

## РАСЧЁТ СТЕНКИ ПАДЕНИЯ С ВОДОБойНОЙ СТЕНКОЙ В ВЕРШИНЕ ОВРАГА

Материал излагается по учебному пособию: Жуков В.И. Проектирование в сложных условиях: учеб. пособие. КрасГАСА, 2000. 95 с.

### 1 Общие положения

При проложении трассы дороги представляется возможность либо обойти овраг, либо его пересечь. Так как обход оврага ведёт к удлинению трассы дороги, то такое проложение приемлемо только для дорог низкой категории. Следует учесть, что продолжающийся рост оврагов в длину зачастую сводит на нет такое проложение трассы, поэтому чаще всего приходится пересекать овраг.

Существуют различные способы борьбы с разрастанием оврага, один из них – это перехват воды выше оврага нагорными канавами. В результате устройства канав часть воды задерживается на склонах и впитывается. Большую же часть воды необходимо спускать на дно оврага. Чтобы предотвратить размыв в вершине оврага и рост оврага в длину, проектируют различные сооружения. Наибольшее применение нашли стенки падения, колодцы, быстротоки, многоступенчатые перепады колодезного типа. Условия их применения 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 <sup>3</sup> /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.

Часто эти сооружения проектируют в комплексе. На рис. 1 показан один из вариантов такого комплекса. С его помощью происходит постепенное гашение избыточной кинетической энергии водного потока, переходящей в другие виды энергии, за счёт взаимодействия струй воды между собой и с поверхностью сооружений.

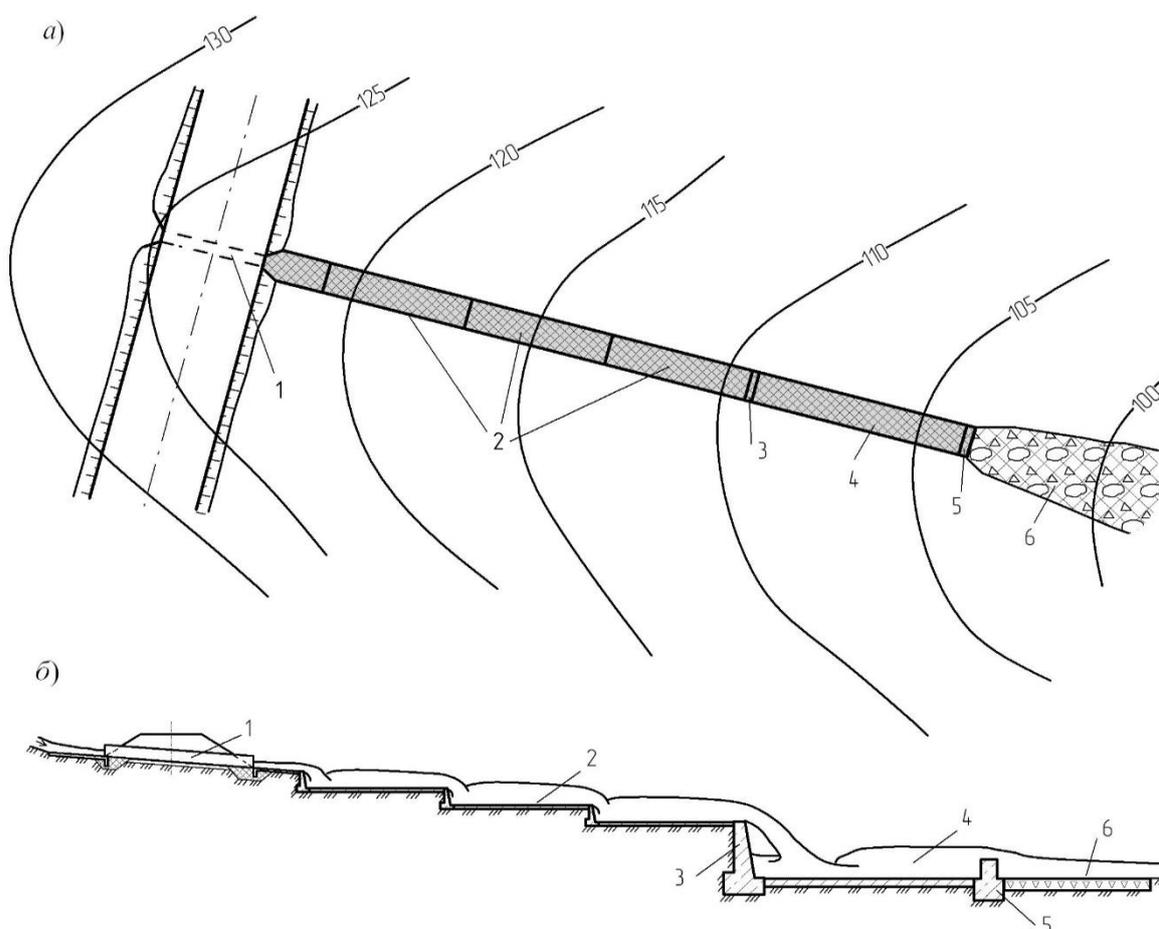


Рисунок 1 - Схема комплекса укрепительных сооружений в вершине оврага: а) – в плане; б) – в профиле; 1 – водопропускная труба; 2 – многоступенчатые перепады; 3 – стенка падения; 4 – водобойный колодец; 5 – водобойная стенка; 6 – рисберма

В данном разделе рассмотрим расчёт стенки падения с водобойной стенкой в вершине оврага. Его ведут с использованием теоретических положений гидравлики открытых русел [2]. Необходимы следующие исходные данные:

- расчётный расход  $Q_p$  (определяется для данного ливневого района по известным методам [3, 4]);
- высота стенки падения  $P$ ;
- ширина лотка  $b$ ;

- уклон дна лотка  $i_0$ ;
- глубина воды в лотке при равномерном движении  $h_0$ .
- глубина воды в отводящей канаве  $h_6$ ;

## 2 Расчёт бытовой глубины и бытовой скорости потока в русле

Глубину и среднюю скорость воды в русле, соответствующие расчётному расходу  $Q_p$  в бытовых условиях (т.е. до строительства сооружения), называют *бытовой глубиной* и *бытовой скоростью* соответственно. Их определяют методом последовательных приближений. Обычно русло малого водотока имеет треугольное сечение. Тогда, задаваясь начальным значением бытовой глубины  $h_6$ , вычисляют следующие параметры:

- площадь живого сечения:

$$\omega = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{i_1} + \frac{1}{i_2} \right) h_6^2, \quad (1)$$

где  $i_1, i_2$  – средние уклоны откосов русла;

- гидравлический радиус:

$$R = \frac{1}{2} h_6; \quad (2)$$

- коэффициент Шези:

$$c = \frac{R^{1/6}}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости откосов русла, см. табл. 2;

- бытовая скорость:

$$v_6 = c \sqrt{R \cdot i_n}; \quad (4)$$

- расход воды:

$$Q = \omega v_6. \quad (5)$$

Таблица 2 – Коэффициент шероховатости

Укрепление	$n$
Засев трав или одерновка	0,025
Мощение	0,02
Бетонные плиты	0,017
Неукрепленные канавы	0,03

Полученное значение сравнивают с  $Q_p$ , т. е. вычисляют относительную погрешность  $\varepsilon$  по зависимости

$$\varepsilon = \frac{|Q - Q_p|}{Q_p} \cdot 100. \quad (6)$$

Если она составляет более 5%, то необходимо задать новое значение бытовой глубины и расчёты повторить. Для удобства результаты сводят в таблицу.

### 3 Расчёт стенки падения

Расчёт сооружения, показанного на рис. 2, ведут в следующей последовательности.

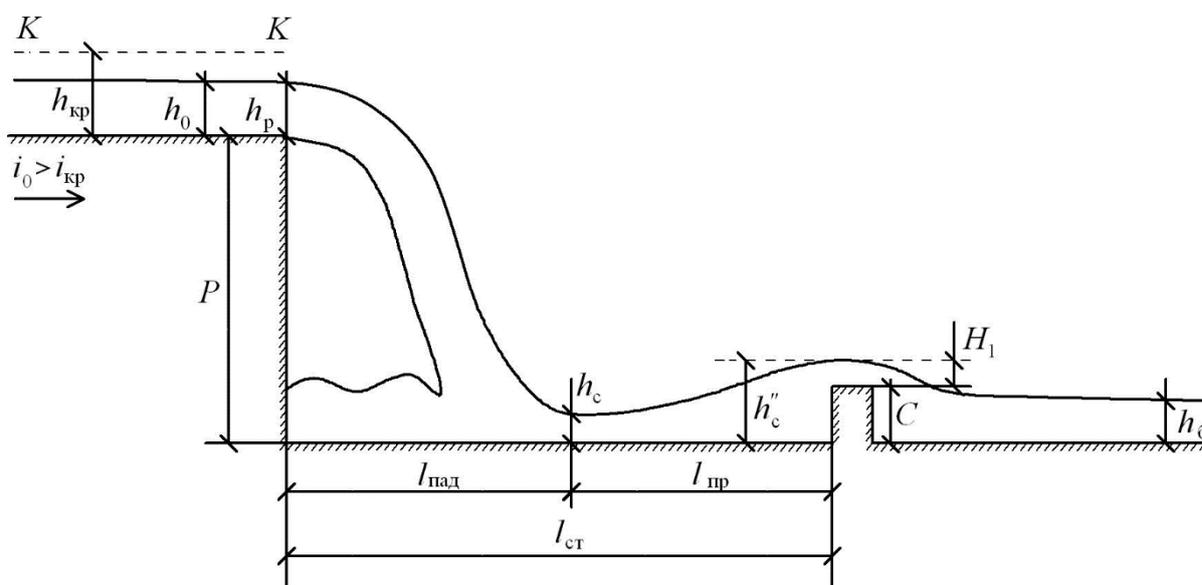


Рисунок 2 - Гидравлическая схема расчёта стенки падения с водобойной стенкой

1. Определяют *критическую глубину*<sup>1</sup>  $h_{кр}$  по формуле

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_p^2}{g b^2}}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент кинетической энергии;  $Q_p$  – расчётный расход, м<sup>3</sup>/с;  $b$  – ширина лотка (канавы) по дну, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

2. Вычисляют глубину в *сжатом сечении* после перепада, предварительно определив вспомогательную величину  $Z$  и установив условия:

<sup>1</sup> Понятие «критическая глубина», «сжатое сечение» смотрите в приложении

- при  $h_{кр} < h_0$  глубина потока на пороге перепада  $h_p = 0,7h_{кр}$ , тогда площадь живого сечения в лотке  $\omega_p = b \cdot 0,7h_{кр}$ ;

- при  $h_{кр} > h_0$  глубина потока на пороге перепада  $h_p = h_0$ , тогда площадь живого сечения в лотке  $\omega_p = bh_0$ .

Скорость на пороге перепада

$$V_p = \frac{Q_p}{\omega_p}. \quad (8)$$

Вспомогательная величина

$$Z = \frac{V_p^2}{2g} + P + \frac{h_p}{2}. \quad (9)$$

Тогда глубина в сжатом сечении (*первая сопряжённая глубина*<sup>2</sup>)

$$h_c = \frac{Q_p}{b\sqrt{2gZ}}. \quad (10)$$

3. Определяют *вторую сопряжённую глубину* в русле по формуле

$$h_c'' = \frac{h_c^2}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8h_{кр}^3}{h_c^3}} - 1 \right). \quad (11)$$

4. Находят расстояние от стенки падения до водобойной стенки по формуле

$$l_{ст} = l_{пад} + l_{пр}, \quad (12)$$

где  $l_{пад}$  – длина падения струи, вычисляемая по зависимости

$$l_{пад} = V_p \sqrt{\frac{2P + h_p}{2g}}; \quad (13)$$

$l_{пр}$  – длина *подпёртого гидравлического прыжка*, равная

$$l_{пр} = 3h_c''. \quad (14)$$

5. Вычисляют высоту водобойной стенки

$$C = 1,05h_c'' + \frac{0,056q^2}{(h_c'')} - 0,661\sqrt[3]{q^2}, \quad (15)$$

где  $q$  – удельный расход воды на единицу ширины лотка, вычисляемый по формуле

$$q = \frac{Q_p}{b} \quad (16)$$

<sup>2</sup> Смотрите приложение

6. Определяют схему работы водобойной стенки. Если  $C > h_6$ , то стенка работает, как незатопленный водослив, и расчёт на этом заканчивается.

7. После установления высоты стенки определяют скорость протекания воды за ней на рисберме по формуле

$$V_{\text{рисб}} = \sqrt{V_1^2 + 2g \left( C + \frac{H_1}{2} \right)}, \quad (17)$$

где  $H_1$  – геометрический напор над стенкой,

$$H_1 = h_c'' - C^{(1)},$$

$$V_1 = \frac{Q_p}{H_1 b}.$$

8. Если  $C < h_6$ , то водобойная стенка работает, как затопленный водослив и тогда требуется сделать перерасчёт в такой последовательности:

- принять новую высоту водобойной стенки  $C^{(1)}$ ;
- вычислить глубину затопления  $h_{\text{н}} = h_6 - C^{(1)}$ ;
- определить геометрический напор перед стенкой  $H_1 = h_c'' - C^{(1)}$ ;
- найти отношение  $\frac{h_{\text{н}}}{H_1}$ ;
- определить коэффициент затопления  $\delta_{\text{н}}$  по табл. 3.

Полный напор перед стенкой

$$H_{01} = H_1 + \frac{\alpha(V_c'')^2}{2g}, \quad (18)$$

где  $V_c''$  – скорость перед стенкой, определяемая по формуле

$$V_c'' = \frac{Q_p}{bh_c''}. \quad (19)$$

Расход

$$Q_1 = \delta_{\text{н}} m_1 b \sqrt{2g} \cdot H_{01}^{3/2}, \quad (20)$$

где  $m_1$  – коэффициент расхода водослива. В данной схеме  $m_1 = 0,42$ .

Полученный расход сравнивают с расчётным расходом  $Q_p$ . Расхождение не должно превышать 5 %. При большом расхождении делают перерасчёт, при этом снова изменяют высоту стенки на значение  $C^{(2)}$ .

При больших скоростях необходимо назначить укрепление русла – *рисберму* (участок крепления русла, расположенный за водобоем и предназначенный для гашения остаточной энергии потока и защиты водобоя от

подмыва), исходя из значения неразмывающей скорости для данного грунта, или проектировать ещё одну водобойную стенку.

Таблица 3 - Коэффициент затопления в зависимости от относительной глубины затопления

$\frac{h_n}{H_1}$	$\delta_n$	$\frac{h_n}{H_1}$	$\delta_n$	$\frac{h_n}{H_1}$	$\delta_n$	$\frac{h_n}{H_1}$	$\delta_n$
0,05	0,997	0,42	0,953	0,60	0,868	0,935	0,524
0,10	0,995	0,44	0,949	0,70	0,856	0,940	0,506
0,15	0,990	0,46	0,945	0,75	0,823	0,945	0,489
0,20	0,985	0,48	0,940	-	-	-	-
0,25	0,980	0,50	0,935	0,80	0,776	0,950	-
-	-	0,52	0,930	0,85	0,710	0,955	0,446
0,30	0,972	0,54	0,925	0,90	0,621	0,960	0,421
0,32	0,970	0,56	0,919	0,905	0,689	0,965	0,395
0,34	0,967	0,58	0,913	0,910	0,596	0,970	0,357
0,36	0,964	0,60	0,906	0,915	0,583	0,975	0,319
-	-	0,62	0,897	0,920	0,570	0,980	0,277
0,38	0,961	0,64	0,888	0,925	0,590	0,985	0,229
0,40	0,957	0,66	0,879	0,930	0,540	0,990	0,170
-	-	-	-	-	-	0,995	0,100
-	-	-	-	-	-	1,000	0,000

Стенку устраивают из сборных железобетонных элементов или из местного камня. Конструкцию стенки падения необходимо назначить по типовым проектам [7].

### Источники информации

1. Жуков, В.И. Проектирование в сложных условиях: учеб. пособие. КрасГАСА, 2000 г.
2. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учеб. для вузов: в 2-х ч. Ч. II. Специальные вопросы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. – М.: Высш. шк., 1987. – 431 с.
3. Федотов, Г.А., Поспелов, П.И. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2 кн. Кн.1: Учебник. – М.: Высш. шк., 2009. 646 с.
4. [www.road-project.okis.ru](http://www.road-project.okis.ru) / Основы проектирования / Лекции / Проектирование малых искусственных сооружений / Определение максимальных расходов воды.

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].
7. Типовые проекты. Земляное полотно автомобильных дорог общего пользования. – М.: Стройиздат, 1987.

## Приложение

### Понятие критической глубины и гидравлического прыжка

*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;  $\gamma$  – удельный вес воды;  $V_1, V_2$  – скорости течения жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициент скорости в сечениях I-I и II-II соответственно.

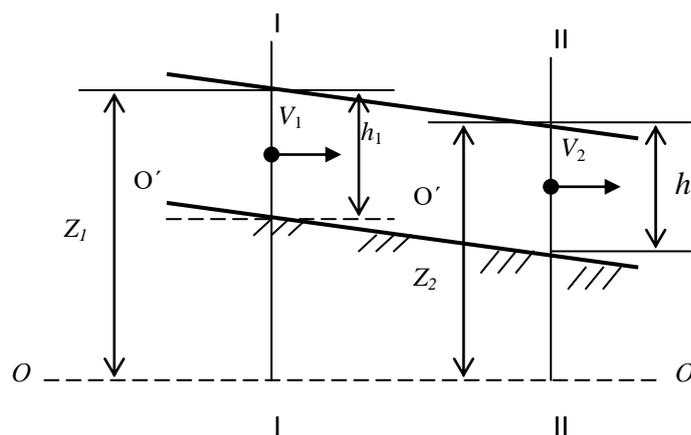


Рисунок П.1 – Схема

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 наименьшую точку сечения, то для сечения I-I, функция будет называться *удельной энергией сечения* и примет вид:

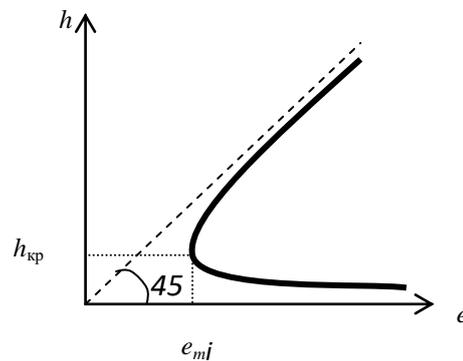
$$e_i = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g},$$

Потенциальная  
энергия

Кинетическая  
энергия

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

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.

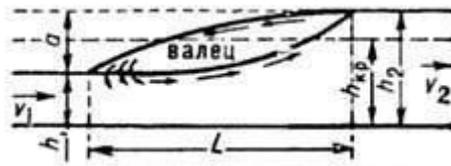


Рисунок П3 – Схема гидравлического прыжка;  $h_1 (h')$  и  $h_2 (h'')$  – первая и вторая сопряженная глубины прыжка соответственно;  $h_{кр}$  – критическая глубина

Гидравлический прыжок бывает *свободным*, как на рис. П3, 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. П4). На выходе из водобойного

колодца скорости потока должны быть снижены до значений, не приводящих к размывам русла.

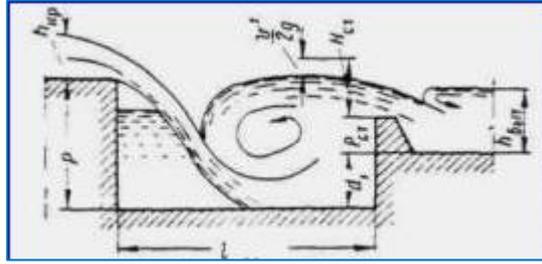


Рисунок П4 – Схема гашения энергии в водобойном колодце