

# 3654с

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

Кафедра физики и химии

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

### **К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ ПО ГИДРАВЛИКЕ**

для студентов специальности 23.05.06 – Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей: специализация № 1 «Строительство магистральных железных дорог», специализация № 2 «Управление техническим состоянием железнодорожного пути», специализация № 3 «Мосты»  
заочной формы обучения

*2-е издание, исправленное и дополненное*

Составители: В.Т. Волон  
Е.В. Вилякина  
Г.П. Токарев

Самара  
2015

УДК 532 (075.8)

Методические указания к выполнению контрольных работ по гидравлике для студентов специальности 23.05.06 – Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей: специализация № 1 «Строительство магистральных железных дорог», специализация № 2 «Управление техническим состоянием железнодорожного пути», специализация № 3 «Мосты» заочной формы обучения заочной формы обучения [Текст] / составители : В.Т. Волов, Е.В. Вилякина, Г.П. Токарев. – 2-е изд., испр. и доп. – Самара : СамГУПС, 2015. – 24 с.

Практические работы посвящены теоретическому исследованию гидравлических явлений. Методические указания предназначены для выполнения практических работ по гидравлике для студентов специальности 23.05.06 - Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей.

Утверждены на заседании кафедры 10 марта 2015 г., протокол № 8.  
Печатаются по решению редакционно-издательского совета университета.

Составители: В.Т. Волов  
Е.В. Вилякина  
Г.П. Токарев

Рецензенты: д.т.н., профессор, зам. заведующего кафедрой «Теплотехники и тепловых двигателей» СГАУ В.В. Бирюк;  
к.ф.-м.н. доцент кафедры «Высшая математика» СамГУПС  
В.П. Кузнецов

Под редакцией В.Т. Волова

Подписано в печать 19.05.2015. Формат 60×90 1/16.  
Усл. печ. л. 1,5. Заказ 63.

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для закрепления знаний по дисциплине гидравлика, в них приведены задачи на основные разделы этой дисциплины. Для каждой из задач дано десять вариантов цифровых исходных данных. Номер варианта выбирается по последней цифре номера студента в списке группы.

Перед решением задачи студент должен проработать соответствующий раздел курса гидравлики.

Методические указания направлены на частичное освоение следующих компетенций:

- способностью применять методы расчета и оценки прочности сооружений и конструкций на основе знаний законов статики и динамики твердых тел, о системах сил, напряжениях и деформациях твердых и жидких тел,

- способностью формулировать технические задания на выполнение проектно-исследовательских и проектно-конструкторских работ в области строительства железных дорог, мостов, транспортных тоннелей и других сооружений на транспортных магистралях, метрополитенов,

- способностью выполнять инженерные изыскания транспортных путей и сооружений, включая геодезические, гидрометрические и инженерно-геологические работы.

В результате освоения дисциплины студент должен:

**знать:** основные законы гидравлики;

**уметь:** производить гидрологические изыскания на объекте строительства;

**владеть:** методами работы с современной испытательной и измерительной аппаратурой.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие условия:

1. Работу следует выполнить либо в письменном, либо в печатном виде на одной стороне листа. Это необходимо для рецензирования и исправлений. Страницы должны быть пронумерованы.

Если работа предоставляется в печатном виде, то она оформляется со следующими полями: верхнее – 20 мм; нижнее – 20 мм; правое – 10 мм; левое – 30 мм.

Основной текст, при наборе на компьютере, печатается в текстовом редакторе **WORD** стандартным шрифтом **Times New Roman**, размер шрифта 14, межстрочный интервал – полтора.

Текст подстрочных ссылок печатается в текстовом редакторе **WORD** стандартным шрифтом **Times New Roman**, размер шрифта 10, межстрочный интервал – 1,0.

2. Решение задач вести поэтапно, с пояснением каждого хода решения.

3. Перед вычислением искомых величин следует вначале написать расчетную формулу в буквенном выражении, затем подставить численные значения всех входящих в нее параметров и привести окончательный ответ.

4. В приводимых расчетных формулах поясняются все входящие в них параметры.
5. У всех размерных величин должна быть поставлена размерность. Размерность всех величин должна быть выражена в Международной системе единиц СИ.
6. Значения всех коэффициентов следует обосновывать ссылкой на литературу с указанием автора, названия источника, года издания и номера страницы.
7. Чертежи к работе, как правило, должны выполняться на миллиметровке и вклеиваться или вшиваться в работу.
8. При построении расчетных графиков нужно указывать величины, откладываемые по осям графика, с обозначением их размерностей.
9. В конце работы привести список литературы, которой пользовался студент в процессе выполнения работы, с указанием автора, названия, места и года издания.
10. Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания должны быть выполнены. Исправлять ошибки следует отдельно по каждой задаче на чистой стороне листа.

Работа может быть зачтена только в том случае, если она не содержит принципиальных и грубых арифметических ошибок. Арифметические ошибки, вызванные несоблюдением единства размерностей или какой-либо небрежностью при расчете, будут оценены наравне с принципиальными ошибками методического характера.

**ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается в настоящих методических указаниях, делать какие-либо пометки в тексте или на рисунках.**

### Задача № 1

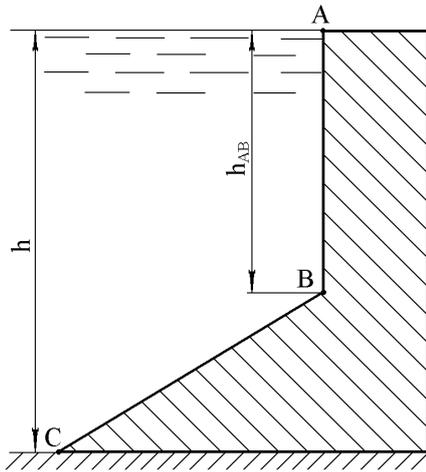


Рис. 1. Плотина

Построить эпюры избыточного гидростатического давления воды на стенки плотины ломаного очертания. Определить силы давления на 1 метр ширины вертикальной и наклонной частей плотины (рис. 1) и точки их приложения, если глубина воды  $h$ , высота вертикальной части стены  $AB$   $h_{AB}$ ; угол наклона стены  $BC$  к горизонту  $30^\circ$ . Исходные данные см. табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h$ , м	3,0	4,5	5,5	7,0	7,0	5,0	6,0	8,0	5,5	4,0
$h_{AB}$ , м	2,0	3,0	4,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0	3,5	2,5

### Задача № 2

Определить величину и направление силы гидростатического давления воды на 1 метр ширины вальцового затвора диаметром  $D$  (рис. 2). Исходные данные см. табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D$ , м	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,3	1,7	2,2	2,8	3,5

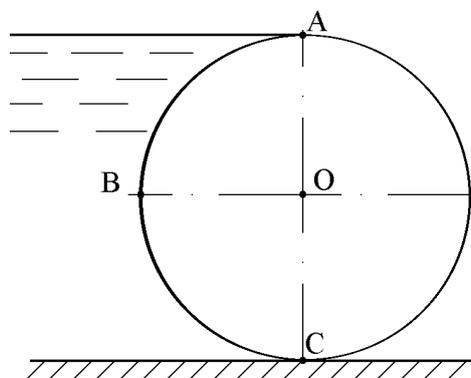


Рис. 2. Вальцовый затвор

### Задача № 3

Определить давление воды  $p_1$  в узком сечении трубопровода (рис. 3, сечение 1–1), если давление в широкой его части (сечение 2–2) равно  $p_2$ , расход воды, протекающей по трубопроводу  $Q = 5$  л/с, диаметры труб узкого и широкого сечения соответственно  $d_1$  и  $d_2$ .

Режим движения воды в трубопроводе — турбулентный. Исходные данные см. табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_2$ , кПа	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50
$d_1$ , мм	50	50	50	40	40	40	32	32	25	25
$d_2$ , мм	100	125	150	125	150	175	80	75	80	75

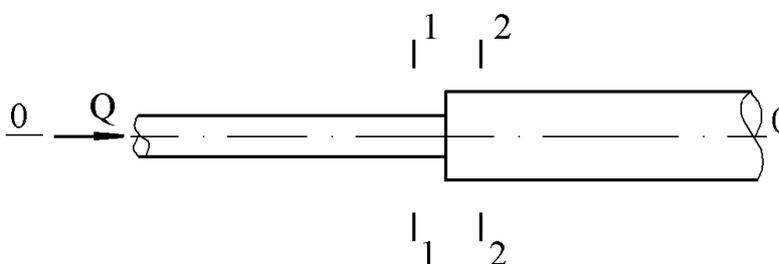


Рис. 3. Трубопровод переменного сечения

### Задача № 4

Определить диаметр  $d$  самотечного трубопровода длиной  $l$ , подающего воду из реки в береговой колодец, и разность уровней воды  $H$  в колодце и реке (рис. 4), если расход воды, забираемой насосом из берегового колодца на нужды водоснабжения  $Q$ ; расчетная скорость движения воды по самотечному трубопроводу  $v = 0,7 \div 1,5$  м/с; эквивалентная шероховатость трубы  $k_s = 1$  мм; температура воды  $t$  °С. Исходные данные см. табл. 4.

#### Примечания:

1. Скоростями движения воды на свободной поверхности в реке и береговом колодце следует пренебречь.

2. Вычисленный диаметр самотечной трубы следует округлить до ближайшего большего стандартного значения: 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 мм.

3. Коэффициенты местных сопротивлений принять:

на входе в трубу, имеющую сетку с обратным клапаном,  $\zeta_{вх} = 3,0$ ;

на выходе из трубы в береговой колодец, заполненный водой,  $\zeta_{вых} = 1,0$ .

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q$ л/с	20	40	60	80	100	80	60	40	20	50
$t$ , °C	20	15	10	5	20	15	5	10	15	20
$l$ , м	50	75	100	125	150	200	150	100	75	50

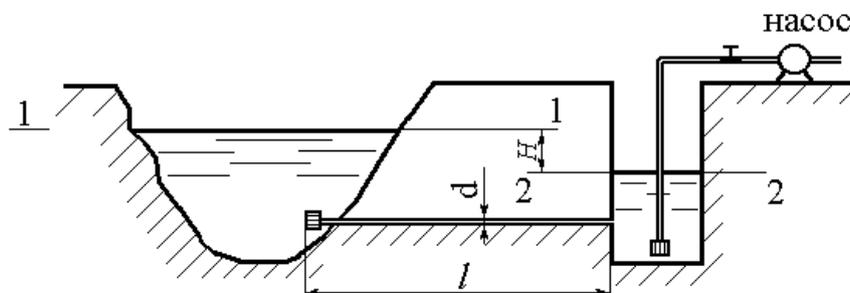


Рис. 4. Схема подачи воды в береговой колодец

### Задача № 5

Определить расход воды  $Q$ , проходящей через водопускную трубу в бетонной плотине, если напор над центром трубы  $H$ , диаметр трубы  $d$ , длина ее  $l$  (рис. 5). Исходные данные см. табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$ , м	12	9	8	8	11	9	12	9	12	11
$d$ , м	1,0	1,0	1,25	1,25	1,50	1,50	1,75	1,75	2,0	2,0
$l$ , м	7,0	5,0	3,0	8,0	4,0	6,0	5,0	7,0	12,0	8,0

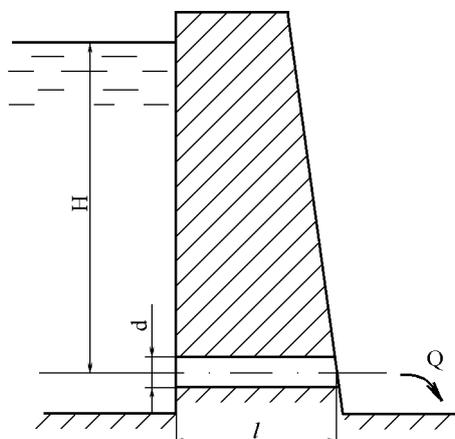


Рис. 5. Бетонная плотина

## Задача № 6

Дорожная насыпь, имеющая высоту  $H_{нас}$ , ширину земляного полотна  $B = 12$  м и крутизну заложения откосов  $m = 1,5$ , пересекает водоток с переменным расходом, для пропуска которого в теле насыпи укладывается с уклоном  $i_T$  круглая железобетонная труба, имеющая обтекаемый оголовок. Исходные данные см. табл. 6.

Требуется:

1. Подобрать диаметр трубы для пропуска максимального расчетного расхода  $Q_{max}$  в напорном режиме при допустимой скорости движения воды в трубе  $v_{дон} = 4$  м/с и минимально допустимом расстоянии от бровки насыпи до подпорного уровня  $a_{min} = 0,5$  м.

2. Определить фактическую скорость движения воды в трубе  $v_{дон}$  при пропуске максимального расхода и глубину  $H$  воды перед трубой, соответствующую этому расходу.

3. Рассчитать предельные расходы и соответствующие им глубины перед трубой, при которых труба будет работать в безнапорном и полунпорном режимах.

Таблица 6

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_{max}, \text{м}^3/\text{с}$	4,5	6	8	3,9	14,5	3	12,8	1,7	10	5
$H_{нас}, \text{м}$	3,0	2,6	3,2	3,6	5,0	2,2	4,1	2,4	5,4	4,0
$i_T$	0,008	0,003	0,02	0,006	0,004	0,01	0,003	0,015	0,012	0,005

## Задача № 7

Магистральный оросительный канал трапецеидального сечения, имеющий ширину по дну  $b$ , крутизну откосов  $m = 1,5$ , коэффициент шероховатости стенок  $n = 0,025$ , проложенный с уклоном  $i$  и пропускающий расход  $Q$ , пересекает железнодорожную линию.

На пересечении железной дороги с каналом установлен малый однопролетный мост, имеющий прямоугольное отверстие. Возвышение низа пролетного строения моста над дном русла  $H_M$ . Исходные данные см. табл. 7.

Требуется:

1. Определить ширину отверстия моста  $b_m$  для пропуска расхода  $Q$ , если максимально допустимая скорость движения воды в подмостовом русле  $v_{дон}$ , а минимально допустимое превышение низа пролетного строения над уровнем подпертого горизонта перед мостом  $a_{min} = 0,5$  м.

2. Найти глубину воды  $H$  перед мостом при пропуске через выбранное отверстие моста заданного расхода.

3. Вычислить скорости движения воды перед мостом  $v$ , за мостом  $v_0$  и в расчетном сечении подмостового русла  $v_p$ .

4. Определить ширину потока по урезу воды перед мостом  $B$  и за мостом  $B_0$ .

**Примечание:** При решении задачи принять коэффициент расхода  $\mu = 0,35$ ; критерий затопления  $N = 0,8$ ; расчетный коэффициент  $k = 0,52$ .

Таблица 7

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$b, м$	11	8	5	10	4	12	6	7	9	3
$i$	0,0001	0,0009	0,001	0,0005	0,002	0,0015	0,0007	0,0012	0,0006	0,0003
$Q_{max}, м^3/с$	13,6	10,0	24,2	18,5	5,3	5,9	6,8	10,2	16,3	2,4
$H_{нас}, м$	3,0	3,8	3,5	2,5	2,8	3,2	2,9	2,0	2,2	1,7
$v_{дон}, м/с$	5,0	2,7	4,5	2,5	4,0	1,7	3,8	4,2	2,5	3,4

## Методические указания к решению задач

### Задача № 1

Избыточное давление в точках  $A$ ,  $B$  и  $C$  определить по формуле (1):

$$p_{изб} = \gamma \cdot h, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельный вес воды ( $\gamma = 10 \text{ кН/м}^3$ );  $h$  – глубина погружения данной точки под уровень жидкости, м.

При построении эпюр гидростатического давления следует помнить, что давление всегда направлено перпендикулярно площадке, на которую оно действует.

Сила избыточного гидростатического давления на плоскую стенку вычисляется по формуле (2):

$$P_{изб} = p_{цт} \cdot \omega, \quad (2)$$

где  $p_{цт}$  – давление в центре тяжести смоченной поверхности, Па;  $\omega$  – площадь смоченной поверхности,  $м^2$ .

Точка приложения суммарной силы избыточного гидростатического давления называется центром давления. Положение центра давления определяется по формуле (3):

$$l_{цд} = l_{цт} + \frac{I}{l_{цт} \cdot \omega}, \quad (3)$$

где  $l_{цд}$  – расстояние в плоскости стенки от центра давления до свободного уровня жидкости, м;  $l_{цт}$  – расстояние в плоскости стенки от центра тяжести стенки до свободного уровня жидкости, м;  $\omega$  – площадь смоченной поверхности,  $м^2$ ;  $I$  – момент инерции смоченной плоской площадки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести,  $м^4$ .

Момент инерции плоской прямоугольной фигуры (4):

$$I = \frac{b \cdot l^3}{12}, \quad (4)$$

где  $b$  – ширина стенки, м;  $l$  – длина стенки, м.

## Задача № 2

Суммарная сила избыточного давления воды на цилиндрическую поверхность определяется по формуле (1):

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \quad (1)$$

где  $P_x$  – горизонтальная составляющая силы избыточного гидростатического давления, Н;  $P_y$  – вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления, Н.

Горизонтальная составляющая силы избыточного гидростатического давления равна силе давления на вертикальную проекцию цилиндрической поверхности (2):

$$P_x = \gamma \cdot y_{цм} \cdot \omega_y, \quad (2)$$

где  $y_{цм}$  – расстояние по вертикали от центра тяжести вертикальной проекции цилиндрической поверхности до уровня воды, м;  $\omega_y$  – площадь вертикальной проекции цилиндрической поверхности, м<sup>2</sup>.

Вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления определяется по формуле (3):

$$P_y = \gamma \cdot W, \quad (3)$$

где  $W$  – объем тела давления, м<sup>3</sup>.

Таким образом, вертикальная составляющая силы давления равна весу жидкости в объеме тела давления.

Тело давления представляет собой объем, расположенный над цилиндрической поверхностью и заключенный между вертикальными плоскостями, проходящими через крайние образующие цилиндрической поверхности, самой цилиндрической поверхностью и свободной поверхностью воды. Если тело давления расположено со стороны смачиваемой жидкостью поверхности (в теле давления находится вода), то оно положительно, и сила  $P_y$  будет направлена вниз. Если тело давления находится со стороны не смачиваемой жидкостью поверхности (в теле давления нет воды), то такое тело давления отрицательно, и сила  $P_y$  будет направлена вверх.

В данной задаче для нахождения тела давления следует цилиндрическую поверхность  $ABC$  разделить на две:  $AB$  и  $BC$ ; причем тело давления для поверхности  $AB$  будет положительным, а для  $BC$  – отрицательным.

Результирующий объем тела давления на всю цилиндрическую поверхность  $ABC$  и его знак находятся путем алгебраического суммирования тел давления на криволинейные поверхности  $AB$  и  $BC$ .

Суммарная сила избыточного гидростатического давления на цилиндрическую поверхность направлена по радиусу к центру цилиндрической поверхности под углом  $\varphi$  к горизонту (4):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{P_x}{P_y}. \quad (4)$$

### Задача № 3

Для определения давления воды  $p_2$  нужно составить уравнение Д. Бернулли для двух сечений:  $1-1$  и  $2-2$  потока воды (индексы при членах уравнения должны соответствовать номерам выбранных сечений).

Плоскость сравнения  $0-0$  следует провести по оси трубопровода.

Уравнение Д. Бернулли будет иметь вид (1):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + h_{1-2}, \quad (1)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – удельная энергия положения, или расстояние от центра тяжести сечений  $1-1$  и  $2-2$  до плоскости сравнения  $0-0$ , м;  $p_1/\gamma$  и  $p_2/\gamma$  – удельная энергия давления, или высота поднятия воды в пьезометрах, установленных соответственно в сечениях  $1-1$  и  $2-2$ , м;  $p_1$  и  $p_2$  – давление воды в соответствующих сечениях, Па;  $\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g}$  и  $\frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g}$  –

удельная кинетическая энергия, или скоростная высота в сечениях  $1-1$  и  $2-2$ , м;  $v_1$  и  $v_2$  – средняя скорость соответственно в сечениях  $1-1$  и  $2-2$ , м/с;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей в соответствующем живом сечении; величина безразмерная, для турбулентного режима движения может быть принята равной единице;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_{1-2}$  – потеря напора при внезапном расширении потока, определяемая по формуле Борда, м,

$$h_{1-2} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}.$$

$z_1 = z_2 = 0$ , т. к. плоскость сравнения проходит через центры тяжести сечений трубопровода.

После анализа и подстановки значений соответствующих членов уравнение Д. Бернулли можно записать в следующем виде:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

или

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}.$$

Отсюда

$$p_1 = \gamma \left( \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right). \quad (2)$$

В этом уравнении, помимо давления  $p_1$  неизвестны скорости  $v_1$  и  $v_2$ . Зная расход воды  $Q$ , диаметры труб  $d_1$  и  $d_2$  и используя уравнение неразрывности (3):

$$Q = v_1 \cdot \omega_1 = v_2 \cdot \omega_2 = const, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – площади живых сечений 1–1 и 2–2,  $m^2$  ( $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ ,  $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ ), можно определить средние скорости  $v_1$  и  $v_2$  и после их подстановки в уравнение (2) определить давление воды  $p_1$  в сечении 1–1.

#### Задача № 4

Зная расход  $Q$  и задаваясь средней скоростью  $v$  движения воды по самотечному трубопроводу, следует определить площадь поперечного сечения трубы  $\omega$  (1):

$$\omega = \frac{Q}{v}, \quad (1)$$

а затем диаметр трубопровода (2):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}. \quad (2)$$

Полученное значение диаметра нужно округлить до ближайшего большего стандартного значения  $d_{cm}$ , после чего вычислить фактическую скорость движения воды в трубе (3):

$$v_\phi = \frac{Q}{\omega} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{cm}^2}. \quad (3)$$

Чтобы определить разность уровней воды  $H$  в береговом колодце и реке, следует составить уравнение Д. Бернулли для двух сечений потока. Сечение 1–1 выбираем на поверхности воды в реке, сечение 2–2 на поверхности воды в береговом колодце; плоскость сравнения проводим по уровню воды в береговом колодце, т. е. по сечению 2–2.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} + h_{1-2}.$$

Далее необходимо провести анализ членов уравнения:

$z_1 = z_2 = 0$ , так как плоскость сравнения проходит по сечению 2–2;

$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_{am}}{\gamma}$ , так как давление на свободной поверхности в реке и колодце равно атмосферному  $p_{am}$ :

$$\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} = 0, \quad \text{так как по условию задачи } v_1 \approx 0 \text{ и } v_2 \approx 0.$$

Подставляя значения параметров, получим расчетный вид уравнения

$$H = h_{1-2}, \quad (4)$$

где  $h_{1-2}$  – потери напора при движении воды по самотечной трубе, м.

Потери напора определим по формуле (5):

$$h_{1-2} = h_m + h_l, \quad (5)$$

где  $h_m$  – потери напора в местных сопротивлениях, м;  $h_l$  – потеря напора по длине, м.

Потери напора в местных сопротивлениях вычисляются по формуле Вейсбаха (6):

$$h_m = \sum \zeta \frac{v_\phi^2}{2g} = (\zeta_{вх} + \zeta_{вых}) \frac{v_\phi^2}{2g}, \quad (6)$$

где  $\zeta_{вх}$ ,  $\zeta_{вых}$  – коэффициенты местных сопротивлений соответственно входа (приемного клапана с сеткой) и выхода;  $v_\phi$  – фактическая скорость движения воды по трубопроводу, м/с.

Потери напора по длине за счет трения жидкости о стенки русла определяются по формуле Дарси (7):

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);  $l$  – длина самотечного трубопровода, м;  $d$  – диаметр самотечного трубопровода, м.

Коэффициент  $\lambda$  может быть определен по формуле А. Д. Альтшуля (8):

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где  $k_s$  – эквивалентная шероховатость, м;  $Re$  – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса определим по формуле (9):

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (9)$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Кинематический коэффициент вязкости зависит от рода жидкости и температуры. Для воды значение  $\nu$  определяется в зависимости от температуры см. табл. 8.

## Зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	20	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\nu, \text{cm}^2/\text{c}$	0,0101	0,0167	0,0157	0,0147	0,0139	0,0131	0,0124	0,0117	0,0112	0,0106

Подставляя значения  $h_m$  и  $h_l$ , в расчетную зависимость (4), определяют разность уровней воды  $H$  в реке и береговом колодце.

## Задача № 5

Расход воды, проходящей через водопускную трубу, определяется по формуле (1):

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \cdot H}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $\omega$  – площадь сечения трубы,  $\text{m}^2$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{m}/\text{c}^2$ ;  $H$  – напор над центром трубы,  $\text{m}$ .

Для определения коэффициента расхода  $\mu$  следует выяснить, как работает водопускная труба: как насадок, как отверстие или как «короткий трубопровод».

Чтобы труба работала как насадок, должны быть соблюдены одновременно два условия:

1. Длина трубы должна быть  $4 \cdot d \leq l < 6 \cdot d$ .
2. Максимальный вакуум  $H_{\text{вак}}^{\text{max}}$  в насадке должен быть меньше  $H_{\text{вак}}^{\text{дон}} = 8 \text{ м вод. ст.}$

Значение  $H_{\text{вак}}^{\text{max}}$  вычисляется по формуле:  $H_{\text{вак}}^{\text{max}} = 0,8 \cdot H$ ,

где  $H$  – напор над центром трубы,  $\text{m}$ .

Если эти условия соблюдены, водопускная труба будет работать как насадок, для которого коэффициент расхода  $\mu = 0,82$ .

Если одно из перечисленных условий не будет выполняться ( $l < 4 \cdot d$  или  $H_{\text{вак}}^{\text{max}} > 8 \text{ м}$ ), то водопускная труба будет работать как отверстие, и коэффициент расхода  $\mu$  будет равен 0,62.

При длине трубы  $l > 6 \cdot d$  следует помимо потерь напора в местных сопротивлениях учитывать потери напора по длине, т. е. рассчитывать водопускную трубу как «короткий трубопровод».

Коэффициент расхода в этом случае следует определить по формуле (2):

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{\text{ex}} + \lambda \frac{l}{d}}}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения ( $\lambda = 0,02$ ).

## Задача № 6

Водопропускные трубы под насыпями дорог (железных и автомобильных) служат для пропуска расходов воды периодически действующих водотоков во время ливневых или весенних паводков.

В настоящее время чаще всего применяются водопропускные трубы круглого сечения.

По числу отверстий трубы бывают одноочковые, двухочковые, трехочковые и многоочковые.

Согласно действующим типовым проектам круглые дорожные водопропускные трубы имеют следующие стандартные отверстия: 0,75; 1,0; 1,25; 1,5 и 2 м.

Одной из задач гидравлического расчета труб является определение необходимого диаметра трубы. При этом считается, что пропускная способность многоочковых (двухочковые, трехочковые и т. д.) труб равна суммарной пропускной способности соответствующего количества одноочковых труб.

Гидравлические расчеты водопропускных труб выполняют в зависимости от условий их работы.

Различают следующие режимы работы труб.

1) Безнапорный, когда входное сечение не затоплено, и на всем протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис. 6).

2) Полунапорный, когда входное сечение трубы затоплено, т.е. на входе труба работает полным сечением, а на остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (рис. 7).

3) Напорный, когда труба работает полным сечением, т.е. все поперечное сечение трубы по всей длине полностью заполнено водой (рис. 8).

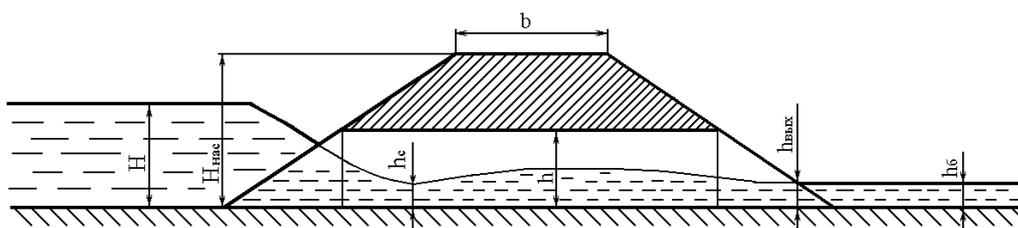


Рис. 6. Безнапорный режим

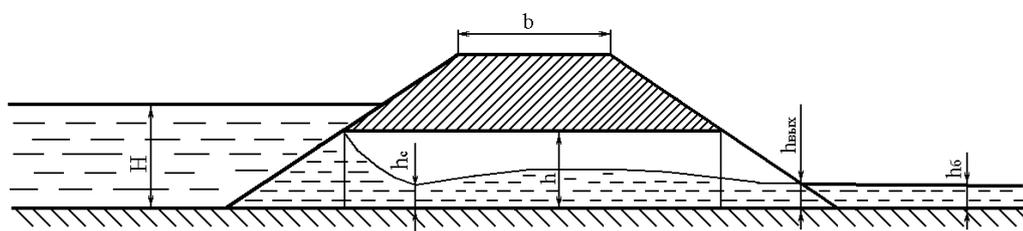


Рис. 7. Полунапорный режим

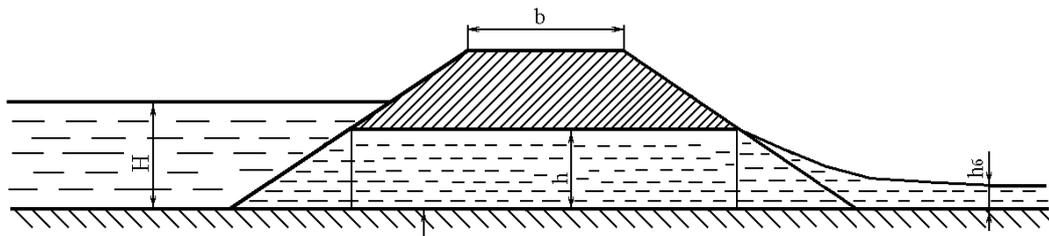


Рис. 8. Напорный режим

Безнапорный режим реализуется при соблюдении следующего условия:

$$H \leq 1,2 \cdot d,$$

где  $H$  – напор (глубина) воды перед трубой, м;  $d$  – диаметр трубы, м.

Пропускная способность безнапорных труб может быть определена по формуле А.А. Угинчуса (1):

$$Q = \mu \cdot b_k \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода (принять  $\mu = 0,335$ );  $b_k$  – средняя ширина потока в сечении с критической глубиной (определяется по графику, представленному на рис. 9), м.

Полунапорный режим бывает при условии  $H > 1,2 \cdot d$ .

Пропускная способность полунапорных труб с учетом уклона дна определяется по формуле (2):

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot [H - (0,708 - 2i_T) \cdot d]}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода, зависящий от типа оголовка (для условий данной задачи принять  $\mu = 0,7$ );  $\omega$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр отверстия трубы, м;  $i_T$  – уклон дна трубы.

Пропускная способность полунапорных труб больше, чем безнапорных.

Напорный режим имеет место при одновременном выполнении трех условий:

- 1) входной оголовок должен быть обтекаемым;
- 2)  $H > 1,4 \cdot d$ ;
- 3)  $i_T < i$ , где  $i$  – гидравлический уклон.

Пропускная способность напорных труб вычисляется по формуле (3):

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot (H + i_T \cdot l - 0,85 \cdot d)}. \quad (3)$$

Коэффициент расхода  $\mu$  определяется зависимостью:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{ex} + \lambda \cdot \frac{l}{d}}},$$

где  $\zeta_{ex}$  – коэффициент сопротивления на входе (для обтекаемых головок  $\zeta_{ex} = 0,2$ );  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения (принять  $\lambda = 0,025$ );  $l$  – длина трубы, м.

При напорном режиме трубы обладают наибольшей пропускной способностью.

### Рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Исходя из заданной допустимой скорости движения воды в трубе  $v_{дон}$  определяются площадь живого сечения потока  $\omega = \frac{Q}{v_{дон}}$  и диаметр напорной трубы:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}.$$

2. Найденный диаметр округляется до ближайшего большего стандартного значения  $d_{cm}$  (0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0 м), и вычисляется фактическая скорость движения воды:

$$v_{ф} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}.$$

3. Определяется длина трубы  $l$ .

При ширине земляного полотна  $B$ , высоте насыпи  $H_{нас}$  и крутизне заложения ее откосов  $m$  длина трубы:  $l = 2 \cdot H_{нас} \cdot m + B$ .

4. После этого вычисляется значение коэффициента расхода:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex} + \lambda \cdot \frac{l}{d}}}.$$

5. Затем из формулы (3) определяется напор воды перед трубой:

$$H = \frac{Q^2}{\mu^2 \cdot \omega^2 \cdot 2g} + 0,85 \cdot d - i_T \cdot l.$$

При этом должны быть выдержаны условия:  $H > 1,4 \cdot d$ ;  $H \leq (H_{нас} - 0,5)$  и  $i_T < i$ .

6. Проверка последнего условия проводится на основании формулы Шези (4):

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot i} = K \cdot \sqrt{i}, \quad (4)$$

где  $C$  – коэффициент Шези,  $m^{0,5}/c$ ;  $R$  – гидравлический радиус, м;  $K$  – расходная характеристика,  $m^3/c$ ;  $i$  – гидравлический уклон.

Откуда гидравлический уклон:  $i = \frac{Q^2}{K^2}$ .

Коэффициент Шези определяется по формуле:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6},$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости ( $n = 0,014$ ).

Верхний предел существования полунапорного режима определяется условием  $H = 1,4 \cdot d$ . Соответствующий ему предельный расход, вычисляемый по формуле (2), будет:

$$Q = \mu \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot [1,4d - (0,708 - 2i_T) \cdot d]}.$$

Верхний предел существования безнапорного режима определяется условием  $H = 1,2 \cdot d$ , а соответствующий ему расход, см. формулу (1):

$$Q = \mu \cdot b_k \cdot \sqrt{2g} \cdot (1,2d)^{3/2}.$$

Для определения  $b_k$  вычисляется отношение  $\frac{Q}{b_k} = \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$ , затем находится значение безразмерного параметра  $\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}$ , после чего по графику

$\frac{b_k}{d} = f\left(\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}\right)$  (рис. 9) определяется соответствующая этому параметру величина  $b_k/d$ , по которой определяется значение  $b_k$ .

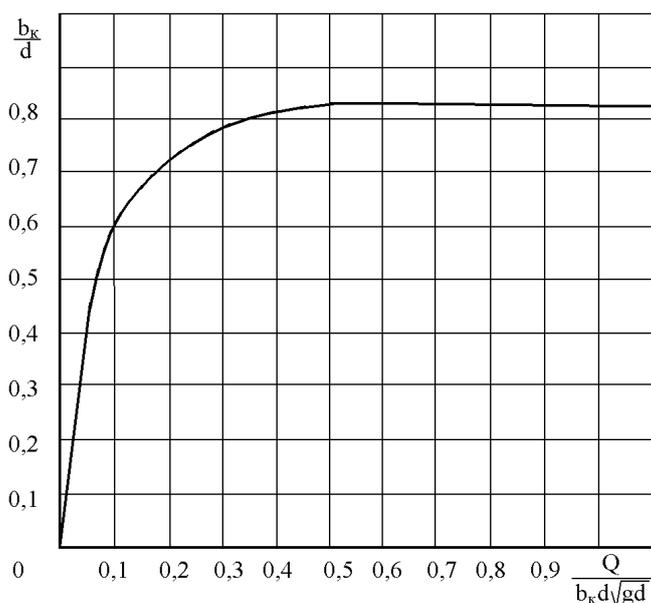


Рис. 9. Зависимость  $\frac{b_k}{d}$  от безразмерного параметра  $\frac{Q}{b_k \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d}}$

### Задача № 7

К малым мостам относятся мосты, полная длина которых не превышает 25 м. Согласно действующим типовым проектам малые мосты имеют стандартные отверстия: 2; 3; 4; 5; 6; 7,5; 10; 12,5 и 20 м.

Малый мост обычно стесняет поток в плане, т. к. отверстие моста  $b_m$  принимают меньше ширины потока, что вызывает повышение уровня воды в верхнем бьефе, т. е. перед мостом.

С точки зрения гидравлики отверстие малого моста работает по схеме водослива с широким порогом.

В зависимости от соотношения между глубиной воды в нижнем бьефе  $h_{нб}$ , и напором воды перед мостом  $H$  различают свободное (незатопленное) и несвободное (затопленное) протекание потока в подмостовом русле. В первом случае глубина потока в нижнем бьефе  $h_{нб}$  не влияет на величину напора  $H$  перед мостом, во втором – влияет.

Вид протекания потока устанавливается по критерию затопления  $N$ .

Если  $\frac{h_{нб}}{H} < N$ , то подмостовое русло работает по схеме незатопленного водослива с широким порогом; если  $\frac{h_{нб}}{H} \geq N$ , то – по схеме затопленного водослива.

В первом случае (рис. 10, а) в конце входного участка устанавливается глубина  $h_p$  (меньше критической в подмостовом русле  $h_k$ ), которую принимают в качестве расчетной и определяют по формуле:

$$h_p = k \cdot H .$$

Во втором случае (рис. 10, б) глубина в конце входного участка  $h_p$  больше критической, но меньше бытовой глубины потока  $h_{нб}$  в несесненном русле. Расчетная глубина воды под мостом определяется по формуле

$$h_p = k_{II} \cdot H .$$

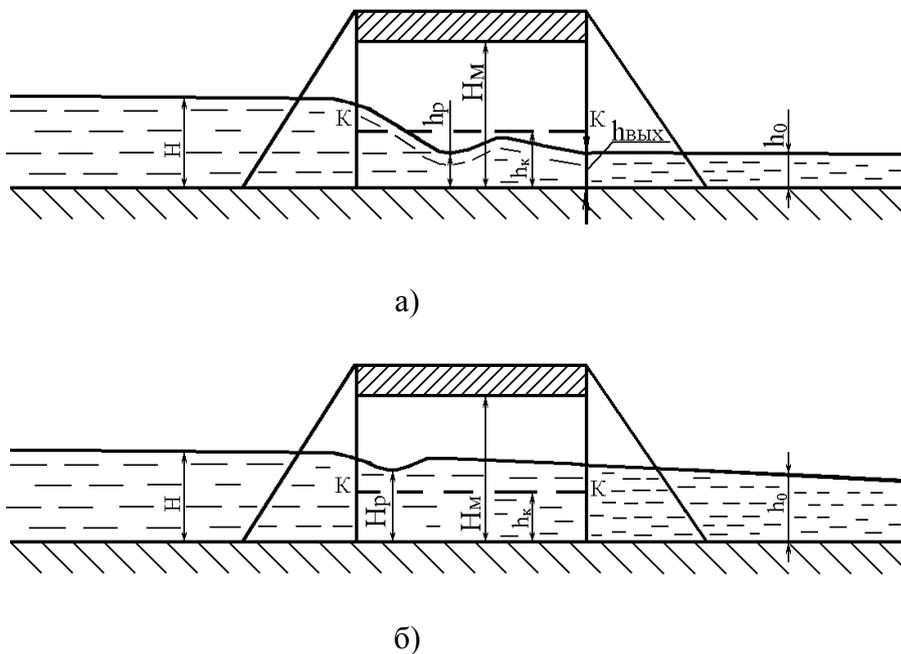


Рис. 10. Схемы водосливов

Коэффициент  $k_{II}$  зависит от  $n = \frac{h_{нб}}{H}$  и может быть определен по таблице 9:

$n$	0,80	0,82	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99
$\sigma_3$	1,00	0,97	0,93	0,89	0,84	0,78	0,71	0,62	0,52	0,37	0,27
$k_{\Pi}$	0,63	0,67	0,70	0,74	0,78	0,82	0,85	0,89	0,93	0,96	0,98

Во всех случаях пропускная способность малых мостов определяется по формуле:

$$Q = \mu \cdot b_m \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \cdot \sigma_3, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода, определяемый формой устоев моста (для условий данной задачи  $\mu = 0,35$ );  $b_m$  – величина отверстия моста, м;  $H$  – напор перед мостом (глубина потока перед мостом), м;  $\sigma_3$  – коэффициент затопления, значения которого принимаются по таблице 9.

Отсюда необходимое отверстие моста:

$$b_M = \frac{Q}{\sigma_3 \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}}.$$

Скорость потока в расчетном сечении определяется по формуле:

$$v_p = \frac{Q}{b_M \cdot h_p},$$

где  $h_p$  – расчетная глубина потока в подмостовом русле, принимаемая в зависимости от схемы протекания потока, м.

Для определения схемы протекания потока необходимо знать глубину потока в нижнем бьефе  $h_{нб}$ , которая равна нормальной глубине потока  $h_0$  в условиях равномерного режима движения.

Искомая глубина  $h_0$  находится методом подбора по формуле Шези:

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i},$$

где  $\omega = (b + m \cdot h) \cdot h$  – площадь живого сечения потока в трапецеидальном русле, м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина канала по дну, м;  $m$  – крутизна откосов;  $H$  – глубина потока, м;  $R$  – гидравлический радиус, м;  $C$  – коэффициент Шези;  $i$  – уклон дна канала.

$$\text{Гидравлический радиус: } R = \frac{\omega}{\chi},$$

где  $\chi = b + 2h \cdot \sqrt{1 + m^2}$  – длина смоченного периметра русла.

Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга  $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ , м<sup>0,5</sup>/с,

где  $n$  – коэффициент шероховатости стенок русла, для условий данной задачи  $n = 0,025$ .

Произведение величин  $\omega \cdot C \cdot \sqrt{R} = K$  называется расходной характеристикой, или модулем расхода.

Таким образом,  $Q = K \cdot \sqrt{i}$ . При  $i = 1$   $Q = K$ . Следовательно, величина  $K$  равна расходу в данном русле при заданной глубине и уклоне дна  $i = 1$ .

Нахождение искомой нормальной глубины  $h_0$  ведется в следующем порядке.

Задаваясь различными значениями  $h$ , вычисляем последовательно величины  $\omega$ ,  $\chi$ ,  $R$ ,  $C$  и  $K$ . Все вычисления сводим в таблицу.

Таблица 10

$h$ , м	$\omega$ , м <sup>2</sup>	$\chi$ , м	$R$ , м	$C$ , м <sup>0,5</sup> /с	$K = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R}$
$h_1$					$K_1$
$h_2$					$K_2$
$h_3$					$K_3$

По данным этой таблицы строим кривую связи  $K = f(h)$  (рис. 11). Определяем заданное значение модуля расхода  $K_{зад} = \frac{Q}{\sqrt{i}}$ . По кривой связи  $K = f(h)$  находим искомую глубину  $h_0$ , соответствующую  $K_{зад}$ , и по  $h_0$  вычисляем  $\omega$ ,  $\chi$ ,  $R$  и  $C$ .

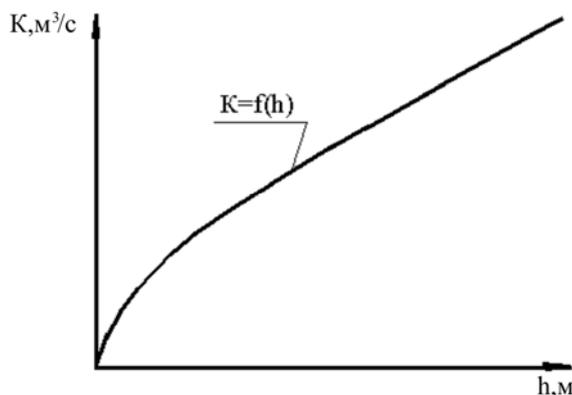


Рис. 11. Зависимость глубины потока  $h$  от расходной характеристики  $K$

По формуле Шези выполняем проверку:

$$Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot i}.$$

Полученное значение  $Q$  должно равняться заданному.

При подборе отверстия моста будем руководствоваться допустимой скоростью движения воды под мостом  $v_{дон}$ .

Исходя из допустимой скорости, определяем величину напора перед мостом в предположении незатопленной схемы протекания ( $\sigma_3 = 1$ ):

$$Q = v_{дон} \cdot b_m \cdot h_p = v_{дон} \cdot b_m \cdot k \cdot H = \mu \cdot b_m \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2},$$

откуда

$$H = \frac{v_{дон}^2 \cdot k^2}{\mu^2 \cdot 2g}.$$

По полученной величине  $H$  и ранее найденной величине  $h_0 = h_{нб}$  уточняем схему протекания воды под мостом. Если  $\frac{h_0}{H} < N$ , то подмостовое русло действительно не затоплено. Если  $\frac{h_0}{H} \geq N$ , то подмостовое русло затоплено, и в этом случае нужно произвести пересчет величины  $H$ . Так как коэффициент затопления  $\sigma_3$  заранее не известен, расчеты ведутся последовательным приближением. При выполнении таких расчетов вначале следует установить наибольшую возможную скорость течения в подмостовом русле, при которой будет иметь место затопленное протекание потока. Эта скорость определяется по формуле:

$$v_{max} = \left( \frac{g \cdot h_0 \cdot \sqrt[3]{2\mu^2}}{N} \right)^{1/2}.$$

Если  $v_{max} > v_{дон}$ , то для дальнейшего расчета принимается допускаемая скорость  $v_{дон}$ , если  $v_{max} < v_{дон}$ , то принимается наибольшая возможная скорость  $v_{max}$ .

Пересчет величины  $H$  производим по формуле:

$$H = \frac{v_{дон}^2 \cdot k_{II}^2}{\mu^2 \cdot 2g \cdot \sigma_3}.$$

При  $v_{max} < v_{дон}$  вместо  $v_{дон}$  в формулу подставляется величина  $v_{max}$ . Расчет ведем методом последовательных приближений, начиная с граничных значений  $\sigma_3$  и  $k_{II}$  при  $n = 0,8$  (см. табл. 9). По вычисленному значению  $H$  определяем величину  $n_1 = \frac{h_0}{H}$  и сравниваем ее с принятой  $n = 0,8$ .

При  $n_1 \neq n$  задаемся новой величиной  $n > 0,8$ , по той же таблице находим новые значения  $\sigma_3$  и  $k_{II}$ , соответствующие принятому  $n$ , определяем новую величину  $H$  и т. д. до тех пор, пока величина  $n = \frac{h_0}{H}$ , соответствующая вычисленному значению  $H$ , не совпадет с принятой.

Вычисленное значение напора перед мостом  $H$  сравниваем с максимально допустимым напором  $H_{max} = H_m - a_{min} = H_m - 0,5$ . Если  $H < H_{max}$ , то производим расчет отверстия моста по формуле:

$$b_m = \frac{Q}{\mu \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \cdot \sigma_3}.$$

Полученное значение  $b_m$  округляем в большую сторону до стандартного  $b_{mI}$ , после чего производим вычисление нового напора:

$$H_1 = H \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_m}{b_{m1}}\right)^2}.$$

Если  $n_1 = \frac{h_0}{H_1} \neq n = \frac{h_0}{H}$ , то задаваясь новой величиной  $n$  и определяя по табл. 9 соответствующее ей значение  $\sigma_3$ , выполняем пересчет напора воды перед мостом по формуле:

$$H_2 = \left( \frac{Q}{\mu \cdot b_{m1} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sigma_3} \right)^{2/3}$$

и т. д. до тех пор, пока величина  $n$ , соответствующая вычисленному значению  $H$ , не совпадет с принятой. Последнее значение  $H$  принимается за расчетное.

Скорость движения воды перед мостом:

$$v = \frac{Q}{\omega},$$

где  $\omega = (b + m \cdot H) \cdot H$  – площадь живого сечения потока в трапециевидальном русле перед мостом,  $\text{м}^2$ .

Скорость движения воды за мостом (при нормальной глубине потока  $h_0$ ):

$$v_0 = \frac{Q}{(b + m \cdot h_0) \cdot h_0}.$$

Скорость движения в подмостовом русле:

$$v_p = \frac{Q}{b \cdot h_p},$$

где  $h_p = k \cdot H$  – при незатопленной схеме протекания;  $h_p = k_p \cdot H$  – при затопленной схеме протекания.

Если  $H > H_{max}$ , то расчет отверстия моста производим исходя из максимального допустимого напора  $H_{max}$ . По отношению  $\frac{h_0}{H_{max}}$  определяем схему протекания потока и соответствующее значение  $\sigma_3$ , после чего находим величину:

$$b_m = \frac{Q}{\mu \cdot \sqrt{2g} \cdot H_{max}^{3/2} \cdot \sigma_3},$$

которую округляем до стандартного большего значения, после чего описанным выше способом уточняем значение  $H$  и определяем величины  $v$  и  $v_p$ .

Значения величин  $B$  и  $B_0$  определяем по формулам:

$$B = b + 2m \cdot H;$$

$$B_0 = b + 2m \cdot h_0.$$

## Библиографический список

1. *Штеренлихт Д.Б.* Гидравлика : учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2004. – 656 с. : ил.
2. *Шейпак А.А.* Гидравлика и гидропневмопривод : учеб. пособ. – Ч. 1. – Основы механики жидкости и грунтов / А.А. Шейпак; рек. МО РФ. – М.: МГИУ, 2003. – 192 с.
3. Сборник задач по машиностроительной гидравлике : учеб. пособие для вузов / под ред. И.М. Куколевского, Л.Г. Подвидза; Доп. МО РФ. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 448 с.
4. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика: Техническая механика жидкости : учебник для гидротехнических специальностей вузов. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
5. *Киселев П.Г.* Справочник по гидравлическим расчетам. – М.: Госэнергоиздат, 1984. – 322 с.
6. *Богомолов А.И., Константинов Н.М.* Примеры гидравлических расчетов. – М.: Автотрансиздат, 1992.
7. *Альтиуль А.Д., Калицун В.И. и др.* Примеры расчетов по гидравлике. – М.: Стройиздат, 1996.