

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, А. Н. Куртнезирова

ГИДРАВЛИКА

Учебное пособие

Краснодар
КубГАУ
2015

УДК 532.5 (075.8)

ББК 22.365

К89

Рецензенты:

Гумбаров А. Д. – доктор технических наук, профессор
(Кубанский госагроуниверситет)

Кузнецов Е.В.

К89 Гидравлика: учеб. пособие / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди,
А. Н. Куртнезирова. – Краснодар, 2015. – 88 с.

ISBN978-5-94672-922-2

В учебном пособии приводятся основы гидростатики и гидродинамики необходимые для решения практических задач по гидравлике, содержит необходимый поясняющий и справочный материал для усвоения разделов гидравлики.

Предназначено для студентов бакалавриата и специалитета инженерных факультетов, изучающих курс гидравлики.

УДК 532.5 (075.8)

ББК 22.365

© Кузнецов Е. В., Хаджиди А. Е.,
Куртнезирова А. Н., 2015

© ФГБОУ ВПО «Кубанский
государственный

аграрный университет», 2015

ISBN978-5-94672-922-2

Оглавление

1	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	5
1.1	Общие положения.....	5
1.2	Условия к задачам.....	8
1.3	Контрольные вопросы.....	10
2	ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИЗБЫТОЧНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ.....	12
2.1	Общие положения.....	12
2.2	Условия к задачам.....	13
2.3	Контрольные вопросы.....	16
3	ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИЗБЫТОЧНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ...	18
3.1	Общие положения.....	18
3.2	Условия к задачам.....	19
3.3	Контрольные вопросы.....	22
4	ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ.....	23
4.1	Истечение из отверстия в атмосферу.....	23
4.2	Истечение из отверстий под уровень.....	24
4.3	Условия к решению задач на истечение жидкости из отверстий.....	24
4.4	Истечение из насадков.....	27
4.5	Условия к решению задач на истечение жидкости из насадков.....	28
4.6	Контрольные вопросы.....	31
5	ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ..	33
5.1	Расчет коротких трубопроводов мелиоративных и водопроводных систем.....	33

5.2	Общие положения.....	33
5.3	Условия к решению задач на истечение через короткие трубопроводы.....	34
5.4	Контрольные вопросы.....	37
5.5	Расчет длинных трубопроводов мелиоративных и водопроводных систем.....	38
5.6	Общие положения.....	38
5.7	Условия к решению задач.....	41
6	ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБАХ.....	47
6.1	Общие положения.....	47
6.2	Условия к задачам.....	48
6.3	Контрольные вопросы.....	50
	Список литературы.....	51
	Примеры решения задач.....	52
	Приложение А.....	80

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

1.1 Общие положения

Основное уравнение гидростатики имеет вид:

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g}, \quad (1.1)$$

где z – координата произвольной точки А относительно плоскости отсчета 0-0 (рисунок 1.1), м;

p – гидростатическое давление в точке А, Н/м²;

z_0 – координата другой точки В, расположенной на свободной поверхности (рисунок 1.1) м;

p_0 – давление на свободной поверхности, Н/м²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Уравнение (1.1) можно представить в виде:

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z), \quad (1.2)$$

где $(z_0 - z)$ – глубина погружения h одной точки под другой, м.

Из уравнения (1.2) можно получить формулу для определения гидростатического давления в точке на глубине h под свободной поверхностью:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.3)$$

где p – полное или абсолютное давление;

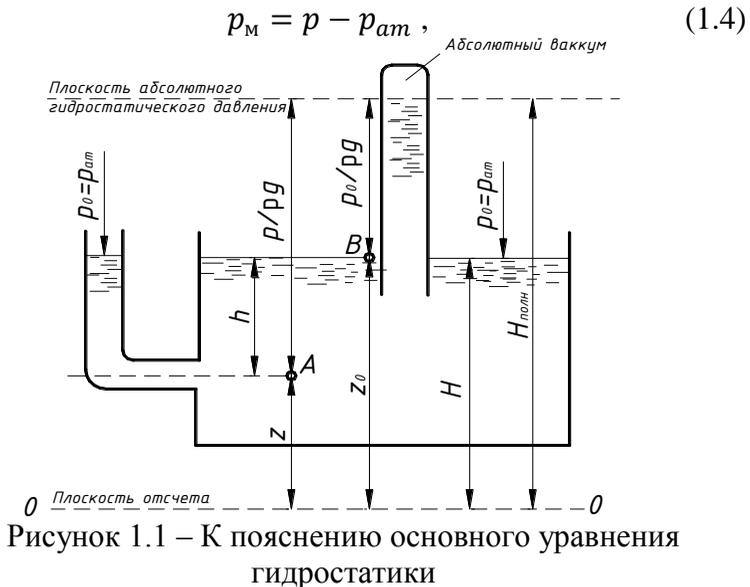
p_0 – внешнее давление (давление на свободной поверхности);

ρgh – избыточное или манометрическое давление.

В гидротехнической практике, в большинстве случаев, внешним давлением является давление атмосферы ($p_0 = p_{at}$).

Под манометрическим давлением подразумевается разность между полным и атмосферным давлением:

$0-0$ – произвольная горизонтальная плоскость отсчета; H – гидростатический напор; $H_{полн}$ – полный (абсолютный) гидростатический напор; $p/\rho g$ – пьезометрическая высота; z – геометрическая высота.



Если на свободной поверхности давление атмосферное, то, согласно зависимости (1.4), получим h :

$$p_M = \rho gh, \quad (1.5)$$

Если полное давление меньше атмосферного, то напряженное состояние в жидкости характеризуется вакуумом. Вакуум – это недостаток давления до атмосферного:

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p, \quad (1.6)$$

Величин $\frac{p}{\rho g}$ – имеет размерность длины и представляет собой высоту, соответствующую полному (абсолютному) давлению. Величина z , отсчитываемая от некоторой произвольной горизонтальной плоскости, называется геометрической высотой. Сумма двух высот: геометрической z и высоты давления $\frac{p}{\rho g}$ называется гидростатическим напором (рисунок 1.1):

$$H_{\text{полн}} = z + \frac{p}{\rho g}, \quad (1.7)$$

Тогда, основное уравнение гидростатики (1.1) можно записать в виде:

$$H_{\text{полн}} = \text{const}, \quad (1.8)$$

Это значит, что гидростатический напор (сумма геометрической высоты и высоты давления) одинаков в любых точках покоящейся однородной жидкости относительно плоскости отсчета.

Графическое изображение уравнения (1.8) $H = z + \frac{p}{\rho g} = \text{const}$, представляется в виде горизонтальной плоскости, проведенной на расстоянии $H_{\text{полн}}$ параллельно плоскости отсчета (рисунок 1.1).

Полный гидростатический напор с энергетической точки зрения представляет собой полную удельную потенциальную энергию жидкости, находящейся в состоянии относительного

покоя. Полная удельная потенциальная энергия жидкости состоит из удельной потенциальной энергии положения z и удельной потенциальной энергии давления $\frac{p}{\rho g}$.

1.2 Условия к задачам

1.2.1 Для схем, представленных на рисунках 1.2 и 1.3, определить вакуум в точке A с помощью ртутных манометров.

1.2.2 К закрытому резервуару, заполненному водой, (рисунки 1.4 и 1.5) подключен ртутный манометр. Определить давление на поверхность воды в резервуаре.

1.2.2 Трубопроводы A и B (рисунки 1.6 и 1.7) заполнены водой. Определить давление в центре трубопровода A с помощью дифференциального ртутного манометра, если давление в центре трубопровода в известно.

Примечание: Для всех вариантов задач выразить искомое давление в Па; м вод. ст.; мм. рт. ст.; кг/см²;

Данные для решения задач приводятся в таблице 1.1

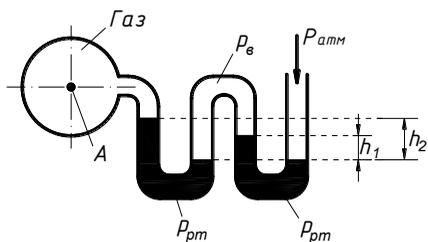


Рисунок 1.2 – К задаче 1.2.1

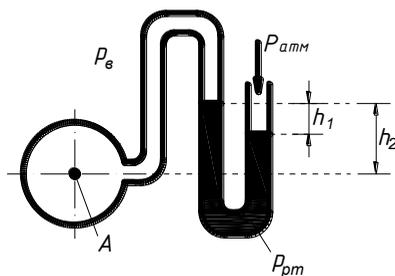


Рисунок 1.3 – К задаче 1.2.1

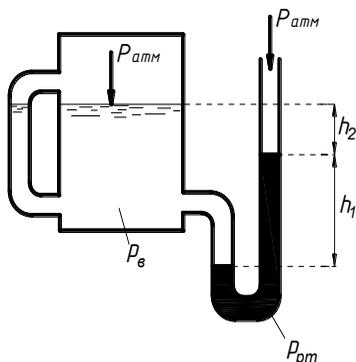


Рисунок 1.4 – К задаче 1.2.2

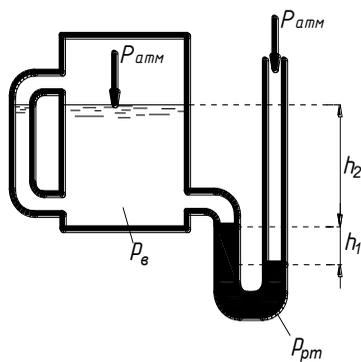


Рисунок 1.5 – К задаче 1.2.2

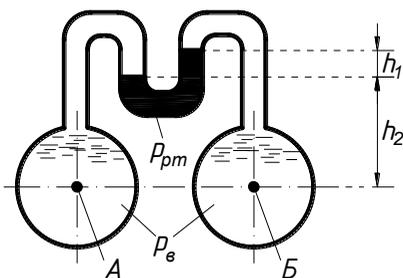


Рисунок 1.6 – К задаче 1.2.3

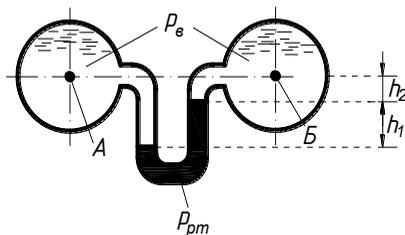


Рисунок 1.7 – К задаче 1.2.3

Таблица 1.1 – Данные к решению задач по определению гидростатического давления

Номер задания	Расчетная схема	Показания манометров, м		Давление в точке В, Мпа
		h1	h2	
1	2	3	4	5
1	Рисунок 1.2	0,10	0,20	-
2		0,12	0,21	-
3		0,15	0,22	-
4		0,20	0,25	-

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
5	Рисунок 1.3	0,25	0,30	-
6		0,30	0,40	-
7		0,35	0,50	-
8		0,80	0,90	-
9	Рисунок 1.4	0,15	1,50	-
10		0,17	2,00	-
11		0,15	2,40	-
12		0,10	2,80	-
13	Рисунок 1.5	0,15	1,20	-
14		0,13	1,80	-
15		0,15	2,50	-
16		0,18	3,00	-
17	Рисунок 1.6	0,20	0,00	0,10
18		3,15	1,00	0,15
19		0,10	1,20	0,20
20		0,06	1,30	0,25
21		0,20	2,20	0,30
22	Рисунок 1.7	0,12	2,00	0,05
23		0,15	1,50	1,18
24		0,20	1,20	0,22
25		0,10	0,70	0,45

Примечание: 1. Температура воды и ртути равна 18 °С.
 2. При решении задач приняты такие значения плотности ρ некоторых жидкостей: вода 1000 – кг/м³; ртуть – 13600 кг/м³.

1.3 Контрольные вопросы

1. Что называется гидростатическим давлением?
2. Какие единицы измерения давления Вы знаете?
3. Как записывается основное уравнение гидростатики?

4. Какие основные свойства гидростатического давления Вы знаете?
5. Как определяется полное (абсолютное) давление в точке?
6. Что называется избыточным или манометрическим давлением?
7. Как определяется манометрическое давление?
8. Что называется вакуумом и как он определяется?
9. Что называется пьезометрической высотой?
10. Что называется вакуумметрической высотой?
11. Что называется поверхностью равного давления?
12. Какова наибольшая величина вакуума и чем она ограничивается?
13. Как определить абсолютное давление в сосуде?
14. Сформулируйте закон Паскаля.
15. Объясните, что понимают под терминами: «внешнее давление» и «весовое давление»?
16. Поясните, что такое абсолютное и избыточное гидростатическое давление и какова связь между ними?
17. Назовите приборы для измерения избыточного гидростатического давления и поясните принцип их действия.
18. Назовите приборы для измерения вакуумметрического гидростатического давления.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИЗБЫТОЧНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ПЛОСКИЕ СТЕНКИ

2.1 Общие положения

Сила избыточного гидростатического давления, действующей на плоские поверхности (фигуры), в общем случае, определяется по формуле:

$$P = \rho g h_c \omega, \quad (2.1)$$

где P – сила избыточного гидростатического давления, действующая на плоскую поверхность (фигуру), Н;

h_c – глубина погружения центра тяжести смоченной поверхности плоской фигуры, м

ω – площадь смоченной поверхности плоской фигуры, м².

Точка приложения равнодействующей сил гидростатического давления называется *центром давления*. Положение центра давления определяется зависимостью:

$$h_D = h_c + \frac{I_c}{\omega h_c}, \quad (2.2)$$

где h_D – глубина погружения центра давления, м;

h_c – глубина погружения центра тяжести смоченной площадки, м.

I_c – момент инерции смоченной площадки плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей в плоскости фигуры через ее центр тяжести, м⁴;

ω – смоченная площадь плоской фигуры, м²;

На рисунке 2.1 приводится пример, иллюстрирующий случай давления жидкости на плоский затвор гидротехнического сооружения.

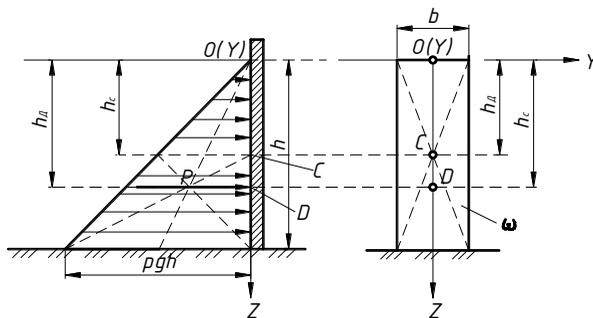


Рисунок 2.1 – К определению силы избыточного гидростатического давления, действующая на плоскую поверхность

Силу избыточного гидростатического давления, действующую на плоскую поверхность затвора, можно определить графически. Для этого необходимо площадь эпюры гидростатического давления (рисунок 2.1) умножить на ширину затвора:

$$P = 0,5pgh^2b, \quad (2.3)$$

где $0,5pgh^2$ – площадь эпюры гидростатического давления, m^2 ;
 b – ширина затвора, м.

Формула (2.3) легко приводится к виду зависимости (2.1), полагая в ней, что $0,5 \cdot h = h_c$ и $b \cdot h = \omega$.

С примерами действия гидростатического давления на плоские поверхности можно ознакомиться в справочной литературе [1, §2 – 10, §2 – 11, 2, § 2.7; 3, § 2 – 5; 5, § 1.2; 6, §3].

2.2 Условия к решению задач

2.2.1. Определить графоаналитическим способом силу избыточного гидростатического давления, действующую на

плоские затворы гидротехнических сооружений (рисунок 2.2) и усилие T которое необходимо создать для преодоления этой силы для вариантов А, Б, В, Г.

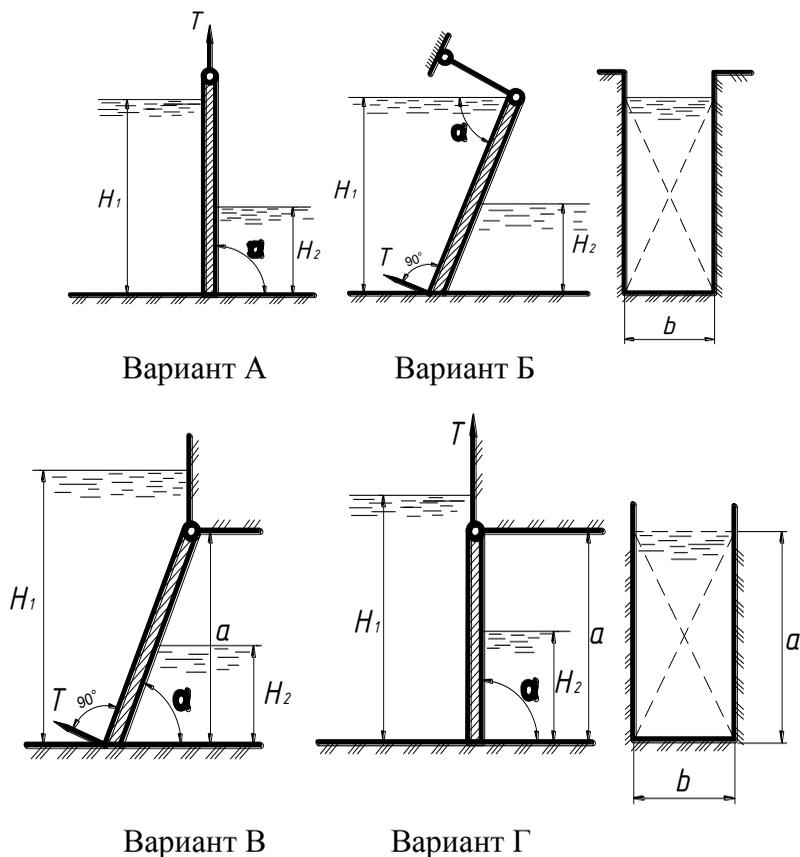


Рисунок 2.2 – Схемы затворов к зданию 2.2.1

2.2.2. Определить графоаналитическим способом силу избыточного гидростатического давления, действующую на плоские подпорные стенки (рисунок 2.3) для вариантов Д и Е.

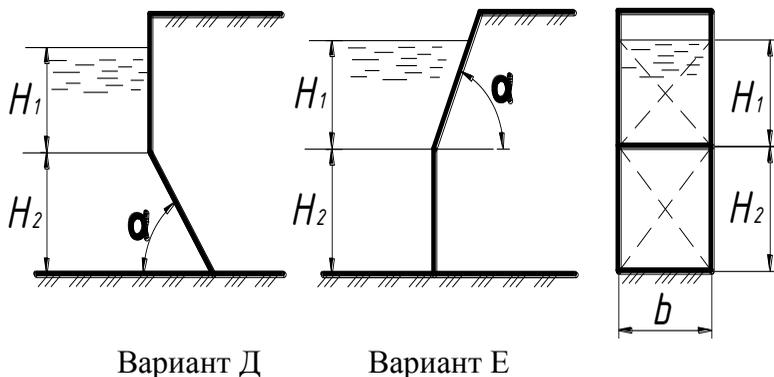


Рисунок 2.3 – Схема подпорных стенок к заданию 2.2.2

Таблица 2.1 – Данные к решению задач по определению силы избыточного гидростатического давления, действующей на плоские поверхности.

Номер задания	Рисунок, вариант	Напор, м		Высота отверстия а, м	Ширина b, м	Угол $\alpha, ^\circ$
		H_1	H_2			
1	2	3	4	5	6	7
1	Рисунок 2.2, вариант А	10	4	-	2	60
2		8	2	-	3	30
3		6	3	-	4	90
4		4	1	-	5	45
5	Рисунок 2.2, вариант Б	2	1	-	6	30
6		3	2	-	7	45
7		4	2	-	8	60
8		5	3	-	9	90
9	Рисунок 2.2, вариант В	6	2	3	10	30
10		7	3	4	11	45
11		8	1	2	12	60
12		9	4	5	3	90

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7
13	Рисунок 2.2, вариант Г	3	1	2	4	30
14		4	2	3	6	45
15		6	3	4	8	60
16		8	5	5	10	90
17		10	4	6	12	90
18	Рисунок 2.3, вариант Д	2	4	-	10	30
19		4	3	-	15	45
20		7	2	-	20	60
21		9	5	-	25	25
22	Рисунок 2.3, вариант Е	2	6	-	12	25
23		4	8	-	16	30
24		3	10	-	18	45
25		1	3	-	22	60

Примечание: При определении усилия T , необходимого для преодоления силы избыточного гидростатического давления, действующего на плоские затворы, принять коэффициент трения в пазах затворов равным 0,5. Вес затвора не учитывать.

2.3 Контрольные вопросы

1. По какой формуле определяется сила избыточного гидростатического давления?
2. Что называется центром давления?
3. Как определяется центр давления на плоской наклонной фигуре?
4. Как формула (2.1) для определения силы избыточного гидростатического давления приводится к зависимости (2.3)?
5. Как вычисляется сила избыточного гидростатического давления графическим способом?

6. На какой глубине от поверхности находится точка приложения силы избыточного гидростатического давления на плоской поверхности?
7. Какой вид будет иметь эпюра гидростатического давления на плоской поверхности закрытого резервуара, если на поверхности жидкости давление больше атмосферного, т. е. $P_0 > P_{am}$?

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИЗБЫТОЧНОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

3.1 Общие положения

Сила избыточного гидростатического давления, действующая на криволинейную поверхность (рисунок 3.1) определяется по формуле:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}, \quad (3.1)$$

где P_x , P_z – горизонтальная и вертикальная составляющие (проекции) силы избыточного гидростатического давления по соответствующим координатным осям OX и OZ , H .

Горизонтальная составляющая силы избыточного гидростатического давления определяется по формуле (2.1). При этом криволинейная поверхность AB (рисунок 3.1) проецируется на вертикальную плоскость YOZ в виде плоской вертикальной поверхности BB'' .

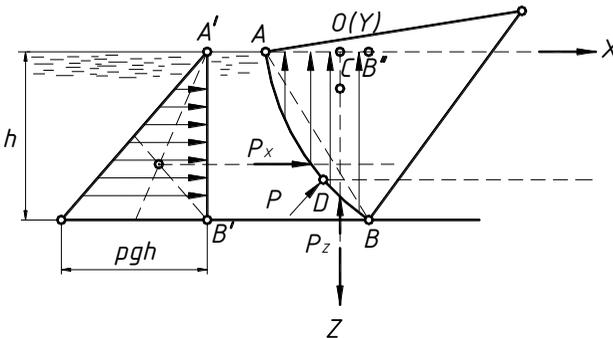


Рисунок 3.1 – К определению силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейную поверхность

Вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления определяется по зависимости:

$$P_2 = \rho g W, \quad (3.2)$$

где W – объем «тела давления», т. е. объем, ограниченный снизу криволинейной поверхностью AB , вертикальной плоскостью BB'' и свободной поверхностью AB'' (рисунок 3.1), м³.

Сила P направлена под углом φ , который находится по формуле:

$$\varphi = \arctg \frac{P_z}{P_x}, \quad (3.3)$$

Более подробно с действием силы избыточного гидростатического давления на криволинейную поверхность можно ознакомиться в справочной литературе [1, §2 – 12; §2 – 13; 2, §2,8; 3, §2 – 4; 4, глава 2; 5, §1,3; 6, §10].

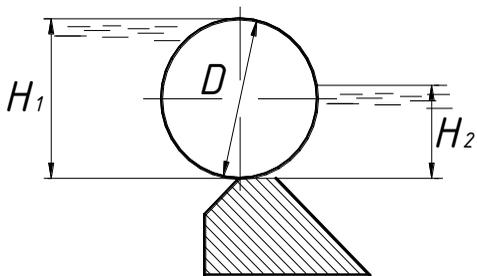
3.2 Условия к решению задач

Определить графоаналитическим способом силу избыточного гидростатического давления, действующую на криволинейные поверхности (рисунок 3.2) для вариантов $A, B, B, \Gamma, Д$ и E .

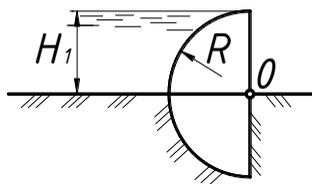
Условия для решения задач по определению силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейную поверхность, приводятся в таблице 3.

Таблица 3.1 – Исходные данные к решению задач по определению силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейные поверхности затворов

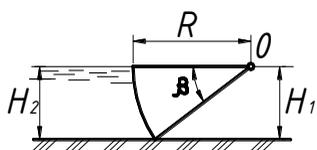
№ задания	Вариант	Напор, H_1 , м	Напор, H_2 , м	Диаметр, D , м	Радиус, R , м	Угол, β , град	Ширина затвора, b , м
1	А	4,00	2,00	4,00	-	-	2,00
2		5,00	1,00	6,00	-		3,00
3		6,00	4,00	8,00	-	-	4,00
4		7,00	3,00	7,00		-	5,00
5	Б	5,00	-	-	5,00	-	1,00
6		3,00	-	-	4,00	-	2,00
7		2,00	-	-	3,00	-	4,00
8		1,00	-	-	2,00	-	5,00
9	В	найти геометрически	-	-	2,00	15,00	2,00
10		найти геометрически	-	-	3,00	20,00	4,00
11		найти геометрически	-	-	4,00	25,00	6,00
12		найти геометрически	-	-	5,00	30,00	8,00
13	Г	найти геометрически	-	-	6,00	40,00	3,00
14		найти геометрически	-	-	7,00	45,00	5,00
15		найти геометрически	-	-	8,00	50,00	2,00
16		найти геометрически	-	-	9,00	60,00	4,00
17	Д	-	3,00	6,00	-	-	1,00
18		10,00	-	5,00	-	-	2,00
19		-	4,00	5,00	-	-	3,00
20		7,00	-	3,00	-	-	4,00
21		6,00	-	2,00	-	-	5,00
22	Е	3,00	-	-	1,00	-	2,00
23		-	5,00	-	2,00	-	4,00
24		7,00	-	-	3,00	-	6,00
25		-	8,00	-	4,00	-	8,00



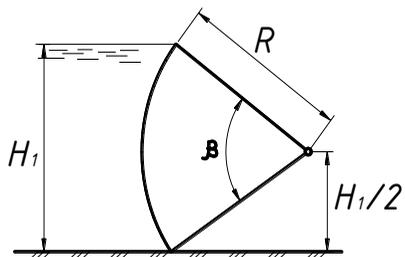
Вариант А



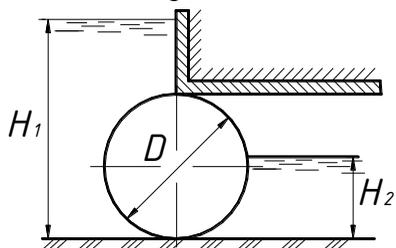
Вариант Б



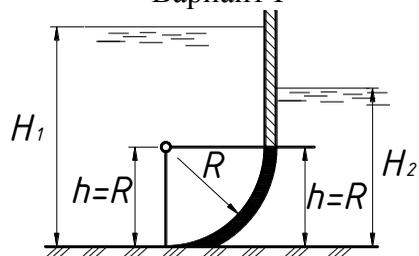
Вариант В



Вариант Г



Вариант Д



Вариант Е

Рисунок 3.2 – Схема к условиям на определение силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейные поверхности

3.3 Контрольные вопросы

1. По какой формуле вычисляется сила избыточного гидростатического давления, действующая на криволинейную поверхность?
2. Как определяются горизонтальная и вертикальная составляющие силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейную поверхность?
3. Как производится построение эпюры давления от действия вертикальной составляющей силы избыточного гидростатического давления? Понятие о теле давления?
4. В каких точках эпюр давления приложены горизонтальная и вертикальная составляющие силы избыточного гидростатического давления?
5. Как находятся точки приложения горизонтальной и вертикальной составляющей сил избыточного гидростатического давления? Как эти точки называются?
6. Как определяется точка приложения силы избыточного гидростатического давления, действующая на криволинейную поверхность?

4 ИСТИЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

4.1 Истечение из отверстия в атмосферу

Расход жидкости из малого отверстия определяется по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}, \quad (4.1)$$

где μ – коэффициент расхода отверстия;
 ω – площадь отверстия, м²;
 H – напор над центром тяжести отверстия, м.

Коэффициент расхода, входящий в формулу (4.1) зависит от коэффициентов скорости и сжатия, и теоретически определяется из соотношения:

$$\mu = \varepsilon\varphi, \quad (4.2)$$

где ε – коэффициент сжатия струи при истечении из отверстия;
 φ – коэффициент скорости.

При решении инженерных задач коэффициент расхода для круглых отверстий при числах Рейнольдса больше 10000 рекомендуется определять по эмпирической формуле:

$$\mu = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{Re}}, \quad (4.3)$$

где $Re = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu}$ – число Рейнольдса;
 d – диаметр отверстия, м;
 ν – кинематическая вязкость жидкости, с/м².

При истечении жидкости из отверстий любой формы, нужно различать совершенное и несовершенное сжатие; полное и неполное сжатие. В справочной литературе [1, §10 – 1, §10 – 2; 2, §10.1, §10.2, §10.3; 3, §5 – 2; 4, §5.1; 5, §3.1; 6, §51] приводится достаточно полное описание этих случаев истечения жидкости из малых отверстий.

4.2 Истечение из отверстия под уровень

Расход через затопление отверстие определяется по формуле

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gZ}, \quad (4.4)$$

где Z – гидравлический перепад, м.

Более точно расход через затопленное отверстие вычисляется по зависимости:

$$Q = \mu_3\omega\sqrt{2g(H_1 - H_2)}, \quad (4.5)$$

где μ_3 – коэффициент расхода при истечении через затопленное отверстие; H_1 и H_2 – напоры над центром тяжести отверстия соответственно перед ним и после него, м.

Коэффициент расхода при истечении через затопленное отверстие, рекомендуется определять по формуле А. Д. Альтшуля, которая приводится в литературе [3, §5 – 3; 4, §5.1].

4.3 Условия к решению задач на истечение жидкости из отверстий

Определить расход жидкости при истечении из различных по форме отверстий при постоянном напоре. Учесть температуру жидкости. Схемы истечения приводятся на рисунке 4.1.

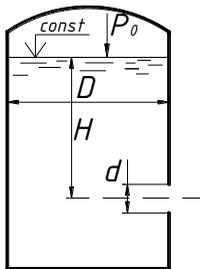
Данные для решения задач даются в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Исходные данные к решению задач по истечению из отверстий

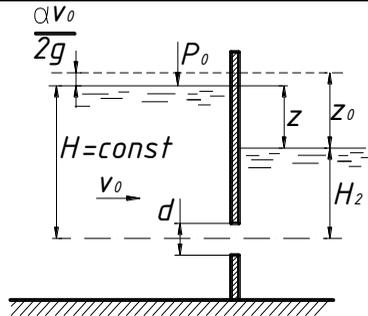
Номер задания	Вариант	Температура воды, °С	Напор $H, м$	Диаметр отверстия, $d, м$	Перепад, $Z, м$	Скорость под-хода, $v_0, м/с$	Давление $P_0, Мпа$	Диаметр, $D, м$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	А	10	5	10	-	-	0,5	1,5
2		20	8	20	-	-	0	2
3		30	3	15	-	-	1,7	3
4		40	1,5	5	-	-	0,9	4,5
5	Б	15	-	5	0,5	1,5	-	-
6		25	-	10	1,7	2	-	-
7		35	-	20	2,4	2,5	-	-
8		40	-	25	4,5	3,5	-	-
9	В (таб- лица 4.2)	4	6	-	-	-	-	-
10		16	4	-	-	-	-	-
11		26	3	-	-	-	-	-
12		32	2	-	-	-	-	-
13	Г	30	1	10	-	-	2	-
14		40	0,5	8	-	-	1,3	-
15		50	0,8	6	-	-	0,8	-
16		10	1,4	12	-	-	0,1	-
17	Д (таб- лица 5.2)	5	3	12	-	-	-	1
18		12	5	14	-	-	-	1,3
19		18	10	16	-	-	-	2,2
20		27	7	24	-	-	-	3,50
21	Е	14	-	3	-	0,7	0,1	0,1
22		18	-	5	-	0,9	0,15	0,15
23		22	-	7	-	1,5	0,2	0,2
24		30	-	99	-	2	0,4	0,25
25		25	-	12	-	2,5	0,6	0,3

Таблица 4.2 – Дополнительные сведения об отверстиях для вариантов В и Д

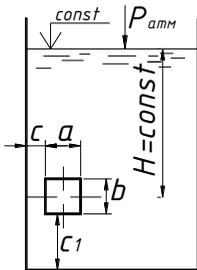
Номер задания	Размеры, м			
	a	b	c	c ₁
9	0,1	0,1	3 a	a
10	0,1	0,1	4 a	2a
11	0,15	0,3	0	0
12	0,2	0,2	a	2 a
17	-	-	0	-
18	-	-	0,1	-
19	-	-	0,3	-
20	-	-	0,5	-



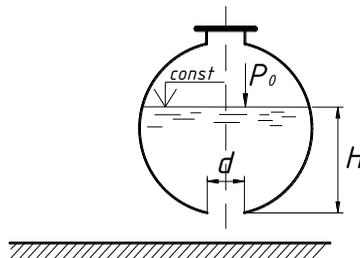
Вариант А



Вариант Б



Вариант В



Вариант Г

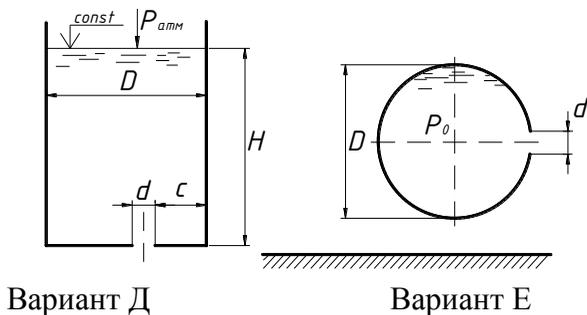


Рисунок 4.1 – Схемы к задачам на истечение жидкости из отверстий

4.4 Истечение из насадков

Расход при истечении жидкости из всех типов насадков определяется по общей формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}, \quad (4.6)$$

где μ – коэффициент расхода насадка, отнесенный к выходному отверстию;

ω – площадь выходного отверстия насадка, м^2 ;

H – напор над центром тяжести выходного отверстия насадка при истечении в атмосферу или разность уровней верхнего и нижнего уровней воды при затопленном истечении из насадка, м.

При решении практических задач на истечение из насадков наиболее сложным моментом является определение (выбор) коэффициента расхода. Для различных типов насадков в справочной литературе [4, §5.2 §5.7; §5.9; §5.11, с 68 – 94] приводятся данные по коэффициентам расхода. Для более полного представления об истечении жидкости через насадки необходимо ознакомиться с литературой [1, §10 – 6 §10 – 9; 2, §10.6 – §10.11].

4.5 Условия к решению задач на истечение жидкости из насадков

4.5.1 Определить диаметр водовыпуска (насадка) для варианта А (рисунок 5.2), устроенного в теле плотины для пропуска заданного расхода при известном напоре. Как изменится пропускная способность водовыпуска, если входную часть насадка сделать плавной с относительным радиусом округления входных кромок r/d ?

4.5.2 Как изменится расход и скорость истечения в атмосферу из резервуара для варианта Б (рисунок 4.2), если к отверстию присоединить насадки: внешний цилиндрический; внутренний цилиндрический; конический расходящийся; конический сходящийся; коноидальный или цилиндрический с радиальным входом (тип насадка принимается по варианту).

Данные к решению задач приводятся в таблице 4.3.

В таблице 4.4 даются характеристики различных типов насадков, а на рисунке 4.3 представлены различные типы насадков, которые используются в гидротехнике и мелиорации.

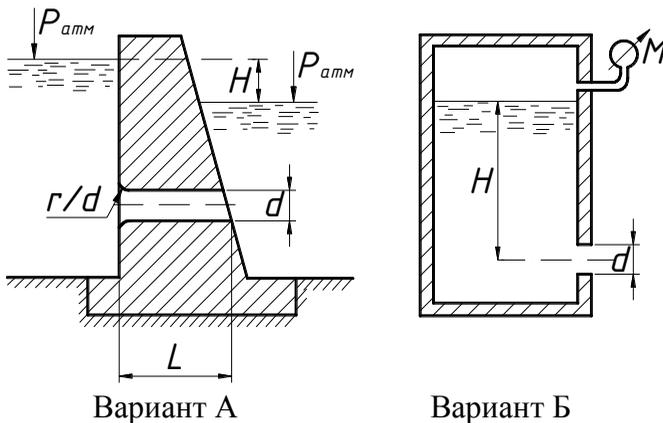


Рисунок 4.2 – Схемы к задачам на истечение жидкости из насадков

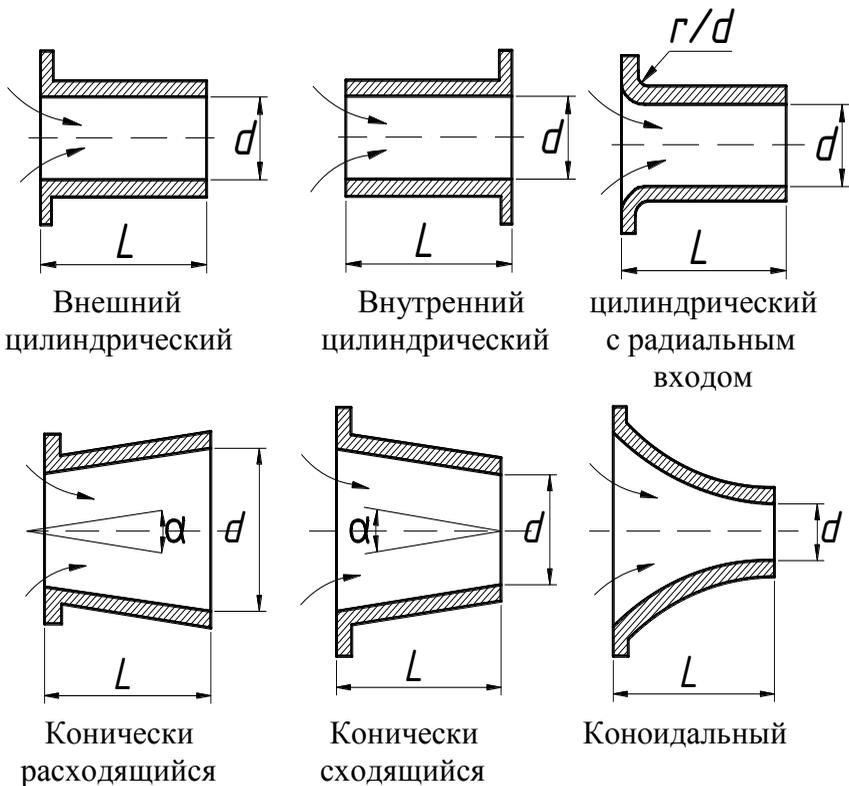


Рисунок 4.3 – Типы насадков

Таблица 4.3 – Данные к решению задач на истечение из насадков

Номер задания	Варианты расчетной схемы	Температура воды, °С	Напор, Н, м	Показание манометра, МПа	Тип и номер насадка	Расход, Q м/с	Размер, L, м	Отношение г/д
1	А	4	1	-	4	3,5	3	0,1
2		6	2	-	5	3	4	0,15
3		8	2,5	-	6	2,8	4,0	0,2
4		10	2,8	-	7	2,5	4,2	0,1
5		12	3	-	8	2	3,8	0,15
6		14	3,5	-	9	2,7	3,6	0,2
7		16	4	-	10	3,2	3,2	0,1
8		18	4,7	-	11	3,8	2,8	0,15
9		20	5	-	12	4,3	3,1	0,2
10		22	5,4	-	13	4,5	3,7	0,1
11		24	5,9	-	14	5	3,9	0,15
12		26	6,5	-	15	5,5	3,5	0,2
13	Б	28	0,8	0,1	17	-	-	-
14		30	1	0,09	18	-	-	-
15		32	1,5	0,08	16	-	-	-
16		34	2	0,07	1	-	-	-
17		36	2,5	0,07	2	-	-	-
18		38	2,8	0,06	3	-	-	-
19		40	3,5	0,05	4	-	-	-
20		5	3,7	0,05	5	-	-	-
21		10	4	0,05	6	-	-	-
22		15	4,5	0,04	7	-	-	-
23		20	4,8	0,03	8	-	-	-
24		25	5,2	0,05	9	-	-	-
25		35	5,5	0,06	10	-	-	-

Таблица 4.4 – Характеристики насадков

Номер насадка	Тип насадка	Диаметр, см	Длина, см	Угол конусности, град	Отношение r/d
1	Внешний цилиндрический	4	20	-	-
2		5	10	-	-
3		4	12	-	-
4	Внутренний цилиндрический	3	12	-	-
5		4	12	-	-
6		5	15	-	-
7	Конически расходящийся	5	10	5	-
8		4	12	8	-
9		3	12	14	-
10	Конически сходящийся	10	10	10	-
11		5	15	30	-
12		4	20	90	-
13	Коноидальный	4	20	-	-
14		5	20	-	-
15		5	15	-	-
16	Внешний цилиндрический с радиальным входом	3	12	-	0,1
17		4	12	-	0,15
18		5	15	-	0,2

4.6 Контрольные вопросы

1. Что называется малым отверстием? По каким параметрам малое отверстие отличается от большого отверстия? Что называется насадкам?
2. Что называется совершенным сжатием струи при истечении через отверстие?
3. Чем отличается полное сжатие струи от неполного сжатия при истечении через отверстие?

4. Чем отличается свободное истечение от истечения через затопленное отверстие?
5. По какой формуле определяется расход жидкости при свободном истечении?
6. Что называется коэффициентом расхода отверстия, насадка?
7. Как определяется коэффициент расхода отверстий и насадков при решении инженерных задач?
8. По какой формуле определяется расход жидкости при истечении через затопленное отверстие или затопленный насадок?
9. Где больше коэффициент расхода в отверстии или насадке?
10. Истечение при переменном напоре

5 ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ

5.1 Расчет коротких трубопроводов мелиоративных и водопроводных систем

5.2 Общие положения

Расход короткого трубопровода при истечении в атмосферу определяется по формуле:

$$Q = \mu_c \omega \sqrt{2gH}, \quad (5.1)$$

где μ_c – коэффициент расхода короткого трубопровода;
 ω – площадь выходного сечения трубопровода, м²;
 H – напор над центром тяжести выходного сечения, м

Расход короткого трубопровода при истечении под уровень вычисляется по формуле:

$$Q = \mu_c \omega \sqrt{2gZ}, \quad (5.2)$$

где Z – разность уровней, м.

Короткие трубопроводы в ряде случаев состоят из участков труб с разными диаметрами. Поэтому при расчете таких участков трубопроводов используется уравнение гидродинамики, которое называется уравнением неразрывности потока:

$$\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2, \quad (5.3)$$

Наиболее трудной задачей при расчете коротких трубопроводов является определение коэффициента расхода. Коэффициент расхода при истечении в атмосферу находится по зависимости:

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \sum \xi}} \quad (5.4)$$

при истечении под уровень

$$\mu_c = \frac{l}{\sqrt{\sum \xi}} \quad (5.5)$$

где α – коэффициент Кориолиса;
 $\sum \xi$ – суммарный коэффициент сопротивлений.

При определении суммарного коэффициента сопротивления короткого трубопровода необходимо учитывать область сопротивления, которая оказывает влияние на выбор и расчет коэффициентов сопротивлений. Так, например, в области «гидравлические гладкие трубы» коэффициент гидравлического трения можно вычислить по формуле Блазиуса, в области «квадратичного сопротивления» - по формуле Шифринсона.

Более подробно с расчетами коротких трубопроводов можно познакомиться в справочной литературе [1, §5 – 4. ..§5 – 11; 2, §10 – 13, §13 – 6;3, §5 – 6; 6, §54]

5.3 Условия к решению задач на истечение через короткие трубопроводы

Определить диаметр водопропускных трубопроводов при заданном расходе и перепаде уровней, если известны материал труб, их длина (рисунок 5.1) для вариантов А, Б и В. Построить в масштабе напорную и пьезометрическую линии.

Определить расход жидкости через короткие трубопроводы при заданном напоре и диаметрах, если известны материал трубопроводов, длина их участков (рисунок 5.1) для вариантов Г, Д, Е. Построить в масштабе напорную и пьезометрическую линии.

Исходные данные по гидравлическому расчету коротких трубопроводов приводятся в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Условия к решению задач на расчет коротких трубопроводов мелиоративных систем

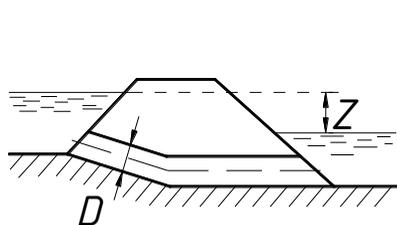
Номер задания	Вариант схемы трубопровода	Напор, H , м; перепад, Z , м	Расход, Q м ³ /с	Диаметр, D , м	Диаметр, D_1 , м	Длина, L , м	Длина L_1 , м	Угол, α , град	Показания прибора, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	А	0,3	1	-	-	15	-	30	-
2		0,4	1,5	-	-	20	-	45	-
3		0,5	1,8	-	-	25	-	30	-
4		0,6	1,9	-	-	30	-	45	-
5		0,7	2	-	-	35	-	60	-
6	Б	0,2	2,2	-	-	10	-	30	-
7		0,3	2,4	-	-	15	-	45	-
8		0,4	0,5	-	-	20	-	60	-
9		0,5	0,7	-	-	25	-	30	-
10	В	0,6	0,9	-	-	28	-	30	-
11		0,7	1,3	-	-	36	-	45	-
12		0,8	1,6	-	-	42	-	60	-
13		0,9	1,8	-	-	50	-	45	-

Продолжение таблицы 5.1

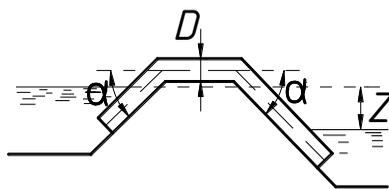
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	Г	1	-	0,15	0,1	20	20	8	0,1
15		1,5	-	0,2	0,15	25	40	7	0,08
16		2	-	0,25	0,15	30	50	6	0,05
17		2,5	-	0,3	0,2	35	55	5	0,04
18	Д	3	-	0,1	0,4	15	70	90	0,05
19		3,5	-	0,25	0,3	25	80	90	0,04
20		4	-	0,1	0,25	40	30	90	0,03
21		4,5	-	0,15	0,2	60	40	90	0,1
22	Е	5	-	0,1	-	30	20	2	0,07
23		5,5	-	0,15	-	40	30	5	0,08
24		6	-	0,2	-	50	40	6	0,09
25		6,5	-	0,25	-	60	20	8	0,02

Примечания:

1. На трубопроводе (вариант Е) установлена задвижка, которая полностью открыта.
2. Трубопроводы (варианты А, Б и В) водопускных сооружений выполнены из железобетона.
3. Трубопроводы (варианты Г, Д и Е) водопроводных систем стальные.



Вариант А



Вариант Б

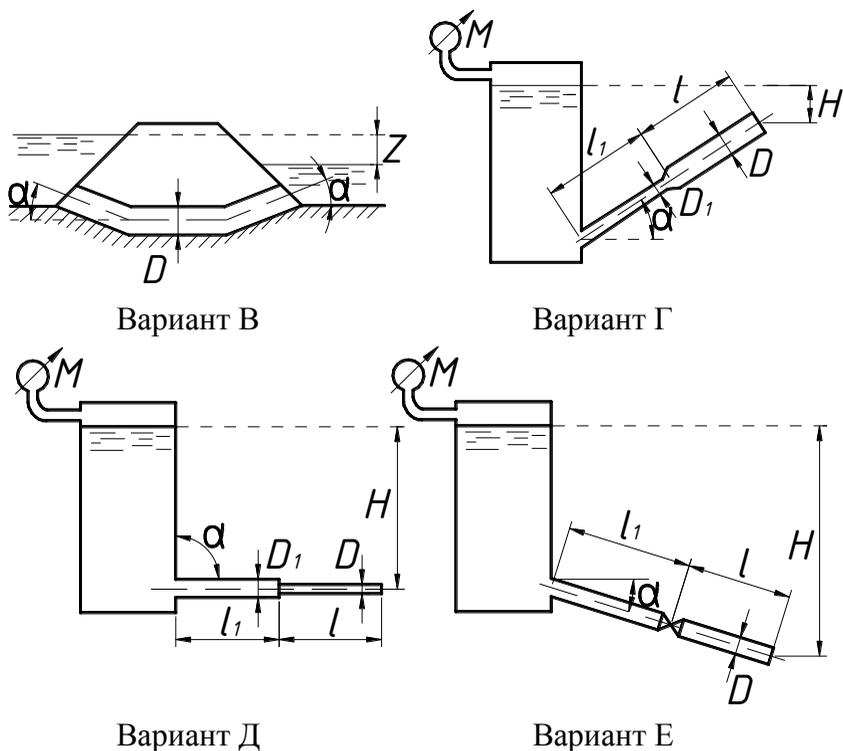


Рисунок 5.1 – Схема к решению задач на расчет коротких трубопроводов

5.4 Контрольные вопросы

1. Что называется коротким трубопроводом?
2. По каким формулам определяется расход при истечении через короткий трубопровод в атмосферу и под уровень?
3. Как определяется коэффициент расхода короткого трубопровода?

4. Как определяются коэффициенты местных сопротивлений?
5. От каких параметров зависит величина коэффициента местного сопротивления?
6. Как уравнение Д. Бернулли при расчете короткого трубопровода приводится к виду формулы (6.1) и (6.2)?
7. Какое уравнение гидродинамики дополнительно принимается при расчете коротких трубопроводов, состоящих из труб различных диаметров?
8. Физический смысл коэффициента гидравлического трения?
9. Как используются области сопротивления при турбулентном режиме, при определении коэффициента гидравлического трения?
10. Как устанавливаются границы между областями сопротивлений?

5.5 Расчет длинных трубопроводов мелиоративных и водопроводных систем

5.6 Общие положения

Потери напора в длинных трубопроводах определяется по одной из трех формул:

$$h = A l Q^2; \quad (5.6)$$

$$h = \frac{Q^2}{K^2} l; \quad (5.7)$$

$$h = i l, \quad (5.8)$$

где A – удельное сопротивление трубопровода, (с/м³)
 l – длина трубопровода, м;

Q – расход, м/с

K – расходная характеристика, м/с

i – гидравлический уклон.

Все три формулы (5.6), (6.7) и (5.8) дают один и тот же результат при определении потерь напора в длинных трубопроводах, так как удельное сопротивление, гидравлический уклон и расходная характеристика связаны между собой соотношениями:

– из формулы Дарси-Вейсбаха имеем:

$$h = \lambda \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} \frac{\omega^2}{\omega^2} = \frac{\lambda}{2gD\omega^2} lQ^2 = AlQ^2,$$

где $A = \frac{\lambda}{2gD\omega^2}$ – удельное сопротивление выражается через расходную характеристику:

$$A = \frac{\lambda}{2gD\omega^2} \frac{4}{4} = \frac{1}{\frac{8g}{2} \omega^2 \frac{D}{4}} = \frac{1}{c^2 \omega^2 R} = \frac{1}{K^2},$$

– подставляя значение удельного сопротивления в виде $\frac{1}{K^2}$ в формулу (5.6), получаем зависимость (5.7)

$$h = \frac{Q^2}{K} l.$$

– из формулы (5.7), имеем $h = il$, где $i = \frac{Q^2}{K^2}$.

Значения расходной характеристики и удельного сопротивления для трубопроводов из различных материалов приводятся в приложении (таблицы 1, 2, 3, 4) при скоростях потока 1 м/с. Если средние скорости движения жидкости в трубопроводах не равны 1 м/с, то значения удельного сопротивления и

расходной характеристики в формулах (5.6) и (5.7) умножаются на поправочные коэффициенты соответственно β и θ , значения которых приведены в таблицах 2а, 3а и 4а приложения.

При расчете длинных трубопроводов по формуле (6.8) используются таблицы, составленные Ф. А. Шевелевым, в которых даются значения $1000i$ (таблицы 5 и 6 приложения). Величина $1000i$ представляет собой потери напора h в метрах на километр трубопровода. Для вычисления потерь напора при помощи таблиц Ф. А. Шевелева необходимо воспользоваться формулой (5.8), которая будет иметь вид:

$$h = 1000i \cdot l, \quad (5.9)$$

где l – длина трубопровода в километрах.

Местные потери напора в длинных трубопроводах составляют от 5 до 10% от потерь напора по длине и учитываются коэффициентом $k = 1,05 - 1,10$.

Если не задан диаметр трубопровода, то он рассчитывается по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}, \quad (5.10)$$

где Q – расчетный расход трубопровода, м³/с
 v – экономически наиболее выгодная скорость движения воды в трубопроводе, (м/с), зависящая от расчетного расхода данной линии и полного расхода сети, а также от конфигурации сети и расположения участка на плане.

Потери напора на участках трубопроводов, где имеется равномерная раздача расхода по пути, определяются по формулам:

– на участках трубопроводов, где имеется транзитный расход, например, участок трубопровода l_{AB} (рисунок 5.2, вариант *Б*):

$$h = A l Q_p^2; \quad (5.11)$$

$$\text{здесь } Q_p = 0,55Q_{\Pi} + Q_{\text{ТР}},$$

где Q_p – расчетный расход на участке трубопровода с равномерной раздачей;

Q_{Π} – путевой расход (расход равномерно отделяется по пути трубопровода потребителям на данном участке);

$Q_{\text{ТР}}$ – транзитный расход (расход проходящий транзитом по данному участку трубопровода);

На участках трубопровода, где нет транзитного расхода, например, участок трубопровода l_{CD} (рисунок 5.2, вариант *А*), расчетный расход вычисляется по формуле:

$$Q_p = 0,55Q_{\Pi},$$

Примеры гидравлического расчета длинных трубопроводов приводятся в справочной литературе [1, с.236-240; 2, с.256-277; 3, с.76-84; 5, с.95-98; 7, с. 19-34]

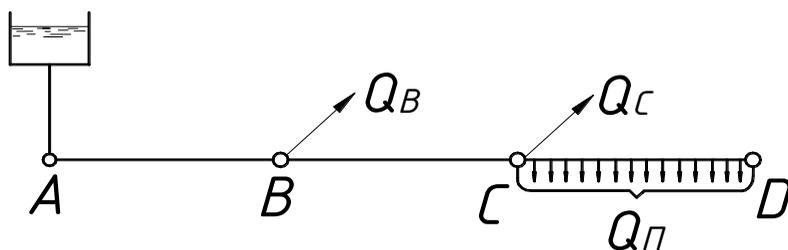
5.7 Условия к решению задач

5.7.1 Определить уровень воды в напорном баке системы водоснабжения, состоящей из трех участков трубопровода для вариантов *А, Б, В, Г, Д* и *Е* (рисунок 5.2). На участках трубопроводной сети имеются узловые отборы (узлы *В, С* и *Д*) и

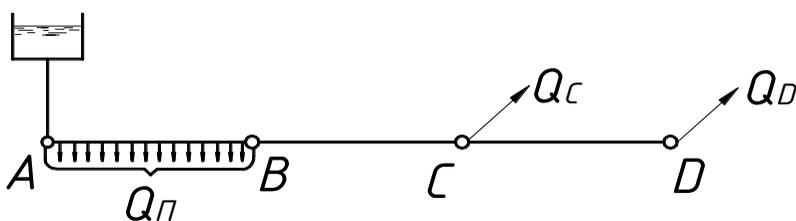
равномерная раздача расхода по пути. Материал труб и их длина, а также расход заданы в таблице 5.2. Расчетные схемы водопроводной сети приводятся на рисунке 5.2. Построить для рассчитанной водопроводной сети напорную линию.

5.7.2 Определить напор насосной установки закрытой мелиоративной трубопроводной сети, состоящей из трех участков с ответвлениями (рисунок 5.3), если известны расходы в узлах D , E и F , а также путевой расход. Материал труб и их длина приводится в таблице 5.3.

Для всех вариантов трубопроводной сети (рисунки 5.2 и 5.3) уклон трубопроводов принять равным нулю. Свободный напор в узле D равен $0,10$ Мпа.



Вариант А



Вариант Б

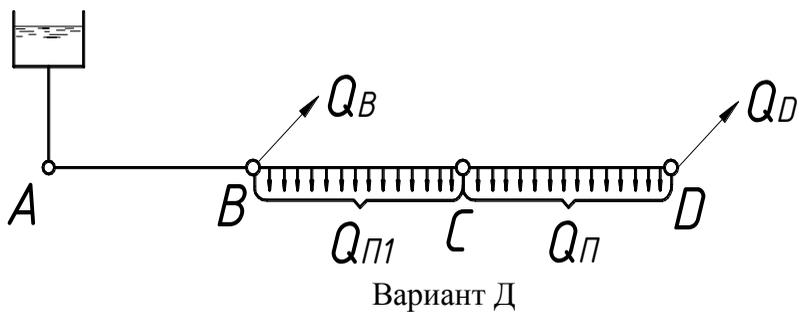
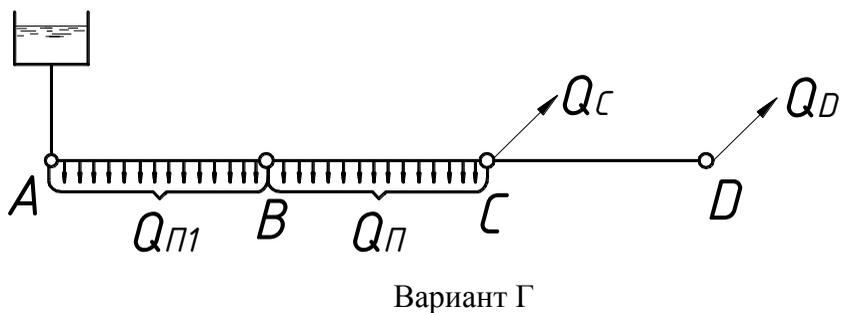
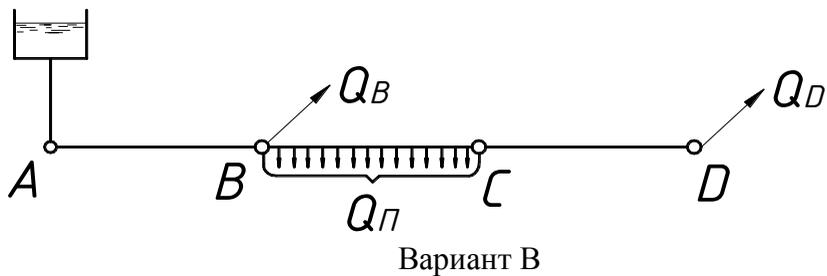


Рисунок 5.2 – Схема к решению задач на расчет длинный трубопроводов

Таблица 5.2 – Данные к решению задач на расчет длинных трубопроводов

Номер задания	Вариант расчетной схемы, формула для расчета	Материал труб	Длина участка, м			Расход, м ³ /с 10 ⁻³				
			l _{AB}	l _{BC}	l _{CD}	Q _B	Q _C	Q _D	Q _П	Q _м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	А (5.6)	Сталь	100	450	200	4	10	-	5	-
2			150	350	400	3	7	-	8	-
3			200	100	500	10	12	-	3	-
4			250	150	600	4	6	-	8	-
5			300	200	500	5	10	-	10	-
6	Б (5.7).	Чугун	350	450	150	-	5	10	5	-
7			400	300	200	-	4	8	10	-
8			450	150	350	-	3	7	10	-
9			100	250	500	-	6	8	5	-
10			150	300	600	-	8	4	7	-
11	В (5.8)	Пласт-масса	200	800	350	4	-	12	5	-
12			250	750	300	6	-	11	6	-
13			300	600	200	8	-	10	7	-
14			350	650	200	10	-	9	8	-
15			400	550	150	12	-	7	9	-
16	Г (5.6)	Асбесто-цемент	450	100	300	-	5	6	7	8
17			500	150	300	-	6	8	10	4
18			550	200	400	-	8	6	6	8
19			100	300	400	-	10	12	6	4
20			150	350	400	-	12	7	9	5
21	Д (5.7)	Сталь	200	300	400	5	-	10	4	10
22			250	400	500	10	-	8	5	10
23			300	600	300	12	-	6	10	4
24			350	200	300	10	-	4	8	6
25			400	100	300	8	-	5	9	7

Таблица 5.3 – Данные к решению задач на расчет длинных трубопроводов

Но- мер зада- ния	Вариант рас- четной схемы, формула для расчета	Мате- риал труб	Длина участка, м					Расход, м ³ /с·10 ⁻³			
			I _{AB}	I _{BC}	I _{CD}	I _{BE}	I _{CF}	Q _E	Q _F	Q _D	Q _П
1	А (5.6)	Сталь	100	200	300	350	480	-	4	12	10
2			200	280	350	450	600	-	5	10	12
3			120	240	500	600	800	-	8	5	15
4			800	550	200	290	350	-	10	4	7
5			300	120	180	400	280	-	12	3	8
6	Б (5.7)	Ас- бес- тоце- мент	200	300	400	500	600	5	-	10	5
7			100	200	350	580	600	6	-	11	10
8			250	350	410	480	500	7	-	12	15
9			350	380	470	510	150	8	-	13	10
10			310	420	350	500	200	9	-	14	5
11	В (5.8)	Чугун	150	100	380	430	500	4	11	6	10
12			200	300	500	350	400	5	10	7	11
13			350	150	100	200	180	7	9	8	12
14			380	210	450	300	320	9	7	9	13
15			250	300	500	600	400	10	4	7	14
16	Г (5.6)	Пласт- масса	100	200	800	600	100	4	-	11	7
17			200	250	700	500	400	6	-	9	8
18			300	380	600	400	350	8	-	7	9
19			400	420	500	300	150	10	-	5	10
20			500	550	400	200	350	12	-	4	11
21	Д (5.7)	Сталь	600	150	300	100	400	6	5	15	10
22			700	200	200	150	380	7	19	13	9
23			800	150	350	400	370	8	3	11	8
24			900	200	400	100	510	9	7	13	7
25			750	250	150	340	730	10	4	15	6

6 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБАХ

6.1 Общие положения

Прямой гидравлический удар бывает тогда, когда время закрытия задвижки t_3 , меньше фазы удара T , определяемой по формуле:

$$T = \frac{2l}{C_v}, \quad (6.1)$$

где l – длина трубопровода от места удара до сечения, в котором поддерживается постоянное давление (например, до резервуара больших размеров или до места присоединения к другому трубопроводу большего диаметра);

C_v – скорость распространения ударной волны в трубопроводе, определяемая по формуле Н.Е. Жуковского:

$$C_v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 + \frac{E d}{E_0 \delta}}}, \text{ м/сек} \quad (6.2)$$

где E – модуль объемной упругости жидкости; для воды $E = 2,07 \times 10^8$ кгс/см² ($2,03 \times 10^6$ кН/м²);

ρ – плотность жидкости (для воды $\rho = 102$ кгс · сек²/м⁴ = 1000 кг/м³ (1000 х Н х сек²/м⁴))

$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения звука в жидкости (для воды $\sqrt{\frac{E}{\rho}} = 1425$ м/сек);

E_0 – модуль упругости материала стенок трубы;

d – диаметр трубы;

δ – толщина стенок трубы.

Для воды отношение $\frac{E}{E_0}$ зависит от материала труб и может быть принято: для стальных труб – 0,01; для чугунных труб – 0,02; для полиэтиленовых труб – 1-1,45.

Повышение давления при *прямом* ударе определяется по формуле:

$$\Delta P = \rho C_v V_0, \quad (6.3)$$

где V_0 – скорость движения воды в трубопроводе до закрытия задвижки.

Если время задвижки больше фазы удара ($t_3 > T$), то такой удар называется *непрямым*. В этом случае дополнительное давление может быть определено по формуле:

$$\Delta P = \frac{2\rho C_v V_0}{t_3}, \quad (6.4)$$

Результат действия удара выражают также величиной повышения напора ΔH , которая равна:

при прямом ударе

$$\Delta H = \frac{C_v V_0}{g}, \quad (6.5)$$

при непрямом ударе

$$\Delta H = \frac{2C_v V_0}{gt_3}, \quad (6.6)$$

6.2 Условия к решению задач

Определить повышение давления в стальном трубопроводе, если в его конце будет закрыта задвижка, (для вариантов 1-5).

Определить повышение напора в полиэтиленовом трубопроводе при гидравлическом ударе в трубопроводе, (для вариантов 6-10).

Определить необходимое время закрытия задвижки в конце чугунного водовода, (для вариантов 11-20).

Определить скорость движения воды в стальном трубопроводе до закрытия задвижки, (для вариантов 21-25).

Таблица 6.1 – Данные к решению задач по определению гидравлического удара в трубах

Номер варианта	l, м	Q, м ³ /с	d, м	δ, м	t ₃₁ , сек	t ₃₂ , сек	ΔP, кгс/см ²
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2000	0,028	0,200	0,006	-	-	-
2	2050	0,029	0,210	0,007	-	-	-
3	2100	0,030	0,220	0,008	-	-	-
4	2150	0,031	0,230	0,009	-	-	-
5	2200	0,032	0,240	0,010	-	-	-
6	1500	0,010	0,150	0,0095	6	2	-
7	1520	0,011	0,160	0,009	7	3	-
8	1540	0,012	0,170	0,008	8	4	-
9	1560	0,013	0,180	0,007	9	5	-
10	1580	0,014	0,190	0,006	10	6	-
11	600	0,120	0,350	0,012	-	-	2,5
12	650	0,125	0,360	0,0125	-	-	2,6
13	700	0,130	0,370	0,013	-	-	2,7
14	750	0,135	0,380	0,0135	-	-	2,8
15	800	0,140	0,390	0,014	-	-	2,9
16	850	0,150	0,400	0,0145	-	-	3,0
17	900	0,160	0,410	0,015	-	-	3,1
18	950	0,170	0,420	0,0155	-	-	3,2
19	1000	0,180	0,430	0,016	-	-	3,3
20	1050	0,190	0,440	0,0165	-	-	3,4
21	900	-	0,080	0,005	-	-	5,0
22	920	-	0,090	0,0055	-	-	5,1

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
23	940	-	0,010	0,006	-	-	5,3
24	960	-	0,011	0,0065	-	-	5,4
25	980	-	0,012	0,007	-	-	5,5

6.3 Контрольные вопросы

1. Что называется гидравлическим ударом в трубах?
2. Какие гидравлические удары бывают?
3. По какой формуле записывается скорость распространения ударной волны в трубопроводе (формула Н.Е. Жуковского)?
4. По какой формуле записывается повышение давления при прямом ударе?
5. По какой формуле записывается повышение давления при непрямом ударе?

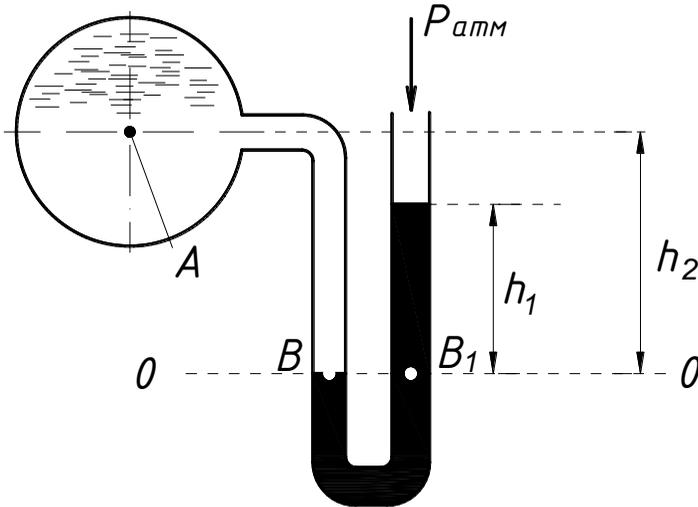
Список литературы

1. Гидравлика: учебник для вузов / Р. Р. Чугаев – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
2. Гидравлика: учебник для вузов / Д. В. Штеренлихт – М.: Энергоиздат, 1984. – 640 с.
3. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. – 312 с.
4. Справочник по гидравлике для мелиораторов / П. М. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. М.: Колос, 1984. – 207 с.
5. Сборник задач по гидравлике: учебное пособие для вузов / под ред. В. А. Большакова. – Киев.: Вища школа, 1979. – 336 с.
6. Гидравлика: учебник для вузов / Богомолов А. И., Михайлов К. А. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

Примеры решения задач

1. Определение гидростатического давления

Задача. Для схемы, представленной на рисунке, определить гидростатическое давление в точке A водопровода с помощью ртутного манометра, если $h_1 = 0,4$ м, а $h_2 = 2,5$ м.



Решение. Трубопровод и присоединенный к нему ртутный манометр образуют систему сообщающихся сосудов. Согласно закону сообщающихся сосудов в любой точке любой горизонтальной плоскости гидростатическое давление будет одинаковым. Пусть горизонтальная плоскость 0-0 проходит через точку B , находящуюся на границе ртуть-вода. Тогда давление в точке B_1 , погруженной в ртуть на глубину h_1 и лежащей в плоскости 0-0 составит:

$$p_{B_1} = p_B, \quad (1)$$

Согласно формуле (1.3) имеем:

$$p_{B_1} = p_{ат} + \rho_{рт}gh_1, \quad (2)$$

$$p_B = p_A + \rho gh_1,$$

Приравнявая, согласно (1), правые части уравнений (2) получим:

$$p_{ат} + \rho_{рт}gh_1 = p_A + \rho gh_2,$$

откуда, искомое давление в точке А составит:

$$p_A = p_{ат} + \rho_{рт}gh_1 - \rho gh_2, \quad (3)$$

при $p_{ат} = 98100 \text{ Н/м}^2$, $\rho_{рт} = 13600 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ получим :

$$\begin{aligned} p_A &= 98100 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,4 - 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,5 = \\ &= 126941,4 \text{ (Н/м}^2\text{)}, \end{aligned}$$

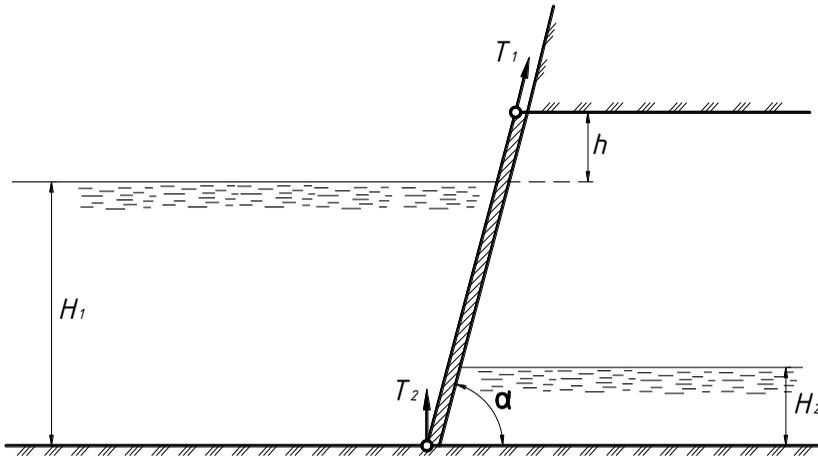
Выразить вычисленное давление p_A в м. вод. ст., мм. рт. ст. и кг/см^2 рекомендуется самостоятельно.

2. Определение силы избыточного гидростатического давления, действующей на плоские стенки

Задача. Определить графоаналитическим способом силу избыточного гидростатического давления, действующую на плоский прямоугольный затвор, схема которого показана на рисунке ниже, если $H_1 = 4,2 \text{ м}$, $H_2 = 1,2 \text{ м}$, $h = 1,0 \text{ м}$, $\alpha = 75^\circ$, ширина перекрываемого затвором отверстия $L = 6,0 \text{ м}$.

Определить начальное усилие T_1 , которое необходимо создать для преодоления этой силы, если затвор открывается сдвигом вдоль перекрываемого отверстия (коэффициент трения в направляющих пазах принять $f_{mp} = 0,1$).

Определить начальное вертикально направленное усилие T_2 , которое необходимо создать для преодоления силы гидростатического давления, действующей на затвор, если при подъеме затвор поворачивается вокруг шарнира O (коэффициентом трения в шарнире пренебречь).

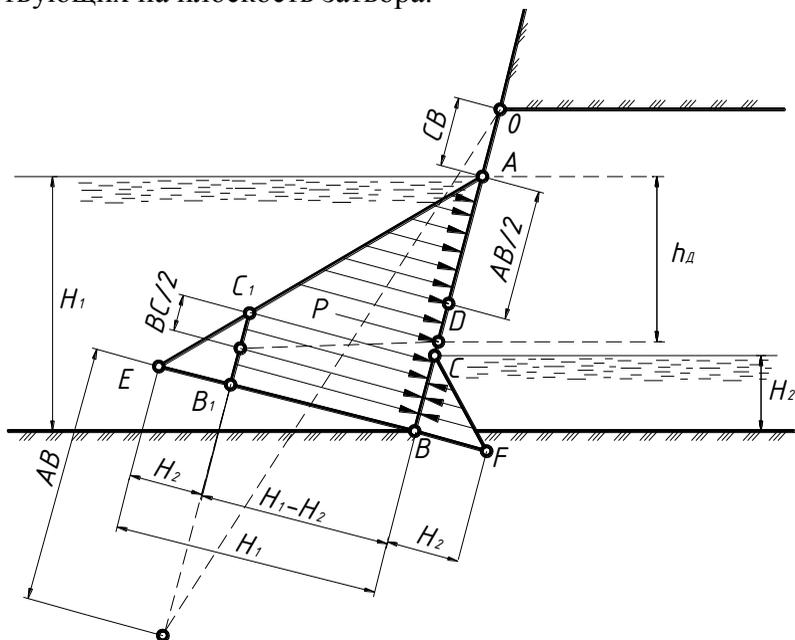


Решение. Закон распределения избыточного гидростатического давления выражается линейной зависимостью (2.1). Этот факт создает условия для определения силы избыточного гидростатического давления, действующей на плоские прямоугольные стенки, графоаналитическим способом.

Приняв условно коэффициент уравнения прямой равным единице, т. е. $k = \rho g = 1$, задачу можно решить в следующем порядке.

После вычерчивания в масштабе схемы гидротехнического сооружения (см. рисунок ниже) в самой нижней точке B строится перпендикуляр к плоскости затвора. Радиусами H_1 и H_2 из точки B на этом перпендикуляре делаются засечки BE и

BF. Точка *E* соединяется прямой линией с точкой *A* (контакт уровня верхнего бьефа с затвором), а точка *F* с точкой *C* (контакт уровня нижнего бьефа с затвором). Полученные треугольники *ABE* и *CFB* представляют собой масштабированные эпюры сил избыточного гидростатического давления, действующих на плоскость затвора.



Силы давления направлены навстречу друг другу. Для получения результирующей эпюры треугольник *CFB* «вычитается» из треугольника *ABE*. В итоге эпюра силы избыточного гидростатического давления, действующей на затвор, выразится трапецией *ABB₁C₁*. Площадь этой трапеции пропорциональна результирующему избыточному гидростатическому давлению, а объем, (т. е. произведение площади на ширину перекрываемого затвором отверстия) - полному избыточному гидростатическому давлению, действующему на затвор.

По результатам графических построений можно вычислить численное значение силы P полного избыточного гидростатического давления, действующей на затвор. Она составит:

$$P = \frac{B_1 C_1 + AB}{2} \cdot (H_1 - H_2) \cdot L \cdot \rho g, \quad (4)$$

где $\frac{(B_1 C_1 + AB)}{2} + (H_1 - H_2)$ – выражение площади трапеции, m^2 ;

L – ширина перекрываемого затвором водотока, m

ρg – истинные значения коэффициента уравнения прямой.

После подстановки численных величин в выражение (4) получим:

$$\begin{aligned} P &= \frac{H_2 + H_1}{2 \sin \alpha} \cdot (H_1 - H_2) \cdot L \cdot \rho g = \\ &= \frac{1,2 + 4,2}{2 \sin 75^\circ} \cdot (4,2 - 1,2) \cdot 6,0 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 493584,5 (H), \end{aligned}$$

Здесь сумма оснований трапеции получена не простым измерением, а аналитически. Простое измерение с учетом масштаба необходимо для текущего контроля.

Для решения некоторых прикладных задач гидротехники требуется знать местоположение точки приложения результирующей силы избыточного гидростатического давления, центра давления.

Результирующая сила избыточного гидростатического давления всегда проходит через центр тяжести результирующей эпюры избыточного давления по нормали к рассматриваемой поверхности, (т. е. перпендикулярно плоскости затвора).

Графически определяем местоположение центра тяжести трапеции ABB_1C_1 (порядок действий легко понять из прилагаемого выше рисунка) и через него перпендикулярно плоскости затвора проводим линию. Точка пересечения этой линии с

плоскостью затвора D есть искомый центр давления. Прямым измерением на чертеже определяем глубину погружения центра давления

$$h_D = 2,65 \text{ м,}$$

В заключение определяются начальные подъемные усилия T и T_1 для различных способов открытия затвора.

Если затвор открывается простым сдвигом в направляющих пазах, то начальное подъемное усилие составит:

$$T = P \cdot f_{mp} = 493584,5 \cdot 0,1 = 49358,45(\text{Н}),$$

что соответствует 5,03 тоннам.

Если затвор открывается поворотом вокруг оси O , то для определения начального подъемного усилия потребуется составить уравнение моментов сил, действующих на затвор, относительно оси его вращения.

$$\begin{aligned} \sum M &= 0; \\ P \cdot l_1 - T_1 \cdot l_2 &= 0, \end{aligned}$$

откуда

$$T_1 = P \cdot \frac{l_1}{l_2},$$

где l_1 - плечо действия силы P относительно точки O , т. е. длина перпендикуляра, опущенного из точки O на линию действия силы P ;

l_2 - плечо действия силы T_1 относительно точки O , т. е. длина перпендикуляра, опущенного из точки O на линию действия силы T_1 .

Из геометрии чертежа определяем:

$$l_1 = \frac{h_D + h}{\sin \alpha} = \frac{2,65 + 1,0}{\sin 75^\circ} = 3,78 \text{ (м)},$$

$$l_2 = \frac{H_1 + h}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{4,2 + 1,0}{\operatorname{tg} 75^\circ} = 1,39 \text{ (м)},$$

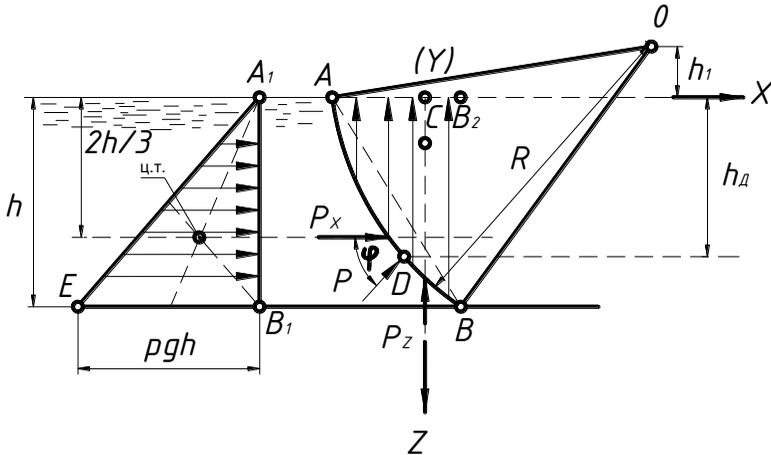
Подставив вычисленные значения плеч в выражение (5) получим:

$$T_1 = 493584,5 \cdot \frac{3,78}{1,39} = 1342265,76 \approx 1342266 \text{ (Н)},$$

что соответствует почти 137 тоннам!

3. Определение силы избыточного гидростатического давления, действующей на криволинейные поверхности

Задача. Определить графоаналитическим способом силу избыточного гидростатического давления, действующую на криволинейный затвор, показанный на рисунке, если $h = 2,6$ м, $h_1 = 0,7$ м, $R = 4,0$ м, ширина перекрываемого затвором водотока $L = 4,0$ м.



Решение. Сила избыточного гидростатического давления, действующая на криволинейную поверхность, складывается из двух составляющих: горизонтальной P_x и вертикальной P_z (3.1). Задача обычно решается для единичной ширины перекрываемого потока, т. е. $L = 1,0$ м, а затем итоговый результат перемножается на действительную ширину.

Для определения горизонтальной составляющей P_x криволинейную поверхность затвора AB проецируют на вертикальную плоскость и в итоге получают её разрез в виде прямой линии A_1B_1 . По аналогии с задачей 2 строится эпюра силы избыточного гидростатического давления, действующей на плоскую поверхность A_1B_1 . Площадь этой эпюры соответствует численному значению горизонтальной составляющей:

$$P_x = \rho g h \frac{h}{2} = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{2,6^2}{2} = 33157,8 \text{ (Н/1 п.м ширины)}$$

Для определения численного значения вертикальной составляющей P_z используется формула (3.2). Обычно трудности возникают здесь при определении объема тела давления, но они легко преодолеваются при внимательном изучении геометрии чертежа.

К примеру, в рассматриваемой задаче площадь поперечного сечения тела давления (криволинейный треугольник AB_2B) может быть вычислена как сумма площадей треугольника AB_2B и сегмента AB .

В большинстве случаев центральный угол α , стягивающий смоченную дугу AB , неизвестен. Из геометрии чертежа следует:

$$\begin{aligned} AB_2 &= \sqrt{R^2 - h_1^2} - \sqrt{R^2 - (h + h_1)^2} = \\ &= \sqrt{4^2 + 0,7^2} - \sqrt{4^2 - (2,6 + 0,7^2)} = 1,68 \text{ (м)}; \end{aligned}$$

$$AB = \sqrt{(AB_2)^2 + h^2} = \sqrt{1,68^2 + 2,6^2} = 3,10 \text{ (м)};$$

$$\alpha = 2\arcsin \frac{AB}{2R} = 2\arcsin \frac{3,10}{2 \cdot 4,0} = 45,6^\circ.$$

Площадь сегмента AB определится как разность площадей сектора OAB и треугольника OAB , т. е.:

$$\begin{aligned} S_{\text{сегм}} &= \frac{\pi R^2 \alpha}{360^\circ} - \frac{1}{2} R^2 \sin \alpha = \\ &= \frac{3,14 \cdot 4^2 \cdot 45,6^\circ}{360^\circ} - \frac{4^2 \sin 45,6^\circ}{2} = 0,648 \text{ (м}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Площадь треугольника AB_2B :

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} (AB_2) \cdot h = \frac{1,68 \cdot 2,6}{2} = 2,184 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким образом, объем тела давления на единицу ширины перекрываемого водотока составит:

$$W = (S_{\text{сегм}} + S_{\Delta}) \cdot h = \frac{1,68 \cdot 2,6}{2} = 2,184 \text{ (м}^2\text{)}.$$

а вертикальная составляющая силы избыточного гидростатического давления по формуле (3.2):

$$P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,832 \approx 27782 \text{ (Н/ 1 пог. м)}.$$

По формуле (3.1) определяется сила избыточного гидростатического давления, действующая на 1 погонный метр ширины затвора

$$P_{\text{затв}} = P \cdot L = 43258 \cdot 4,0 = 173032 \text{ (H)} \text{ или } 17,6 \text{ тонн.}$$

Угол φ направления силы P составит:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{P_z}{P_x} = \operatorname{arctg} \frac{27782}{33158} = 39,96^\circ = 39^\circ 57,5'.$$

Относительно оси вращения затвора (точки O) центр давления D (точка приложения силы P) погружен на глубину:

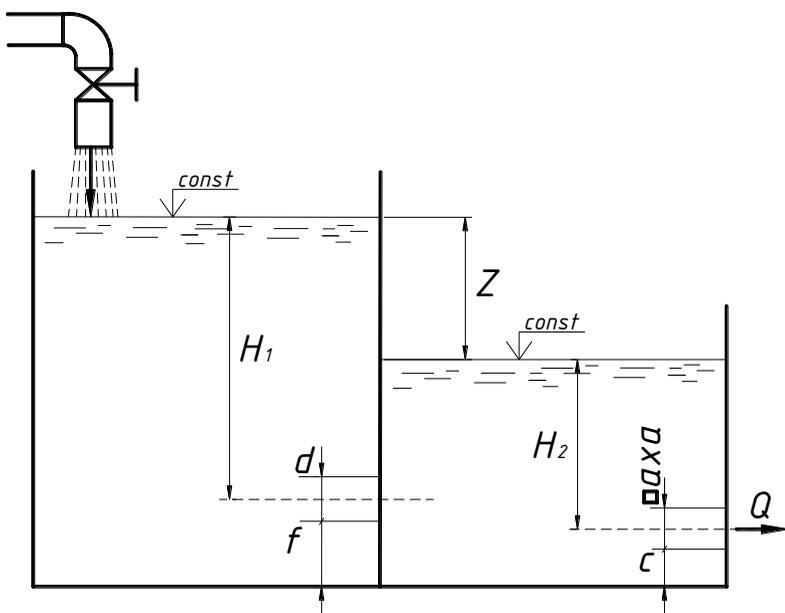
$$H_{\text{д}} = R \cdot \sin\varphi = 4 \cdot \sin 39,96^\circ = 2,57 \text{ (м)},$$

а относительно уреза воды на глубину

$$h_{\text{д}} = H_{\text{д}} - h_1 = 2,57 - 0,70 = 1,87 \text{ (м)}$$

4. Истечение жидкостей из отверстий

Задача. Определить диаметр d отверстия в перегородке резервуара из условия сохранения «равновесия» системы показанной на рисунке, если: $H_1 = 6,0 \text{ м}$; $H_2 = 3,0 \text{ м}$; сторона квадратного отверстия во внешней стенке $a = 0,12 \text{ м}$; $c = 0,25 \text{ м}$; $f = 3,5d$; ширина внешней стенки, (в которой выполнено квадратное отверстие), $L = 1,0 \text{ м}$.



Решение. Условие равновесия рассматриваемой гидравлической системы означает, что расходы через отверстия во внутренней перегородке и внешней стенке равны.

Расход через отверстие во внешней стенке определится по формуле (4.1). Отверстие расположено достаточно близко к дну резервуара ($c < 3a$), следовательно, имеет место несовершенное сжатие вытекающей струи. Коэффициент расхода отверстия в тонкой стенке ($\mu = 0,62$) в этом случае изменится и его следует определить по формуле:

$$\mu_{\text{нес}} = \mu \cdot \left[1 \div 0,64 \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \right],$$

где ω - площадь отверстия, м^2 ;

Ω - площадь смоченной поверхности стенки, в которой выполнено отверстие, м^2 .

Из геометрии чертежа:

$$\Omega = L \cdot \left(H_2 + c + \frac{a}{2} \right) = 1 \cdot \left(3 + 0,25 + \frac{0,12}{2} \right) = 3,31 \text{ (м}^2\text{)},$$

следовательно

$$\mu_{\text{нес}} = 0,62 \cdot \left[1 + 0,64 \left(\frac{0,12}{3,31} \right)^2 \right] = 0,62.$$

Площадь смоченной стенки, в которой выполнено отверстие, несоизмеримо больше площади отверстия поэтому несовершенное сжатие практически не повлияло на величину коэффициента расхода.

По формуле (4.1) определяем:

$$Q = \mu_{\text{нес}} \cdot a^2 \cdot \sqrt{2gH_2} = 0,62 \cdot 0,12^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,0} = 0,0685 \text{ (м}^3\text{/с)}$$

Для сохранения «равновесия» системы расход через отверстие в перегородке должен быть точно таким же. Из формулы истечения под уровень (4.4) следует, что для обеспечения этого расхода площадь отверстия должна быть равна:

$$\omega = \frac{Q}{\mu \sqrt{2gZ}}$$

где $\mu = 0,62$ – коэффициент расхода отверстия в тонкой стенке, (так как сжатие совершенное);

Z – перепад уровней, м

Учитывая, что $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, выражение для определения искомого диаметра примет вид:

$$d = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\mu\sqrt{2gZ}}}$$

в которой из геометрии чертежа перепад Z составит:

$$\begin{aligned} Z &= H_1 + \frac{d}{2} + f - H_2 - \frac{a}{2} - c = \\ &= H_1 + \frac{d}{2} + 3,5d - H_2 - \frac{a}{2} - c = \\ &= 6 + 4d - 3 - \frac{0,12}{2} - 0,25 = 2,69 + 4d. \end{aligned}$$

Таким образом, окончательное выражение для определения диаметра отверстия в перегородке принимает вид:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\mu\sqrt{2g(2,69 + 4d)}}}$$

Или после подстановки в правую часть численных значений известных величин:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0685}{3,14 \cdot 0,62 \sqrt{2 \cdot 9,81(2,69 + 4d)}}} = \sqrt{\frac{0,178254}{\sqrt{2,69 + 4d}}}$$

Присутствие искомого d в знаменателе правой части данного выражения означает, что кратчайшее решение можно найти способом итераций (последовательных приближений).

Составим небольшую таблицу фиксации итераций (приближений). Расчет (определение d) выполним с точностью до

0,0001 м, то есть до тех пор, пока результаты во второй и третьей колонках таблицы не будут различаться более чем на 0,0001 м

№ приближения	d, м	$\sqrt{\frac{0,178254}{2,69 + 4d}}$
1	0,1	0,3184
2	0,3184	0,2992
3	0,2992	0,3007
4	0,3007	0,3006
5	0,3006	0,3006

Пусть в первом приближении $d = 0,1$ м. Тогда, подставив это значение в выражение в третьей колонке таблицы, получим 0,3184. Во втором приближении принимаем, что d равно именно этому значению, т.е. 0,3184.

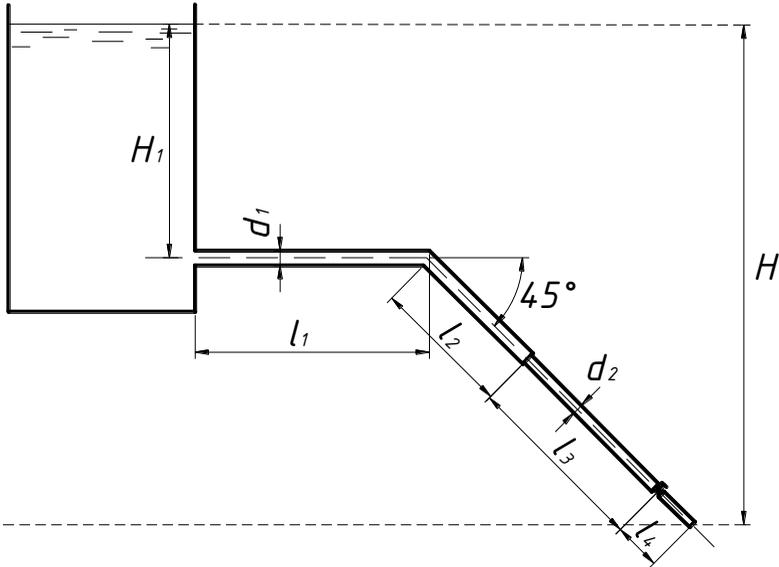
После подстановки этого значения в знаменатель выражения третьей колонки таблицы получим 0,2992. Результаты во второй и третьей колонках различаются более чем на 0,0001. Поэтому продолжаем выполнять приближения.

После вычислений четвертого приближения можно принять, что диаметр должен равняться 0,3006 м. Для контроля выполняем пятое приближение и убеждаемся, что для сохранения «равновесия» системы диаметр в перегородке должен равняться 0,3006 м.

5. Расчет коротких трубопроводов

Задача. Определить расход воды через систему коротких новых стальных трубопроводов ($k_3 = 0,03$ мм = 0,00003 м), показанных на рисунке, при температуре 20° С ($\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Построить' в масштабе напорную и пьезометрическую линию, если $H_1 = 5,0$ м, $d_1 = 150$ мм; $d_2 = 100$ мм; $l_1 = 5,0$ м, $l_2 = 3,0$ м, $l_3 = 4,0$ м $l_4 = 1,0$ м; задвижка открыта полностью.



Решение. К коротким трубопроводам относят такие трубопроводы, в которых суммарные потери напора в местных гидравлических сопротивлениях соизмеримы с потерями напора по длине, то есть превышают 10 % от потерь напора по длине.

Для определения расхода жидкости через заданную систему воспользуемся формулой (6.1). Предварительно из геометрии чертежа определим напор над центром тяжести выходящего отверстия:

$$\begin{aligned}
 H &= H_1 + (l_2 + l_3 + l_4) \cdot \sin 45^\circ = \\
 &= 5 + (3 + 4 + 1) \cdot \sin 45^\circ = 10,66(\text{м}).
 \end{aligned}$$

Суммарный коэффициент сопротивления системы коротких трубопроводов, входящий в формулу коэффициента расхода (6.4), следует вычислить по формуле:

$$\sum \xi = \sum \xi_{\text{местн.}} + \sum \xi_{\text{дл.}}$$

где $\sum \xi_{\text{местн.}}$ – сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений по длине системы трубопроводов.

где $\sum \xi_{\text{дл.}}$ – сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений по длине системы трубопроводов.

Местные гидравлические сопротивления в рассматриваемой системе коротких трубопроводов представлены (по ходу движения воды):

- вход в трубопровод ($\xi_{\text{вх.}}$),
- колено под углом 45° ($\xi_{\text{кол.}}$);
- внезапное сужение трубопровода ($\xi_{\text{вн.с}}$);
- полностью открытая задвижка ($\xi_{\text{зад.}}$).

При определении коэффициента расхода системы по формуле (5.4) следует помнить, что значения всех коэффициентов сопротивлений (местных и по длине), входящих в выражение должны быть отнесены к скорости в выходном отверстии. Пересчет численных значений осуществляется путем перемножения справочной величины на поправочный коэффициент f определяемый из условия неразрывности (5.3) по формуле:

$$f = \left(\frac{d_{\text{вых}}}{d_i} \right)^4,$$

где $d_{\text{вых}}$ – диаметр выходного отверстия;

d_i – диаметр трубопровода, скорость движения воды в котором является определяющей при вычислении потерь напора.

В рассматриваемом примере потери напора на входе, на колене и по длине первого трубопровода должны определяться по скорости движения воды первом участке трубопровода $(l_1 + l_2)$. Все остальные потери определяются по скорости на втором участке, то есть по скорости в выходном отверстии.

Вычисляем значение поправочного коэффициента:

$$f = \left(\frac{0,10}{0,15} \right)^4 = 0,20.$$

Из справочных данных имеем:

$$\xi_{\text{вх}} = 0,50 \text{ или относительно скорости на выходе } - 0,10;$$

$$\xi_{\text{кол}} = 0,35 \text{ или относительно скорости на выходе } - 0,07;$$

$$\text{при } \frac{\omega_2}{\omega_1} = (d_2 - d_1)^2 = (100/150)^2 = 0,44 \rightarrow \xi_{\text{вн.с}} = 0,28;$$

$$\xi_{\text{зад}} = 0,12.$$

Сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений по длине системы трубопроводов, представленной трубопроводами двух диаметров, определится по формуле:

$$\sum \xi_{\text{дл}} = \lambda_1 \frac{l_1 + l_2}{d_1} + \lambda_2 \frac{l_3 + l_4}{d_2},$$

Предположим, что движение воды в системе трубопроводов проходит в квадратичной области сопротивления, тогда по формуле Б. Л. Шифринсона:

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{k_э}{d_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,03}{150} \right)^{0,25} = 0,013 \text{ или после}$$

приведения к скорости в выходном отверстии $\lambda_1 = 0,0026$;

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{k_э}{d_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,03}{100} \right)^{0,25} = 0,0145,$$

Таким образом

$$\begin{aligned}\sum \xi &= 0,1 + 0,07 + 0,28 + 0,12 + \frac{0,0026 \cdot 8}{0,15} + \\ &+ \frac{0,0145 \cdot 5}{0,10} = 1,43,\end{aligned}$$

Следовательно, по формуле (5.4)

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha = \sum \xi}} = \frac{1}{\sqrt{1,05 + 1,43}} = 0,635,$$

По формуле (5.1) находим:

$$\begin{aligned}Q &= \mu_c \omega_2 \sqrt{2gH} = \\ &= 0,635 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,10^2}{4} = \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 10,66} = 0,072 \text{ (м}^3/\text{с)},\end{aligned}$$

Проверим область сопротивления движению воды в трубе с максимальным диаметром:

$$\begin{aligned}Re_1 &= \frac{v_1 d_1}{\nu} = \frac{4Qd_1}{\pi d_1^2 \cdot \nu} = \frac{4Q}{\pi d_1 \cdot \nu} = \\ &= \frac{4 \cdot 0,072}{3,14 \cdot 0,15 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}} = 605410,\end{aligned}$$

$Re_1 \frac{k_3}{d_1} = 605410 \frac{0,00003}{0,15} \approx 101$, что соответствует переходной зоне сопротивления ($10 \leq Re_1 \frac{k_3}{d_1} \leq 500$).

Таким образом, значение λ_1 следовало определять по формуле А.Д Альтшуля:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 0,11 \left(\frac{k_3}{d_1} + \frac{68}{Re_1} \right)^{0,25} = \\ &= 0,11 \left(\frac{0,00003}{0,15} + \frac{68}{605410} \right)^{0,25} = 0,0146,\end{aligned}$$

или после приведения к скорости в выходном отверстии $\lambda_1 = 0,0029$.

Проверим область сопротивления движению воды в трубе с минимальным диаметром:

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu} = \frac{4Qd_2}{\pi d_2^2 \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 0,072}{3,14 \cdot 0,10 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6}} = 908116;$$

$$Re_2 \frac{k_3}{d_2} = 908116 \frac{0,00003}{0,10} \approx 272, \text{ что также соответствует}$$

переходной зоне сопротивления

$$\left(10 \leq Re_2 \frac{k_3}{d_2} \leq 500 \right).$$

Следовательно:

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 0,11 \left(\frac{k_3}{d_2} + \frac{68}{Re_2} \right)^{0,25} = \\ &= 0,11 \left(\frac{0,00003}{0,10} + \frac{68}{908116} \right)^{0,25} = 0,0153,\end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}\sum \xi &= 0,1 + 0,07 + 0,28 + 0,12 + 0,0029 \frac{8}{0,15} + \\ &+ 0,0153 \frac{5}{0,10} = 1,49,\end{aligned}$$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1,05 + 1,49}} = 0,627,$$

Таким образом, расчетный расход по системе коротких трубопроводов составит:

$$Q = 0,627 \frac{3,14 \cdot 0,10^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 10,66} = 0,071 \text{ (м}^3/\text{с)},$$

Для построения пьезометрической линии (линии удельной потенциальной энергии) вычислим скорости движения воды по расчетным участкам трубопроводов и им соответствующие скоростные напоры:

$$v_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,071}{3,14 \cdot 0,15^2} = 4,02 \text{ (м/с)},$$

$$v_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,071}{3,14 \cdot 0,10^2} = 9,04 \text{ (м/с)},$$

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{1,05 \cdot 4,02^2}{2 \cdot 9,81} = 0,86 \text{ (м)},$$

$$\frac{\alpha v_2^2}{2g} = \frac{1,05 \cdot 9,04^2}{2 \cdot 9,81} = 4,37 \text{ (м)},$$

Для построения напорной линии вычислим потери напора на всех участках движения воды по системе трубопроводов:

1) потери на вход

$$h_{\text{вх}} = \xi_{\text{вх}} \frac{\alpha v_1^2}{2g} = 0,5 \cdot 0,86 = 0,43 \text{ (м)},$$

2) потери на трение по длине l_1 первой трубы

$$h_1 = \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} = 0,0146 \frac{5}{0,15} 0,86 = 0,42 \text{ (м)},$$

3) потери на прохождение колена

$$h_{\text{кол}} = \xi_{\text{кол}} \frac{\alpha v_1^2}{2g} = 0,35 \cdot 0,86 = 0,30 \text{ (м)},$$

4) потери на трение по длине l_2 первой трубы

$$h_2 = \lambda_1 \frac{l_2 v_1^2}{d_1 2g} = 0,0146 \frac{3}{0,15} 0,86 = 0,25 \text{ (м)},$$

5) потери на внезапное сужение

$$h_{\text{вн.с}} = \xi_{\text{вн.с}} \frac{\alpha v_2^2}{2g} = 0,28 \cdot 4,37 = 1,22 \text{ (м)},$$

6) потери на трение по длине l_3 второй трубы

$$h_3 = \lambda_2 \frac{l_3 v_2^2}{d_2 2g} = 0,0153 \frac{4}{0,10} 4,37 = 2,67 \text{ (м)},$$

7) потери на задвижку

$$h_{\text{зад.}} = \xi_{\text{зад.}} \frac{\alpha v_2^2}{2g} = 0,12 \cdot 4,37 = 0,51 \text{ (м)},$$

8) потери на трение по длине l_4 второй трубы

$$h_4 = \lambda_2 \frac{l_4 v_2^2}{d_2 2g} = 0,0153 \frac{1}{0,10} 4,37 = 0,67 \text{ (м)},$$

Сумма потерь напора

$$\sum h_{\text{тр}} = 0,43 + 0,42 + 0,30 + 0,25 + 1,22 + 2,67 + \\ + 0,52 + 0,67 = 6,48 \text{ (м)},$$

Проверяем правильность расчета:

$$\frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h_{\text{тр}} = 4,37 + 6,48 = 10,85 \text{ (м)},$$

что соответствует, примерно, фактическому напору $H = 10,66$ м. Разность в 0,19 м появилась вследствие округлений каждого промежуточного результата. Её можно распределить по всем потерям пропорционально их значениям, а можно (в

связи с незначительной длиной последнего участка) целиком включить в h_4 , т. е. принять $h_4 = 0,48$ м.

Для построения линии полной удельной энергии необходимо вычертить в масштабе схему истечения через систему коротких трубопроводов и отметить характерные сечения. Как правило, характерные сечения назначают в точках размещения местных гидравлических сопротивлений. Полная удельная энергия в каждом сечении будет равна энергии в предыдущем сечении без потерь напора между ними.

Согласно схеме истечения (см. рисунок ниже) полная энергия в сечении 1-1 (сразу после входа в трубопровод) составит:

$$H_1 = H - h_{\text{вх}} = 10,66 - 0,43 = 10,23 \text{ (м)},$$

В сечении 2-2 перед коленом:

$$H'_2 = H_1 - h_1 = 10,23 - 0,42 = 9,81 \text{ (м)},$$

В сечении 2-2 после колена:

$$H''_2 = H'_2 - h_{\text{кол}} = 9,81 - 0,30 = 9,51 \text{ (м)},$$

В сечении 3-3 перед внезапным сужением:

$$H'_3 = H''_2 - h_2 = 9,51 - 0,25 = 9,26 \text{ (м)},$$

В сечении 3 -3 после внезапного сужения:

$$H''_3 = H'_3 - h_{\text{вн.с.}} = 9,26 - 1,22 = 8,04 \text{ (м)},$$

В сечении 4 -4 перед задвижкой:

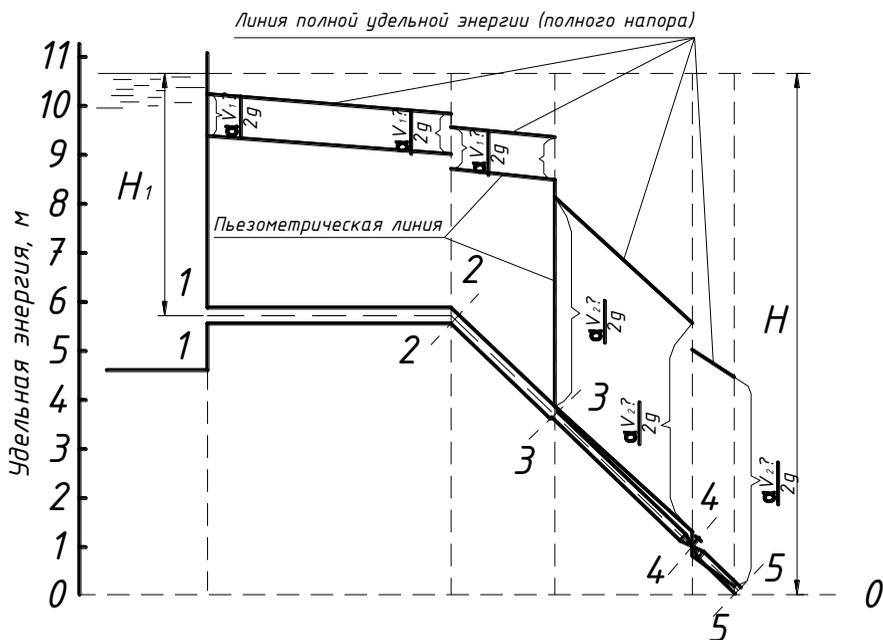
$$H'_4 = H'_3 - h_3 = 8,04 - 2,67 = 5,37 \text{ (м)},$$

В сечении 4-4 после задвижки:

$$H''_4 = H'_4 - h_{\text{зад}} = 5,37 - 0,52 = 4,85 \text{ (м)},$$

В сечении 5-5:

$$H_5 = H''_4 - h_4 = 4,85 - 0,48 = 4,37 \text{ (м)},$$



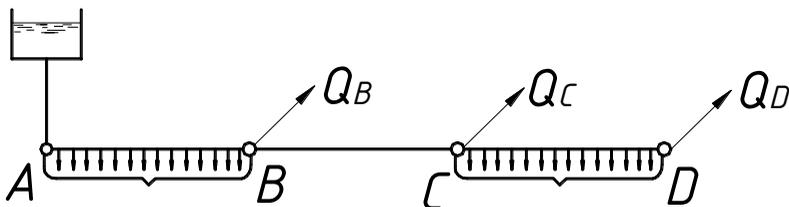
Отсчет (откладывание) высот полной удельной энергии производим от плоскости 0-0, проходящей через центр тяжести выходного сечения. Предварительно через центры каждого условного сечения трубопровода следует провести вспомогательные вертикали.

Для построения линии пьезометрического напора необходимо в каждом условном сечении отложить (в масштабе) вниз от линии полного напора величину скоростного напора ($\frac{\alpha v^2}{2g}$)

В рассматриваемом примере в сечениях 1-1, 2'-2', 2''-2'' и 3'-3' вниз следует отложить величину $\frac{\alpha v_1^2}{2g} = 0,86$ м, а в сечениях 3''-3'', 4'-4', 4''-4'' и 5-5 величину $\frac{\alpha v^2}{2g} = 4,37$ м.

6. Гидравлические расчеты трубопроводов мелиоративных и водопроводных систем

Задача. Определить уровень воды в напорном баке системы водоснабжения, состоящей из трех участков трубопровода, и показанной ниже на рисунке



На участках водопроводной сети имеются узловые отборы Q_B , Q_C , Q_D и равномерная раздача расхода на участках AB и CD . Материал труб - пластмасса. Расходы в узлах: $Q_B = 5$ л/с; $Q_C = 10$ л/с; $Q_D = 5$ л/с. Путевые расходы: $Q_{\Pi 1} = 10$ л/с; $Q_{\Pi 2} = 4$ л/с. Уклон трубопровода равен нулю. Длина трубопровода по участкам: $l_{AB} = 200$ м; $l_{BC} = 100$ м; $l_{CD} = 300$ м. Свободный напор в узле D равен 0,15 МПа. Построить для рассчитанной водопроводной сети напорную линию.

Решение. Уровень воды в водонапорном баке будет равен:

$$H = H_{\text{св}} \pm H_{\text{г}} + \sum h,$$

Свободный напор ($H_{\text{св}}$) принимается из условия к задаче и будет равен 0,15 МПа или 15 м водного столба. Так как трубопровод горизонтальный (уклон равен нулю) геодезическая высота (H_z) равна нулю. Поэтому уровень воды будет равен сумме потерь напора на участках водопроводной сети ($\sum h$) и свободного напора ($H_{\text{св}}$) в узле D .

Потери напора на участках водопроводной сети будем вычислять по формуле (6.6):

$$h_1 = A_i l_i Q_i^2,$$

Чтобы найти удельное сопротивление A , пластмассовых трубопроводов (таблица 36, приложение) необходимо определить его диаметры на расчетных участках. Диаметры на участках водопроводной сети рассчитываются по формуле (5.10).

Установим расчетные расходы на участках водопроводной сети, начиная с последнего участка:

$$\begin{aligned} Q_{CD} &= Q_D + 0,5Q_{\Pi} = 5 + 0,5 \cdot 10 = 10, \\ Q_{BC} &= Q_C + Q_D + Q_{\Pi} = 10 + 5 + 10 = 25, \\ Q_{AB} &= Q_B + Q_C + Q_D + Q_{\Pi} + 0,5Q_{\Pi 1} = \\ &= 5 + 10 + 5 + 10 + 0,5 \cdot 4 = 32, \end{aligned}$$

Для установления экономически наивыгоднейшей скорости движения воды на участках водопроводной сети (1 м/с) диаметры трубопроводов должны равняться:

$$D_{AB} = \sqrt{\frac{4 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 1}} = 0,202 \text{ (м)},$$

$$D_{BC} = \sqrt{\frac{4 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 1}} = 0,178 \text{ (м)},$$

$$D_{AB} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 1}} = 0,113 \text{ (м)},$$

Округляем полученные диаметры до стандартных размеров (таблица 36, приложение):

$$D_{AB} = 200 \text{ мм}; D_{BC} = 180 \text{ мм}; D_{CD} = 125 \text{ мм}.$$

Уточняем скорости движения воды в трубах на участках по формуле: $V = \frac{4Q}{\pi D^2}$:

$$v_{AB} = \frac{4 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,2^2} \cong 1,0,$$

$$v_{BC} = \frac{4 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,18^2} \cong 1,0,$$

$$v_{CD} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,125^2} \cong 0,8,$$

Поправочные коэффициенты при данных скоростях в пластмассовых трубах (таблица 4, приложение) составят:

$$\beta_{AB} = 1; \beta_{BC} = 1; \beta_{CD} = 1,05.$$

Определяем потери напора на участках водопроводной сети:

$$h_{AB} = 14,26 \cdot 200 \cdot (32 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 = 2,92 \text{ (м)},$$

$$h_{BC} = 24,76 \cdot 100 \cdot (25 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1 = 1,54 \text{ (м)},$$

$$h_{CD} = 166,7 \cdot 300 \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,05 = 4,00 \text{ (м)},$$

Уровень в водонапорном баке будет:

$$H = 15,0 + 2,92 + 1,54 + 4,00 = 23,46 \text{ (м)},$$

По данным расчета водопроводной сети построим напорную линию (см. рисунок ниже). Вначале вычерчиваем в масштабе схему сети (вертикальный масштаб, как правило, крупнее горизонтального). Построение напорной линии начинаем от узла D , где имеется свободный напор 15 м, и перемещаемся к баку, последовательно поднимаясь в каждом встречающемся узле на величину (высоту) потерь напора на пройденном участке.

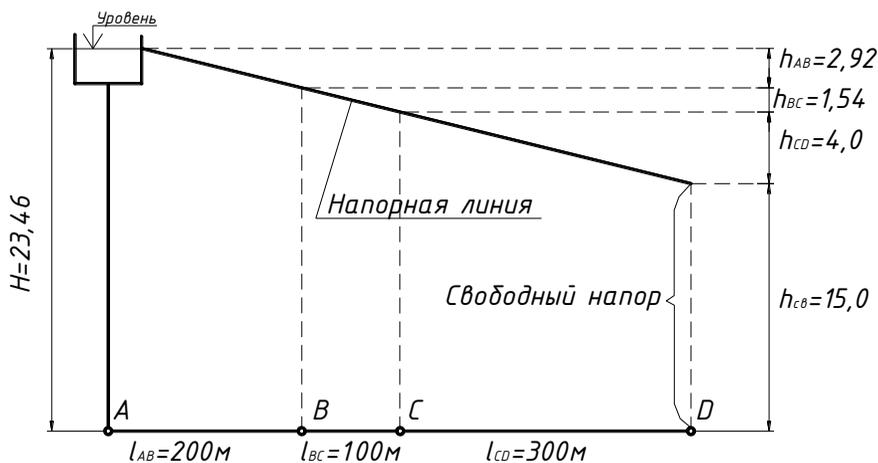


Схема напорной линии рассчитанного водопровода

6. Расчет гидравлического удара в трубах

Задача: По стальному трубопроводу длиной $l = 2$ км подается вода с расходом $Q = 28$ л/с, диаметр трубопровода $d = 200$ мм, а толщина его стенок $\delta = 6$ мм. Определить повышение давления в трубопроводе, если в его конце будет закрыта задвижка в течение: 1) 3 сек; 2) 10 сек.

Решение. Определяем скорость распространение ударной волны

$$C_v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_0} \frac{d}{\delta}}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + 0,01 \frac{200}{6}}} = 1235 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

До закрытия задвижки скорость в трубопроводе

$$V_0 = \frac{Q_4}{\pi d^2} = \frac{0,28 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,89 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

Фаза удара

$$T = \frac{2l}{C_v} = \frac{2 \cdot 2000}{1235} = 3,24 \text{ с},$$

Следовательно, в первом случае возникает прямой удар, а во втором – не прямой. Определяем повышение давления:

$$1) \Delta p = \rho C_v V_0 = 102 \cdot 1235 \cdot 0,89 = 1100 \text{ кН/м}^2,$$

$$2) \Delta p = \frac{2\rho V_0 l}{t_3} = \frac{2 \cdot 102 \cdot 0,89 \cdot 2000}{10} = \frac{3,63 \text{ кгс}}{\text{см}^2} = \frac{356 \text{ кН}}{\text{м}^2}.$$

Приложение А

Таблица А1 – Значения расходной характеристики К и удельных сопротивлений А для новых стальных труб при скорости $V = 1$ м/с

Трубы стальные водогазопроводные ГОСТ 3262-75			Трубы стальные электросварные ГОСТ 1074-76 и ГОСТ 8696-74		
Условный проход D, мм	K, м ³ /с	A, с ² /м ⁶	Условный проход D, мм	K, м ³ /с	A, с ² /м ⁶
15	0,0005	3962000	50	0,02068	2362
20	0,001	824600	60	0,02587	1494
25	0,00197	258500	80	0,05699	307,8
32	1,03436	52570	100	0,09136	119,8
40	0,00617	26260	125	0,13623	53,88
50	0,01244	6464	150	0,213	22,04
65	0,0227	1940	175	0,25743	15,09
80	0,03598	772,7	200	0,4407	5,149
90	0,05269	360,1	250	0,77779	1,653
100	0,07204	192,7	300	1,22915	0,6619
125	0,12841	60,65	350	1,84177	0,2948
150	0,80265	24,35	400	2,5641	0,1521
-	-	-	450	3,5353	0,08001
-	-	-	500	4,6166	0,04692
-	-	-	600	7,3343	0,01859
-	-	-	700	10,4719	0,009119
-	-	-	800	14,7091	0,004622
-	-	-	900	19,984	0,002504
-	-	-	1000	26,2885	0,001447
-	-	-	1200	42,0666	0,0005651
-	-	-	1400	62,6593	0,0002547
-	-	-	1500	75,0375	0,0001776
-	-	-	1600	88,8056	0,0001268

Таблица А2 – Значения расходной характеристики К и удельных сопротивлений А для чугунных труб при скорости $V = 1$ м/с

Условный проход D , мм	ГОСТ 9583-75 и ГОСТ 21053-75			
	Класс ЛА		Класс А	
	К, м/с	А, с ² /м ⁶	К, м ³ /с	А, с ² /м ⁴
80	0,03468	831,7	-	-
100	0,06018	276,1	-	-
125	0,10936	83,61	-	-
150	0,17122	34,09	-	-
200	0,36763	7,399	-	-
250	0,43497	2,299	-	-
300	1,09526	0,8336	-	-
350	-	-	1,5521	0,4151
400	-	-	2,19	0,2085
450	-	-	2,9696	0,1134
500	-	-	3,9287	0,06479
600	-	-	6,3334	0,02493
700	-	-	9,4873	0,01111
800	-	-	13,5432	0,005452
900	-	-	18,4522	0,002937
1000	-	-	24,2607	0,001699

Таблица А2а – Значения поправочных коэффициентов β и θ к величинам А и К для стальных и чугунных труб

v, м/с	Значения β и θ для новых труб			
	стальных		чугунных	
	β	θ	β	θ
1	2	3	4	5
0,2	1,244	0,897	1,462	0,827
0,25	1,198	0,914	1,38	0,851
0,3	1,163	0,927	1,317	0,871
0,35	1,138	0,937	1,267	0,888
0,4	1,113	0,948	1,226	0,903
0,45	1,095	0,956	1,192	0,916
0,5	1,081	0,962	1,163	0,927
0,55	1,067	0,968	1,138	0,937
0,6	1,057	0,973	1,115	0,947
0,65	1,046	0,978	1,096	0,955
0,7	1,039	0,981	1,078	0,963
0,75	1,029	0,986	1,062	0,97
0,8	1,021	0,99	1,047	0,977
0,85	1,016	0,992	1,034	0,983
0,9	1,011	0,995	1,021	0,99
1	1	1	1	1
1,1	0,993	1,004	0,988	1,006
1,2	0,986	1,007	0,965	1,018
1,3	0,979	1,011	0,951	1,025
1,4	0,972	1,014	0,938	1,036
1,5	0,968	1,016	0,927	1,039
1,6	0,965	1,018	0,917	1,044
1,7	0,961	1,02	0,907	1,05
1,8	0,958	1,022	0,899	1,056
1,9	0,954	1,024	0,891	1,059
2	0,951	1,026	0,884	1,061
2,1	0,947	1,027	0,878	1,067
2,2	0,946	1,028	0,871	1,072
2,3	0,943	1,03	0,866	1,075

Продолжение таблицы А2а

1	2	3	4	5
2,4	0,941	1,031	0,861	1,077
2,5	0,939	1,032	0,856	1,081
2,6	0,937	1,033	0,851	1,085
2,7	0,936	1,034	0,847	1,087
2,8	0,934	1,035	0,843	1,089
2,9	0,933	1,036	0,839	1,092
3	0,932	1,036	0,836	1,094

Таблица А3 – Значения расходной характеристики K и удельных сопротивлений A для асбестоцементных труб при скорости $V = 1$ м/с (ГОСТ 539-80)

Диаметр условного прохода $D, мм$	$K, м/с$	$A, с^2/м^6$	$K, м^3/с$	$A, с^2/м^6$
	ВТ-6	ВТ-9	ВТ-12	
1	2	3	4	5
50	0,01208	6851	-	-
75	0,03461	835	-	-
100	0,07299	187,7	-	-
125	0,11463	76,1	-	-
150	0,17803	31,55	0,159	39,5
200	0,38075	6,898	0,3404	8,63
250	0,67023	2,227	0,6202	2,6
300	1,04599	0,914	0,9259	1,08
350	1,51759	0,4342	1,3989	0,511
400	1,87424	0,2171	1,9687	0,258
500	3,7273	0,7198	3,432	0,0849
600	6,86803	0,0212	-	-
700	10,2383	0,00954	-	-
800	14,4791	0,00477	-	-
900	19,6494	0,00259	-	-
1000	25,8199	0,0015	-	-

Таблица 3а – Значения поправочных коэффициентов β и θ к значениям А и К для асбестоцементных труб при скоростях, отличающихся от $V = 1$ м/с

v, м/с	β	θ	v, м/с	β	θ
1	2	3	4	5	6
0,2	1,31	0,874	0,95	1,01	0,995
0,25	1,26	0,891	1	1	1
0,3	1,22	0,905	1,1	0,99	1,005
0,35	1,19	0,917	1,2	0,97	1,015
0,4	1,16	0,929	1,3	0,96	1,02
0,45	1,14	0,937	1,4	0,95	1,026
0,5	1,12	0,945	1,5	0,94	1,031
0,55	1,11	0,949	1,6	0,93	1,037
0,6	1,09	0,958	1,7	0,925	1,04
0,65	1,07	0,967	1,8	0,92	1,043
0,7	1,06	0,971	1,9	0,915	1,045
0,75	1,05	0,976	2	0,97	1,048
0,8	1,04	0,981	2,1	0,905	1,051
0,85	1,03	0,985	2,2	0,9	1,054
0,9	1,02	0,99	2,3	0,895	1,057

Таблица А3б - Значения расходной характеристики К и удельных сопротивлений А для пластмассовых труб «тип Т» ГОСТ 18599-73 при скорости $V = 1$ м/с

Наружный диаметр, D, мм	К, м ³ /с	А, с ² /м ⁶
16	0,00029	12120000
20	0,00061	2695000
25	0,00115	757100
32	0,00221	204800
40	0,00398	63290
50	0,00712	19720
63	0,01299	5929
75	0,02046	2390
90	0,0329	926,8
100	0,0556	323,9
125	0,0775	166,7
140	0,1045	91,62
160	0,1476	45,91
180	0,201	24,76
200	0,2648	14,26ч
225	0,36	7,715
250	0,4738	4,454
280	0,6377	2,459

Таблица А4 – Значения поправочных коэффициентов β и θ к значениям А и К для пластмассовых труб при скоростях, отличающихся от $V = 1$ м/с

v, м/с	β	θ	v, м/с	β	θ
0,2	1,44	0,833	1,00	1	1
0,25	1,37	0,854	1,1	0,99	1,005
0,3	1,31	0,873	1,2	0,96	1,021
0,35	1,27	0,887	1,3	0,94	1,031
v, м/с	β	θ	v, м/с	β	θ
0,4	1,23	0,902	1,4	0,93	1,037
0,45	1,2	0,913	1,5	0,91	1,048
0,5	1,17	0,925	1,6	0,9	1,054
0,55	1,15	0,933	1,7	0,89	1,06
0,6	1,12	0,945	1,8	0,88	1,066
0,65	1,1	0,954	1,9	0,87	1,072
0,7	1,08	0,962	2	0,86	1,078
0,75	1,07	0,967	2,1	0,85	1,085
0,8	1,05	0,976	2,2	0,84	1,091
0,85	1,04	0,981	2,3	0,83	1,098
0,9	1,02	0,996	2,4	0,82	1,104

Таблица А5 – Предельные экономические расходы, скорости и уклоны для стальных и чугунных труб

Условный проход D, мм	Материал труб					
	Стальные			чугунные		
	Q, л/с	v, м/с	1000i	Q, л/с	v, м/с	1000i
1	2	3	4	5	6	7
50	3,1	0,96	36,6	2,5	1,2	72,4
60	4,1	1,07	39,3	-	-	-
80	8,1	1,14	30,1	5,7	1,06	31,6
100	11,7	1,15	24,1	9,4	1,15	27,8
125	16,6	1,19	21	15	1,18	23,8
150	21,8	1,12	14,8	25,3	1,4	21,9
175	29,2	1,3	17,7	-	-	-
200	46	1,34	14,7	45,8	1,42	17,1

Продолжение таблицы А5

1	2	3	4	5	6	7
250	71	1,34	11	73,5	1,46	13,6
300	103	1,35	9	108	1,48	11,1
350	140	1,35	7,31	149	1,53	9,69
400	184	1,36	6,29	197	1,56	8,5
450	234	1,37	5,7	254	1,59	8,4
500	315	1,5	5,43	352	1,79	7,65
600	443	1,49	4,49	518	1,83	7
700	591	1,51	3,82	722	1,87	6
800	776	1,53	3,32	966	1,92	5,28
900	987	1,54	2,9	1250	1,97	5,17
1000	1335	1,68	3,05	1725	2,2	4,76

Таблица А6 – Предельные экономичные расходы, скорости и уклоны для асбестоцементных и пластмассовых труб

Асбестоцементные, ВТ-6, ВТ-9				Пластмассовые				
Условный проход, D мм	Q, л/с	v, м/с	1000i	Наружный диаметр, D, мм	Условный проход, D мм	Q, л/с	v, м/с	1000i
50	2,2	1,12	32,6	63	50	2,1	1,01	26,6
75	5,2	1,18	22	75	60	3,1	1,05	23,9
100	9,1	1,17	15,2	90	70	5Д	1,2	23,2
125	13,8	1,23	14,4	110	100	8,7	1,37	22,9
150	23,6	1,5	13,4	140	125	13,8	1,35	16,5
200	44	1,57	12,5	160	150	25,9	1,92	16,3
250	71	1,64	10,5	225	200	61	1,95	16,2
300	103	1,68	9	280	250	97,7	1,87	10,9
350	144	1,77	8,31	315	300	241	3,64	-
400	217	2,05	7,28	-	-	-	-	-
500	505	3,09	-	-	-	-	-	-

Учебное издание

**Кузнецов Евгений Владимирович,
Хаджиди Анна Евгеньевна,
Куртнезиров Арсен Нариманович**

ГИДРАВЛИКА

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 25.03.2015. Формат 60 x 84 ¹/₁₆.

Усл. печ. л. – 5,1. Уч.-изд. л. – 4

Тираж 100 экз. Заказ № _____

Типография Кубанского государственного аграрного университета.
350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13