

## РАСЧЁТ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ПЕРЕПАДА ДЛЯ ПОДВЕДЕНИЯ ВОДЫ ПО СКЛОНУ К СТЕНКЕ ПАДЕНИЯ

**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.

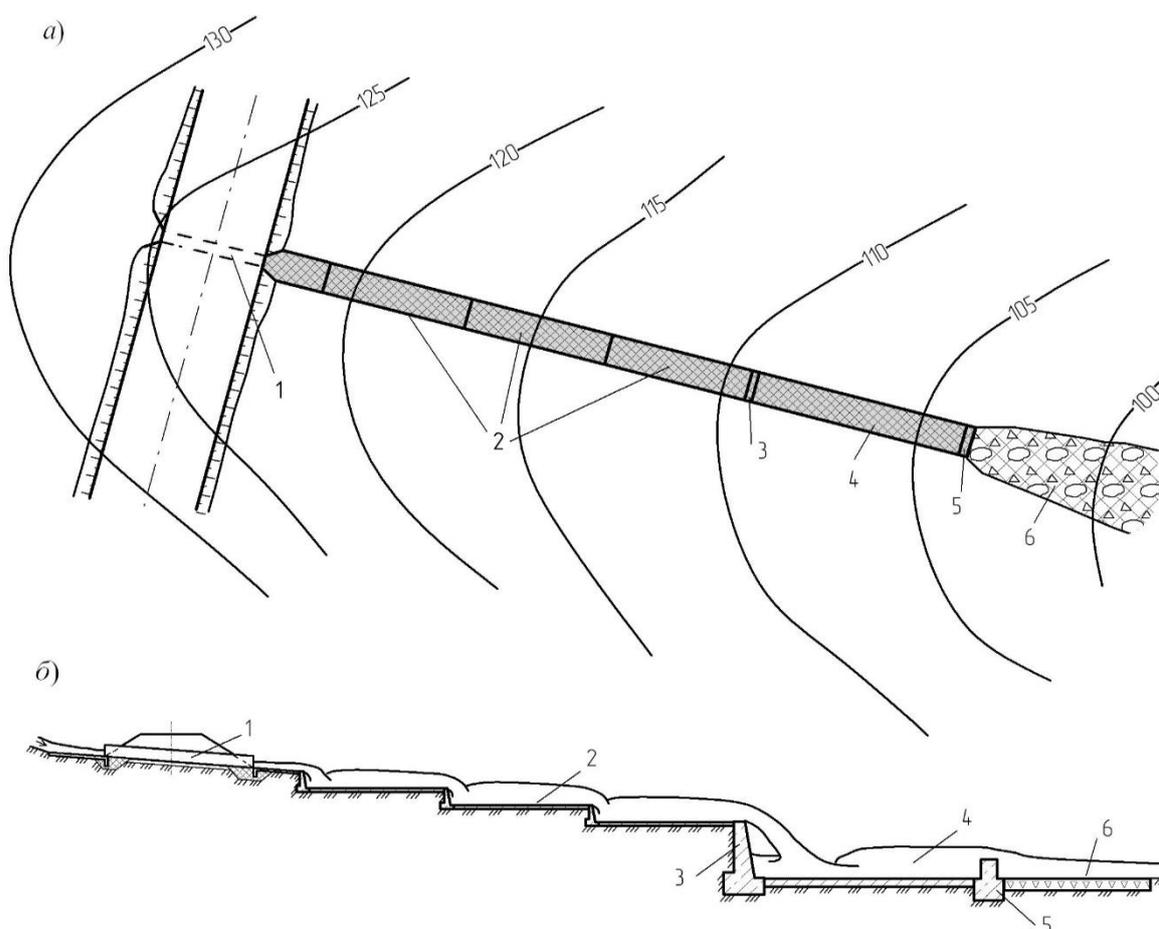


Рисунок 1 - Схема комплекса укрепительных сооружений в вершине оврага: а) – в плане; б) – в профиле; 1 – водопропускная труба; 2 – многоступенчатые перепады; 3 – стенка падения; 4 – водобойный колодец; 5 – водобойная стенка; 6 – рисберма

Для подведения воды со склона к стенке падения устраивают многоступенчатый перепад колодезного типа. Расчётная схема приведена на рис. 2. Расчёт 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 ступени перепада  $P_1$ ;

- количество ступеней  $n_{\text{п}}$  ( $n_{\text{п}} = 3$  в данном случае);
- тип укрепления (мощение, бетонирование и др.);
- лоток у перепада – прямоугольного сечения;
- ширина лотка  $b$ .

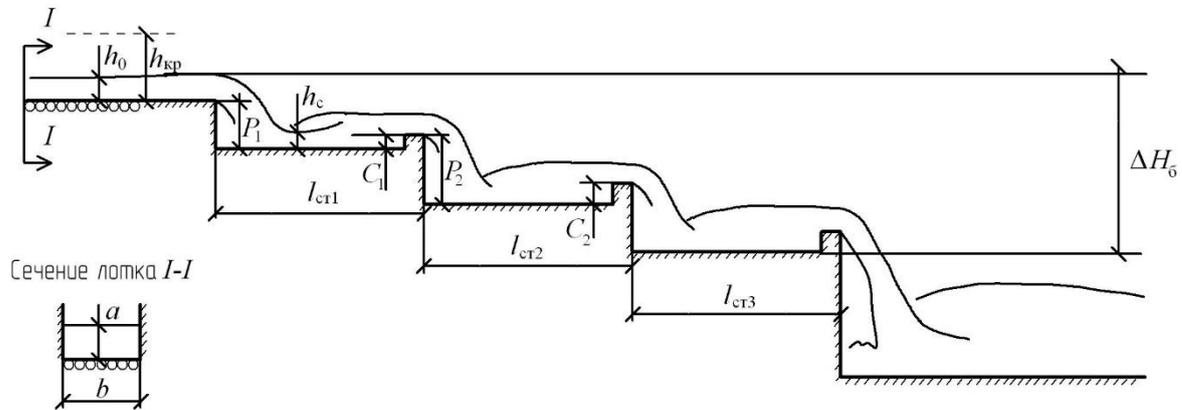


Рисунок 2 - Гидравлическая схема расчета многоступенчатых перепадов

## 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:

$$v_{\bar{c}} = c\sqrt{R \cdot i_{\text{д}}}; \quad (4)$$

- расход воды:

$$Q = \omega v_{\bar{c}}. \quad (5)$$

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.

Зная ширину лотка и бытовую скорость, зададим глубину равномерного течения в прямоугольном лотке, как

$$h_0 = \frac{Q_p}{v_{\bar{c}} \cdot b}. \quad (7)$$

### 3 Расчёт многоступенчатого перепада

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

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

$$h_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_p^2}{g b^2}}, \quad (8)$$

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 и скорость 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

$$V_p = \frac{Q_p}{\omega_p}. \quad (9)$$

Вспомогательная величина

$$Z = \frac{V_p^2}{2g} + P_1 + \frac{h_p}{2}. \quad (10)$$

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

$$h_c = \frac{Q_p}{b\sqrt{2gZ}}. \quad (11)$$

Скорость в сжатом сечении

$$V_c = \sqrt{V_p^2 + 2g\left(P_1 + \frac{h_p}{2}\right)}. \quad (12)$$

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

$$h_c'' = \frac{h_c^2}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8h_{кр}^3}{h_c^3}} - 1 \right). \quad (13)$$

4. Вычисляют высоту первой водобойной стенки  $C_1$  в таком порядке:

- полный напор над водобойной стенкой определяют из формулы пропускной способности водослива

$$H_{полн} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{2gm_1^2b^2}}, \quad (14)$$

где коэффициент расхода водослива  $m_1 = 0,42$ ;

- скоростной напор перед водобойной стенкой

$$H_v = \frac{\alpha Q^2}{2gb^2(h_c'')^2}, \quad (15)$$

где  $\alpha = 1,1$ ;

- напор над стенкой без скоростного напора (геометрический напор)

$$H_z = H_{полн} - H_v; \quad (16)$$

<sup>2</sup> Смотрите приложение

- высота водобойной стенки

$$C_1 = 1,05h_c'' + \frac{0,056q^2}{(h_c'')} - 0,661\sqrt[3]{q^2}, \quad (17)$$

где  $q$  – удельный расход воды на единицу ширины лотка, составляющий

$$q = \frac{Q}{b}. \quad (18)$$

5. Находят длину первой ступени перепада

$$l_{ср1} = l_{пад1} + l_{пр1}, \quad (19)$$

где  $l_{пад1}$  – длина падения струи, определяемая, как

$$l_{пад1} = V_0 \sqrt{\frac{2P_1 + h_p}{2g}}; \quad (20)$$

где  $l_{пр1}$  – длина подпёртого гидравлического прыжка, равная

$$l_{пр1} = 3h_c''. \quad (21)$$

Расчёт второй ступени:

1. Назначают глубину воды перед водобойной стенкой  $h_p = H_z$ .

2. Площадь живого сечения  $\omega_p = bh_p$ .

3. Скорость протекания воды над стенкой вычисляют по формуле (9).

4. Высота падения струи

$$P_2 = P_1 + C_1. \quad (22)$$

5. Скорость в сжатом сечении потока

$$V_c = \sqrt{V_p^2 + 2g\left(P_2 + \frac{h_p}{2}\right)}. \quad (23)$$

6. Площадь сжатого сечения

$$\omega_c = \frac{Q}{V_c}. \quad (24)$$

7. Глубина воды в сжатом сечении

$$h_c = \frac{\omega_c}{b}. \quad (25)$$

8. По формуле (13) вычисляют вторую сопряжённую глубину  $h_c''$ .

9. Определяют высоту второй водобойной стенки  $C_2$  в такой последовательности:

- полный напор перед водобойной стенкой по формуле (14);
- скоростной напор перед водобойной стенкой по формуле (15);
- геометрический напор перед водобойной стенкой по формуле (16);

- высоте второй водобойной стенки по формуле (17)

10. Проверяют условие  $C_2 + H_z < P_2$ . Если оно выполняется, то первая водобойная стенка работает как незатопленный водослив, и расчёт её высоты считается законченным. Если не выполняется, то стенка работает как затопленный водослив и следует сделать перерасчёт, увеличив высоту первой ступени перепада  $P_1$ .

11. Определяют длину второй ступени перепада:

$$l_{ст2} = l_{пад2} + l_{пр2}, \quad (26)$$

где

$$l_{пад2} = V_0 \sqrt{\frac{2P_2 + h_p}{2g}}; \quad (27)$$

$$l_{пр2} = 3h_c''. \quad (28)$$

Аналогично рассчитывают последующие стенки или принимают равными по длине и высоте элементам второй ступени при незначительном изменении высоты стенки.

12. Определяют схему работы последней водобойной стенки. Если  $C_3 > h_6$ , то стенка работает, как незатопленный водослив, и расчёт на этом заканчивается.

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

$$V_{рисб} = \sqrt{V_{р3}^2 + 2g \left( C_3 + \frac{H_{z3}}{2} \right)}, \quad (30)$$

где  $H_3$  – геометрический напор над стенкой,

$$H_3 = h_c'' - C^{(3)},$$

$$V_{р3} = \frac{Q_p}{H_{z3} b}.$$

Принимая скорость воды на рисберме в качестве неразмывающей, назначаем по табл. 3 тип укрепления на рисберме.

Таблица 3 – Назначение укрепления по неразмывающей скорости

Тип укрепления	Размер камня, см	Допустимые скорости течения, м/с, при средней глубине потока			
		0,4 м	1,0 м	2,0 м	3,0 м
Одерновка плашмя	–	0,9	1,1	1,3	1,4
Одерновка в стенку	–	1,5	1,8	2,0	2,2
Каменная наброска из	7,5	2,0	2,4	2,8	3,1

бульжника с галькой					
Грунты, укрепленные битумом	–	2,3	2,7	3,0	3,3
Одиночное мощение на щебне	15,0	2,5	3,0	3,5	4,0
	20,0	3,0	3,5	4,0	4,5
	25,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Двойное мощение из рваного камня на щебне	15,0-20,0	3,5	4,5	5,0	5,5
Бутовая кладка из известняка	–	3,0	3,5	4,0	4,5
Бетон марки 150	–	6,0	7,0	8,0	9,0
Бутовая кладка из камня крепких пород	–	6,5	8,0	10,0	12,0
Бетонные лотки	–	12,0	14,0	16,0	18,0

### 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.

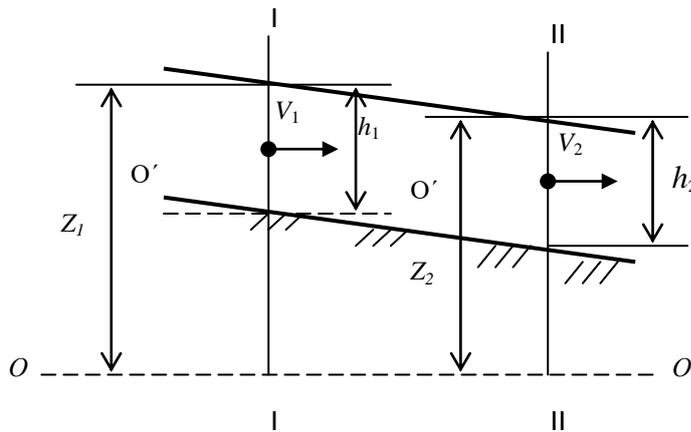


Рисунок П.1 – Схема

Удельная энергия потока:

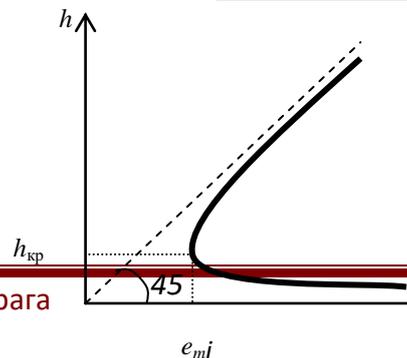
$$e_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$$

Если плоскость сравнения  $O' - O'$  провести через наимизшую 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*.

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.

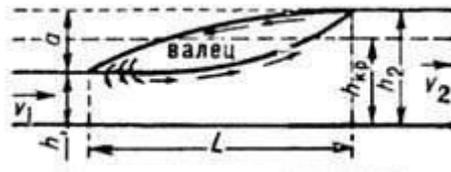


Рисунок ПЗ – Схема гидравлического прыжка;  $h_1 (h')$  и  $h_2 (h'')$  – первая и вторая сопряженная глубины прыжка соответственно;  $h_{кр}$  – критическая глубина

Гидравлический прыжок бывает *свободным*, как на рис. ПЗ, так и *подпёртым*. 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.

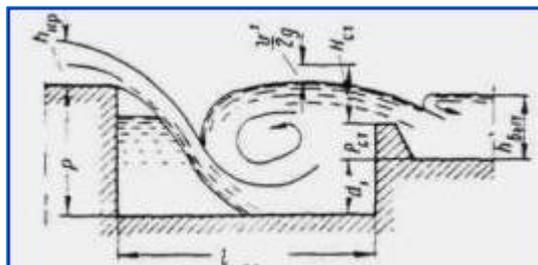


Рисунок П4 – Схема гашения энергии в водобойном колодце