назначать в районах, где не наблюдается резкого понижения температуры.
3	Железобетонный быстроток прямоугольного сечения с водобойным колодцем	Для спуска воды из нагорных и водоотводных канав и из перепускных труб в косогорных условиях.

Схема комплекса водопропускных сооружений в вертикальной плоскости показана на рис. 2.

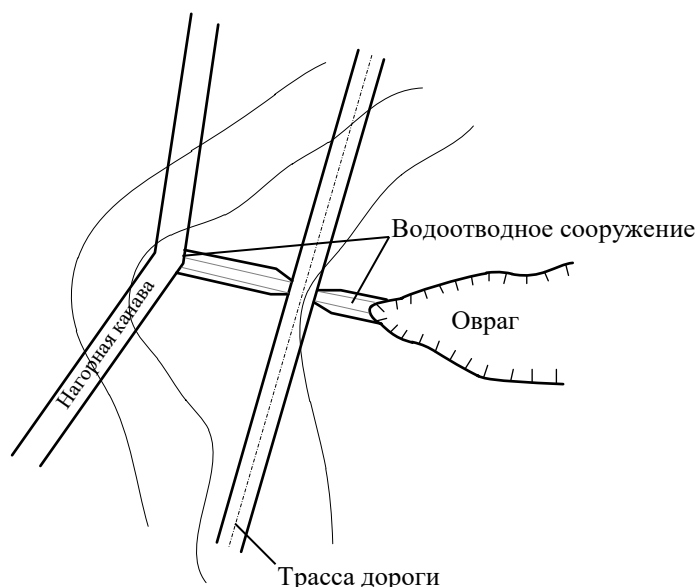


Рисунок 1 – Трасса, нагорная канава и водоотводное сооружение в плане

Необходимо провести гидравлический расчёт данной системы сооружений. В качестве исходных данных используются: Q_p – расчетный максимальный расход заданной вероятности превышения, м³/с; i_0 – продольный уклон по дну быстротока; L – длина быстротока.

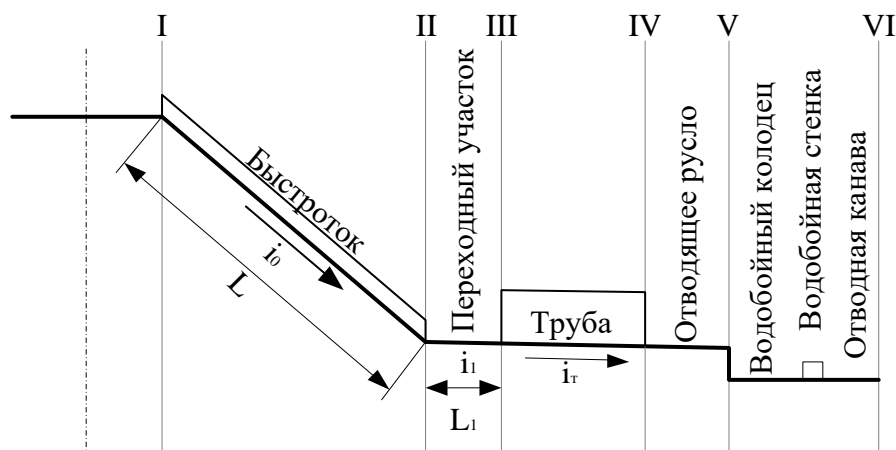


Рисунок 2 – Схема быстротока с водобойным колодцем в вертикальной плоскости

Расчётный максимальный расход воды определяется по параметрам водосборного бассейна, номеру ливневого района и другим характеристикам [3,4].

Вероятность превышения расчётных паводков при сооружении водоотводных канав и кюветов принимают для дорог категорий I и II – 2 %, категории III – 3 %, категорий IV и V – 4 % [5]. Расчёт состоит из нескольких этапов.

2 Гидравлический расчёт быстротока

2.1 Назначаем допускаемую скорость и коэффициент шероховатости. Допускаемая скорость течения воды в железобетонном быстротоке равна 6 м/с ($v_{\text{доп}}=6,0$ м/с), коэффициент шероховатости бетона $n'=0,014$.

При уклоне быстротока $i_0 > 10\%$ необходимо учитывать аэрацию водного потока. Явление *аэрации* возникает при значительных скоростях воды и заключается в насыщении воды пузырьками воздуха, вследствие чего поток испытывает некоторое дополнительное торможение, учитываемое увеличением коэффициента шероховатости. Коэффициент аэрации a зависит от уклона быстротока и гидравлического радиуса [6]. В наших условиях его можно принять $a = 1,33$. Тогда коэффициент шероховатости с учётом аэрации составит:

$$n = a \cdot n' = 1,33 \cdot 0,014 = 0,0186. \quad (1)$$

Необходимая площадь живого сечения быстротока:

$$\omega = \frac{Q_p}{v_{\text{доп}}}. \quad (2)$$

2.2 Определяем по формуле Ю.Н. Даденкова наиболее выгодную ширину лотка быстротока:

$$b = 0,765 \cdot \sqrt[5]{Q_p^2} \quad (3)$$

и округляем значение b до числа, кратного 5, например: $[0,67\text{м}] = 0,65$ м.

2.3 Находим глубину воды h_0 в быстротоке методом последовательных приближений и результаты сводим в таблицу (см. табл. 1). Для этого сначала задаем начальное значение глубины (например, 0,05 м) и для него определяем следующие параметры:

смоченный периметр

$$\chi = b + 2 \cdot h_0; \quad (4)$$

гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (5)$$

коэффициент Шези, где y берется из таблицы 2,

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y; \quad (6)$$

скорость потока

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_0}; \quad (7)$$

расход воды

$$Q = \omega \cdot v; \quad (8)$$

относительную погрешность

$$\varepsilon = \frac{Q - Q_p}{Q_p}. \quad (9)$$

Если $\varepsilon < 5\%$, то расчёт прекращаем, иначе увеличиваем глубину h . Окончательная глубина – h_0 .

Таблица 1 – Образец расчётной таблицы

h_0	χ	R	C	v	Q	ε
0,05						
0,1						

Таблица 2 – Значения параметра y в зависимости от гидравлического радиуса

R	y
0,1	0,130
0,2	0,127
0,3	0,126
0,4	0,124
0,5	0,124
0,7	0,122
0,9	0,121
1,2	0,120
1,6	0,119
2,0	0,118
3,0	0,116
4,0	0,115
5,0	0,114
6,0	0,114
7,0	0,113
8,0	0,112
9,0	0,112
10,0	0,112
12,0	0,111
14,0	0,110
16,0	0,110
17,0	0,109
20,0	0,109

2.4 Находим критическую глубину в начале быстроготока (сечение I-I на рис. 2) по формуле

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot Q_p}{g \cdot b^2}}, \quad (10)$$

где $\alpha = 1,1$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

2.5 Определяем длину кривой спада, т.е. расстояние от сечения с h_k до сечения с глубиной h_0 , в котором устанавливается равномерное течение. Вычисляем:

- площади живого сечения в начале и конце быстротока соответственно:

$$\omega_k = h_k \cdot b ; \omega_0 = h_0 \cdot b ; \quad (11)$$

- удельную энергию сечения в начале и конце быстротока соответственно:

$$\mathcal{E}_k = h_k + \frac{\alpha \cdot Q_p^2}{2 \cdot g \cdot \omega_k^2} ; \mathcal{E}_0 = h_0 + \frac{\alpha \cdot Q_p^2}{2 \cdot g \cdot \omega_0^2} ; \quad (12)$$

- смоченный периметр в начале и конце быстротока соответственно:

$$\chi_k = b + 2 \cdot h_k ; \chi_0 = b + 2 \cdot h_0 ; \quad (13)$$

- гидравлический радиус в начале и конце быстротока соответственно:

$$R_k = \frac{\omega_k}{\chi_k} ; R_0 = \frac{\omega_0}{\chi_0} ; \quad (14)$$

- коэффициент Шези в начале и конце быстротока соответственно:

$$C_k = \frac{1}{n} \cdot R_k^y ; C_0 = \frac{1}{n} \cdot R_0^y ; \quad (15)$$

- уклоны трения в начале и конце быстротока соответственно:

$$i_{fk} = \frac{Q_p^2}{C_k^2 \cdot R_k \cdot \omega_k^2} ; i_{f0} = \frac{Q_p^2}{C_0^2 \cdot R_0 \cdot \omega_0^2} ; \quad (16)$$

- среднее значение уклона трения:

$$i_{fcp} = \frac{i_{fk} + i_{f0}}{2} ; \quad (17)$$

- длину кривой спада:

$$l_{cp} = \frac{\mathcal{E}_0 - \mathcal{E}_k}{i_0 - i_{fcp}} . \quad (18)$$

2.6 Проверка. Если $l_{cp} < L$, то в конце быстротока устанавливается равномерное движение воды.

3 Расчёт переходного участка

Очертания поперечного профиля лотка изменяются от прямоугольного, в сечении II-II, до цилиндрического, в сечении III-III с радиусом R (перед трубой под насыпью). Во избежание образования гидравлического прыжка, трубу и переходный участок необходимо располагать с уклоном, превышающим критический i_{jk} . Ввиду резкого снижения уклона, на переходном участке образуется кривая подпора. Расчётные данные для переходного участка приводим в таблицу.

Таблица 3 – Расчётные данные для переходного участка

Длина переходного участка, м	Уклон на переходном участке, i_{II}	Расход, Q_p , м ³ /с	Элемент сечения II-II			
			\mathcal{E}_0	i_{f0}	h_0	v_0

Необходимо определить гидравлические параметры для сечения III-III. Порядок расчёта следующий:

- назначаем предварительную глубину h_1 ;
- вычисляем площадь живого сечения

$$\omega_1 = h_1 \cdot b_1, \quad (19)$$

где b_1 – ширина переходного участка на выходе;

- вычисляем смоченный периметр

$$\chi_1 = b_1 + 2 \cdot h_1; \quad (20)$$

- находим гидравлический радиус

$$R_1 = \frac{\omega_1}{\chi_1}. \quad (21)$$

Если уклон переходного участка $<10\%$, то аэрация потока не учитывается и $n=0,014$, в противном случае используем формулу (1). Далее, вычисляем:

- коэффициент Шези

$$C_1 = \frac{1}{n} \cdot R_1^y; \quad (22)$$

- удельную энергию сечения

$$\mathfrak{E}_1 = h_1 + \frac{\alpha \cdot Q_p^2}{2 \cdot g \cdot \omega_1^2}; \quad (23)$$

-уклон трения

$$i_{j_1} = \frac{Q_p^2}{C_1^2 \cdot R_1 \cdot \omega_1^2}; \quad (24)$$

- среднее значение уклона трения

$$i_{j_{\text{ср}}} = \frac{i_{j_0} + i_{j_1}}{2}; \quad (25)$$

- длину кривой подпора:

$$l_{\text{подп}} = \frac{\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_0}{i_1 - i_{j_{\text{ср}}}}. \quad (26)$$

Если $l_{\text{подп}} \leq L_1$, то длина переходного участка подобрана правильно.

Определяем скорость на выходе из переходного участка:

$$v = \frac{Q_p}{\omega_1}. \quad (27)$$

4 Расчёт трубы

Расчёт трубы ведём аналогично. В круглой трубе вычисляем площадь живого сечения и другие характеристики по формулам:

$$\omega_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(l \cdot \frac{d}{2} - b \cdot \left(\frac{d}{2} - h \right) \right). \quad (28)$$

$$b_2 = 2 \cdot \sqrt{h \cdot d - h^2}; \quad (29)$$

$$\chi_2 = \sqrt{b^2 + \frac{16 \cdot h^2}{3}}. \quad (30)$$

Во избежание образования подпора перед трубой глубину воды в начале трубы не допускается предусматривать более $0,5d$.

5 Расчёт отводящего русла

Расчёт отводящего русла производится аналогично алгоритму, изложенному в п. 2. На выходе из отводящего русла получаем значения h_3 , v_3 , b_3 .

6 Расчет водобойного колодца

Сопряжение *бурного потока* воды из отводящего русла, со *спокойным бытовым* в водотоке происходит посредством гидравлического прыжка. *Гидравлический прыжок* – это скачкообразное возрастание глубины потока (рис. 3). В вальце гидравлического прыжка идёт интенсивное перемешивание воды и за счёт трения водяных струй происходит уменьшение кинетической энергии.

Гидравлический прыжок бывает *свободным*, как на рис. 2, так и *подёртым*. Последнее имеет место при устройстве *водобойной стенки*. Если гидравлический прыжок поместить в *водобойный колодец*, то в нем гашение энергии произойдет гораздо быстрее (рис.4). На выходе из водобойного колодца скорости потока должны быть снижены до значений, не приводящих к размывам русла.

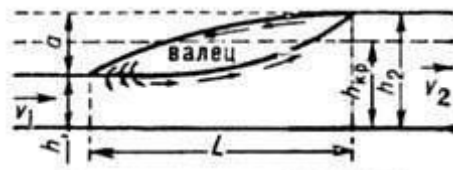


Рисунок 3 – Схема гидравлического прыжка; h_1 (h') и h_2 (h'') – первая и вторая сопряженные глубины прыжка соответственно; $h_{кр}$ – критическая глубина (см. приложение)

В качестве исходных данных для расчётов принимаем Q_p , h_3 и v_3 . Назначаем глубину колодца P .

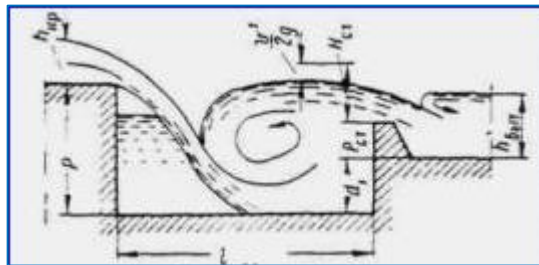


Рисунок 4 – Схема гашения энергии в водобойном колодце

Далее, определяем глубину в сжатом сечении:

$$h_c = \frac{Q_p}{b_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Z}}, \quad (31)$$

где

$$Z = \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + P + \frac{h_3}{2}. \quad (32)$$

Глубина в сжатом сечении является первой сопряженной глубиной гидравлического прыжка. Находим вторую сопряженную глубину:

$$h'' = \frac{h_c}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{8 \cdot h_{кр}^3}{h_c^3}} - 1 \right), \quad (33)$$

критическую глубину

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q_p^2}{g \cdot b_3^2}}, \quad (34)$$

высоту прыжка:

$$h_{\text{пр}} = \sigma \cdot h'' - h_{\text{кр}} . \quad (35)$$

Гидравлический прыжок бывает *отогнанным* и *затопленным*. В последнем случае гашение кинетической энергии происходит более интенсивно. Степень затопления прыжка характеризуется σ – коэффициентом затопления прыжка, принимаемым 1,05.

Находим погрешность расчёта

$$\varepsilon_1 = \frac{P - h_{\text{пр}}}{h_{\text{пр}}} \quad (36)$$

и проверяем условие. Если $\varepsilon_1 \leq 5\%$, то глубина колодца назначена верно, иначе изменяем глубину P .

Длина водобойного колодца вычисляется по зависимости

$$l_{\text{кол}} = l_{\text{пад}} + l_{\text{пр}}, \quad (37)$$

где $l_{\text{пад}}$ – длина падения струи, $l_{\text{пр}}$ – длина подпёртого прыжка.

Длина падения струи:

$$l_{\text{пад}} = v_3 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P + h_3}{g}}, \quad (38)$$

длина подпёртого водобойной стенкой прыжка:

$$l_{\text{пр}} = 2,25 \cdot h'' . \quad (39)$$

Источники информации

1. Жуков, В.И. Проектирование в сложных условиях: учеб. пособие. КрасГАСА, 2000 г.
2. Федотов, Г.А., Поспелов, П.И. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн. Кн.1: Учебник. – М.: Высш. шк., 2009. 646 с.
3. www.road-project.okis.ru / Основы проектирования / Лекции / Проектирование малых искусственных сооружений / Определение максимальных расходов воды.
4. www.road-project.okis.ru / Основы проектирования / Курсовой проект / Нагорная канава.
5. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2013. 139 с.
6. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений и русел. – М.: Транспорт, 1967 [Электронный ресурс].

Приложение

Понятие критической глубины

Уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} ,$$

где Z_1, Z_2 – высота положения жидкости относительно горизонтальной плоскости сравнения O – O в сечениях I-I и II-II соответственно; P_1, P_2 – гидродинамическое давление жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно; γ – удельный вес воды; V_1, V_2 – скорости течения жидкости

в сечениях I-I и II-II соответственно; g – ускорение свободного падения; α_1, α_2 – коэффициент скорости в сечениях I-I и II-II соответственно.

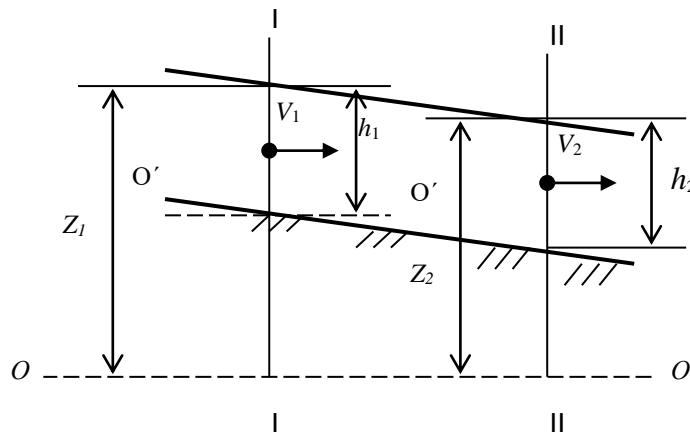


Рисунок П.1 – Схема

Удельная энергия потока:

$$e_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$$

Если плоскость сравнения $O'-O'$ провести через наинищую точку сечения, то для сечения I-I, функция будет называться *удельной энергией сечения* и примет вид:

$$e_i = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g},$$



При $Q = const$ удельная энергия сечения зависит только от глубины потока, т.е. является функцией $e = f(h)$.

Глубина потока, при которой удельная энергия сечения достигает минимального значения называется *критической*.

При $h > h_{кр}$ – поток спокойный; $h = h_{кр}$ – критический; $h < h_{кр}$ – бурный.

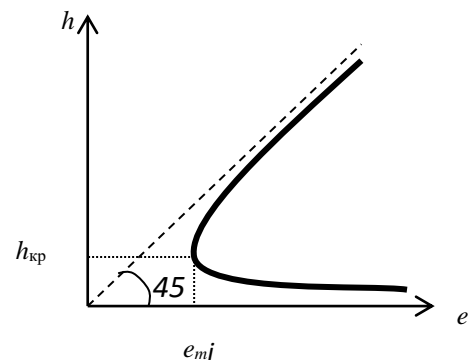


Рисунок П.2 – График удельной энергии сечения