

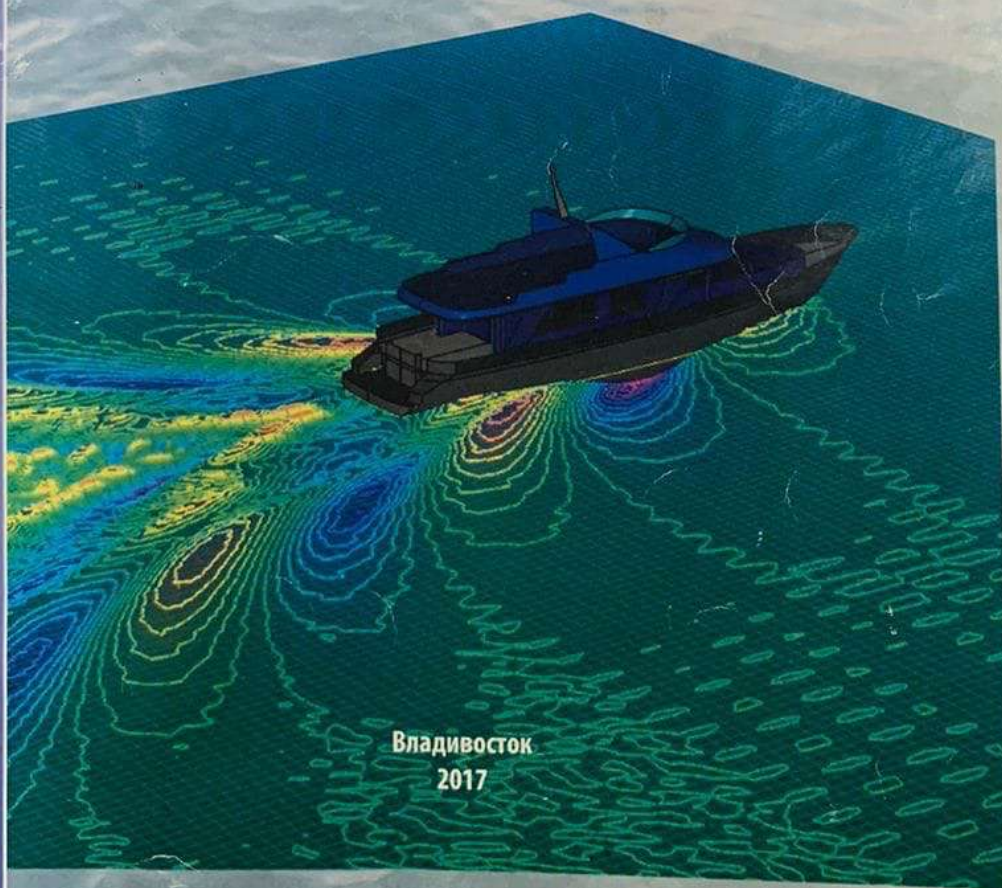


Н.И.Восковщук, Н.В. Дружинина

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие

ПРОГРАММА НОВЫЕ КАДРЫ ОПК



Владивосток
2017

УДК 621
ББК 30.13
Т38

Составители:

Восковщук Николай Иванович – кандидат технических наук,
профессор базовой кафедры морских технологий и энергетики
(Дальневосточный федеральный университет,
Филиал в г. Большой Камень);

Дружинина Наталия Владиславовна – конструктор
ООО «ВладСудоПроект».

Т38 **Техническая физика** : учебно-методич. пособие / сост.: Н.И. Восковщук,
Н.В. Дружинина. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2017. – 60 с.
ISBN 978-5-7444-4107-4.

В пособии кратко изложены основные теоретические сведения о равновесии и движении жидкости. Подробно изложены методы расчета сил гидростатического давления на плоские и криволинейные поверхности, потенциального обтекания тел, простого трубопровода. Приведены темы домашних заданий и курсовых работ.

Пособие содержит необходимые справочные данные и решения наиболее характерных примеров.

Предназначено для проведения практических занятий, выполнения домашних заданий, контрольных и курсовых работ.

Ключевые слова: суммарные силы давления, потенциальное обтекание тел, потенциал скорости, функция тока, расход жидкости, гидродинамический напор, потери напора.

УДК 621
ББК 30.13

ISBN 978-5-7444-4107-4

© ФГАОУ ВО «ДВФУ», 2017

ВВЕДЕНИЕ ...

1. РАСЧЕТ СИЛ
НА ПЛОСКИЕ

1.1. Краткие

1.2. Примеры

2. РАСЧЕТ ПО

2.1. Краткие

2.2. Примеры

2.2.1. Без

2.2.2. Цир

2.2.3. Обт

2.2.4. Обт

2.2.5. Обт

2.2.6. Обт

2.2.7. Обт

3. РАСЧЕТ П

3.1. Краткие

3.2. Примеры

3.3. Порядо

4. ТЕМЫ ДО

4.1. Расчет

4.2. Расчет

4.2.1. Об

4.2.2. Об

4.2.3. Об

4.2.4. Об

4.2.5. Об

4.2.6. Пр

4.3. Расчет

ПРИЛОЖЕН

УПОТРЕБЛЯ

СПИСОК ЛИ

4.3. Расчет простого трубопровода

Задание 4.3.1. Резервуар продувается воздухом с постоянным избыточным давлением $p_{изб}$. Определить расход воды Q при заданных геометрических характеристиках трубопровода (рис.4.4). В первом приближении считать, что режим течения соответствует квадратичной зоне с абсолютной эквивалентной зернистой шероховатостью равной k . Построить диаграмму уравнения Бернулли. Геометрические размеры трубопровода даны в таблице 4.13, температура воды $t = 15^\circ \text{C}$.

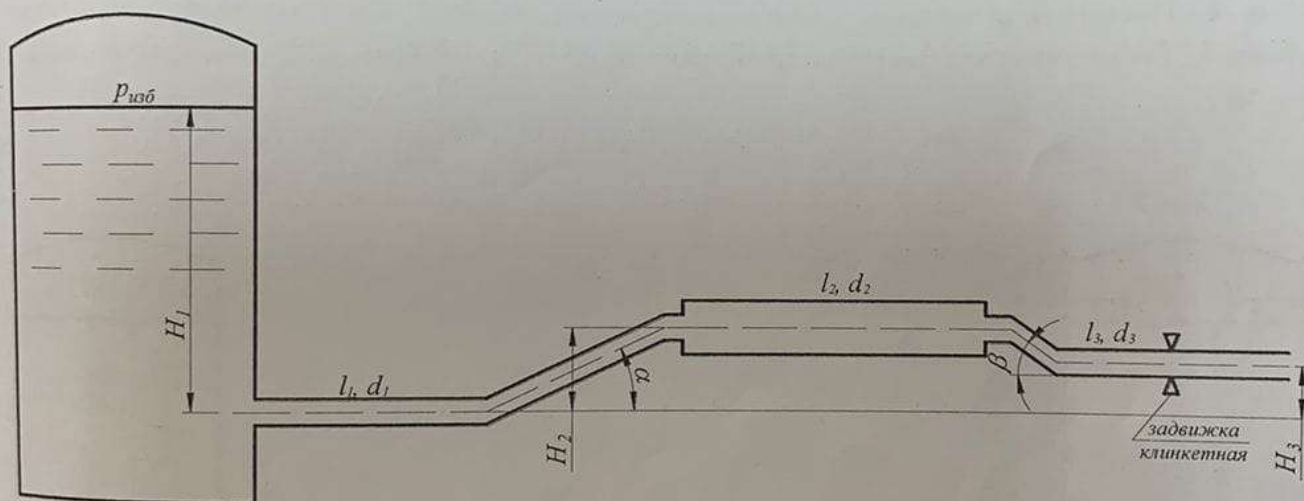


Рис. 4.4. Схема трубопровода

Таблица 4.13

Геометрические размеры трубопровода

Обозначения	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_1, \text{м}$	35,0	35,0	40,0	40,0	50,0	50,0	60,0	60,0	70,0	80,0
$l_2, \text{м}$	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
$l_3, \text{м}$	26,0	28,0	30,0	32,0	34,0	36,0	38,0	40,0	42,0	44,0
$d_1, \text{мм}$	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0

Обозначения	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_2, \text{мм}$	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
$d_3, \text{мм}$	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
$H_1, \text{м}$	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0
$H_2, \text{м}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$H_3, \text{м}$	0,0	0,5	1,0	1,5	0,0	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0
$p_{\text{изб}}, \text{МПа}$	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
$\alpha, \text{град}$	30,0	30,0	30,0	60,0	60,0	60,0	45,0	45,0	45,0	45,0
$\beta, \text{град}$	60,0	60,0	60,0	30,0	30,0	30,0	60,0	60,0	60,0	60,0
$k, \text{мм}$	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,40	0,45	0,45	0,40	0,50

Задание 4.3.2. Вода самотеком перепускается из одного резервуара в другой по трубопроводу (рис. 4.5). Определить расход при заданных уровнях H_1 и H_2 , пренебрегая неустановившемся характером течения и полагая, что в первом приближении режим течения соответствует квадратичной области с абсолютной эквивалентной зернистой шероховатостью k . Построить диаграмму уравнения Бернулли, а также найти время выравнивания уровней. Геометрические размеры трубопровода даны в таблице 4.14, температура воды $t = 20^\circ \text{C}$.

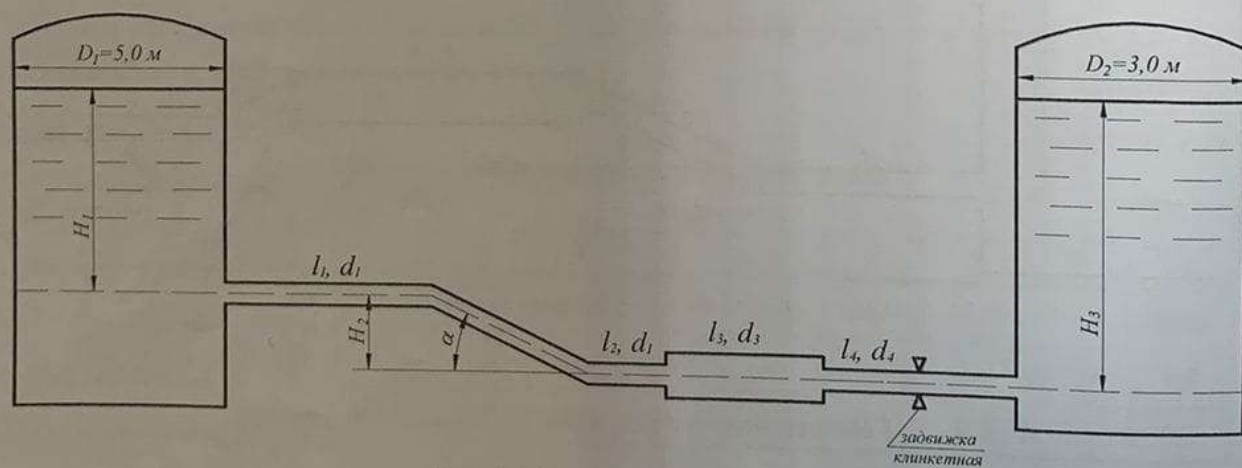


Рис. 4.5. Схема трубопровода

Обозначения	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_2, \text{мм}$	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
$d_3, \text{мм}$	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
$H_1, \text{м}$	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0
$H_2, \text{м}$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$H_3, \text{м}$	0,0	0,5	1,0	1,5	0,0	0,0	0,5	0,5	1,0	1,0
$p_{\text{изб}}, \text{МПа}$	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098
$\alpha, \text{град}$	30,0	30,0	30,0	60,0	60,0	60,0	45,0	45,0	45,0	45,0
$\beta, \text{град}$	60,0	60,0	60,0	30,0	30,0	30,0	60,0	60,0	60,0	60,0
$k, \text{мм}$	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,40	0,45	0,45	0,40	0,50

Задание 4.3.2. Вода самотеком перепускается из одного резервуара в другой по трубопроводу (рис. 4.5). Определить расход при заданных уровнях H_1 и H_2 , пренебрегая неустановившемся характером течения и полагая, что в первом приближении режим течения соответствует квадратичной области с абсолютной эквивалентной зернистой шероховатостью k . Построить диаграмму уравнения Бернулли, а также найти время выравнивания уровней. Геометрические размеры трубопровода даны в таблице 4.14, температура воды $t = 20^\circ \text{C}$.

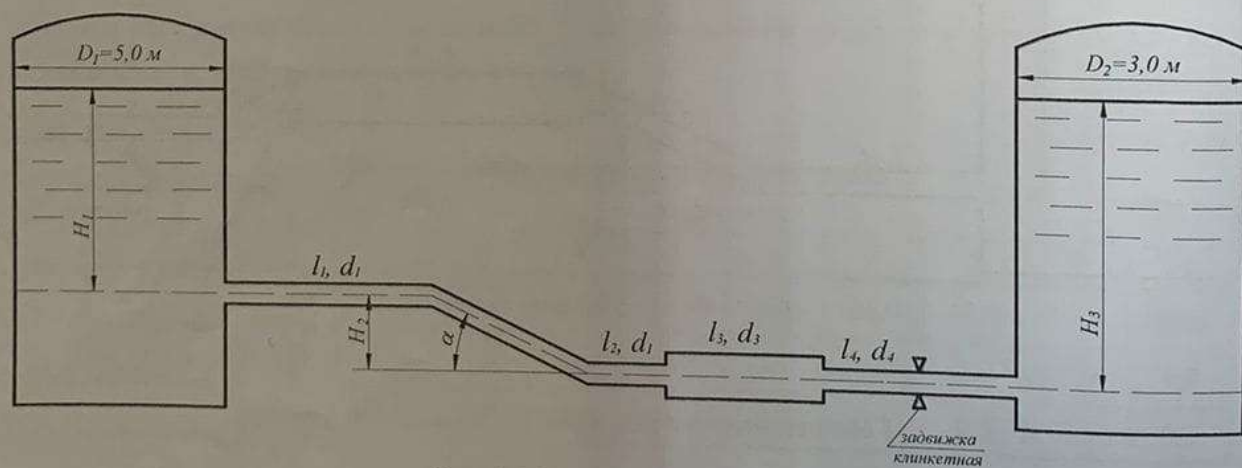


Рис. 4.5. Схема трубопровода

3. РАСЧЕТ ПРОСТОГО ТРУБОПРОВОДА

3.1. Краткие сведения из теории

Задание должно познакомить студентов с основами гидравлических расчетов. Расчет простого трубопровода, т.е. трубопровода, не имеющего разветвлений, при установившемся режиме работы, основан на применении уравнения Бернулли для потока вязкой жидкости и уравнения неразрывности в гидравлической форме:

$$\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w; \quad (3.1)$$

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = \dots = v_i \cdot S_i = Q = \text{const}, \quad (3.2)$$

где Q – объемный расход жидкости в единицу времени;

$v_i = \frac{Q}{S_i}$ – средняя по расходу скорость в i -том сечении;

$S_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$ – площадь сечения;

p_i – пьезометрическое давление в i -том сечении;

d_i – диаметр трубы;

z_i – геометрическая высота центра тяжести сечения (геометрический напор);

$\alpha_i = \frac{\int v^3 \cdot dS}{v_i^3 \cdot S}$ – коэффициент неравномерности кинетической энергии;

g – ускорение силы тяжести;

γ – удельный вес движущейся жидкости;

h_w – член, учитывающий потери на преодоление сопротивлений между первым и вторым сечениями.

Индекс 1 относится к верхнему по течению трубопровода; индекс 2 – к нижнему, оба сечения следует выбирать в районах плавно изменяющего потока.

Все слагаемые в уравнении (3.1) имеют размерность длины и поэтому именуются высотами:

$\frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g}$ – скоростная высота;

$\frac{p}{\gamma}$ – приведенная высота давления;

z – геометрическая высота.

Отложив от горизонтальной прямой, изображающей в масштабе спрямленную ось потока, для каждого сечения последовательно величины z , $\frac{p}{\gamma}$, $\frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g}$ получают диаграмму

уравнения Бернулли, дающую графическое представление об изменении полного гидродинамического напора $H_d = \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\gamma} + z$ и его составляющих вдоль потока. Линию

$H_d = f(x)$ на диаграмме именуют напорной линией, а линию $H_c = \frac{p}{\gamma} + z$ – пьезометрической линией.

Все источники потерь напора в трубопроводах подразделяют на два вида — потери напора на трение $h_{mp,i}$ и местные потери напора $h_{m,j}$. Пренебрегая взаимным влиянием гидравлических сопротивлений, потерю напора h_w представляют в виде арифметической суммы потерь на трение $h_{mp,i}$ и местных $h_{m,j}$ вдоль потока (принцип наложения потерь напора)

$$h_w = \sum h_{mp,i} + \sum h_{m,j}. \quad (3.3)$$

Согласно теории гидродинамического подобия все виды потерь выражают через безразмерные гидродинамические коэффициенты в долях от скоростного напора потока.

Потеря напора на трение на участках равномерного течения (с постоянным диаметром)

$$h_{mp,i} = \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g}, \quad (3.4)$$

потеря напора в местных сопротивлениях

$$h_{m,i} = \zeta_j \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g}, \quad (3.5)$$

где λ — гидравлический коэффициент сопротивления трения;

l — длина участка трубопровода;

d — диаметр трубы;

ζ — коэффициент местного сопротивления.

В формулах (3.3), (3.4), (3.5) индекс j служит обозначением местного сопротивления (кран, заслонка, поворот, шайба, расширение или сжатие и т.д.), а индекс i характеризует сечение трубопровода, в котором установлено данное сопротивление.

Численные значения коэффициентов λ и ζ зависят от числа Рейнольдса, подсчитываемого по средней скорости и диаметру:

$$Re_i = \frac{v_i \cdot d_i}{\nu}. \quad (3.6)$$

Большинство местных сопротивлений при достаточно больших числах Рейнольдса имеет постоянный коэффициент сопротивления ζ .

Коэффициент сопротивления трения λ в общем случае зависит от Re , относительной шероховатости $\varepsilon = k/d$ (k — абсолютная шероховатость) и формы сечения канала.

Для круглых трубопроводов при ламинарном течении, т.е. при $Re < 2400$, справедлива формула Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (3.7)$$

При турбулентном режиме ($Re > 2400$) в гидравлически гладких трубах используются полуэмпирические формулы:

формула Блазиуса (для $Re < 10^5$)

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}; \quad (3.8)$$

или формула Никурадзе (для $Re > 10^5$)

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}. \quad (3.9)$$

Для области *квадратичного* сопротивления, то есть для сильно шероховатых труб при высоких числах Re , используется формула Никурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{d}{2 \cdot k} + 1,74. \quad (3.10)$$

Для переходной области и области квадратичного сопротивления при турбулентном течении справедлива универсальная формула Альтшуля

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \cdot \lg \left(\frac{Re}{Re \cdot \frac{0,1 \cdot k}{d} + 7} \right) \quad (3.11)$$

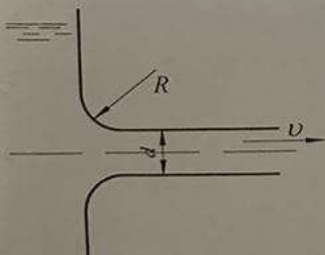
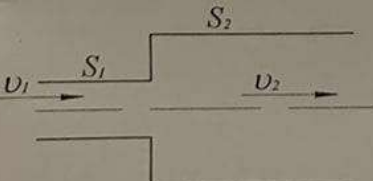
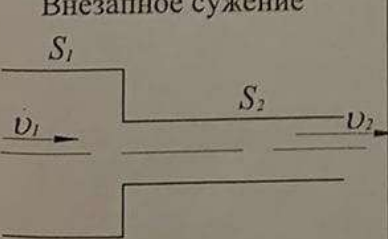
или ее степенная аппроксимация

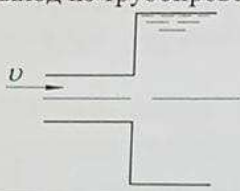
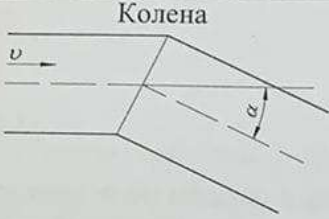
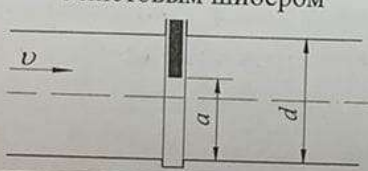
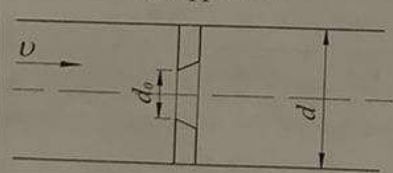
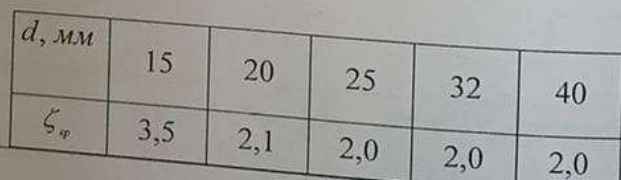
$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{0,1 \cdot k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (3.12)$$

Коэффициенты местных сопротивлений принимают главным образом по результатам экспериментальных исследований. Необходимые для решения предлагаемых заданий сведения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

**Коэффициенты местных сопротивлений
основных типов**

Наименование и вид сопротивления	Расчетная формула или числовое значение ζ												
Вход в трубу 	$h = \zeta_{\text{вх}} \cdot \frac{V^2}{2g}$ <table><tr><td>R/d</td><td>0</td><td>0,02</td><td>0,08</td><td>0,16</td><td>0,2</td></tr><tr><td>$\zeta_{\text{вх}}$</td><td>0,5</td><td>0,37</td><td>0,15</td><td>0,06</td><td>0,03</td></tr></table>	R/d	0	0,02	0,08	0,16	0,2	$\zeta_{\text{вх}}$	0,5	0,37	0,15	0,06	0,03
R/d	0	0,02	0,08	0,16	0,2								
$\zeta_{\text{вх}}$	0,5	0,37	0,15	0,06	0,03								
Внезапное расширение 	$h = \zeta_{\text{расш}} \cdot \frac{V_1^2}{2g};$ $\zeta_{\text{расш}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2.$												
Внезапное сужение 	$h = \zeta_{\text{суж}} \cdot \frac{V_2^2}{2g};$ $\zeta_{\text{суж}} = \left[\left(\frac{1}{\epsilon} \right) - 1 \right]^2;$ $\epsilon = 0,577 + \left[\frac{0,043}{(1,1 - n)} \right];$ $n = S_2/S_1.$												

Наименование и вид сопротивления	Расчетная формула или числовое значение ζ																						
Выход из трубопровода 	$h = \zeta_{\text{вых}} \cdot \frac{v^2}{2g};$ $\zeta_{\text{вых}} = \alpha_1,$ $\alpha_1 - \text{коэффициент неравномерности кинетической энергии. } \alpha_1 = 1,1.$																						
Колена 	$h = \zeta_{\kappa} \cdot \frac{v^2}{2g}$ <table><tr><td>α°</td><td>15</td><td>30</td><td>45</td><td>60</td><td>90</td></tr><tr><td>ζ_{κ}</td><td>0,06</td><td>0,17</td><td>0,32</td><td>0,68</td><td>1,26</td></tr></table>	α°	15	30	45	60	90	ζ_{κ}	0,06	0,17	0,32	0,68	1,26										
α°	15	30	45	60	90																		
ζ_{κ}	0,06	0,17	0,32	0,68	1,26																		
Задвижки с листовым шибером 	$h = \zeta_{\text{з}} \cdot \frac{v^2}{2g}$ <table><tr><td>a/d</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td><td>1,0</td></tr><tr><td>$\zeta_{\text{з}}$</td><td>4,0</td><td>1,0</td><td>0,2</td><td>0,01</td></tr></table>	a/d	0,4	0,6	0,8	1,0	$\zeta_{\text{з}}$	4,0	1,0	0,2	0,01												
a/d	0,4	0,6	0,8	1,0																			
$\zeta_{\text{з}}$	4,0	1,0	0,2	0,01																			
Задвижки клинкетные	$h = \zeta_{\text{зк}} \cdot \frac{v^2}{2g}$ $\zeta_{\text{зк}} = 0,15 \div 0,30, (a/d = 1).$																						
Диафрагмы 	$h = \zeta_{\text{д}} \cdot \frac{v^2}{2g}$ <table><tr><td>d_0/d</td><td>0,05</td><td>0,10</td><td>0,20</td><td>0,30</td><td>0,40</td><td>0,50</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,90</td></tr><tr><td>$\zeta_{\text{д}}$</td><td>960</td><td>240</td><td>57</td><td>18</td><td>8,2</td><td>3,8</td><td>1,8</td><td>0,8</td><td>0,3</td><td>0,06</td></tr></table>	d_0/d	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	$\zeta_{\text{д}}$	960	240	57	18	8,2	3,8	1,8	0,8	0,3	0,06
d_0/d	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90													
$\zeta_{\text{д}}$	960	240	57	18	8,2	3,8	1,8	0,8	0,3	0,06													
Кран проходной 	$h = \zeta_{\text{кр}} \cdot \frac{v^2}{2g}$ <table><tr><td>$d, \text{ мм}$</td><td>15</td><td>20</td><td>25</td><td>32</td><td>40</td></tr><tr><td>$\zeta_{\text{кр}}$</td><td>3,5</td><td>2,1</td><td>2,0</td><td>2,0</td><td>2,0</td></tr></table>	$d, \text{ мм}$	15	20	25	32	40	$\zeta_{\text{кр}}$	3,5	2,1	2,0	2,0	2,0										
$d, \text{ мм}$	15	20	25	32	40																		
$\zeta_{\text{кр}}$	3,5	2,1	2,0	2,0	2,0																		

Если элементы трубопровода заданы, то с помощью уравнений (3.1) и (3.2) можно решать два типа задач:

- 1) определение необходимого напора при заданном расходе;
- 2) вычисление расхода при заданном напоре.

Первая задача решается относительно просто, поскольку необходимый напор

$$H = \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + h_w \quad (3.13)$$

зависит от потерь h_w , которые легко вычисляются по формулам (3.4), (3.5) ÷ (3.12), так как скорости во всех участках трубопровода сразу же определяются через заданный расход

$$v_i = \frac{Q}{S_i} \quad (3.14)$$

Вторую задачу приходится решать методом последовательных приближений, поскольку потери зависят от скорости течения жидкости, которая неизвестна. В качестве исходного приближения для скорости в самом узком сечении трубопровода можно взять скорость истечения идеальной жидкости

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.15)$$

3.2. Пример расчета

Определить расход воды при заданных геометрических характеристиках простого трубопровода (рис. 3.1). Построить диаграмму уравнения Бернулли, считая уровень воды в резервуаре и избыточное давление постоянным. Абсолютная эквивалентная зернистая шероховатость $k = 0,5$ мм, температура воды $t = 15^\circ \text{C}$.

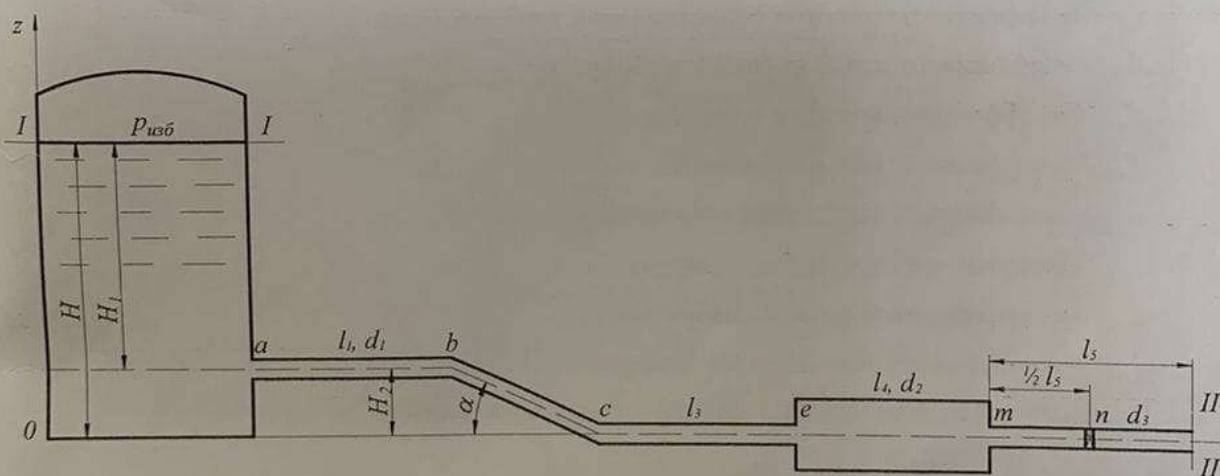


Рис. 3.1. Простой трубопровод

$$p_{изб} = 1962 \text{ Па}; d_1 = 100 \text{ мм}; d_2 = 200 \text{ мм}; d_3 = 120 \text{ мм}; l_1 = 20 \text{ м}; l_3 = 20 \text{ м}; l_4 = 10 \text{ м}; \\ l_5 = 80 \text{ м}; \alpha = 60^\circ; H_1 = 5,0 \text{ м}; H_2 = 2,0 \text{ м}.$$

Решение. Так как по условию задачи течение установившееся, используем уравнение Бернулли в форме (3.1) и уравнение неразрывности в виде (3.2). Ориентировочно полагаем, что режим течения турбулентный (в дальнейшем уточним), поэтому коэффициенты α_1 и α_2 принимаем равными единице. При решении задачи выдерживаем следующую последовательность:

- 1) выбираем плоскость сравнения;
- 2) выбираем два сечения потока;
- 3) вычисляем значения величин, входящих в уравнение (3.1).

Плоскость сравнения $O-O$ проводится через наиболее низкую точку потока; в рассматриваемом случае через центр выходного сечения $II-II$. Сечения выбирают так, чтобы в одном из них находились искомые величины, а в другом было бы максимальное количество известных. Этими сечениями являются: сечение по поверхности воды в напорном баке $I-I$ и сечение на выходе из трубопровода $II-II$.

Составим таблицу значений z , P и v для этих сечений.

Таблица 3.2

Значения z , P и v в сечениях трубопровода

Сечение	Геометрическая высота Ц.Т. сечения	Давление, P	Средняя скорость, v
$I-I$	$H = H_1 + H_2$	$P_a + P_{\text{вб}}$	0
$II-II$	0	P_a	v_3

Уравнение (3.1) с учетом данных таблицы 3.2 принимает вид

$$H + \frac{P_{\text{вб}}}{\gamma} = \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + h_w. \quad (3.16)$$

Потери h_w складываются из потерь на всех участках. В рассматриваемой задаче

$$h_w = \zeta_{\text{вх}} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \zeta_{\kappa.в} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_1 \cdot \frac{l_{\text{вс}}}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \zeta_{\kappa.с} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_1 \cdot \frac{l_3}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} +$$

$$+ \zeta_{\text{в.р.}} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \lambda_2 \cdot \frac{l_4}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \zeta_{\text{в.с.}} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + \lambda_3 \cdot \frac{l_5}{d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + \zeta_{\text{з.к.}} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + \lambda_3 \cdot \frac{l_5}{d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + \zeta_{\text{вых.}} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g},$$

где ζ_i — коэффициенты местных сопротивлений трубопровода:

$\zeta_{\text{вх}}$ — коэффициент входа из бака в трубопровод;

$\zeta_{\kappa.в}$ — коэффициент колена в точке B ;

$\zeta_{\kappa.с}$ — коэффициент колена в точке C ;

$\zeta_{\text{в.р.}}$ — коэффициент внезапного расширения;

$\zeta_{\text{в.с.}}$ — коэффициент внезапного сужения;

$\zeta_{\text{з.к.}}$ — коэффициент задвижки клинкетной;

$\zeta_{\text{вых.}}$ — коэффициент выхода из трубопровода.

Скорости v_1 , v_2 и v_3 связаны уравнением неразрывности (3.2):

$$v_1 = v_3 \cdot \frac{S_3}{S_1} = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_1} \right)^2;$$

$$v_2 = v_3 \cdot \frac{S_3}{S_2} = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2,$$

откуда

$$h_w = \frac{v_3^2}{2 \cdot g} \cdot \left[\left(\zeta_{\text{вх}} + \lambda_1 \cdot \frac{l_1 + l_{\text{вс}} + l_3}{d_1} + \zeta_{\kappa.в} + \zeta_{\kappa.с} + \zeta_{\text{в.р.}} \right) \cdot \left(\frac{d_3}{d_1} \right)^4 + \lambda_2 \cdot \frac{l_4}{d_2} \cdot \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^4 + \right.$$

$$\left. + \left(\zeta_{\text{в.с.}} + \lambda_3 \cdot \frac{l_5}{d_3} + \zeta_{\text{з.к.}} + \zeta_{\text{вых.}} \right) \right] = \zeta_c \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g}. \quad (3.17)$$

С учетом (3.17) уравнение (3.16) принимает вид

$$H + \frac{P_{\text{вб}}}{\gamma} = (1 + \zeta_c) \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g}. \quad (3.18)$$

Следовательно

$$v_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{P_{\text{вб}}}{\gamma} \right)}. \quad (3.19)$$

Искомый расход определяется по формуле

$$Q = v_3 \cdot S_3 = \frac{S_3}{\sqrt{1 + \zeta_c}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{P_{\text{вб}}}{\gamma} \right)}. \quad (3.20)$$

Вычисления по формуле (3.20) затрудняются тем, что суммарный коэффициент сопротивления трубопровода ζ_c зависит от Re , т.е. от искомой скорости. Используют два метода решения этого уравнения. Первый метод заключается в нахождении зависимости $Q = f(H)$. С этой целью задается ряд значений Q в ожидаемом интервале. Точка, где H равно заданному напору $H + \frac{P_{\text{вб}}}{\gamma}$, определит расчетный режим. Второй метод – метод последовательных приближений, при использовании которого задают в первом приближении Q ; по нему вычисляют Re , λ , ζ и по формуле (3.20) определяют Q в следующем приближении. Быстрота получения результата зависит от удачного выбора первого приближения.

В рассматриваемом примере в первом приближении принимаем режим квадратичного сопротивления. Коэффициенты λ_1 , λ_2 и λ_3 для него определим по формуле Никурадзе (3.10):

$$\lambda_1 = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{d_1}{2 \cdot k} + 1,74 \right)^2} = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{100}{2 \cdot 0,5} + 1,74 \right)^2} = 0,030;$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{200}{2 \cdot 0,5} + 1,74 \right)^2} = 0,025;$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \frac{120}{2 \cdot 0,5} + 1,74 \right)^2} = 0,029.$$

Коэффициенты местных сопротивлений определим по данным таблицы 3.1:

$$\zeta_{\text{вх}} = 0,50; \quad \zeta_{\text{к.в}} = 0,68; \quad \zeta_{\text{к.с}} = 0,68; \quad \zeta_{\text{в.р.}} = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{100}{200} \right)^2 \right]^2 = 0,56;$$

$$\zeta_{\text{в.с.}} = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 \right]^2 = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{120}{200} \right)^2 \right]^2 = 0,20; \quad \zeta_{\text{з.к.}} = 0,30;$$

$$\zeta_{\text{вых}} = 0,0 \text{ (истечение жидкости плавное).}$$

Находим приведенный коэффициент сопротивления системы по формуле (3.17)

$$\begin{aligned} \zeta_c = & \left(0,50 + 0,030 \cdot \frac{42,3}{0,10} + 0,68 + 0,68 + 0,56 \right) \cdot \left(\frac{120}{100} \right)^4 + 0,025 \cdot \frac{10}{0,20} \cdot \left(\frac{120}{200} \right)^4 + \\ & + \left(0,20 + 0,029 \cdot \frac{80}{0,12} + 0,30 + 0,0 \right) = 51,3. \end{aligned}$$

По формуле (3.20) вычисляем расход

$$Q = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4 \cdot \sqrt{1 + \zeta_c}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{P_{узб}}{\gamma} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4 \cdot \sqrt{1 + 51,3}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \left(7 + \frac{1962}{981} \right)} = 0,0208 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Средние скорости течения и числа Рейнольдса по участкам при этом расходе равны:

$$v_3 = \frac{Q}{S_3} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 0,0208}{3,14 \cdot 0,12^2} = 1,84 \text{ м/с};$$

$$v_2 = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 = 1,84 \cdot \left(\frac{0,12}{0,20} \right)^2 = 0,66 \text{ м/с};$$

$$v_1 = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_1} \right)^2 = 1,84 \cdot \left(\frac{0,12}{0,10} \right)^2 = 2,65 \text{ м/с};$$

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu} = \frac{2,65 \cdot 0,10}{1,142} \cdot 10^6 = 2,32 \cdot 10^5;$$

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot d_2}{\nu} = \frac{0,66 \cdot 0,20}{1,142} \cdot 10^6 = 1,16 \cdot 10^5;$$

$$Re_3 = \frac{v_3 \cdot d_3}{\nu} = \frac{1,84 \cdot 0,12}{1,142} \cdot 10^6 = 1,93 \cdot 10^5,$$

где $\nu = 1,142 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент кинематической вязкости воды при температуре $t = 15^\circ \text{C}$.

При заданных числах Рейнольдса для определения коэффициентов λ , второго приближения применим универсальную формулу Альтшуля (3.11):

$$\lambda_1 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg \frac{Re}{Re \cdot \frac{0,1 \cdot k}{d_1} + 7} \right)^2} = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg \frac{2,32 \cdot 10^5}{2,32 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,1 \cdot 0,5}{100} + 7} \right)^2} = 0,0286;$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg \frac{1,16 \cdot 10^5}{1,16 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,1 \cdot 0,5}{200} + 7} \right)^2} = 0,0250;$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\left(1,8 \cdot \lg \frac{1,93 \cdot 10^5}{1,93 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,1 \cdot 0,5}{120} + 7} \right)^2} = 0,0280.$$

Далее производим расчет второго приближения

$$\zeta_c = \left(0,50 + 0,029 \cdot \frac{42,3}{0,10} + 0,68 + 0,68 + 0,56 \right) \cdot \left(\frac{120}{100} \right)^4 + 0,025 \cdot \frac{10}{0,20} \cdot \left(\frac{120}{200} \right)^4 + \left(0,20 + 0,028 \cdot \frac{80}{0,12} + 0,30 + 0,0 \right) = 49,8;$$

$$Q = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4 \cdot \sqrt{1 + \zeta_c}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(H + \frac{P_{\text{вд}}}{\gamma} \right)} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4 \cdot \sqrt{1 + 49,8}} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \left(7 + \frac{1962}{981} \right)} = 0,0210 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$v_3 = \frac{Q}{S_3} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 0,0210}{3,14 \cdot 0,12^2} = 1,86 \text{ м/с};$$

$$v_2 = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 = 1,86 \cdot \left(\frac{0,12}{0,20} \right)^2 = 0,67 \text{ м/с};$$

$$v_1 = v_3 \cdot \left(\frac{d_3}{d_1} \right)^2 = 1,86 \cdot \left(\frac{0,12}{0,10} \right)^2 = 2,68 \text{ м/с}.$$

Значение скорости второго приближения отличается от значения скорости первого приближения на величину δ

$$\delta = \frac{1,86 - 1,84}{1,86} \cdot 100\% = 1,1\% < 2\%.$$

Так как величина относительной погрешности δ лежит в установленном пределе, то расчет третьего приближения не производим.

Для построения диаграммы уравнения Бернулли вычисляем скоростные напоры

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{2,68^2}{2 \cdot 9,81} = 0,37 \text{ м}; \quad \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = \frac{0,67^2}{2 \cdot 9,81} = 0,02 \text{ м}; \quad \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = \frac{1,86^2}{2 \cdot 9,81} = 0,18 \text{ м}$$

и потери напора для характерных сечений:

сечение $a-a$

$$h_{w_{ax}} = \zeta_{ax} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 0,5 \cdot 0,37 = 0,19 \text{ м};$$

сечение $b-b$

$$h_{w_{кс}} = \zeta_{кс} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 0,68 \cdot 0,37 = 0,25 \text{ м};$$

$$h_{w_s} = h_{w_{ax}} + h_{w_{кс}} + \lambda_1 \cdot \frac{l_{ac}}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 0,19 + 0,25 + 0,286 \cdot \frac{20}{0,10} \cdot 0,37 = 2,55 \text{ м};$$

сечение $c-c$

$$h_{w_{кс}} = \zeta_{кс} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 0,68 \cdot 0,37 = 0,25 \text{ м};$$

$$h_{w_c} = h_{w_s} + h_{w_{кс}} + \lambda_1 \cdot \frac{l_{ac}}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 2,55 + 0,25 + 0,286 \cdot \frac{2,3}{0,10} \cdot 0,37 = 3,04 \text{ м};$$

сечение $e-e$

$$h_{w_{ep}} = \zeta_{ep} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 0,56 \cdot 0,37 = 0,21 \text{ м};$$

$$h_{w_e} = h_{w_c} + h_{w_{ep}} + \lambda_1 \cdot \frac{l_3}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = 3,04 + 0,21 + 0,286 \cdot \frac{20}{0,10} \cdot 0,37 = 5,37 \text{ м};$$

сечение $m-m$

$$h_{w_{mc}} = \zeta_{mc} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = 0,20 \cdot 0,18 = 0,04 \text{ м};$$

$$h_{w_m} = h_{w_e} + h_{w_{e.c.}} + \lambda_2 \cdot \frac{l_4}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = 5,37 + 0,04 + 0,025 \cdot \frac{10}{0,20} \cdot 0,02 = 5,44 \text{ м};$$

сечение $n-n$

$$h_{w_{3.к.}} = \zeta_{3.к.} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = 0,30 \cdot 0,18 = 0,05 \text{ м};$$

$$h_{w_n} = h_{w_m} + h_{w_{3.к.}} + \lambda_3 \cdot \frac{l_5}{2 \cdot d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = 5,44 + 0,05 + 0,028 \cdot \frac{80}{2 \cdot 0,12} \cdot 0,18 = 7,17 \text{ м};$$

сечение $II-II$

$$h_{w_{II}} = h_{w_n} + \lambda_3 \cdot \frac{l_5}{2 \cdot d_3} \cdot \frac{v_3^2}{2 \cdot g} = 7,17 + 0,028 \cdot \frac{80}{2 \cdot 0,12} \cdot 0,18 = 8,85 \text{ м}.$$

Проверяем точность результата, подставив значения h_w и $\frac{v_3^2}{2 \cdot g}$ в исходное уравнение (3.16)

$$\Delta = H + \frac{P_{изб}}{\gamma} - \left(\frac{v_3^2}{2 \cdot g} + h_w \right) = 7 + 2 - (0,18 + 8,85) = -0,03 \text{ м}.$$

Погрешность равна $\frac{|\Delta|}{H + \frac{P_{изб}}{\gamma}} \cdot 100\% = \frac{0,03}{7+2} \cdot 100\% = 0,3\%$, что находится в пределах точности вычислений.

По этим данным строим диаграмму уравнения Бернулли (см. рис. 3.2).

От уровня напора в резервуаре $H + \frac{P - P_a}{\gamma} = 9,0 \text{ м}$ для каждого характерного сечения откладываем вниз потерю напора до этого сечения. Соединив полученные точки, получаем напорную линию 3 (H_d). Отложим вниз от нее скоростной напор, получим пьезометрическую линию 2 (H_c). Геометрическая линия строится по высотным отметкам трубопровода; в рассматриваемом примере это линия 1. Так как на всех участках диаграммы уравнения Бернулли пьезометрическая линия выше геометрической, то в трубопроводе давление больше атмосферного. Расстояния между пьезометрической и геометрической линиями для любого сечения равны избыточному давлению в метрах столба движущейся жидкости. Так для сечения $e-e$ (внезапное расширение) избыточное давление $p - p_a = 3,63 \text{ м. вод. ст.} = 0,36 \text{ бар}$.

3.3. Порядок выполнения работы

Необходимо записать условия задачи, нарисовать схему заданного трубопровода. Затем провести расчет требуемых параметров течения жидкости с соответствующей точностью (погрешность расчета указывается). Все вычисления, производимые в процессе решения задачи, а также все используемые справочные данные записываются. После окончания расчета строится диаграмма Бернулли, снабженная необходимыми пометками и комментариями.

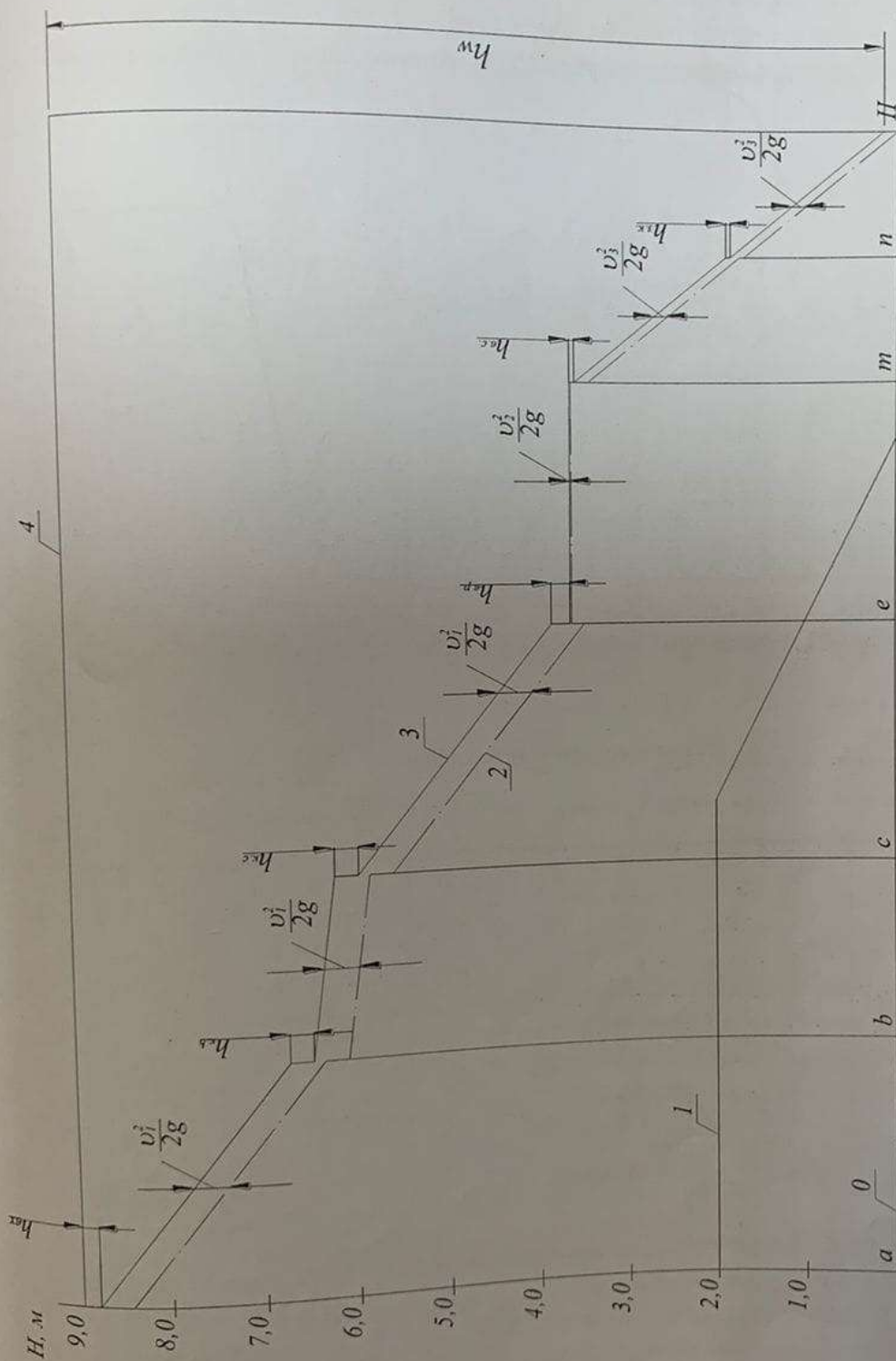


Рис. 3.2. Диаграмма уравнения Бернулли: 0 – плоскость сравнения; 1 – геометрическая ось трубопровода; 2 – пьезометрическая линия; 3 – напорная линия; 4 – уровень напора в резервуаре

**Единицы измерения величин, наиболее употребляемых
в гидравлических и гидродинамических расчетах**

в гидравлических и гидродинамических системах

Наименование:		Обозначение единиц в системах		Соотношения между единицами систем МКГСС и СИ
величин	единиц измерения в СИ	СИ	МКГСС	
Основные единицы				
Длина – l	метр	м	м	–
Масса – M, m	килограмм	кг	кгс·сек ² /м	1 кг – 0,102 кгс·сек ² /м
Время – T, t	секунда	сек	сек	–
Производные единицы				
Плотность – ρ	килограмм на кубический метр	кг/м ³	кгс·сек ² /м ⁴	1 кг/м ³ – 0,102 кгс·сек ² /м ⁴
Сила – F	ньютон	Н	кгс	1 Н – 0,102 кгс
Удельный вес – γ	ньютон на кубический метр	Н/м ³	кгс/м ³	1 Н/м ³ – 0,102 кгс/м ³
Скорость – v	метр на секунду	м/сек	м/сек	–
Ускорение – g	метр на секунду в квадрате	м/сек ²	м/сек ²	–
Давление – $p^*)$	ньютон на квадратный метр	Н/м ²	кгс/м ²	1 Н/м ² – 0,102 кгс/м ²
Динамическая вязкость – μ	ньютон-секунда на квадратный метр	Н·сек/м ²	кгс·сек/м ²	1 Н·сек/м ² – 0,102 кгс·сек/м ²
Кинематическая вязкость – ν	квадратный метр на секунду	м ² /сек	м ² /сек	–
Расход жидкости – Q	метр кубический в секунду	м ³ /сек	м ³ /сек	–
Циркуляция скорости – Γ	квадратный метр на секунду	м ² /сек	м ² /сек	–

*) – в случае расчетов с применением технической системы единиц

*) – в случае расчетов с применением технической системы единиц в качестве исходной единицы измерения пользуются килограмм-силой на квадратный сантиметр кгс/см², или технической атмосферой (ат): 1 ат – 98066,5 Н/м².

1 ат = 1 кгс/см² = 98066,5 Н/м² = 10 м.вод.ст.

физическая атмосфера (атм): 1 атм = 1,033 кгс/см² = 101325 Н/м².