Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

О. Б. Дубровина, А. В. Некрасов, А. А. Секачева

Применение электронных таблиц при решении задач о движении воды в открытых руслах

Текстовый электронный образовательный ресурс

Пособие по дисциплине «Гидрология, гидротехника» по направлению подготовки 08.03.01 Строительство; образовательная программа «Строительство зданий, сооружений и развитие территорий»

Подготовлено кафедрой гидравлики
Институт Строительства и Архитектуры

Екатеринбург
2025

Содержание

Введение 3
1. Геометрические параметры потоков 4
2. Равномерное движение 9
3. Неравномерное движение. Критические параметры 16
4. Неравномерное движение. Кривые свободной поверхности 19
5. Решение уравнения неравномерного движения 24
6. Водосливы, истечение из-под щита 28
7. Сопряжение бьефов 36
8. Гашение кинетической энергии потока в нижнем бьефе 39
9. Расчет быстротоков и перепадов 43
Библиографический список 49

Введение

Гидравлика открытых русел – раздел гидравлики, в котором рассматриваются закономерности течения потоков жидкостей, и прежде всего – воды, с открытой свободной поверхностью, т. е. в реках, искусственных каналах и т. п.

Эти законы имеют важное практическое значение, поскольку используются при проектировании систем водоотведения, мелиорации, различных гидротехнических сооружений (каналов, плотин, дамб, водосбросов и т. п.). Они также важны для понимания природных явлений, связанных с движением водных потоков.

Инженерные расчеты открытых потоков и сооружений часто оказываются более сложными, чем, например, трубных течений, поскольку они всегда являются пространственными. Традиционно для решения таких задач используются графо-аналитические методы. В то же время широкое распространение компьютеров позволяет использовать более точные численные методы решения.

В настоящее время разработано большое количество компьютерных приложений для решения наиболее часто встречающихся задач о течении воды в открытых руслах. Однако для их правильного использования важно не только понимание физики явлений, но и наличие навыков самостоятельного решения основных задач такого рода.

В данном пособии рассмотрены базовые понятия гидравлики открытых русел при установившемся течении воды: нормальная глубина, критические параметры потока, гидравлический прыжок, сопряжение бьефов и др. Приводится методика расчета некоторых гидротехнических сооружений: водосбросов, водобойных колодцев, перепадов.

Предполагается, что читатель знаком с основными понятиями и законами гидравлики, таким как: давление и напор жидкости, расход и закон его сохранения, уравнение Бернулли, виды и причины потерь механической энергии при движении жидкости.

Большинство примеров и задач, рассмотренных в пособии, предполагают использование в качестве основного рабочего инструмента электронной таблицы Microsoft Excel. Однако это не исключает использование других продуктов этого класса, например, OpenOffice Calc, Google Sheets, Яндекс.Таблицы и т. п.*

* В данном пособии рассматривается программное обеспечение компьютерных аудиторий института Строительства и Архитектуры

1. Геометрические параметры потоков

Геометрическими параметрами, характеризующими поток в открытом русле (канале), являются (рис. 1.1):

• площадь живого сечения ω – площадь поперечного сечения потока, в каждой точке которого вектор скорости движения воды перпендикулярен ему;

• смоченный периметр χ – часть периметра живого сечения, на которой жидкость соприкасается со стенками канала;

• ширина потока поверху B – открытая часть периметра живого сечения;

• гидравлические радиус R и диаметр D – параметры, используемые при расчетах потоков*:

$$R = \frac{\omega}{\chi},\ D = 4R; \tag{1.1}$$

• уклон, i – тангенс угла наклона дна канала в данной точке,

• глубина, h, - глубина потока в данном сечении, отсчитываемая от дна русла, как правило, по вертикали, поскольку обычно уклон является малым.

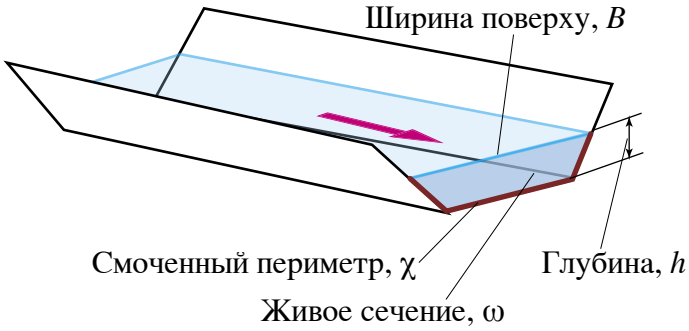


Рис. 1.1. Геометрические характеристики потоков

Если форма и размеры русла не меняются по его длине, его называют *призматическим*. Очень часто они имеют неизменный по длине уклон, что характерно для большинства искусственных каналов.

Сечения искусственных призматических русел обычно имеют простые геометрические формы: прямоугольную, трапецеидальную, круглую (рис. 1.2). Геометрические параметры трапецеидального сечения могут быть рассчитаны по следующим формулам:

– гидравлический радиус

$$R = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}}, \tag{1.2}$$

* Далее геометрические радиус и диаметр круглых сечений будут обозначаться строчными буквами r и d соответственно

– ширина поверху

$$B = b + 2mh, \tag{1.3}$$

– площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh)h\,. \tag{1.4}$$

На рис. 1.2 и в этих формулах: b – ширина потока по дну, m – коэффициент заложения откосов (котангенс угла наклона откоса α). В случае прямоугольного канала $m = 0$, для русла треугольной формы $b = 0$.

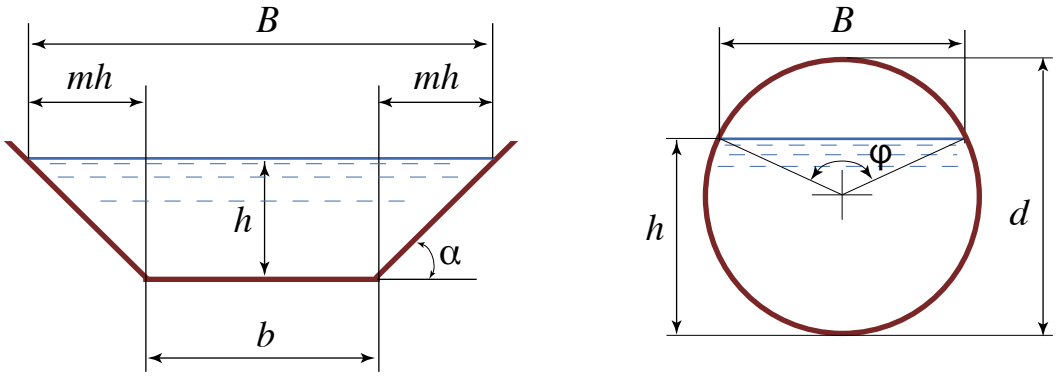


Рис.1.2. Трапецеидальный и круглый каналы

Для канала круглого сечения (угол φ в радианах, d – геометрический диаметр):

– смоченный периметр

$$\chi = d\left(\pi - \frac{\varphi}{2}\right), \tag{1.5}$$

– ширина поверху

$$B = d \cdot \sin\frac{\varphi}{2}, \tag{1.6}$$

– площадь живого сечения

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{d^2}{8}(\varphi - \sin\varphi), \tag{1.7}$$

– глубина потока

$$h = \frac{d}{2}\left(1 + \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right). \tag{1.8}$$

Геометрические параметры каналов замкнутого сечения других форм определяют с использование специальных таблиц.

Пример 1.1

Рассмотрим расчет параметров канала круглого поперечного сечения радиусом r = 0,5 м в среде Calc OpenOffice.

Создадим новую таблицу и введем в строку 4 необходимые расчетные формулы (рис. 1.3).

ABS =$C$2*(1+COS(A10/2))

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Параметры круглого сечения							
2	Радиус сечения, r		0,5					
3	Угол, рад	Угол, град.	Глубина	Площадь	Периметр	Ширина	Гидр. Радиус	Гидр. Диам.
4	0	0	1,000	0,785	3,14	0	0,250	1,000
5	0,785	45	0,962	0,775	2,7475	0,382	0,282	1,129
6	1,570	90	0,854	0,714	2,355	0,707	0,303	1,212
7	3,140	180	0,500	0,393	1,57	1,000	0,250	1,001
8	4,712	270	0,146	0,071	0,7838	0,707	0,091	0,362
9	5,495	315	0,038	0,009	0,3925	0,384	0,024	0,097
10	6,283	=$C$2*(1+COS(A10/2))			0,000	0,000	0	0

Рис. 1.3. Таблица для расчета параметров круглого сечения канала в среде Calc OpenOffice

Поскольку во всех формулах используется одно и то же значение радиуса (в примере это ячейка C2), на нее следует дать *абсолютную ссылку*, т. е. ввести $C$2.

Значения аргумента (угла) в диапазоне 0... 2π в примере введены в ячейки A4: A10. Значения аргумента и их количество можно выбрать произвольно. Далее скопируйте ячейки B4:H4 в остальные строки таблицы.

Обратите внимание, что при φ = 0, т. е. когда сечение полностью заполнено водой гидравлический диаметр равен геометрическому.

Представим результаты в виде графиков. Для этого нужно выделить соответствующие колонки таблицы и открыть пункт меню *Вставка – Диаграмма*. При этом откроется окно *Мастера диаграмм* для указания параметров графика (рис. 1.4). В нашем случае необходимо указать тип графика *Диаграмма XY**, а для отображения гладких кривых отметить пункт *Сглаживание линий*. Результат показан на рис. 1.5.

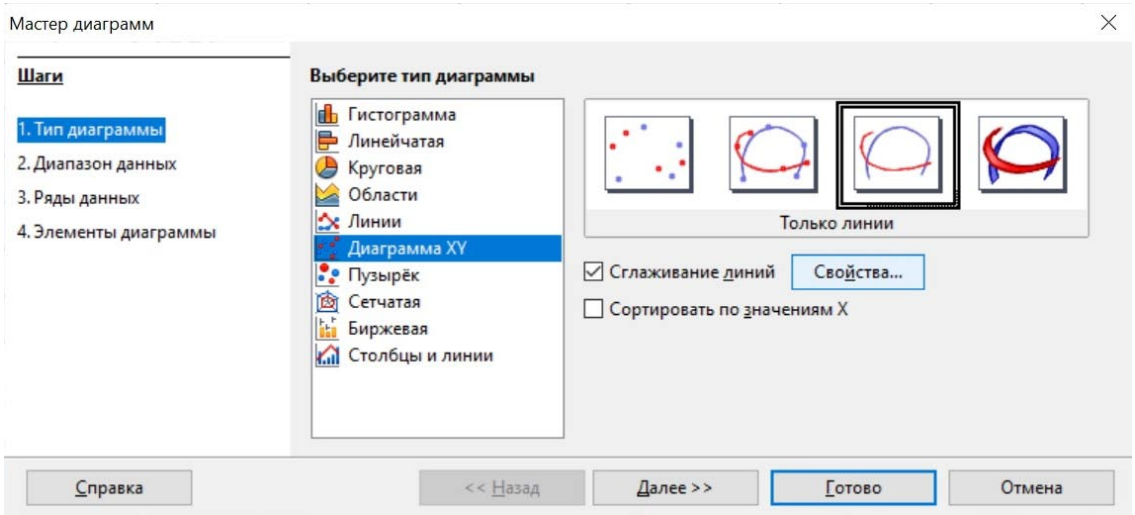


Рис. 1.4. Мастер построения диаграмм OpenOffice Calc

* При работе в среде Excel следует использовать точечную диаграмму

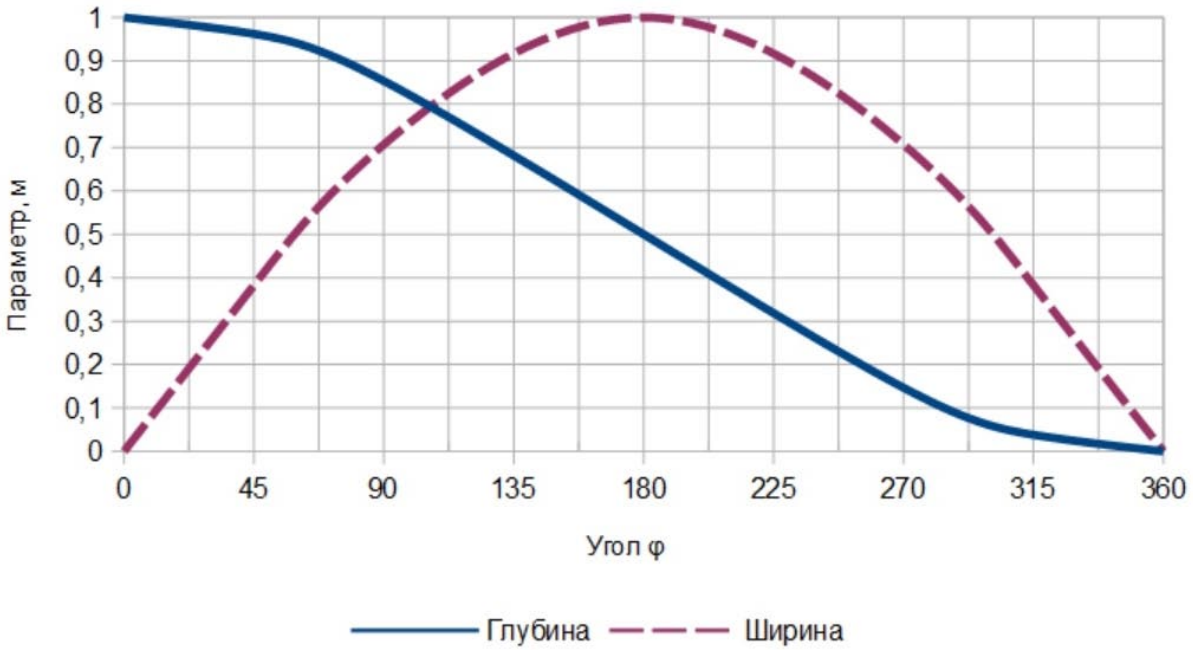


Рис. 1.5. Графики зависимостей ширины потока поверху и глубины потока от угла φ

Предлагаем самостоятельно познакомиться с другими возможностями *Мастера диаграмм*.

Задание для самостоятельной работы

Параметры естественных русел определяют экспериментально. В табл. 1.1 показаны результаты измерений глубины русла в зависимости от расстояния до одного из берегов (от начала створа).

Необходимо:

– построить профиль поперечного сечения;

– определить длину смоченного периметра потока;

– рассчитать методом трапеций площадь живого сечения;

– определить гидравлический радиус сечения.

Таблица 1.1

Результаты измерения глубин в створе реки

Расстояние от начала створа, м	Глубина русла, м
1,0	0,4
3,5	0,7
5,7	0,9
7,5	1,5
9,4	2,3
11,2	1,3
12,5	0,0

Вопросы для самоконтроля

1. Какими геометрическими параметрами характеризуют поток в открытом русле?

2. Какие бывают формы сечения искусственных русел?

3. Чему равен гидравлический радиус канала круглого сечения при его полном заполнении водой?

4. Чему равна ширина поверху для канала трапецеидального сечения?

5. Чему равен коэффициент заложения откосов для прямоугольного канала?

2. Равномерное движение

Вода, текущая в открытом русле (канале) или частично заполненном трубопроводе, имеет открытую свободную поверхность, давление на которой равняется атмосферному. Ее движение осуществляется за счет действия силы тяжести. В гидравлике такие течения принято называть *безнапорными*.

Движение воды в открытом русле называют *равномерным*, если расход, форма и размеры поперечных сечений, уклон дна не изменяются по его длине.

Глубины потока, скорости в сходственных точках различных сечений равномерного потока одинаковые (рис. 2.1). Свободная поверхность воды в этом случае является плоскостью, параллельной дну канала.

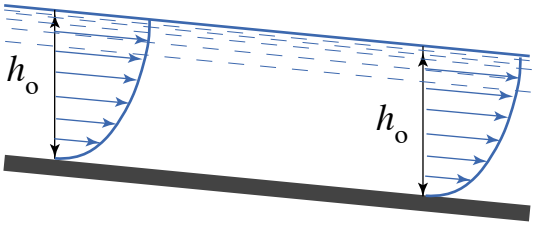


Рис. 2.1. Равномерное движение в открытом русле

Глубина потока при равномерном движении h_o называется *нормальной* глубиной.

Если хотя бы один параметр потока (уклон, форма канала и т. д.) изменяется по его длине, движение является *неравномерным*.

Основными зависимостями, устанавливающими связь между расходом Q воды в канале, и его физическими и геометрическими параметрами являются формулы Шези и Маннинга.

Формула Шези:

$$Q = \omega C\sqrt{Ri}, \tag{2.1}$$

где C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с, который характеризует шероховатость стенок канала, i – уклон дна канала.

Формула Маннинга:

$$Q = \frac{1}{n}\omega R^{2/3}\sqrt{i}\,, \tag{2.2}$$

где n – коэффициент шероховатости поверхности русла.

Значения n определяют по справочникам. Например, для поверхностей на цементном растворе n = 0,011 – 0,015, для земляных каналов n = 0,027 – 0,035.

Формулы (2.1) и (2.2) равноценны. Выбор конкретной формулы для выполнения расчетов чаще всего обусловлен сложившимися традициями.

Коэффициенты C и n связаны соотношением:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \qquad (2.3)$$

где $y =$ 1/6, что следует из сравнения формул (2.1) и (2.2).

В общем случае этот коэффициент переменный. В отечественной практике расчетов его обычно рассчитывают по формуле Н. Н. Павловского:

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}1). \qquad (2.4)$$

При расчетах равномерного движения рассматривают три типа задач.

1. *Определение пропускной способности канала*, т. е. расхода Q при заданных значениях геометрических параметров (для круглого сечения – d; для трапецеидального – b, m), нормальной глубины h_o , уклона i и коэффициента шероховатости n.

К этому же типу относятся задачи об определении уклона канала i. Критерием определения уклона может быть, например, условие недопущения его переполнения. Другими условиям могут являться отсутствие заиливания канала или размыванию русла.

В первом случае задается минимально допустимая скорость, а во втором – максимальная. Должны быть также известны геометрические параметры сечения и нормальная глубина.

2. *Определение нормальной глубины* h_o.

В задачах этого типа заданными величинами являются расход Q, геометрические параметры (для круглого сечения – d; для трапецеидального – b, m), уклон i и коэффициент шероховатости n.

3. *Определение оптимальной формы и размеров поперечного сечения* канала (b, m или d) при заданном расходе Q, уклоне i и коэффициенте шероховатости n.

Решение задач 1-го типа

Сначала по заданным геометрическим параметрам находят площадь живого сечения ω, смоченный периметр χ и гидравлический радиус R.

Расход рассчитывают по формуле (2.2) или по формуле (2.1) с учетом (2.3), (2.4).

Пример 2.1

Поток движется в круглой цилиндрической трубе диаметром d = 1 м. Уклон канала i = 0,077. Глубина потока h_o = 0,5 м. Поверхность русла на цементном растворе, для которой n = 0,012. Нужно определить расход воды по формулам Шези и Маннинга.

Геометрические параметры потока в круглой трубе при d = 1 м рассчитаны ранее. Поэтому воспользуемся данными из таблицы на рис. 1.3 при глубине 0,5 м:

– площадь живого сечения $\omega = 0{,}393$ м^2,
– смоченный периметр $\chi = 1{,}571$ м,
–гидравлический радиус $R = 0{,}25$ м.

Расход по формуле Маннинга можно рассчитать сразу:

$$Q = \frac{1}{n}\omega R^{2/3}\sqrt{i} = \frac{1}{0{,}012}0{,}393 \cdot 0{,}25^{2/3} \cdot \sqrt{0{,}077} = 3{,}60 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для использования формулы Шези предварительно определим показатель степени y в формуле (2.4):

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}1) =$$
$$= 2{,}5\sqrt{0{,}012} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{0{,}25}(\sqrt{0{,}012} - 0{,}1) = 0{,}140.$$

Таким образом, коэффициент Шези:

$$C = \frac{1}{n}R^y = \frac{1}{0{,}012}0{,}25^{0{,}14} = 68{,}61 \text{ м}^{0{,}5}/\text{с},$$

и расход

$$Q = \omega C\sqrt{Ri} = 0{,}393 \cdot 68{,}61\sqrt{0{,}25 \cdot 0{,}077} = 3{,}74 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расходы, рассчитанные по разным формулам отличаются менее, чем на 4%, что вполне допустимо для большинства инженерных расчетов.

Решение задач 2-го типа

Как указано выше, эти задачи связаны с определением нормальной глубины. Их решают графически или численно. Очевидно, что второй способ значительно точнее. В электронных таблицах для этого используют инструмент *Подбор параметра*.

Пример 2.2

Рассмотрим цилиндрический водовод диаметром $d = 2$ м, изготовленный из бетона. Уклон водовода $i = 0{,}006$. Расход воды $Q = 5$ м^3/с. Примем коэффициент шероховатости $n = 0{,}013$.

Требуется определить нормальную глубину потока h_o.

Ход решения иллюстрирует рис. 2.2.

В ячейки B1:B4 введем заданные параметры. В ячейке B6 зададим произвольное значение угла φ. Именно эта величина будет подбираться в ходе расчета.

В ячейке B7 находится формула (1.5) для расчета смоченного периметра, в ячейке B8 – формула (1.7), по которой рассчитывается площадь живого сечения. В ячейке B9 выполняем расчет гидравлического радиуса (1.1).

Глубина h_o при известных значениях d и φ рассчитывается по формуле (1.8). Введем эту формулу в ячейку B10.

В ячейке B11 находится формула (1.6) для определения ширины потока поверху.

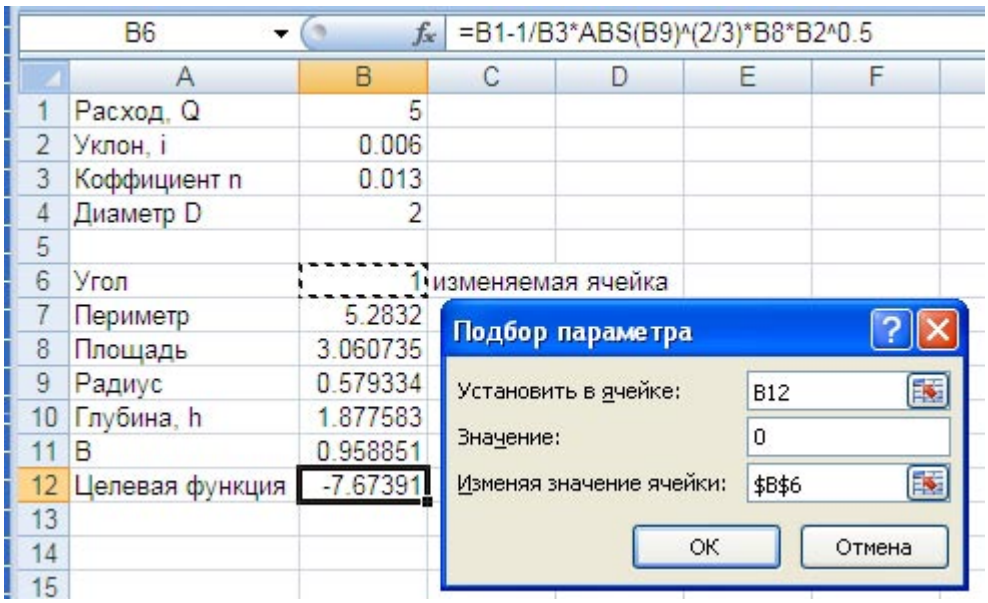


Рис. 2.2. Определение нормальной глубины в среде Excel

Расход будем рассчитывать по формуле Маннинга (2.2). Перенесем все ее слагаемые в левую часть:

$$Q - \frac{1}{n}\omega R^{2/3}\sqrt{i} = 0.$$

Эту формулу необходимо ввести в ячейку B12 как целевую функцию. Поскольку угол φ задан произвольно, значение целевой функции не равно нулю.

После запуска приложения *Подбор параметра* укажем, что в ячейке целевой функции нужно получить ноль при изменении угла φ.

В результате расчета получим φ = 3,32 рад. и h_o = 0,91 м. При этом площадь живого сечения потока составляет ω = 1,39 м^2.

Решение задач 3-го типа

Как указано выше, задачи этого типа подразумевают определение геометрических параметров сечений потока. Во многих случаях они решаются относительно просто. Однако иногда может возникнуть необходимость решения систем уравнений, в том числе и нелинейных.

Пример 2.3

Заданными параметрами являются расход Q, коэффициент заложения откосов трапецеидального канала m, уклон i , коэффициент шероховатости n. Задана также допустимая скорость течения воды V.

Требуется определить ширину канала понизу b и глубину потока h.

В данном случае имеются две неизвестные величины. Для их определения необходимо составить систему из двух уравнений.

Поскольку заданы расход и скорость, можно сформировать две функции – F_1 и F_2.

Одна из них построена на основе формулы для расчета площади трапеции. С учетом того, что она равна $\omega = \frac{Q}{V}$:

$$F_1(b,h) = \frac{Q}{V} - h\left(b + mh\right). \qquad (2.5)$$

Вторую функцию построим на основе формулы Маннинга:

$$F_2\left(b,h\right) = Q - \frac{1}{n}\omega R^{2/3}\sqrt{i} \quad , \qquad (2.6)$$

где

$$R = \frac{\omega}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}. \qquad (2.7)$$

Поскольку *Подбор параметра* не позволяет найти две неизвестные величины, воспользуемся инструментом Excel *Поиск решения* *, у которого такого ограничения нет.

Для использования данного инструмента необходимо сформировать целевую функцию $F(b, h)$, значение которой должно быть равно нулю.

Целевую функцию нужно сформировать из двух выражений: $F_1(b, h)$ и $F_2(b, h)$. Это можно сделать несколькими способами. Например:

$$F = F_1^{\,2} + F_2^{\,2}. \qquad (2.8)$$

Обратим внимание, что в правой части записана сумма квадратов функций, поскольку в ходе решения они могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Последовательность работы с конкретными исходными данными иллюстрирует рис. 2.3.

Сначала введем исходные данные в ячейки B3:B7. Площадь ω рассчитаем в ячейке B8 как =B3/B7.

В ячейки B11, B12 введем произвольные значения искомых параметров.

Ячейки B15, B16 и B17 содержат формулы (2.5), (2.7) и (2.6) соответственно. Целевая функция (2.8) находится в ячейке B18.

Далее откроем пункт меню *Данные – Поиск решения* (если он отсутствует, значит, эта надстройка Excel не установлена).

В окне *Поиск решения* укажем, что целевая функция B18 должна быть равна нулю. При этом изменяемыми ячейками являются B1:B12. Дополнительно можно задать ограничение поиска только в области положительных значений b, h (кнопка *Добавить*). Решение будет найдено после нажатия кнопки *Выполнить*. Его результат:

$$b = 0{,}841 \text{ м}, \; h = 2{,}379 \text{ м}.$$

---

* По умолчанию данный инструмент не устанавливается. Для его подключения необходимо настроить параметры Excel в разделе Надстройки – Параметры Excel

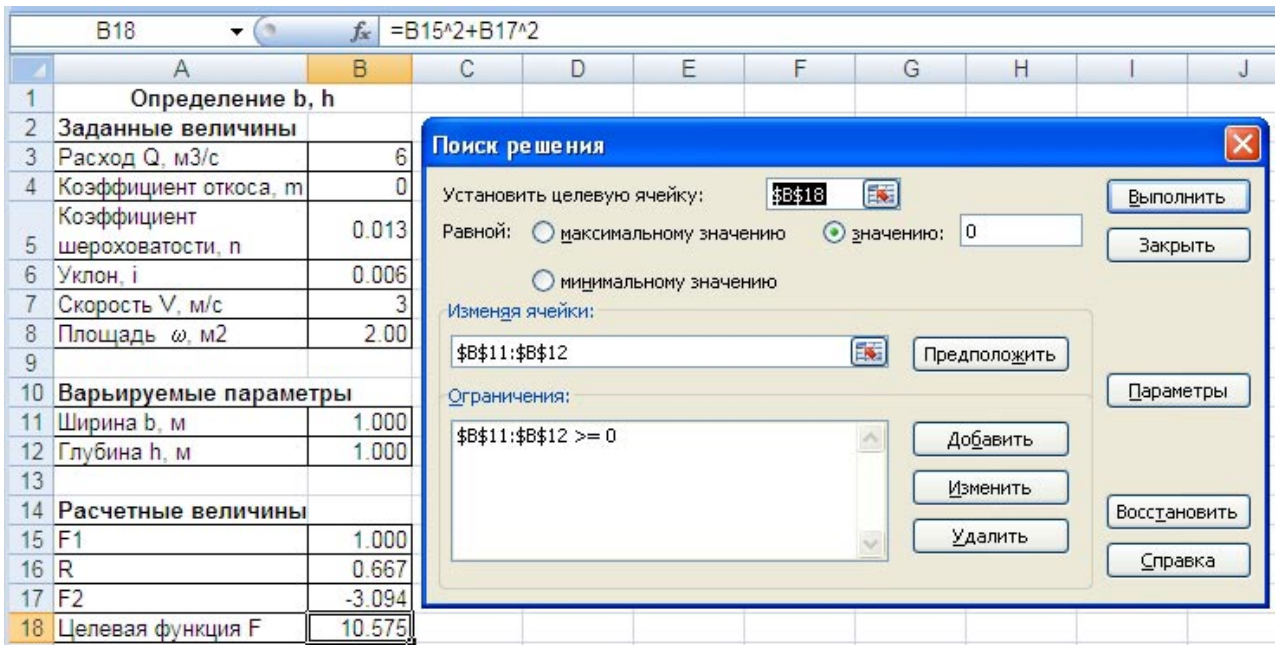


Рис. 2.3. Поиск решения в среде Excel

Если решение не будет найдено, следует задать другие начальные значения искомых параметров.

Задание для самостоятельной работы

Используя формулу Маннинга, определите нормальную глубину потока h_o при его течении в русле, форма поперечного сечения которого показана на рис. 2.4.

Исходные данные:

– расход Q = 50 м^3/с;

– уклон i = 0,007;

– коэффициент шероховатости n = 0,012;

– ширина канала b_1= 3 м;

– ширина канала b_2= 5 м;

– высота a = 1 м.

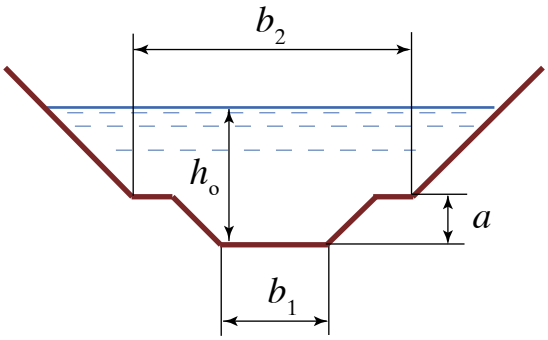


Рис. 2.4. Сечение русла

В данном случае площадь живого сечения потока и смоченный периметр определяются по разным формулам в зависимости от соотношения искомой глубины и высоты a. Эти формулы нужно составить самостоятельно.

Автоматический выбор формулы в зависимости от условия осуществляется с помощью функции:

=IF(*Условие*; *Формула_1*; *Формула_2*)

Если логическое *Условие* выполняется (истина), то вычисления выполняются по *Формуле_1*, в противном случае (ложь) – по *Формуле_2*.

Вопросы для самоконтроля

1. При каких условиях движение воды в открытом русле является равномерным?

2. Какое движение воды в открытом русле называется неравномерным?

3. Какую глубину потока называют нормальной?

4. Каким соотношением связаны коэффициент Шези (C) и коэффициент шероховатости поверхности русла (n)?

7. Какие три основных типа задач рассматриваются при расчетах равномерного движения?

3. Неравномерное движение. Критические параметры

Если хотя бы один параметр потока (уклон, форма канала и т. д.) изменяется по его длине, движение будет неравномерным. Свободная поверхность таких потоков в общем случае уже не является плоской, хотя ее кривизна часто очень мала.

Если поток обладает запасом кинетической энергии, то его движение возможно даже при отрицательном уклоне дна. Такие течения всегда являются неравномерными.

Механическая энергия воды, движущейся в канале, представляет собой сумму потенциальной и кинетической энергии. Потенциальная энергия обусловлена действием силы тяжести и пропорциональна глубине потока, а кинетическая – зависит от его скорости V.

Удельной энергией сечения потока называют сумму:

$$E = h + \frac{\alpha V^2}{2g}. \qquad (3.1)$$

Коэффициент α в этом выражении называется *коэффициентом кинетической энергии*. Чем меньше изменение скорости потока в конкретном сечении по его высоте, тем ближе значение α к единице. Обычно α =1,0...1,1.

При конкретном значении расхода в канале заданной геометрии глубина потока и его скорость зависят от уклона дна. Чем больше уклон, тем выше скорость, но тем меньше глубина. Таким образом, одному и тому же значению удельной энергии в общем случае соответствуют различные пары значений потенциальной и кинетической энергии.

На рис. 3.1 приведен примерный вид зависимости глубины потока от его удельной энергии при конкретном расходе в канале.

Параметры (глубина, уклон), соответствующие минимуму удельной энергии, называются критическими. Далее критические значения глубины и уклона обозначаются индексом «к» – $h_к$, $i_к$.

В зависимости от соотношения фактических глубин h_1, h_2 и критической глубины различают *спокойные* потоки, в которых $h_1 > h_к$, и *бурные*, если $h_2 < h_к$.

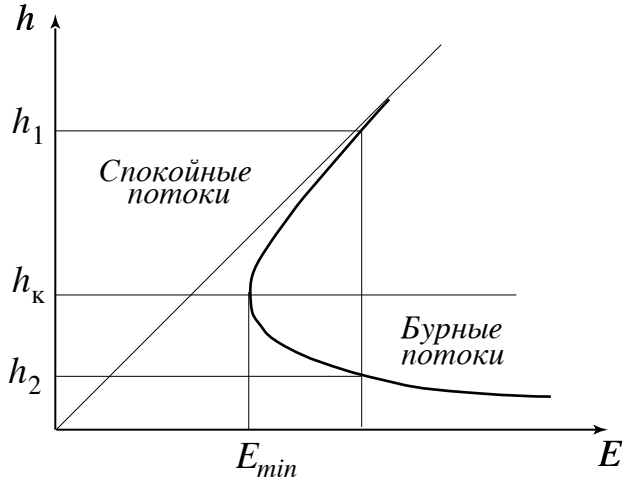


Рис. 3.1. Зависимость глубины h от удельной энергии E

Уклон дна русла называют *пологим*, если $i < i_к$. При $i > i_к$ уклон является *крутым*.

Для русла произвольной формы критическая глубина определяется из соотношений:

$$\frac{\omega_к^3}{B_к} = \frac{\alpha Q^2}{g} \tag{3.2}$$

или

$$1 - \frac{\alpha Q^2 B_к}{g\omega_к^3} = 0, \tag{3.3}$$

где $\omega_к$, $B_к$ – площадь живого сечения и ширина потока поверху при критической глубине.

В частности для прямоугольного канала:

$$h_к = \left(\frac{\alpha Q^2}{gb^3}\right)^{\frac{1}{3}}. \tag{3.4}$$

Обратим внимание, что критическая глубина от уклона не зависит. Критический уклон $i_к$ определяют из формул Шези или Маннинга при критической глубине $h_к$.

Для сечений других конфигураций критическую глубину проще всего определить численно с помощью инструмента электронных таблиц *Подбор параметра*.

Пример 3.1

Рассмотрим порядок расчета критической глубины для потока в канале круглого сечения (рис. 3.2).

Заданными параметрами являются:

– расход $Q = 1$ м^3/с;

– диаметр $d = 1$ м,

– коэффициент $\alpha = 1$.

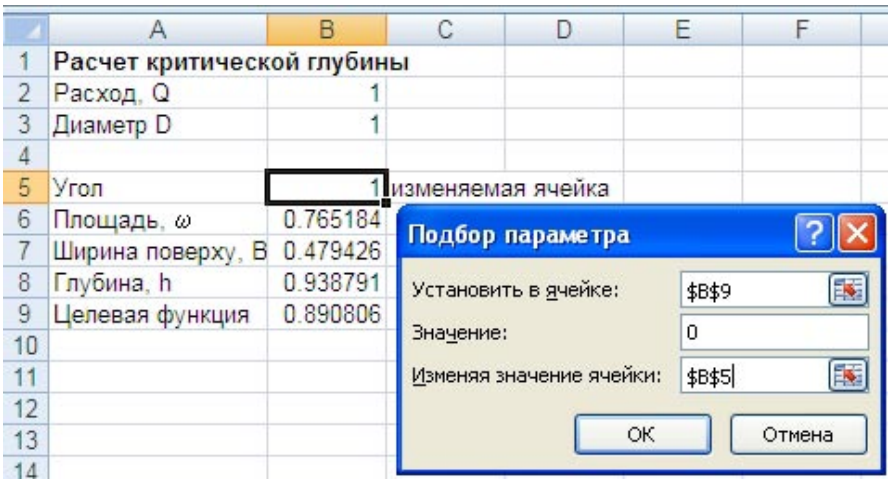


Рис. 3.2. Расчет критической глубины в круглом канале

В ячейки B2, B3 введены исходные данные. Я ячейку B5 введем произвольное значение угла φ (см. рис. 1.2). Именно это значение является изменяемым параметром при расчете.

Площадь живого сечения в ячейке B6 рассчитываем по формуле (1.7), а ширину поверху по формуле (1.6). Интересующую нас глубину рассчитываем в ячейке B8 по формуле (1.8).

В качестве целевой функции используем (3.3). Левую часть этой формулы вводим в B9.

В результате расчета получим $h_к$ = 0,573 м.

Задания для самостоятельной работы

1. Постройте график зависимости нормальной глубины потока от удельной энергии для течения в трапецеидальном призматическом канале при следующих параметрах:

расход Q = 40 м^3/с;

ширина канала по дну b = 14 м;

коэффициент заложения откосов m = 1;

коэффициент шероховатости n = 0,011.

Расчет выполните по формуле Маннинга для уклонов, изменяющихся в диапазоне от 0,0005 до 0,005.

Определите по графику критическую глубину и рассчитайте соответствующий ей критический уклон.

2. Рассчитайте нормальную и критическую глубину для тех же параметров потока по формуле (3.2) при уклоне i = 0,0006.

3. Рассчитайте критический уклон для тех же параметров потока по формуле Маннинга.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называют удельной энергией сечения потока?
2. Какие параметры потока называются критическими?
3. Как определить критическую глубина для русла произвольной формы?
4. При каком условии уклон дна русла называется пологим?
5. При каком условии поток называется бурным?

4. Неравномерное движение. Кривые свободной поверхности

С практической точки зрения одной из основных задач гидравлики открытых русел является задача об изменении глубины потока h при его течении в каналах заданной конфигурации. Ее называют задачей о построении кривых свободной поверхности.

Поскольку при неравномерном движении все параметры потока меняются по его длине l, течение описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \dfrac{Q^2}{C^2\omega^2 R}}{1 - \dfrac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3}}. \qquad (4.1)$$

Поскольку по длине потока изменяется и площадь живого сечения ω и ширина потока поверху B, то в одной части потока знаменатель может быть положительным, а в другой – отрицательным. Однако при изменении знака знаменатель стремится к нулю, а само выражение – к бесконечности. Нулевому значению знаменателя соответствуют критические параметры потока, рассмотренные ранее. При этом зависимость $h = f(l)$ терпит разрыв.

На практике переход глубины потока через критическое значение осуществляется в виде так называемого *гидравлического прыжка* (рис. 4.1)

Глубины бурного потока перед прыжком h_1 и спокойного за прыжком h_2 носят название *сопряженных глубин*. В прямоугольном канале они связаны соотношением:

$$h_1 = \frac{h_2}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{8\alpha Q^2}{g b^2 h_2^3}} - 1\right). \qquad (4.2)$$

а

б

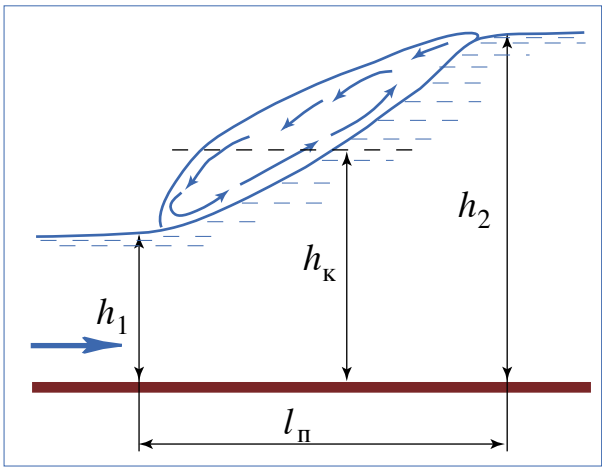


Рис. 4.1. Гидравлический прыжок:
а – фотография прыжка (вид сверху), *б* – схема прыжка

Длина прыжка определяется по эмпирическим формулам. Одной из них является, например, формула Павловского:

$$l_п = 2{,}5(1{,}9h_2 - h_1) \qquad (4.3)$$

Выполним численный анализ уравнения (4.1) для конкретного случая.

Пример 4.1

Рассмотрим русло прямоугольного сечения ($m = 0$) шириной $b = 3$ м с уклоном i = 0,0006. Расход Q = 30 м^3/с, коэффициент шероховатости n = 0,012. Примем коэффициент неравномерности $\alpha = 1{,}1$.

Для потока с такими параметрами нормальная глубина $h_о = 4{,}54$ м, критическая глубина $h_к$ = 2,24 м, критический уклон $i_к$ = 0, 0034.

В среде электронной таблицы (здесь используется Excel) создадим таблицу для расчета правой части уравнения (4.1). Ее примерный вид показан на рис. 4.2. В качестве минимального значения глубины примем h = 1,6 м, т. е. $h < h_к < h_о$.

Далее в последовательные ячейки введем формулы для расчета величин, входящих в правую часть уравнения:

– площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh)h \ ,$$

– смоченный периметр

$$\chi = b + 2h,$$

– гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} \ ,$$

– показатель степени

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}1) \ ,$$

– коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n}R^y \ .$$

Напоминаем, что на неизменные параметры из ячеек C1... C6 необходимо давать абсолютные ссылки.

Далее введем формулы для расчета значений числителя (H8), знаменателя (H9) правой части уравнения (4.1) и их отношения (H10). Поскольку сечение русла прямоугольное, то в этих формулах $B = b$.

После заполнения первой строки ее нужно размножить для других значений глубины, с шагом ее изменения, например, 0,1 м. Эту таблицу рекомендуется сохранить, поскольку она будет использоваться в дальнейшем.

Обратим внимание, что значение производной между h = 2,2 и 2,4 меняет знак. В нашем случае именно в этом диапазоне находится значение критической глубины ($h_к$ = 2,24), когда выражение (4.1) стремится к бесконечности. Поскольку далее на

основе этой таблицы будут строиться графики, то для их корректного отображения значение ячейки J16 следует удалить.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Расход, Q		30							
2	Ширина по дну, b		3							
3	Коэф-т откоса, m		0							
4	Уклон, i		0.0006							
5	Коэф-т шерох., n		0.012							
6	Коэф-т α		1.1							
7										
8		*h*	ω	χ	*R*	*y*	*C*	Числитель	Знаменатель	*dh/dl*
9		1.6	4.8	6.2	0.774	0.138	80.450	-0.0072	-1.740	0.0041
10		1.7	5.1	6.4	0.797	0.137	80.772	-0.0061	-1.285	0.0047
11		1.8	5.4	6.6	0.818	0.137	81.067	-0.0051	-0.925	0.0056
12		1.9	5.7	6.8	0.838	0.137	81.339	-0.0044	-0.636	0.0069
13		2	6	7	0.857	0.137	81.589	-0.0038	-0.403	0.0094
14		2.1	6.3	7.2	0.875	0.137	81.821	-0.0033	-0.212	0.0154
15		2.2	6.6	7.4	0.892	0.137	82.036	-0.0028	-0.054	0.0525
16		2.3	6.9	7.6	0.908	0.137	82.237	-0.0025	0.077	
17		2.4	7.2	7.8	0.923	0.137	82.425	-0.0022	0.188	-0.0115
28		4.6	13.8	12.2	1.131	0.136	84.744	0.0000	0.885	0.0000
29		4.8	14.4	12.6	1.143	0.136	84.863	0.0001	0.899	0.0001
30		5	15	13	1.154	0.136	84.973	0.0001	0.910	0.0001

Рис. 4.2. Пример анализа уравнения (4.1)

Следующий шаг работы – построение графика $\frac{dh}{dl} = f(h)$. Напоминаем, что при построении графиков на основе нескольких произвольных колонок при их выделении следует удерживать кнопку Ctrl. Тип диаграммы в Excel – *точечная*, а при использовании Calc – *диаграмма XY*. Результат построения показан на рис. 4.3.

Рассмотрим полученный график. Он имеет разрыв при $h = h_к$, а правая ветвь

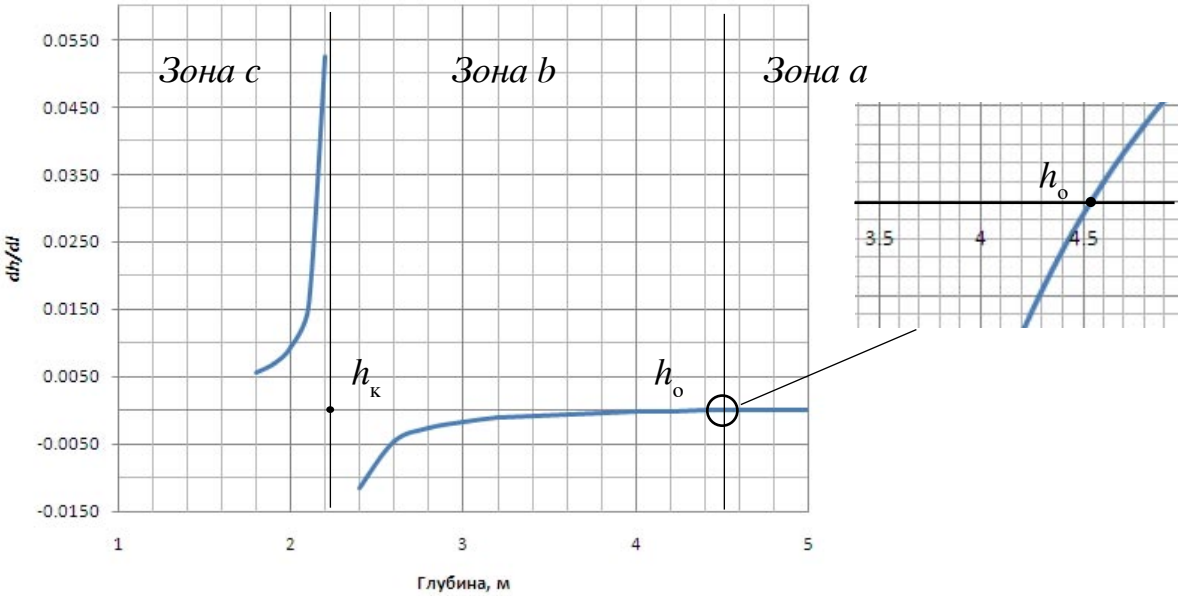


Рис. 4.3. Зависимость $\frac{dh}{dl}$ от глубины h

пересекает ось абсцисс при $h = h_о$. Таким образом, можно выделить три части графика или, как принято говорить, три зоны течения:

зона a: $h > h_о$ и $h > h_к$ – реальная глубина больше нормальной и критической;
зона b: $h_о \geq h \geq h_к$ – глубина имеет промежуточное значение;
зона c: $h \leq h_к$ и $h \leq h_о$ – глубина потока меньше критической и нормальной.

Рассмотрим их подробно, ориентируясь на результаты вычислений.

В ***зоне a***, величина $\frac{dh}{dl} > 0$, т. е. глубина по ходу течения увеличивается.

Принято говорить, что имеет место *кривая подпора*. Величина производной мала, и глубина увеличивается незначительно. Если расчетную таблицу размножить до более высоких значений глубин, можно заметить, что в этой зоне знаменатель стремится к единице, а числитель и сама производная – к заданному значению уклона. Предлагаем убедиться в этом самостоятельно.

Напомним, что глубина h отсчитывается от дна канала, которое в свою очередь понижается. В результате получается, что глубина потока, начиная с некоторого ее значения, а уровень воды будет горизонтальным.

Кривые свободной поверхности при $i < i_к$ обозначают римской цифрой I, а в данном случае – *a*I (иногда используют обозначение a_I).

В ***зоне b***, величина $\frac{dh}{dl} < 0$, т. е. глубина по ходу течения уменьшается.

Такие кривые свободной поверхности называется *кривыми спада*. По мере уменьшения глубины ее значение постепенно приближается к критической величине, когда нарушается непрерывность кривой свободной поверхности. На практике такие течения возникают перед водопадами, а кривые обозначаются *b*I.

В ***зоне c***, величина $\frac{dh}{dl} > 0$, и глубина по ходу течения увеличивается.

Кривые свободной поверхности являются кривыми подпора, в конце которых также нарушается их непрерывность. Именно такой вид кривых формируется перед гидравлическим прыжком. Кривые обозначаются *c*I .

Виды рассмотренных кривых схематично показаны на рис.4.4.

При уклоне дна $i > i_к$ также существуют три вида свободных поверхностей,

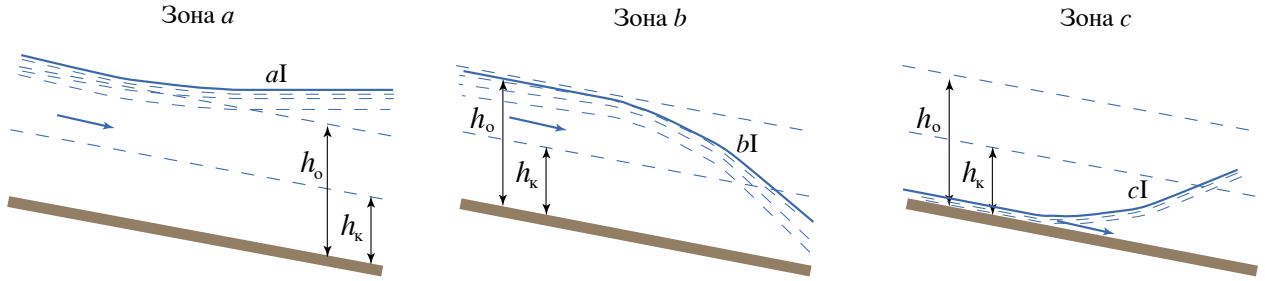


Рис. 4.4. Кривые свободных поверхностей при $i < i_к$

которые обозначают *a*II, *b*II и *c*II. Анализ уравнения (4.1), аналогичный рассмотренному, предлагается выполнить самостоятельно.

Кривые свободных поверхностей при $i = i_к$ (тип III) и при обратном уклоне $i < 0$ (тип IV) в практике инженерных расчетов встречаются относительно редко. При необходимости с ними можно познакомиться в учебной литературе [1, 2].

Задания для самостоятельной работы

Поток воды движется в канале прямоугольного сечения ($m = 0$) шириной $b = 3$ м с уклоном $i = 0{,}004$. Расход $Q = 40$ м³/с, коэффициент шероховатости $n = 0{,}012$, коэффициент неравномерности $\alpha = 1{,}1$.

1. Рассчитайте его нормальную и критическую глубину, критический уклон. Убедитесь, что заданный уклон больше критического.

2. Выполните по аналогии с рассмотренным примером численный анализ уравнения (4.1). Результат представьте в виде графика типа рис. 4.3.

3. По аналогии с рис. 4.4 нарисуйте схематично виды кривых свободных поверхностей в зонах *a*II ($h > h_к$), *b*II ($h_к < h < h_о$) и *c*II ($h < h_к$).

Вопросы для самоконтроля

1. Какое физическое явление называется гидравлическим прыжком? Когда оно возникает?

2. Какие глубины называются сопряженными?

3. Как можно определить длину прыжка?

4. Какие кривые свободной поверхности называются кривыми спада и подпора?

5. Какой вид имеют кривые свободной поверхности типов *a*II, *b*II и *c*II?

5. Решение уравнения неравномерного движения

При решении задач о течении воды в открытых руслах довольно часто возникает необходимость определения координат отдельных точек кривых свободных поверхностей. С математической точки зрения эта задача сводится к интегрированию дифференциального уравнения (4.1), т. е. к нахождению функции $h = f(l)$.

Для аналитического решения таких задач, применительно к рассматриваемому уравнению, еще в начале XX века, как в нашей стране, так и за рубежом были разработаны специальные методы. Все они ориентированы на выполнение ручных расчетов и предполагают использование специальных вспомогательных таблиц. В частности, методы Б. А. Бахметьева, Н. Н. Павловского и др. подробно описаны во многих учебниках и справочниках по гидравлике [2, 3 и др.], и здесь мы не будем на них останавливаться.

Естественно, что сейчас мы имеем возможность использовать для решения поставленной задачи с помощью компьютеров, и решать ее не аналитически, а численно.

Одним из широко используемых приложений для решения различных математических задач является MathCAD. Для решения дифференциальных уравнений в нем используется функция *rkfixed*.

MathCAD – весьма «тяжеловесное» приложение, требующее к тому же определенных навыков его использования. Далее на конкретном примере мы рассмотрим применение для решения поставленной задачи электронных таблиц (Excel или Calc из свободно распространяемого ПО OpenOffice).

Напомним, что результатом любого численного метода решения дифференциального уравнения является функция, представленная в виде таблицы. К настоящему времени разработано множество методов (алгоритмов) решения дифференциальных уравнений. Мы рассмотрим наиболее простой – метод Эйлера.

Идея метода состоит в следующем. Весь отрезок изменения аргумента функции $h = f(l)$ разбивается на некоторое количество отрезков длиной Δl. На каждом отрезке функция считается линейной. Если вспомнить, что геометрический смысл производной – тангенс угла наклона касательной к кривой $h = f(l)$, то можно записать (рис. 5.1)

$$h_{j+1} = h_j + \Delta l_j \left.\frac{dh}{dl}\right|_{h=h_j} \qquad (5.1)$$

Иными словами, для определения глубины на данном шаге расчета h_{j+1} требуется знать ее величину на предыдущем шаге h_j и значение производной, т. е. правой части уравнения (4.1), при $h = h_j$.

Основным недостатком метода Эйлера является то, что для достижения требуемой точности расчетов иногда приходится задавать малые значения шага изменения длины Δl, который в общем случае целесообразно изменять в ходе

расчета. Именно поэтому в (5.1) шаг имеет индекс j.

Поскольку вычисления будут выполняться в таблице, шаг мы сможем подобрать, задавшись необходимой точностью Δh:

$$\Delta l_j = \frac{\Delta h}{\left.\frac{dh}{dl}\right|_{h=h_j}} \quad . \tag{5.2}$$

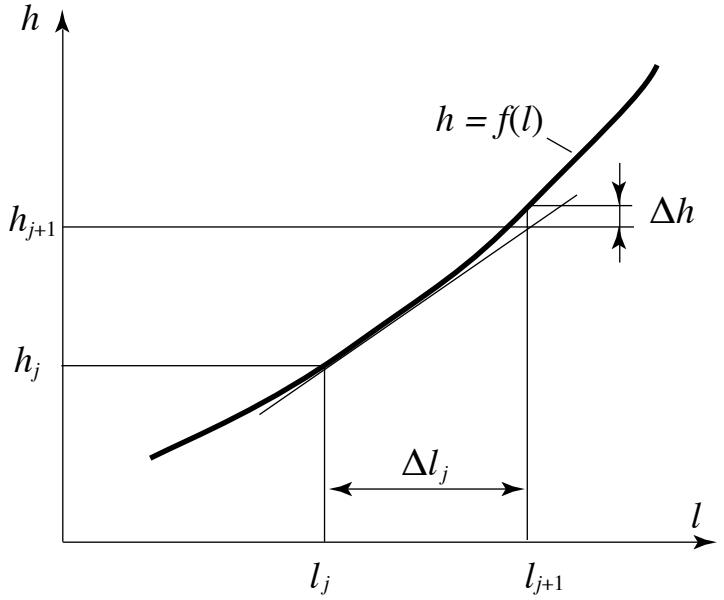


Рис. 5.1. Решение дифференциального уравнения методом Эйлера

Порядок расчета рассмотрим на конкретном примере.

Пример 5.1

Откройте таблицу, созданную при рассмотрении примера 5, и удалите все строки ниже строки 10 (рис. 5.2). Дополните таблицу двумя колонками. В ячейки колонки А будем вручную вводить значения длины потока, а в колонку Шаг поместим формулу (5.2). В ней необходимо указать абсолютную ссылку на ячейку с заданной точность вычислений (например, 0,05 м). Поскольку производная может быть отрицательной, то для удобства будем вычислять абсолютную величину Δl_j. Таким образом, содержимое ячейки K9

=ABS($J$6/J9)

Далее эти величины будем использовать в качестве ориентира.

При необходимости введите (откорректируйте) в ячейки C1:C6 указанные исходные данные. Предлагаем самостоятельно убедиться, что в данном случае заданный уклон больше критического, нормальная глубина 0,202 м, критическая глубина 1,08 м.

Зададим в качестве граничного условия (при $l = 0$) $h = 1{,}07$. Поскольку эта величина меньше критической, в результате расчета следует ожидать получение

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Расход, Q		40								
2	Ширина по дну, b		12								
3	Коэф-т откоса, m		0								
4	Уклон, i		0.32								
5	Коэф-т шерох., n		0.012								
6	Коэф-т α		1.1						Точность	0.05	
7											
8	*l*	*h*	*ω*	χ	*R*	*y*	*C*	Числитель	Знаменатель	*dh/dl*	Шаг
9	0	1.07	12.84	14.14	0.908	0.137	82.239	0.3184	-0.018	-17.6326	0.003
10	0.003	1.017102	12.20523	14.0342	0.870	0.137	81.752	0.3182	-0.185	-1.7169	0.029
11	0.033	0.965595	11.58714	13.93119	0.832	0.137	81.251	0.3178	-0.385	-0.8249	0.061
12	0.100	0.910325	10.9239	13.82065	0.790	0.137	80.681	0.3174	-0.653	-0.4859	0.103
13	0.200	0.861737	10.34085	13.72347	0.754	0.138	80.149	0.3169	-0.949	-0.3340	0.150
14	0.300	0.828341	9.940095	13.65668	0.728	0.138	79.765	0.3165	-1.194	-0.2650	0.189
15	0.400	0.80184	9.622081	13.60368	0.707	0.138	79.449	0.3161	-1.419	-0.2228	0.224
16	0.500	0.779564	9.354768	13.55913	0.690	0.138	79.175	0.3158	-1.633	-0.1934	0.258
17	0.600	0.760221	9.122654	13.52044	0.675	0.138	78.930	0.3154	-1.839	-0.1716	0.291
18	0.700	0.743065	8.916784	13.48613	0.661	0.138	78.707	0.3151	-2.040	-0.1545	0.324
19	0.800	0.727618	8.73142	13.45524	0.649	0.138	78.503	0.3148	-2.238	-0.1407	0.355
20	0.900	0.713551	8.562616	13.4271	0.638	0.138	78.312	0.3144	-2.433	-0.1292	0.387
21	1.000	0.700627	8.407525	13.40125	0.627	0.138	78.134	0.3141	-2.626	-0.1196	0.418

Рис. 5.2. Пример решения уравнения неравномерного движения методом Эйлера

кривой спада типа *b*II.

Продолжим заполнение таблицы. В ячейку А10 введем новую длину, равную вычисленному шагу 0,003.

В ячейке В10 рассчитаем новое значение глубины согласно (5.1):

=B9+(A10-A9)*J9

В ячейки С10:К10 скопируем формулы из предыдущей строки. Как видно, значение производной существенно уменьшилось, а шаг увеличился приблизительно в 10 раз. Таким образом, следующую длину (А11) можно взять равной 0,033.

В дальнейшем вычисленные значения шага можно округлять до одной значащей цифры. Остальные ячейки очередной строки просто копируются из предыдущей.

Самостоятельно продолжите расчеты до длины 5 м. Значение глубины на этой длине должно составить $h \approx 0{,}47$ м*.

Задание для самостоятельной работы

Выполните расчет кривой свободной поверхности при течении воды в русле при следующих исходных данных:

– расход $Q = 600$ м^3/с;
– ширина канала по дну $b = 50$ м;
– коэффициент заложения откосов $m = 0$;
– коэффициент шероховатости $n = 0{,}04$;
– уклон $i = 0{,}003$;
– коэффициент неравномерности α =1,1.

* Заметим, что расчет по методу Б. А. Бахметьева дает $h \approx 0{,}48$ м, т. е. расхождение не превышает заданной точности.

Начальное значение глубины потока при $l = 0$ составляет $h = 1{,}2$ м.

Какова глубина потока на расстоянии 15 м?

Вопросы для самоконтроля

1. К какому типу относится кривая свободной поверхности, полученная в результате выполнения задания?

2. Как рассчитать координату точки свободной поверхности при известных значениях глубины h и уклона i?

3. Как с помощью Excel (Calc OpenOffice) построить график изменения глубины потока?

6. Водосливы, истечение из-под щита

Водосливом называется преграда на пути открытого потока со свободной поверхностью, через которую переливается жидкость. Водослив делит поток на две части: верхний и нижний бьеф. Верхнюю грань стенки (т. *A*, на рис. 6.1) называют порогом или гребнем.

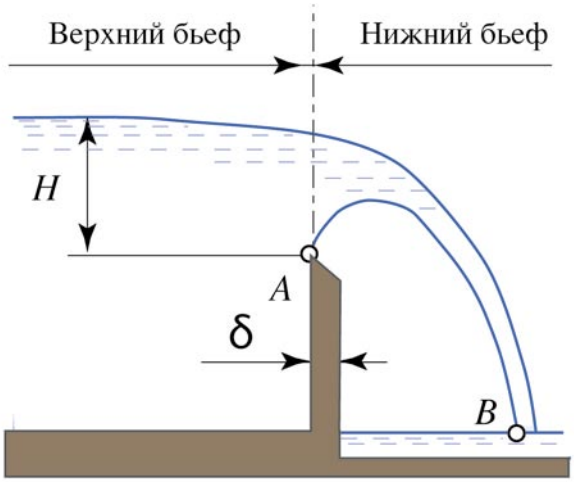


Рис. 6.1. Водослив с тонкой стенкой

Далее используется следующая терминология и обозначения:

H – геометрический напор на водосливе – превышение уровня воды над гребнем водослива, на том расстоянии, где нет заметного спада уровня;

V_o – скорость подхода воды к водосливу на том же расстоянии;

H_o – полный напор на водосливе:

$$H_o = H + \frac{\alpha V_o^2}{2g}; \qquad (6.1)$$

b – ширина водослива;

δ – толщина стенки.

Скорость V_o определяют по расходу Q:

$$V_o = \frac{Q}{bH}.$$

Среди нескольких принципов классификации водосливов наиболее важным критерием является соотношение δ и H. Различают:

– водосливы с тонкой стенкой, у которых

$$\delta \le 0{,}5H;$$

– водосливы с широким порогом (рис. 6.2) при

$$2H \le \delta \le 8H$$

(при $\delta > 8H$ принято рассматривать водослив как канале с горизонтальным дном);

– водосливы практического профиля, т. е. иные другие, отличающиеся от указанных выше.

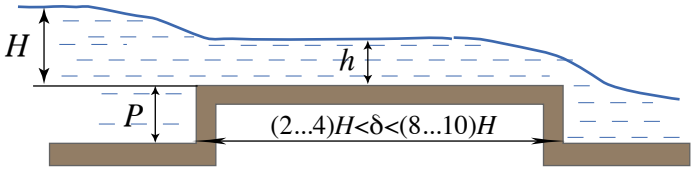


Рис. 6.2. Водослив с широким порогом

Основной расчетной формулой для определения расхода через водослив практического профиля является:

$$Q = \sigma_п m b \sqrt{2g} H_o^{3/2}, \qquad (6.2)$$

где m – коэффициент расхода водослива, для прямоугольного водослива обычно m = 0,4... 0,5 (табличная величина);

$\sigma_п$ – коэффициент затопления, учитывающий положение уровня воды в отводящем русле (экспериментальная величина); далее принимаем $\sigma_п$ = 1 (неподтопленный водослив).

Расход через прямоугольный водослив с широким порогом:

$$Q = \varphi b h \sqrt{2g\left(H_o - h\right)}, \qquad (6.3)$$

где h – уровень воды над порогом (см. рис. 6.2); φ – коэффициент скорости (экспериментальная величина).

При расчетах водосливов обычно имеют дело с решением задач трех типов:

– определение расхода Q при известных значениях напора H и ширины b;

– расчет напора H при заданных Q и b;

– определение ширины водослива b, обеспечивающей пропуск заданного расхода Q при известной величине напора H.

Особенности их решения рассмотрим на примере задачи третьего типа. В общем случае на гребне плотины могут быть запроектированы несколько водосливных отверстий, разделенных быками (рис. 6.3).

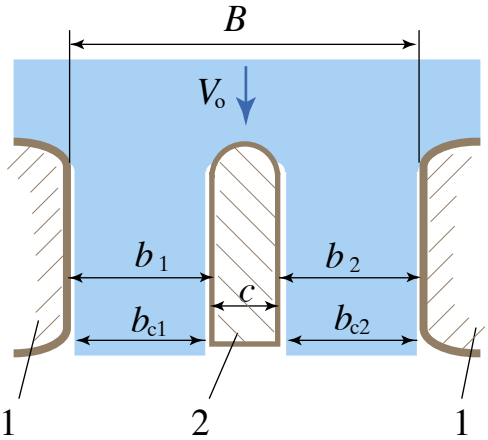


Рис. 6.3. Схема к расчету ширины отверстий водосброса (вид сверху):
1 – устои, 2 – промежуточная опора (бык)

В этом случае расход определяют по формуле:

$$Q = \varepsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \tag{6.4}$$

где B – ширина водосливного фронта, представляющая собой сумму длин b_i отдельных водосливных отверстий, количество которых равно n:

$$B = \sum_{i=1}^{n} b_i. \tag{6.5}$$

С помощью коэффициента сжатия ε учитывают тот факт, что действительная ширина водосливного фронта B_c несколько меньше B:

$$\varepsilon = \frac{B_c}{B}, \tag{6.6}$$

где:

$$B_c = \sum_{i=1}^{n} b_{ci}. \tag{6.7}$$

где b_{ci} – сжатая ширина отдельных струй.

Если отверстие одно, то

$$\varepsilon = 1 - 0,2\xi \frac{H_o}{b}, \tag{6.8}$$

где ξ – коэффициент, учитывающий форму вертикальных ребер устоев. При прямоугольном очертании устоев (в плане) $\xi = 0,7$, для скругленных – $\xi = 0,7$.

Для n отверстий одинакового размера:

$$\varepsilon = 1 - 0,2 \frac{\xi + (n-1)\xi_б}{n} \frac{H_o}{b}, \tag{6.9}$$

где $\xi_б$ - коэффициент, учитывающий форму быков в плане (рис. 6.4).

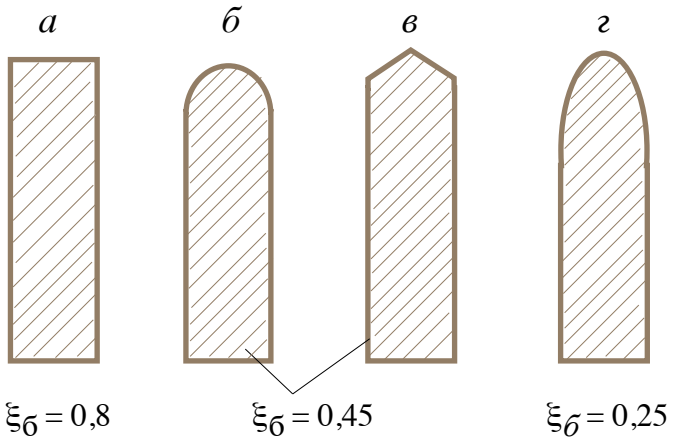


Рис. 6.4. Значения коэффициента $\xi_б$ для некоторых конфигураций быков:
а – прямоугольная; *б* – полуциркульная; *в* – треугольная;
г – плавнозаостренная

Пример 6.1

Определить ширину отверстия водосброса при Q = 115 м³/с, V_o= 0,3 м/с, H = 2,5 м, m = 0,49, α =1. Предполагается наличие одного отверстия. Устои имеют прямоугольное очертание.

Согласно (6.1) полный напор составляет H_o= 2,504 м. Примем в первом приближении ε = 1. Выразив ширину водосливного фронта B из формулы (6.4), получим B = 13,4 м.

Уточним значение коэффициента сжатия ε. Согласно (6.8) получим ε = 0,96. Уточненное значение ширины B =13,9 м.

С целью регулирования расхода воды отверстия водозаборных, водопропускных сооружений, водосбросов перекрывают затворами той или иной конструкции.

На рис. 6.5 показаны картины истечения из-под плоского вертикального затвора с острой кромкой. Как известно из курса гидравлики, при истечении жидкостей через отверстия возникает уменьшение поперечного сечения потока, т. е. его сжатие. На некотором расстоянии от затвора величина поперечного сечения достигает минимального значения. Это сечение называется *сжатым*.

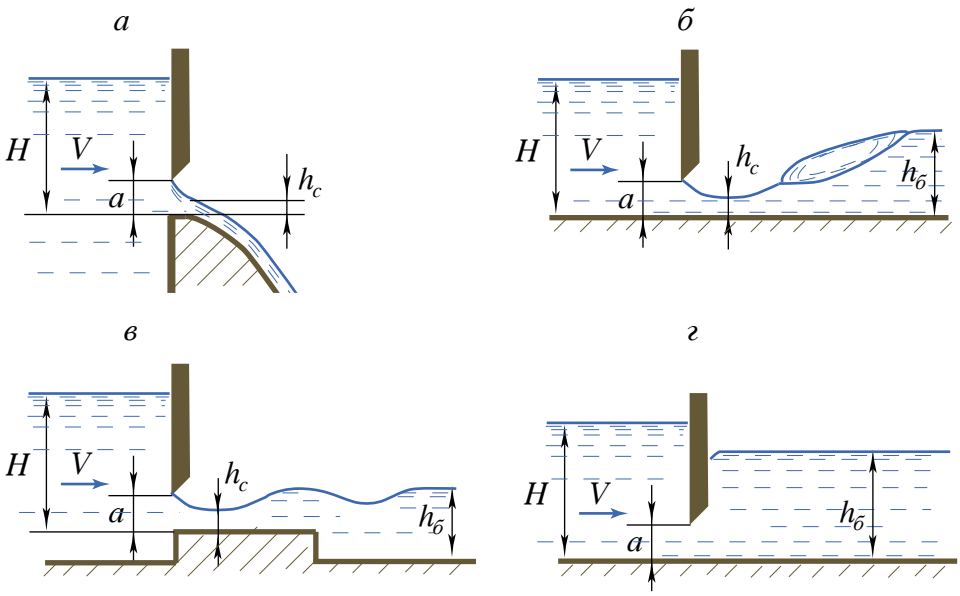


Рис. 6.5. Истечение из-под затворов:
а – на гребне водослива криволинейного очертания; *б* – свободное истечение; *в* – в начале водослива с широким порогом; *г* – под уровень

Сжатие в горизонтальном направлении обычно мало, поэтому при практических расчетах учитывают только вертикальное сжатие, которое характеризуется коэффициентом сжатия:

$$\varepsilon = \frac{h_c}{a}, \qquad (6.10)$$

где a – высота поднятия щита, h_c – глубина потока в сжатом сечении.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что

основным фактором, влияющим на величину ε, является отношение a/H. Эта зависимость представлена в табл. 6.1

Таблица 6.1

Зависимость коэффициента сжатия ε от относительной глубины a/H

a/H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
ε	0,615	0,62	0,625	0,633	0,643	0,66	0,69

Расход из-под щита при свободном истечении рассчитывают по формуле:

$$Q = \mu ab\sqrt{2g(H_0 - \varepsilon a)} \qquad (6.11)$$

где $\mu = \varepsilon\varphi$ – коэффициент расхода, φ – коэффициент скорости.

Обычно φ = 0,95 – 0,97; при истечении через затвор, установленный над широким порогом, φ = 0,85 – 0,95.

При расчетах истечения чаще всего приходится решать такие задачи:

– определение расхода при известных значениях напора и размеров отверстия;

– определение высоты поднятия затвора, необходимого для пропуска заданного расхода Q, при известных H и b.

Эти задачи можно решить с помощью инструмента электронных таблиц *Подбор параметра*.

При этом может возникнуть необходимость определения коэффициента сжатия по табл. 6.1. Для автоматизации этой процедуры табличную зависимость целесообразно представить в виде формулы.

Пример 6.2

Необходимо подобрать формулу $\varepsilon = f(a/H)$, которая наилучшим образом описывает зависимость, представленную в виде табл. 6.1.

Введем данные в электронную таблицу (например, Excel) и построим точечный график (рис. 6.6).

После щечка правой кнопкой мыши по любой точке графика откроем контекстное меню, в котором выберем пункт *Добавить линию тренда*.

В окне *Формат линии тренда* (рис. 6.7) необходимо отметить пункты *Показывать уравнение на диаграмме* и *Поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации* (R^2)*.

Далее следует просто подобрать параметры линии тренда, при которых R^2 будет максимальным. Результат этих действий показан на рис. 6.8.

Используем полученную формулу для решения конкретной задачи.

* В математической статистике эта величина называется коэффициентом детерминации

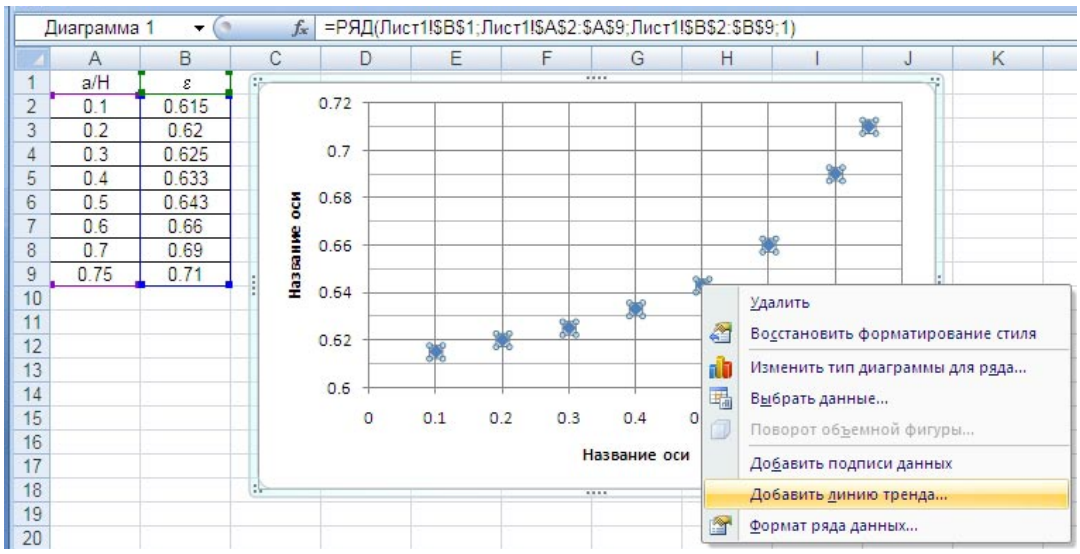


Рис. 6.6. Исходные данные для построения линии тренда

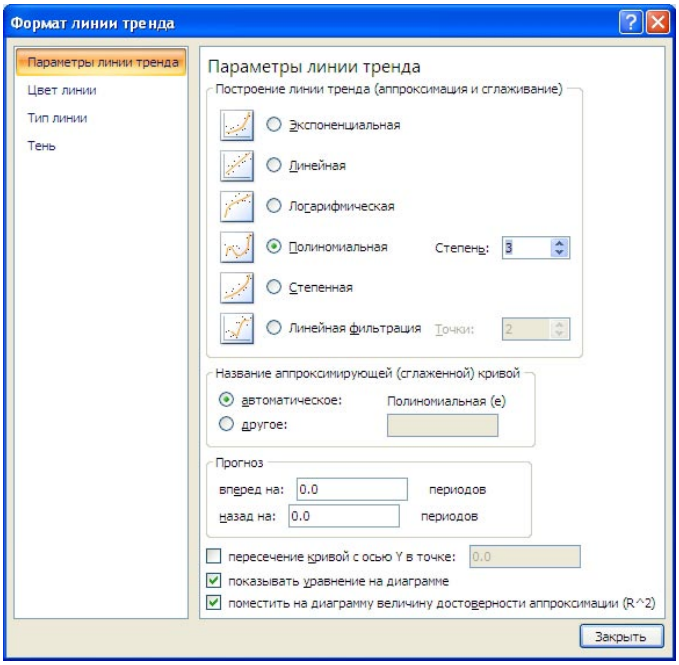


Рис. 6.7. Окно *Формат линии тренда*

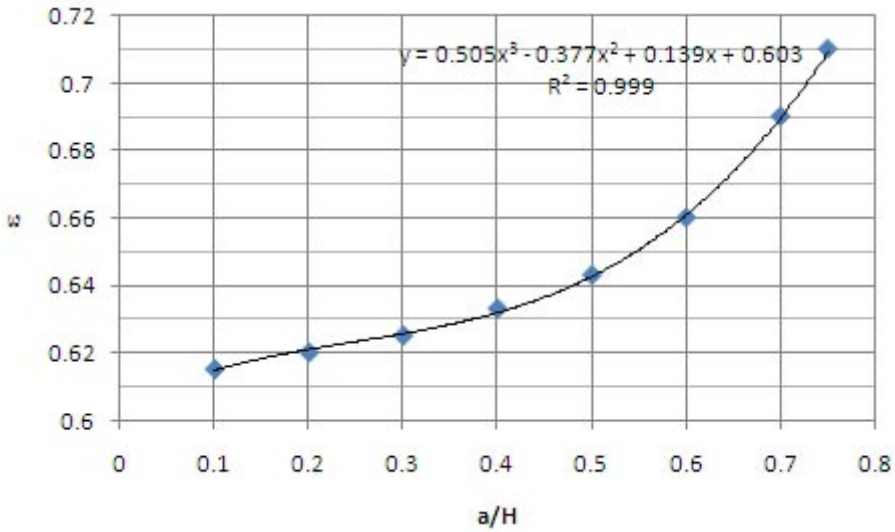


Рис. 6.8. Линия тренда и ее уравнение

Пример 6.3

Необходимо определить расход при стечении воды из-под затвора при напоре $H = 5$ м, размерах отверстия $a \times b = 0{,}5 \times 2$ м и коэффициенте скорости $\varphi = 0{,}96$.

Решение в виде листа Excel показано на рис. 6.9. В ячейках третьей колонки размещены исходные данные. В строке 20 введено ориентировочное значение расхода. Именно это значение будет изменяемым при подборе параметра.

В коэффициент сжатия ε рассчитывается по формуле с рис. 6.8. Здесь необходимо сделать важное замечание. При использовании любых аппроксимирующих зависимостей значение аргумента не должно выходить за те его пределы, которые использовались при построении линии тренда.

13	**Истечение из-под затвора**			
14				
15	Ширина отверстия	*b*	2	
16	Высота отверстия	*a*	0.5	
17	Напор	*H*	5	
18	Коэф. скорости	*φ*	0.96	
19				
20	Расход	Q	5.66	Изменяемая
21	Коэф. сжатия	*ε*	0.61	
22	Коэф. расхода	*μ*	0.59	
23	Скорость	*V_o*	0.57	
24	Полный напор	*H_o*	5.02	
25	Целевая функция		-2E-05	

Рис. 6.9. Определение расхода из-под затвора

Полный напор определяем согласно (6.1). Целевая функция в C25 сформирована из формулы (6.11) так, чтобы при найденном расходе ее значение было нулевым.

В результате решения получим $Q = 5{,}66$ м^3/с.

При несвободном истечении (см. рис. 6.5, *г*) с достаточной для большинства практических расчетов точностью расход можно рассчитывать по формуле:

$$Q = \varphi_б h_б b \sqrt{2g(H_0 - h_б)}, \qquad (6.12)$$

где $\varphi_б$ – коэффициент скорости, определяемый по экспериментальным данным (табл. 6.2); $h_б$ – глубина потока в отводящем русле, которую часто называют бытовой глубиной.

Таблица 6.2

Зависимость коэффициента скорости $\varphi_б$ от относительной высоты поднятия затвора $a/h_б$ при несвободном истечении

$a/h_б$	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\varphi_б$	0,04	0,07	0,15	0,19	0,26	0,32	0,45	0,60	0,75	0,85	0,95	1,0

Задания для самостоятельной работы

1. Для условий примера 6.1 определите ширину отверстий водосброса при наличии одной полуциркульной промежуточной опоры (см. рис. 6.4, *б*).

2. Определить высоту поднятия плоского вертикального затвора, закрывающего прямоугольное отверстие в плотине шириной 2 м при напоре $H = 5$ м, при котором будет обеспечен расход $Q = 10$ м^3/с.

3. Определите расход при истечении из-под плоского вертикального затвора при истечении под уровень. Напор $H = 3{,}5$ м; высота поднятия затвора $a = 0{,}9$ м; ширина отверстия $b = 7$ м; бытовая глубина в отводящем русле $h_б = 2{,}8$ м.

Для определения коэффициента скорости $\varphi_б$ используйте данные из табл. 6.2, подобрав наилучшую линию тренда.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое сооружение называется водосливом?
2. Что называют гребнем водослива?
3. Как определить полный напор на водосливе?
4. Как форма промежуточных опор (быков) влияет на течение воды?
5. Какие типы задач встречаются при расчетах водосливов?

7. Сопряжение бьефов

Одной из важных с практической точки зрения задач, которую необходимо решать проектировщику, является задача о сопряжении бьефов.

Под сопряжением бьефов понимают слияние потока жидкости, переливающегося, например, через быстроток, с потоком в отводящем русле (нижнем бьефе).

Как правило, уклон отводящего русла меньше критического. В этом случае возможны три вида сопряжения.

Первый вид – сопряжение в виде отогнанного гидравлического прыжка (рис. 7.1). В этом случае на длине потока l (длина отгона) уровень воды возрастает (кривая подпора) от некоторого значения глубины сжатого сечения h_c до первой сопряженной глубины прыжка h_1.

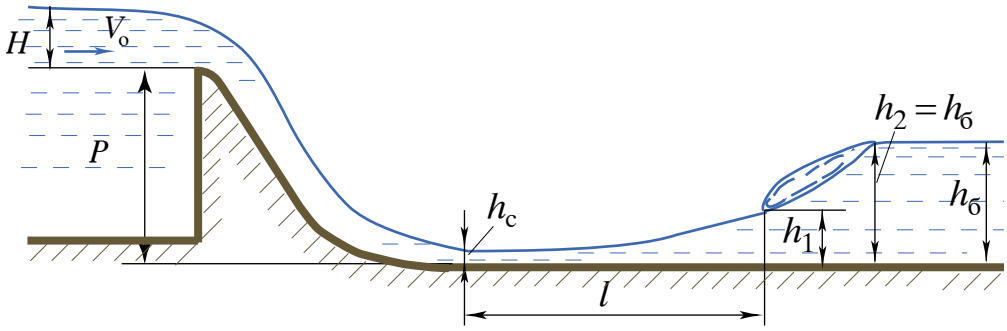


Рис 7.1. Сопряжение в виде отогнанного прыжка

Второй вид сопряжения – сопряжение с надвинутым прыжком (рис. 7.2) наблюдается в случае формирования прыжка в непосредственной близости от конца быстротока (длина отгона $l = 0$).

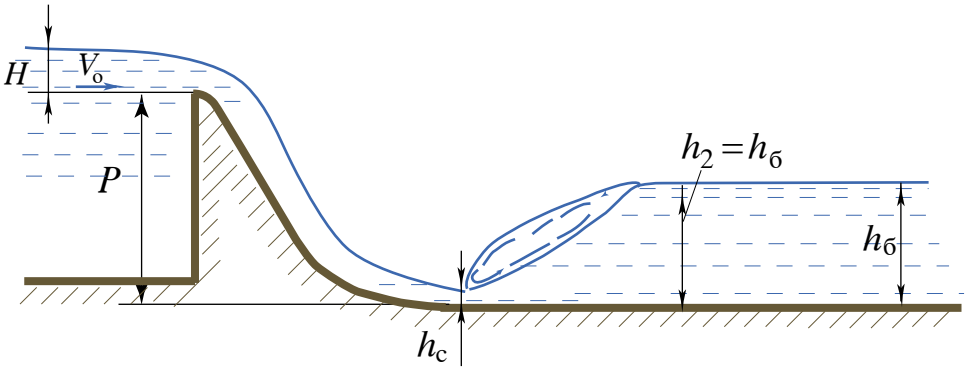


Рис 7.2. Сопряжение с надвинутым прыжком

Третий вид – сопряжение с затопленным гидравлическим прыжком (рис. 7.3).

При расчете сопряжения бьефов необходимо, прежде всего, определить вид сопряжения на основании имеющихся исходных данных: расхода, высоты плотины, глубины потока в нижнем бьефе $h_б$. Последовательность расчетов должна быть такой.

1. Сначала нужно рассчитать глубину потока в сжатом сечении h_c.

2. Далее рассчитывается сопряженная с ней глубина гидравлического прыжка h_1. Поскольку этот прыжок может на самом деле и не существовать, что соответствует

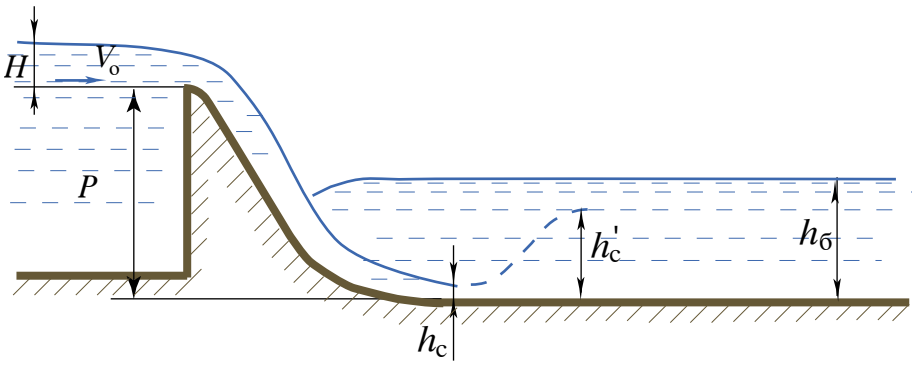


Рис. 7.3. Сопряжение с затопленным прыжком

третьему виду сопряжения, его называют фиктивным.

3. Полученное значение сравнивается с глубиной $h_б$:

– если $h_б < h_1$, то нижний бьеф не затапливает прыжок, и имеет место первый тип сопряжения;

– если $h_б = h_1$, фиктивный прыжок превращается в реальный – сопряжение второго типа;

- если $h_б > h_1$, нижний бьеф затапливает прыжок – третий тип сопряжения.

Пример 7.1

Необходимо определить тип сопряжения бьефов при следующих исходных данных: высота плотины относительно нижнего бьефа $P = 7$ м, расход воды $q = 8$ м^3/с в расчете на один погонный метр гребня водослива; уровень воды в нижнем бьефе $h_б = 3{,}6$ м. Коэффициент расхода $m = 0{,}49$.

Из уравнения расхода водослива (6.2) определим полный напор на водосливе $H_о$. При $b = 1$ и $\sigma_п = 1$ получим.

$$H_0 = \left(\frac{q}{m\sqrt{2g}}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{0{,}49\sqrt{2\cdot 9{,}8}}\right)^{2/3} = 2{,}39$$

Для определения глубины $h_с$ воспользуемся формулой [1]:

$$q = h_с \varphi \sqrt{2g\left(P + H_о - h_с\right)} \qquad (7.1)$$

Проще всего это сделать с помощью инструмента *Подбор параметра* (рис. 7.4).

Следующий шаг – определения сопряженной глубины h_1 (см. рис. 7.1). Для этого используем формулу (4.2), полагая в ней $\alpha = 1$, $b = 1$, $Q = q$ и $h_1 = h_с$. Этот расчет не требует пояснений. После его выполнения получим $h_1 = 4{,}05$ м.

Таким образом, поскольку $h_б < h_1$, сопряжение в нижнем бьефе будет происходить с отогнанным прыжком.

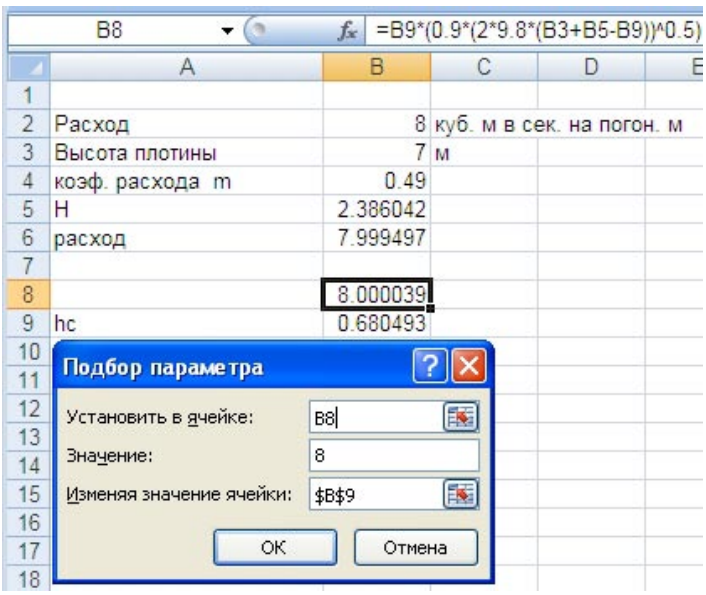


Рис. 7.4. Определение глубины сжатого сечения h_c

Задание для самостоятельной работы

Определите тип сопряжения бьефов при следующих исходных данных: высота плотины относительно нижнего бьефа P = 6 м, расход воды Q =65 м^3/с, уровень воды в нижнем бьефе $h_б$ = 2,5 м. Нижний бьеф призматический, прямоугольного сечения шириной 12 м. Коэффициент затопления $\sigma_п$ = 1, коэффициент расхода m = 0,5.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимают под сопряжением бьефов?
2. Каковы типы сопряжения бьефов?
3. По каким параметрам определяют тип сопряжения?
4. Как рассчитывают расход через водослив практического профиля?
5. Какую глубину называют сжатой?

8. Гашение кинетической энергии потока в нижнем бьефе

Поток, образующийся после плотины или в конце быстротока, обладает относительно высокой кинетической энергией и может разрушать русло в нижнем бьефе. Таким образом, необходимо предпринимать меры для гашения энергии потока.

Наименьшей кинетической энергией обладает поток с сопряжением третьего типа (затопленный прыжок). Если же в результате расчета сопряжения получается отогнанный или надвинутый прыжок, то необходимо каким-либо образом превратить его в затопленный.

Одним из способов решения этой задачи состоит в том, чтобы преобразовать кинетическую энергию потока в потенциальную за счет увеличения глубины в нижнем бьефе до уровня – бытовой глубины $h_б$.

На практике это достигается путем искусственного увеличения глубины потока в нижнем бьефе путем понижения уровня дна канала непосредственно около сооружения, т. е. создания водобойного колодца (рис. 8.1).

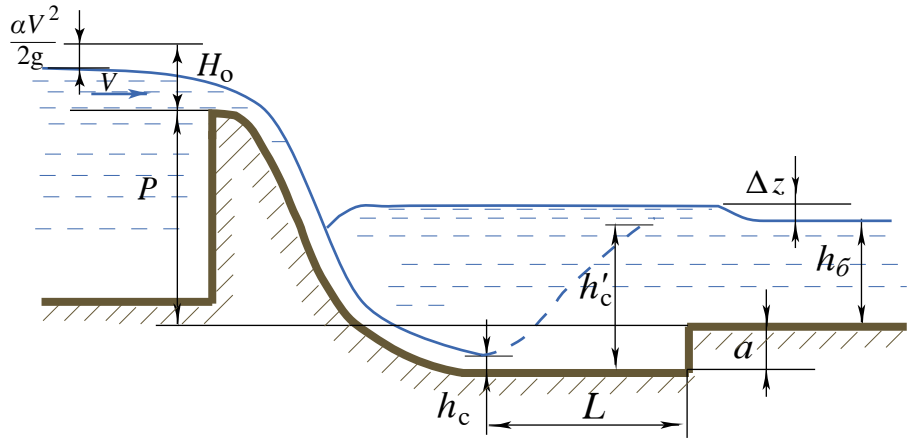


Рис. 8.1. Водобойный колодец

Гидравлический расчет водобойного колодца заключается в определении его глубины a и длины L.

Основная задача проектирования колодца состоит в том, чтобы понижая уровень его дна (путем увеличения a), добиться возникновения затопленного прыжка. Если пренебречь величиной Δz, то глубина, при которой получится затопленный прыжок, должна удовлетворять условию:

$$a + h_б > h'_c, \qquad (8.1)$$

где h'_c – глубина прыжка, сопряженная с глубиной в сжатом сечении h_c.

Последовательность расчета глубины колодца рассмотрим на конкретном примере.

Пример 8.1

Необходимо определить глубину водобойного колодца при следующих исходных данных (см. рис. 8.1): высота плотины относительно нижнего бьефа

P =7,4 м, удельный расход воды q = 8 м^3/с в расчете на один погонный метр гребня водослива; уровень воды в нижнем бьефе $h_б$ = 3,5 м; коэффициент расхода водослива m = 0,4; коэффициент скорости φ = 0,95.

Из формулы для вычисления расхода через водослив (6.2) при $\sigma_п$ = 1 и b =1 следует, что полный напор:

$$H_о = \left(\frac{q}{m\sqrt{2g}}\right)^{2/3} = \left(\frac{8}{0,4\sqrt{2\cdot 9,8}}\right)^{2/3} = 2,73 \text{ м.}$$

С учетом запаса 10% согласно (8.1) можем записать, что

$$a = 1,1(h'_c - h_б). \qquad (8.2)$$

Глубины $h_б$ и h'_c рассматриваем как сопряженные. Тогда:

$$h_б = \frac{h'_c}{2}\left(\sqrt{1+\frac{8q^2}{gh'^3_c}} - 1\right). \qquad (8.3)$$

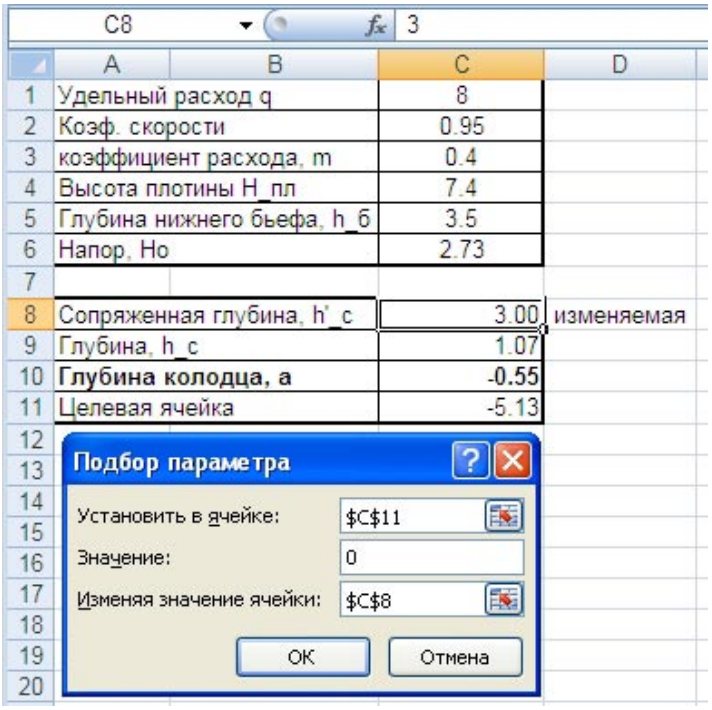
Глубину в сжатом сечении найдем из формулы (7.1), введя в нее величину a. Поскольку далее будет использоваться инструмент электронных таблиц *Подбор параметра*, перенесем все слагаемые в левую часть:

$$q - h_c\varphi\sqrt{2g\left(P + H_о - h_c\right)} = 0. \qquad (8.4)$$

Заполним таблицу Excel (рис. 8.2).

В ячейки С1:С6 введены исходные данные. В ячейку С8 введем произвольное начальное значение глубины h'_c (изменяемая величина) В ячейке С9 размещена

а



б

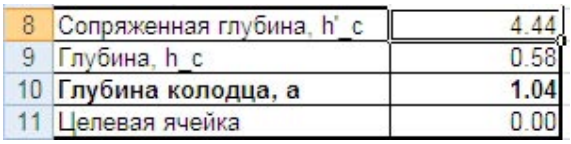


Рис. 2.15. Расчет глубины колодца в среде Excel:
а – исходная таблица; *б* – результат решения

формула (8.3) для расчета глубины $h_б$; в ячейке C10 – формула (8.2). Целевой ячейкой является C11, где размещена левая часть формулы (8.4). Необходимо подобрать значение C8, при котором в C11 будет получен ноль.

В результате подбора значения C8 получим глубину колодца a = 1,04 м.

Вторым конструктивным параметром водобойного колодца является его длина L. Довольно часто эту длину принимают несколько меньше длины гидравлического прыжка, которая может быть рассчитана по формуле Павловского:

$$L = (0,7...0,8)(1,9h'_c - h_c). \qquad (8.5)$$

Для рассмотренного примера $L \approx 6$ м.

Другим способом уменьшения кинетической энергии потока в нижнем бьефе является его удар об искусственную преграду – водобойную стенку (рис. 8.3).

Задачей расчета является определение теоретического значения высоты стенки $a_о$ (см. рис. 8.3). При этом стенка рассматривается как подтопленный водослив.

Заданными параметрами являются: расход Q, высота P, ширина стенки b.

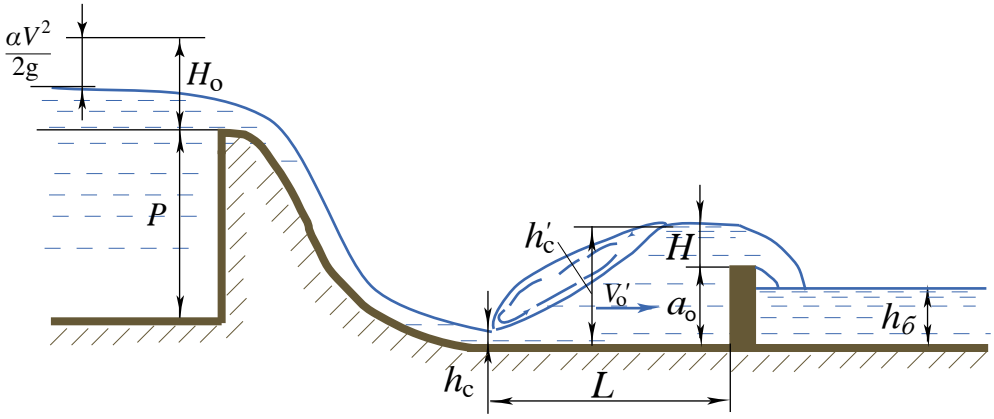


Рис. 8.3. Водобойная стенка

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. Сначала, как и в случае расчета колодца определим полный напор $H_о$ из формулы (6.2). Для расчета и сжатую глубину $h_с$ используем формулу (8.4), в которой a = 0.

2. Далее необходимо установить характер сопряжения в нижнем бьефе, для чего находим критическую глубину $h_к$. Если канал имеет прямоугольную форму, то используем формулу (3.4). Водобойную стенку следует устанавливать, если $h_с < h_к$ (бурный поток в нижнем бьефе).

3. Из уравнения гидравлического прыжка находим глубину h'_c как сопряженную с глубиной $h_с$.

4. Скорость потока перед стенкой определяем по заданным значениям расхода и ширины стенки:

$$V'_o = \frac{Q}{bh'_c}.$$

5. Находим полный напор:

$$H'_{\text{о}} = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

6. Определяем геометрический напор на стенке

$$H' = H'_{\text{о}} - \frac{\left(V'_{\text{о}}\right)^2}{2g}.$$

7. Находим теоретическую высоту водобойной стенки:

$$a_{\text{о}} = h'_{\text{с}} - H'.$$

На практике эту высоту увеличивают на 5 – 10 % процентов.

Расстояние, на котором устанавливается стенка, определяется, как и в случае водобойного колодца по формуле (8.5).

Самостоятельная работа

Определите высоту водобойной стенки при следующих исходных данных: высота плотины относительно нижнего бьефа $P = 7{,}4$ м, удельный расход воды $q = 8$ м^3/с в расчете на один погонный метр гребня водослива; уровень воды в нижнем бьефе $h_{\text{б}} = 3{,}5$ м. Коэффициент расхода водослива $m = 0{,}4$, коэффициент скорости $\varphi = 0{,}95$.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие сооружения используют для гашения кинетической энергии потока в нижнем бьефе?
2. В чём заключается гидравлический расчет водобойного колодца? Какова последовательность этого расчета?
3. Как определяется длина водобойного колодца?
4. В чём заключается гидравлический расчет водобойной стенки? Какова последовательность этого расчета?

9. Расчет быстротоков и перепадов

Передача воды с высоких отметок на низкие осуществляется с помощью специальных сопрягающих сооружений – быстротоков и перепадов.

Быстроток – это канал с уклоном больше критического (рис. 9.1).

Гидравлический расчет быстротока включает два этапа. На первом этапе необходимо определить параметры потока в конце быстротока. Эта задача решается путем построения кривой свободной поверхности тем или иным способом. Эта кривая относится к типу b_{II}. Такой расчет рассмотрен в примере 4.1.

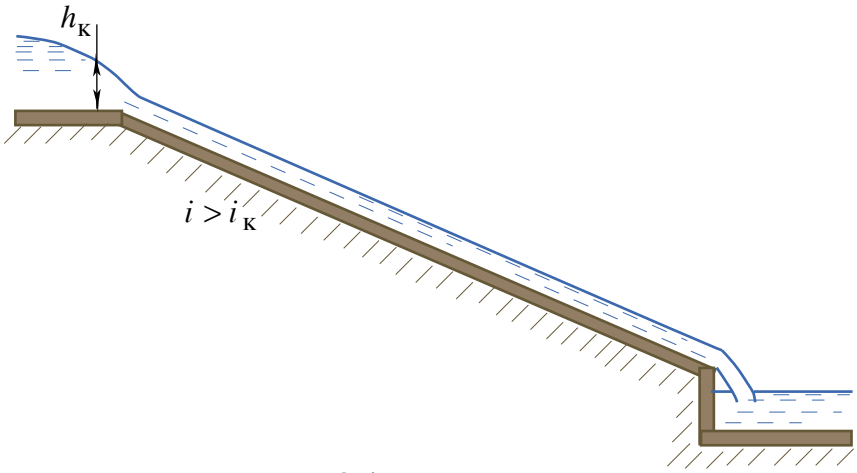


Рис. 9.1. Быстроток

На втором этапе нужно решить задачу о сопряжении с нижним бьефом. При наличии отогнанного или надвинутого гидравлического прыжка необходимо рассчитать водобойный колодец.

Перепад представляет собой одну или несколько укрепленных ступеней, по которым стекает вода. Количество таких ступеней может быть любым и зависит от рельефа местности и высоты. Перепады могут иметь колодцы, образованные водобойными стенками или уступами.

На рис. 9.2 показан одноступенчатый перепад. В его конструкции выделяют вход, стенку падения, водобой и выход.

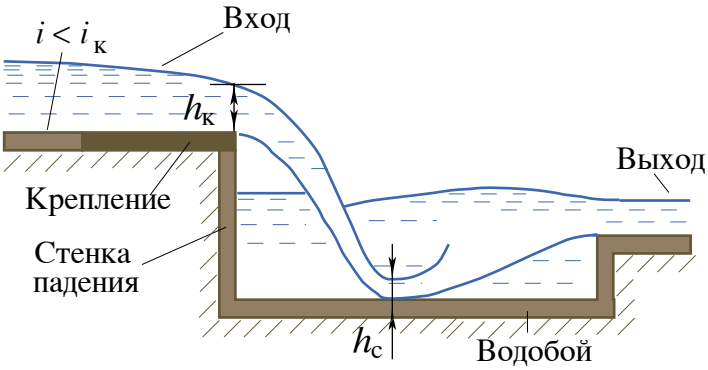


Рис. 9.2. Одноступенчатый перепад

Обычно уклон дна верхнего бьефа меньше критического ($i < i_к$), поэтому в конце канала поверхность потока имеет вид b_I (кривая стада), его глубина $h_к$ близка

к критической. Поскольку скорость потока при этом возрастает, вход перепада всегда укрепляют. Расчет одноступенчатого перепада выполняется по аналогии с водобойным колодцем.

Многоступенчатый перепад состоит из нескольких одинаковых ступеней . Такие перепады обычно сооружаются при уклонах местности $i > 0{,}25$ по трассе водосброса.

Рассмотрим методику расчета многоступенчатого колодезного перепада (рис. 9.3). Количество его ступеней зависит от разности уровней верхней и нижней отметки и высоты ступеней Z. Высота ступеней P обычно одинаковая (приблизительно 2–4 м) при длине L до 20 м.

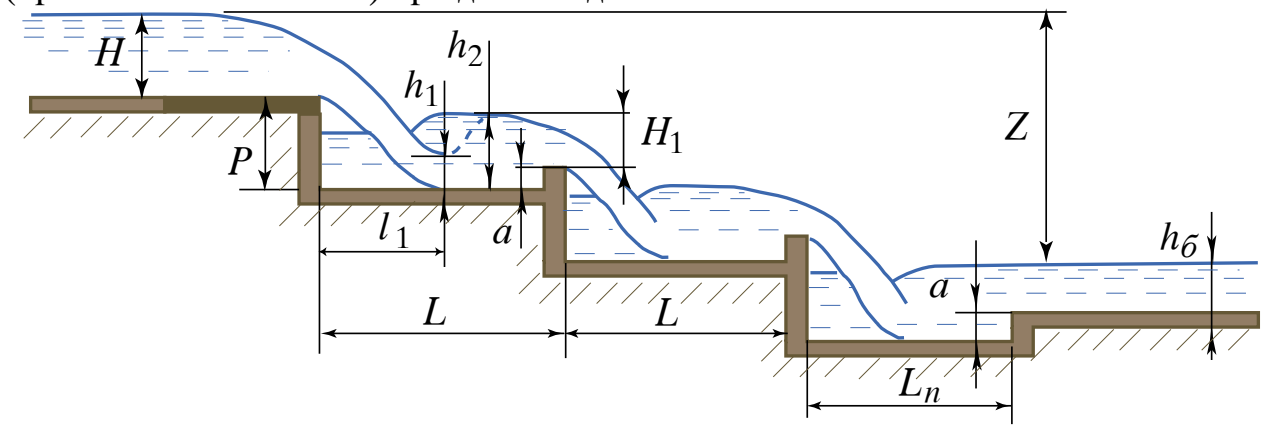


Рис. 9.3. Многоступенчатый колодезный перепад

Высоту водобойной стенки a принимают (с последующим уточнением):

$$a \approx \frac{P}{3}. \tag{9.1}$$

Таким образом, количество ступеней:

$$n = \frac{Z}{P - a}. \tag{9.2}$$

Расчеты выполняются для первой, второй и последней ступеней. Размеры всех остальных ступеней принимаются такими же, как и размеры второй ступени.

Другими исходными данными являются: расход Q, ширина ступени перепада b, скорость потока на подходе к перепаду V_o.

Расчет начинают с первой ступени. Входную часть перепада при этом рассматривают как водослив с широким порогом. Из формулы:

$$q = h_c \varphi \sqrt{2g\left(P + H_o - h_c\right)} \tag{9.3}$$

определяется глубина в сжатом сечении ступени h_1. При этом коэффициент скорости φ принимается по справочным данным в зависимости от высоты и конструктивных особенностей ступени.

Далее нужно рассчитать сопряженную глубину h_2:

$$h_2 = \frac{h_1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{8\alpha Q^2}{g b^2 h_1^3}} - 1\right). \tag{9.4}$$

Эта глубина позволяет оценить скорость потока при подходе к стенке:

$$V_о = \frac{Q}{bh_2}. \qquad (9.5)$$

Поскольку ширина порога относительно мала, для определения H_1 воспользуемся формулой для расчета расхода через водослив с тонкой стенкой. Из нее следует:

$$H_1 = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}}\right)^{2/3} - \frac{\alpha V_о^2}{2g}, \qquad (9.6)$$

где $m = 0{,}4 - 0{,}5$; $\alpha \approx 1$.

Таким образом, высота водобойной стенки:

$$a = h_2 - H_1. \qquad (9.7)$$

Длина ступени перепада (водобойного колодца) складывается из дальности полета струи l_1 и длины прыжка $l_п$:

$$L = l_1 + 0{,}8 \times l_п, \qquad (9.8)$$

где $l_п$ – длина прыжка, l_1 – дальность отлета струи:

$$l_1 = \frac{Q}{bh_к}\sqrt{\frac{2P + h_к}{g}}. \qquad (9.9)$$

Эта формула получена из уравнения движения материальной точки под действием силы тяжести. При этом принято во внимание, что глубина потока в начале струи близка к критической $h_к$.

Расчет многоступенчатого безколодезного перепада (рис. 9.4) состоит лишь в определении длин его ступеней, которые считают одинаковыми.

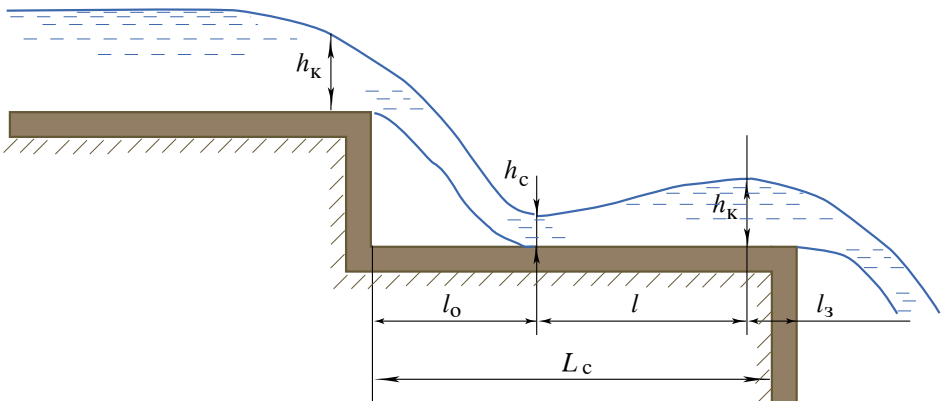


Рис. 9.4. Безколодезный перепад

Длина ступени $L_с$ должна быть такой, чтобы в ее конце поток имел критическую глубину. Тогда

$$L = l_о + l + l_з, \qquad (9.10)$$

где $l_о$ – дальность отлета струи, l – длина, на которой происходит сопряжение глубины $h_с$ с критической глубиной $h_к$; $l_з \approx 2h_к$ – запас.

Пример 9.1

Необходимо выполнить расчет двух первых ступеней многоступенчатого колодезного перепада (см. рис. 9.3) при следующих исходных данных:

расход $Q =$ 40 м^3/с,

ширина потока $b = 12$ м,

разность уровней $Z = 15$ м.

При расчетах примем коэффициент скорости в формуле (9.3) $\varphi = 0{,}8$; коэффициент расхода в формуле (9.6) $m = 0{,}45$; коэффициент кинетической энергии $\alpha = 1$.

Примем высоту ступеней перепада $P = 3$ м. В этом случае ориентировочная высота водобойных стенок согласно (9.1) $a = 1$ м.

Таким образом, количество ступеней (9.2):

$$n = \frac{Z}{P-a} = \frac{15}{3-1} \approx 7.$$

Будем считать, что глубина потока на подходе к первой ступени перепада близка к критической, которая для прямоугольного канала определяется по формуле (3.4):

$$h_к = \left(\frac{\alpha Q^2}{gb^3}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{40^2}{9{,}8 \cdot 12^3}\right)^{\frac{1}{3}} = 0{,}46 \text{ м}.$$

Скорость потока на подходе к первой ступени

$$V_о = \frac{Q}{bh_к} = \frac{40}{12 \cdot 0{,}46} = 7{,}3 \text{ м/с}.$$

Таким образом, его полный напор:

$$H_0 = h_к + \frac{\alpha V_о^2}{2g} = 0{,}46 + \frac{7{,}3^2}{2 \cdot 9{,}8} = 3{,}2 \text{ м}.$$

Дальнейшие расчеты выполним с использованием Excel (рис. 9.5).

В ячейки C2:C7 введем исходные данные. При использовании этих параметров в формулах на них следует давать *абсолютные ссылки*.

Перейдем к расчету 1-й ступени. Введем в ячейки C9:C11 найденные значения глубины, скорости и полного напора.

Следующий шаг расчета – определение глубины h_1 (см. рис. 9.3) из формулы (9.3). Как и ранее, для этого будем использовать инструмент Excel *Подбор параметра*. Для этого в ячейку C12 введем произвольное начальное значение глубины (например, 0,3), а ячейку C13 – формулу (9.3) для определения расхода Q. Данная ячейка является целевой при подборе глубины. Ее значение должно быть равно заданному расходу $Q = 40$ м^3/с. В результате расчета получим $h_1 = 0{,}39$ м.

Расчет сопряженной глубины h_2 выполняем в ячейке C14 по формуле (9.4). В ячейку C15 вводим формулу для расчета скорости $V_о$ согласно (9.5).

Геометрический напор H_1 около 2-й ступени рассчитываем по формуле (9.6) в ячейке C16, а высоту ступени по формуле (9.7) – в ячейке C17. В результате получаем a = 0,9 м, что близко к первоначально принятому значению 1 м, т. е. изменять количество ступеней нет необходимости.

	A	B	C	D
2	Расход	Q, м3/с	40	
3	Ширина потока	b, м	12	
4	Коэффициент скорости	φ	0.8	
5	Коэффициент расхода	m	0.45	
6	Разность уровней	Z, м	15	
7	Высота ступени	P, м	3	
8			1-я ст.	2-я ст.
9	Глубина	hк, м	0.46	1.3
10	Скорость	Vo, м/с	7.2	2.6
11	Полный напор	Ho, м	3.1	1.6
12	**Глубина**	h1, м	0.30	0.46
13	Целевая функция (9.3)	Q	30.8	40.0
14	Сопряженная глубина	h2, м	2.6	2.0
15	Скорость у стенки	Vo, м/с	1.3	1.7
16	Напор	H1, м	1.3	1.3
17	Высота ступени	a, м	1.3	0.7
18	Дальность отлета	l1, м	5.9	0.9
19	Длина прыжка	lп, м	11.6	8.4
20	Длина ступени	L, м	15.2	7.6

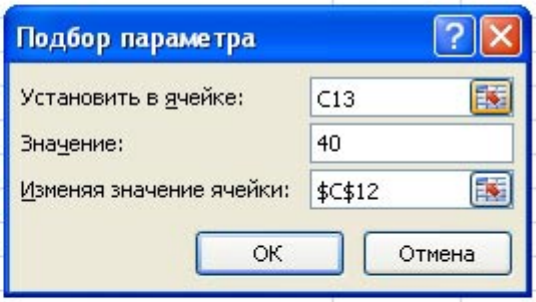


Рис. 9.5. Расчет первой ступени перепада в среде Excel

В ячейках C18:C20 рассчитываем дальность отлета l_1 (9.9) , длину гидравлического прыжка $l_п$ (4.3) и общую длину ступени (9.8), которая составит L = 13,5 м.

Для расчета 2-й ступени скопируем ячейки C9:C20 в соседнюю колонку D (рис. 9.6). В качестве глубины в ячейку D9 нужно ввести значение H_1 из ячейки C16. Далее выполняем подбор параметра в ячейке D12 для получения значения целевой функции D13, равного заданному расходу 40 м^3/с.

8			1-я ст.	2-я ст.
9	Глубина	hк, м	0.46	1.3
10	Скорость	Vo, м/с	7.2	2.6
11	Полный напор	Ho, м	3.1	1.6
12	**Глубина**	h1, м	0.39	0.46
13	Целевая функция (9.3)	Q	40.0	40.0
14	Сопряженная глубина	h2, м	2.2	2.0
15	Скорость у стенки	Vo, м/с	1.5	1.7
16	Напор	H1, м	1.3	1.3
17	Высота ступени	a, м	0.9	0.7
18	Дальность отлета	l1, м	5.9	0.9
19	Длина прыжка	lп, м	9.5	8.4
20	Длина ступени	L, м	13.5	7.6

Рис. 9.6. Расчет второй ступени перепада в среде Excel

В результате получим высоту 2-й ступени a = 0,7 м и ее длину L = 7,6 м.

Для ступеней 3 – 6 принимаются те же значения высоты и длины. Последнюю

ступень рассчитывают, принимая во внимание значение глубины в нижнем бьефе, т. е. с учетом соответствующего типа сопряжения. Методика соответствующих расчетов рассмотрена в п. 7 и 8.

Самостоятельная работа

Выполните расчет безколодезного многоступенчатого перепада для условий примера 9.1.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие существуют виды сопрягающих гидротехнических сооружений?
2. Что такое быстроток? Каковы этапы его гидравлического расчета?
3. Какие существуют виды перепадов?
4. Каковы этапы гидравлического расчета многоступенчатого колодезного перепада?
5. Как выполняется расчет многоступенчатого безколодезного перепада?

Библиографический список

1. Лапшев Н.Н. Гидравлика: учебное пособие для вузов. – М.: Академия, 2007. – 272 с.

2. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика. М.: Энергия, 1964. – 352 с.

3. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев (ред.), А.Д. Альтшуль, Н.В., Данильченко и др. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

4. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: Учеб. для вузов – В 2-х кн.: Кн. 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 367 с.: ил.

5. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. / под ред. Л.Н. Рассказова. – М.: Стройиздат, 1996. – Ч. 1. – 446 с.

Текстовый электронный образовательный ресурс

Дубровина Ольга Борисовна
Некрасов Александр Васильевич
Секачева Антонина Андреевна

Применение электронных таблиц при решении задач о движении воды в открытых руслах

Учебно-методическое пособие

Иллюстрации и компьютерная верстка *А. В. Некрасова*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Протокол №__ от _____2025

Электронный формат – pdf

https://study.urfu.ru