

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Двоеглазов Семен Иванович

Должность: Директор

Дата подписания: 01.07.2025 13:45:22

Уникальный программный ключ:

2cc3f5fd1c09cc1a69668dd98bc3717111a1a555



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Старооскольский филиал

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

**«Российский государственный геологоразведочный университет имени
Серго Орджоникидзе»
(СОФ МГРИ)**

*Кафедра прикладной геологии, технологии поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых*

ГИДРОМЕХАНИКА

**Методические указания по выполнению курсовой работы
для студентов очной и заочной форм обучения
специальности 21.05.04 – «Горное дело»**

Рекомендовано Ученым советом СОФ МГРИ

Старый Оскол, 2022 г.

УДК 532
ББК 22.253

Составитель: Кривоченко А.В.
Рецензент: д.ф.-м.н. Ковалев А.В.

Гидромеханика. Методические указания по выполнению курсовой работы для студентов очной и заочной формы обучения специальности 21.05.04 - «Горное дело» / Сост.: А.В. Кривоченко. – Старый Оскол: СОФ МГРИ, 2022. – 108с.

Настоящие методические указания содержат примеры решения задач по каждой теме курсовой работы, и некоторые справочные материалы.

Издание предназначено для студентов высших учебных заведений обучающихся по специальности «Горное дело».

© А.В.Кривоченко, 2022 г.

© СОФ МГРИ, 2022 г.

Ведение

Успешное изучение курса «Гидромеханика» зависит от умения студентов работать самостоятельно. Основным назначением данного учебно-методического пособия – помочь изучающим гидромеханику применять теоретические знания и освоить методику гидравлических расчетов в ходе выполнения курсовой работы. Учебно-методическое пособие включает основные разделы курса «Гидромеханика» - «Гидростатика» (тема 1, тема 2), «Гидродинамика» (тема 3), «Прикладная гидромеханика» (тема 4, тема 5). Каждый раздел содержит задания для решения, а также примеры их выполнения. Примеры гидравлических расчетов приближены к горному производству. Выбор заданий осуществляется в соответствии с двумя последними цифрами номера зачетной книжки студента, а именно: номер задачи каждой темы соответствует предпоследней цифре (в случае нуля – это десятое задание); необходимые числовые значения параметров выбираются из таблицы в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки. В случае затруднения с выбором варианта следует обратиться к преподавателю дисциплины.

В приложении приводятся таблицы справочного характера, которые используются при решении заданий курсовой работы. Кроме приведенных справочных таблиц возможно использование справочных материалов других учебных пособий.

Как правило студенты сравнительно легко усваивают сведения, которые поясняются с помощью чертежей. Для этого в данной учебно-методическом пособии примеры гидравлических расчетов содержат большое количество графического материала. Примеры даются с подробными численными решениями.

Тема №1: «Гидростатическое давление в жидкости».

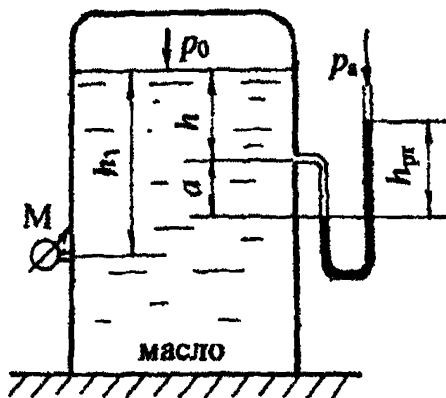


Рис. 1.1

ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.1). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

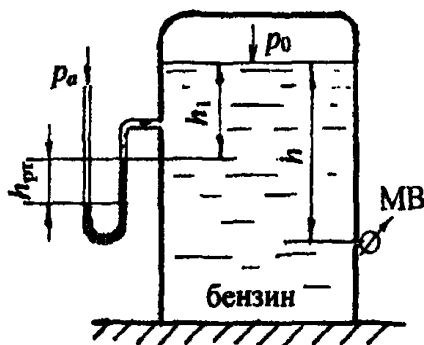


Рис. 1.2

берутся из таблицы 1.

Задание 1. Определить показания U-образного ртутного манометра $h_{рт}$, подключенного к резервуару с маслом на глубине $h = 0,8 \text{ м}$, если показания пружинного манометра установленного на глубине h_1 равны $p_{ман}$. Принять поправку ртутного манометра $a = 0,3 \text{ м}$, плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$, плотность

Задание 2. Определить давление p_0 на поверхности бензина в закрытом резервуаре и показания мановакуумметра $p_{мв}$ установленного на глубине h , если показания U-образного ртутного манометра равны $h_{рт}$. Принять глубину $h_1 = 1,0 \text{ м}$, плотность бензина $\rho_{бенз} = 720 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.2).

Требуемые числовые значения

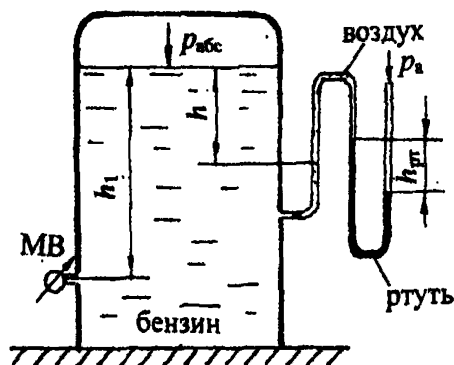


Рис. 1.3

Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Давлением воздуха в U-образном ртутном манометре можно пренебречь (рис. 1.3). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

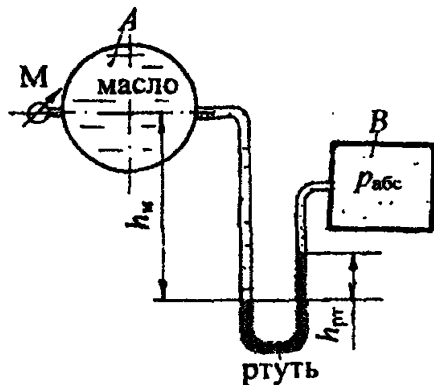


Рис. 1.4

Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Задание 3. Определить абсолютное давление на поверхности бензина в закрытом резервуаре $p_{\text{абс}}$, а также показание мановакуумметра $p_{\text{мв}}$, установленного на глубине h_1 , при заданных величинах $h = 0,5 \text{ м}$, $h_{\text{рт}} = 300 \text{ мм}$, атмосферное давление $p_a = 740 \text{ мм.рт.ст.}$

Задание 4. Определить абсолютное давление воздуха в резервуаре B, если показание манометра, установленного по центру резервуара A, заполненного маслом, равно $p_{\text{ман}}$, высоты уровней масла и ртути в U-образном ртутном дифференциальном манометре соответственно равны h_m , $h_{\text{рт}}$ (рис. 1.4). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

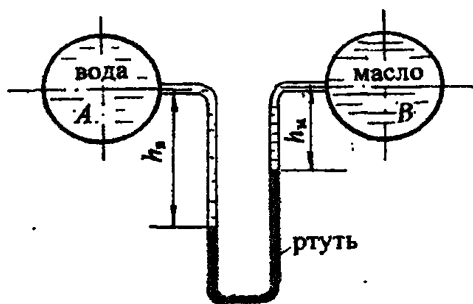


Рис. 1.5

Задание 5. Определить разность давлений (в ат) в центрах трубопроводов А и В, заполненных водой и маслом, если высоты уровней воды и масла в U-образном ртутном дифференциальном манометре равны соответственно $h_в$, $h_м$ (рис. 1.5). Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$;

ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

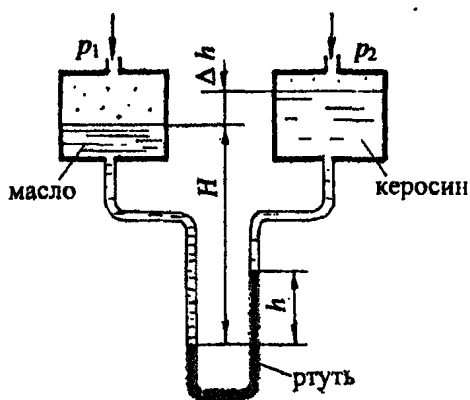


Рис. 1.6

Задание 6. Два сосуда наполнены разнородными жидкостями: маслом и керосином. На поверхности жидкостей в сосудах действуют давления p_1 и p_2 .

Найти разность этих давлений, если показание U-образного ртутного манометра равно h , высота уровня масла H , превышение уровня керосина Δh . Принять плотности жидкостей: масла $\rho_{мас} = 900$

кг/м^3 ; керосина $\rho_{кер} = 800 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1.6). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

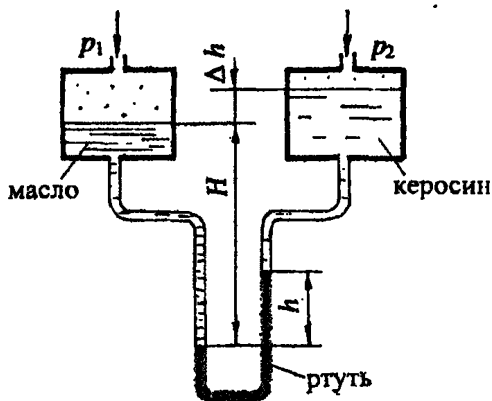


Рис. 1.7

$\text{кг}/\text{м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

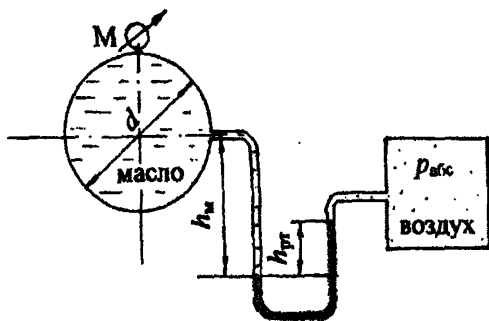


Рис. 1.8

Задание 7. Из открытого резервуара С через трубу В вода поднята в резервуар А с глубиной заполнения h . Давление воздуха на поверхности воды в резервуаре А измерено U-образным ртутным манометром, показание которого равно h_{pt} (рис. 1.7). Определить высоту H в трубе В. Принять плотность ртути $\rho_{pt} = 13,6 \cdot 10^3$

Задание 8. Определить показание манометра $p_{ман}$ (в ат) установленного на маслопроводе диаметром d , если абсолютное давление в воздушном резервуаре равно p_{abs} . Между воздушным резервуаром и маслопроводом подключен U-образный ртутный манометр, показание которого равно h_{pt} . Высота

столба масла от оси маслопровода до уровня ртути в U-образном манометре равно h_m . Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$; ртути $\rho_{pt} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ (рис. 1.8). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

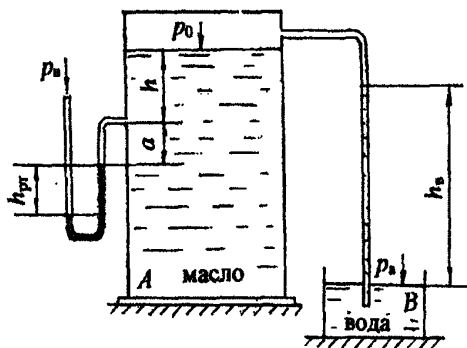


Рис. 1.9

также высоту подъема воды $h_в$ в стеклянной трубке опущенной в открытый резервуар B, заполненный водой (рис. 1.9). Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

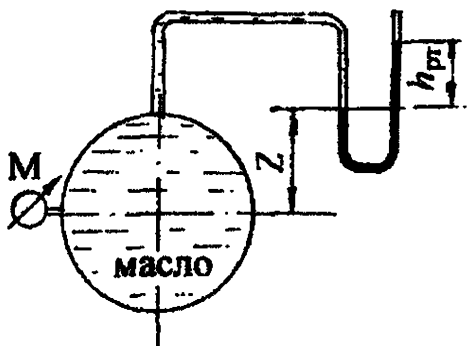


Рис. 1.10

$\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 1.

Задание 9. В закрытом резервуаре A, заполненном маслом, давление на поверхности жидкости равно p_0 . На глубине h подключен U-образный ртутный манометр показания которого равны $h_{рт}$, понижение уровня ртути в правом колене $a = 0,2 \text{ м}$. Определить давление p_0 (в бар) на поверхности масла, а

Задание 10. Определить на какой высоте Z находится уровень ртути в левом колене U-образного ртутного манометра, если манометрическое давление по центру маслопровода равно $p_{ман}$, а показания ртутного манометра равны $h_{рт}$. Система находится в равновесии (Рис. 1.10). Принять плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$; ртути

Таблица 1.

		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$h_1, \text{ м}$	1,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
	$\rho_{\text{мас}}, \text{ ат}$	0,21	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
2	$h, \text{ м}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$h_{\text{пр}}, \text{ мм}$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
3	$h_1, \text{ м}$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
4	$p_{\text{ман}}, \text{ ат}$	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
	$h_{\text{м}}, \text{ мм}$	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650
	$h_{\text{пр}}, \text{ мм}$	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
5	$h_{\text{в}}, \text{ мм}$	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550
	$h_{\text{м}}, \text{ мм}$	380	385	390	395	400	405	410	415	420	425
6	$h, \text{ мм}$	75	80	85	95	100	105	110	115	120	125
	$H, \text{ мм}$	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550
	$\Delta h, \text{ мм}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
7	$h, \text{ м}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	$h_{\text{пр}}, \text{ мм}$	210	205	200	195	190	185	180	175	170	175
8	$d, \text{ мм}$	184	188	192	196	200	204	208	212	216	220
	$p_{\text{абс}}, \text{ ат}$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,9	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
	$h_{\text{пр}}, \text{ мм}$	240	230	220	210	200	190	180	170	160	150

	h_m , мм	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650
9	h , м	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1,0
	h_{pm} , мм	44	42	40	38	36	34	32	30	28	26
	a , м	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,4	0,4	0,4
10	$p_{ман}$, бар	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
	h_{pm} , мм	130	125	120	115	110	105	100	95	90	85

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Гидростатическое давление в жидкости».

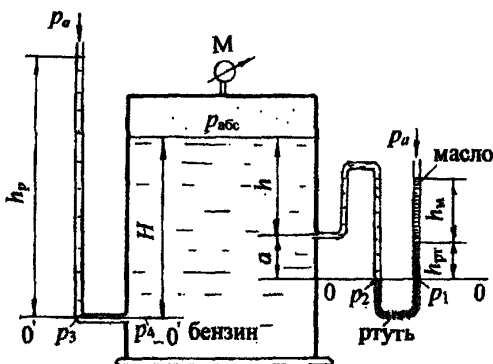


Рис. 1.11

манометра (обозначен буквой М), установленного на крышке резервуара, а также возможную высоту уровня бензина в пьезометре h_p при условии, что $h=0,75$ м; $a=0,15$ м; $H=1,1$ м; принять плотность масла $\rho_{мас} = 900$ кг/м³; плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Решение.

Решение проведем с учетом атмосферного давления, поскольку по условию задачи необходимо определить абсолютное давление паров бензина.

Для решения задачи воспользуемся понятием **плоскости уровня**. Выберем плоскость уровня 0-0 на разделе жидкостей бензин-ртуть и составим условие равенства давления, приравняв давления в правом (p_1) и левом (p_2) колене и-образного манометра:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2; \\ p_1 &= p_a + \rho_{мас} g h_m + \rho_{рт} g h_{рт}; \\ p_2 &= p_{абс} + \rho_{бенз} g (h_m + a). \end{aligned}$$

Пример 1. К резервуару (рис. 1.11) заполненному бензином плотностью $\rho_{бенз} = 700$ кг/м³, присоединен U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{рт} = 0,1$ м; уровень масла над ртутью $h_m = 0,2$ м. Определить абсолютное давление $p_{абс}$ паров на поверхности бензина и показание пружинного

Приравнявая давления получаем

$$p_a + \rho_{мас} g h_m + \rho_{рт} g h_{рт} = p_{абс} + \rho_{бенз} g (h_m + a),$$

отсюда абсолютное давление паров бензина:

$$p_{абс} = p_a + \rho_{мас} g h_m + \rho_{рт} g h_{рт} - \rho_{бенз} g (h_m + a).$$

Принимая атмосферное давление $p_a = 98 \text{ кПа}$, получаем:

$$\begin{aligned} p_a &= 98 \cdot 10^3 + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,1 - 700 \cdot 9,8 \cdot 0,9 = \\ &= 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па} \end{aligned}$$

Показания манометра, установленного на крышке бака, определяется так:

$$p_{ман} = p_{абс} - p_a = \rho_{мас} g h_m + \rho_{рт} g h_{рт} - \rho_{бенз} g (h_m + a) = 8,76 \text{ кПа} = 0,089 \text{ ат.}$$

Для определения возможной высоты бензина в пьезометрической трубке h_p составим условие равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0-0, в этом случае расчеты можно вести по избыточному (манометрическому) давлению. Для плоскости уровня 0-0 запишем равенство давлений

$$\rho_{бенз} g h_p = p_{ман} + \rho_{бенз} g H,$$

отсюда

$$h_p = \frac{p_{ман}}{\rho_{бенз} g} + H = 2,38 \text{ м.}$$

Ответ. $p_{абс} = 106,76 \cdot 10^3 \text{ Па}$; $p_{ман} = 8,76 \text{ кПа}$; $h_p = 2,38 \text{ м}$.

Пример 2. Два резервуара заполнены водой и бензином, линии центров которых находятся на одном уровне, соединены двухколенным ртутным манометром (рис. 1.12). Пространство между уровнями ртути в манометре заполнено маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Определить, в каком резервуаре давление больше и на какую величину если высоты уровней жидкостей равны соответственно: $h_1 = 250 \text{ мм}$; $h_2 = 120 \text{ мм}$; $h_3 = 80 \text{ мм}$; $h_4 = 50 \text{ мм}$. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{\text{рт}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

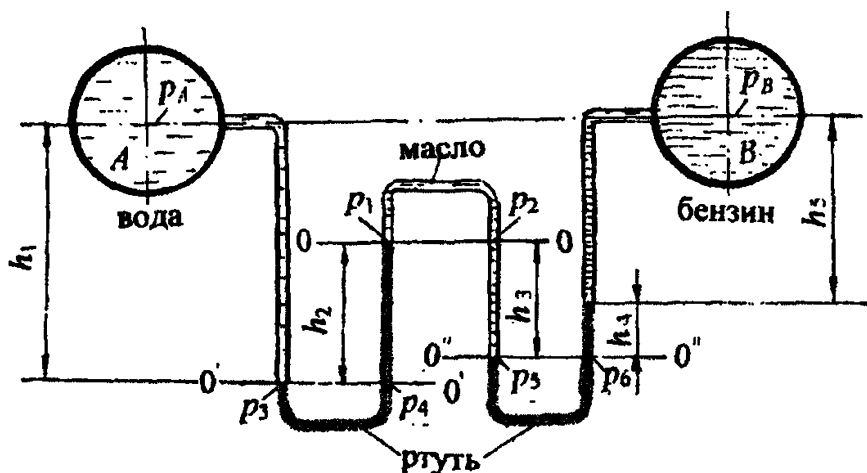


Рис. 1.12

Решение.

Резервуары закрыты, следовательно давление будем рассчитывать по избыточному давлению без учета атмосферного давления. Обозначим давление на уровне центра в левом резервуаре p_A , в правом p_B .

Определим положение плоскостей уровня для данной равновесной системы: это плоскости $0-0$, $0'-0'$, $0''-0''$. Данные горизонтальные плоскости проводятся по однородной жидкости $0-0$ - по маслу, остальные по ртути. Для этих плоскостей запишем условие равенства давлений: $p_1 = p_2$; $p_3 = p_4$; $p_5 = p_6$. Плоскость $0-0$ является основной плоскостью равновесного состояния для которой $p_1 = p_2$.

Согласно основному уравнению гидростатики, чтобы записать давление p_1 , нужно к давлению в центре резервуара А (p_A) прибавить давление столба воды $\rho g h_1$ - получим давление $p_3 = p_4$, из давления p_4 вычтем давление столба ртути $\rho_{рт} g h_2$ и, таким образом, получаем:

$$p_1 = p_A + \rho g h_1 - \rho_{рт} g h_2.$$

Аналогично для давления p_2 :

$$p_2 = p_B + \rho_{бенз} g h_5 + \rho_{рт} g h_4 - \rho_{мас} g h_3.$$

Согласно чертежу, высота столба бензина

$$h_5 = h_1 - h_2 + h_3 - h_4 = 160 \text{ мм}.$$

По распределению ртути в дифференциальном манометре предположим, что давление в резервуаре А больше чем в резервуаре В. Найдем эту разность:

$$\Delta p = p_A - p_B = \rho_{бенз} g h_5 - \rho_{рт} g h_4 - \rho_{мас} g h_3 - \rho g h_1 + \rho_{рт} g h_2.$$

Подставляя численные значения получаем $\Delta p = 20,63 \text{ кПа}$.

Ответ. $\Delta p = 20,63 \text{ кПа}$. Поскольку ответ положителен, то давление в резервуаре А больше чем в резервуаре В.

Пример 3. Определить какое давление – манометрическое или вакуум показывает мановакуумметр (p_{me}), установленный по оси резервуара B с керосином, если показания манометра по центру резервуара A с водой $p_{ман}=0,12 \text{ ат}$. Между резервуарами подключен U-образный ртутный манометр, показание которого $h_{рт}=200 \text{ мм}$; расстояние от уровня ртути в левом колене до оси резервуара A $h=300 \text{ мм}$. Оси центров резервуаров находятся на одной линии (рис. 1.13). Принять плотность керосина $\rho_{кер}=820 \text{ кг/м}^3$; ртути $\rho_{рт}=13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Решение.

В данной задаче основной плоскостью уровня для всей системы является плоскость $0-0$, в левой части она проходит по воде, в правой – по ртути U-образного манометра. Для этой плоскости $p_1 = p_2 = p_3$. В плоскости $0'-0'$, проведенной в керосина $p_4 = p_5$. Задача решается без учета атмосферного давления. Если рассчитанное давление на уровне установки мановакуумметра (МВ) получится положительным, то прибор работает как манометр, в противном случае как вакуумметр.

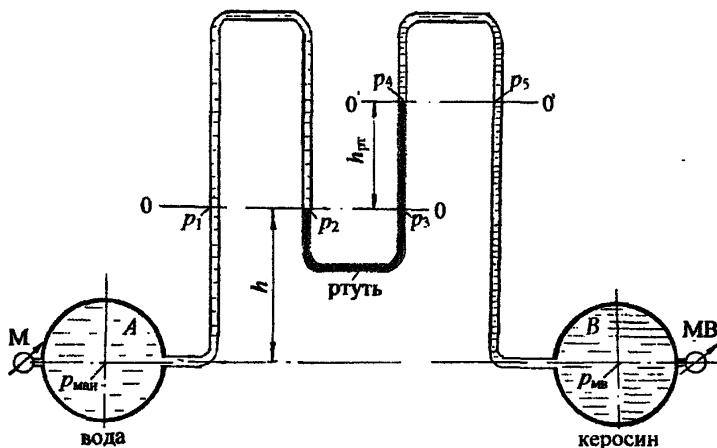


Рис. 1.13

Запишем давление на уровне установки мановакуумметра. Имеем манометрическое давление $p_{ман}$ по оси резервуара A , поднимаемся до плоскости уровня $0-0$, т.е. вычитаем давление столба воды ρgh , получаем давление p_1 , по плоскости уровня переходим в левое колено U-образного манометра, где $p_1 = p_2$. Затем переходим в правое крыло манометра, где $p_3 = p_2$, поднимаемся к плоскости $0'-0'$, т.е. вычитаем давление столба ртути $\rho_{рт} gh_{рт}$ и получаем давление p_4 ; переходим по плоскости уровня $0'-0'$ к давлению $p_5 = p_4$. К полученному давлению p_5 прибавляем давление столба керосина $\rho_{кер} g(h + h_{пт})$ поскольку опускаемся вниз до оси резервуара B .

Таким образом

$$p_{MB} = p_{ман} - \rho gh - \rho_{рт} gh_{рт} + \rho_{кер} g(h + h_{пт})$$

Подставляя числовые значения получаем

$$p_{MB} = 0,12 \cdot 98 \cdot 10^3 - 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,3 - 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 + \\ + 820 \cdot 9,8 \cdot 0,5 = -13,82 \text{ кПа}.$$

Знак «минус» говорит о том, что мановакуумметр работает как вакуумметр.

Ответ. Мановакуумметр работает как вакуумметр и показывает вакуумметрическое давление $p_{вак} = 0,14 \text{ ат}$.

Тема № 2. «Сила давления жидкости на плоские поверхности».

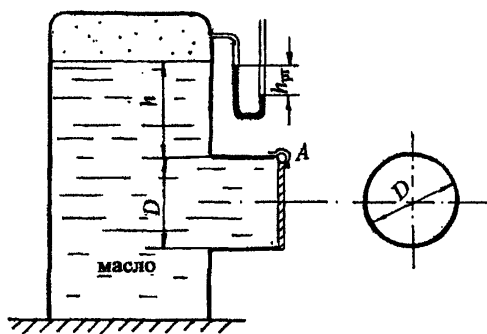


Рис. 2.1

(рис. 2.1). Принять: диаметр крышки - D , глубину масла до шарнира A - h , плотность масла $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{рт} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Числовые данные берутся из таблицы 2.

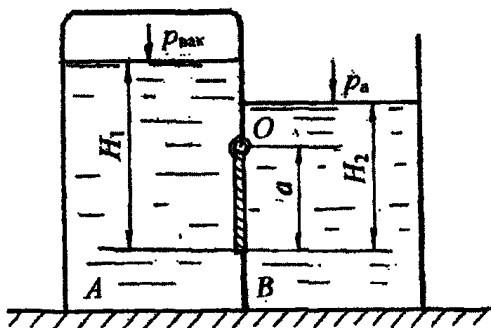


Рис. 2.2

крышка оставалась в закрытом положении. Резервуар B открыт (рис. 2.2). Числовые данные берутся из таблицы 2.

Задание 1. Патрубок резервуара перекрывается круглой крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира A. Определить каким должно быть показание U-образной трубки, заполненной ртутью ($h_{рт}$), установленного на поверхности масла, чтобы крышка находилась в закрытом положении за счет вакуума

Задание 2. В вертикальной перегородке отстойника состоящего из двух резервуаров – A и B, проделано квадратное отверстие со стороной a , которое перекрывается крышкой, поворачивающейся вокруг шарнира O. Определить, какой наименьший вакуум нужно создать на поверхности воды в закрытом резервуаре A, чтобы

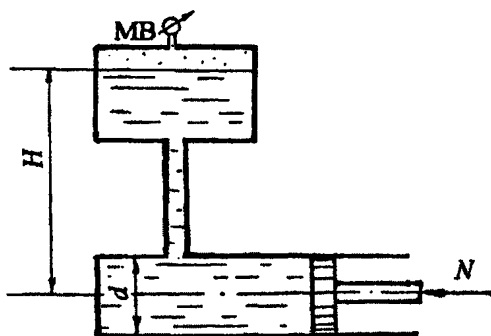


Рис. 2.3

на уровне оси поршня H (рис. 2.3). Числовые данные берутся из таблицы 2.

Задание 3. Определить величину и направление силы N , приложенной к штоку гидроцилиндра для удержания его на месте, если показание мановакуумметра равно p_{MB} . Гидроцилиндр заполнен маслом плотностью $\rho_{мас} = 900 \text{ кг/м}^3$, диаметр поршня d , высота уровня масла

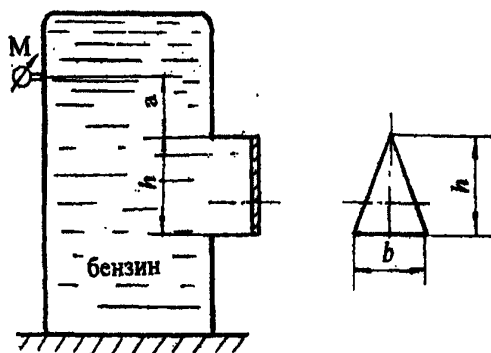


Рис. 2.4

Задание 4. Определить силу давления бензина на треугольный затвор шириной b и высотой h , а также положение центра давления, если показание манометра установленного на расстоянии a от верхней кромки затвора равно $p_{ман}$ (рис. 2.4). Принять плотность бензина $\rho_{бенз} = 720 \text{ кг/м}^3$. Числовые данные берутся из таблицы 2.

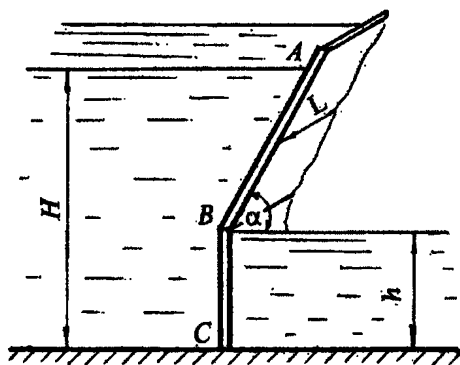


Рис. 2.5

выполнить графо-аналитическим методом. Числовые данные берутся из таблицы 2.

Задание 5. Определить величину и положение равнодействующей сил давления воды на плоскую ломаную стенку ABC , удерживающую слева напор воды H , справа h . Длина стенки в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа L . Верхняя часть стенки наклонена под углом α к горизонту (рис. 2.5). Расчет

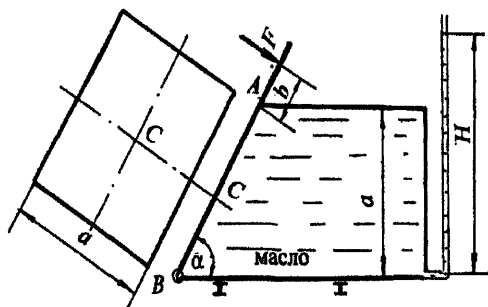


Рис. 2.6

сторонай a . Патрубок заполнен маслом плотностью $\rho_{\text{мас}} = 900 \text{ кг/м}^3$. К дну патрубка присоединен пьезометр показание которого H . Сила F приложена на расстоянии $b=50$ мм от стенки патрубка (рис. 2.6). Числовые данные берутся из таблицы 2.

Задание 6. Определить нормальное усилие F , приложенное к наклонной крышке AB для удержания крышки в закрытом положении. Крышка расположена под углом α к горизонту и укреплена с помощью шарнира B и перекрывает патрубок квадратного сечения со

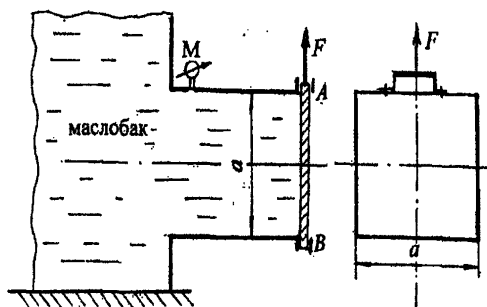


Рис. 2.7

кг/м^3 , коэффициент трения скольжения в пазах - f . Масса крышки $M=2,0 \text{ кг}$ (рис. 2.7). Числовые данные берутся из таблицы 2.

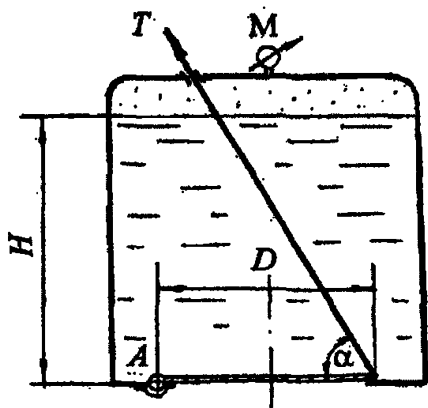


Рис. 2.8

Трением в шарнире и направляющих троса пренебречь (Рис. 2.8). Числовые данные берутся из таблицы 2.

Задание 7. Патрубок маслобака квадратного сечения со стороной a перекрывается крышкой AB , перемещающейся в вертикальных пазах. Определить силу F для открытия крышки, если показания манометра установленного на верхней стенке патрубка $p_{\text{ман}}$. Принять плотность масла $\rho_{\text{мас}}=900$

Задание 8. В закрытом резервуаре с водой круглое донное отверстие закрывается крышкой диаметром D , шарнирно укрепленной в точке A . Определить наименьшую силу натяжения троса T для открытия крышки. Трос укреплен под углом α . Принять показания манометра на поверхности воды $p_{\text{ман}}$, глубину заполнения резервуара H , массу крышки $M = 4,0 \text{ кг}$.

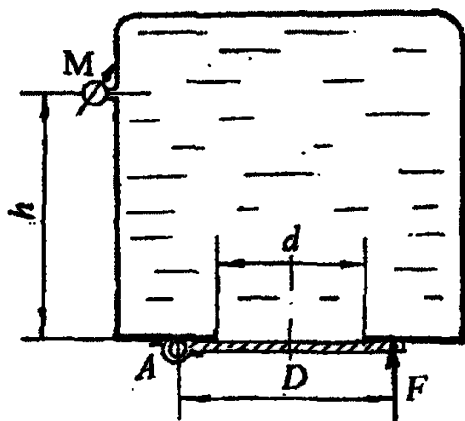


Рис. 2.9

Задание 9. Закрытый резервуар, заполненный водой находится под давлением. В резервуаре круглое отверстие диаметром d , закрывается крышкой D , закрепленной шарниром в точке A . Определить силу F удерживающую крышку в закрытом положении, если масса крышки $M = 4,0$ кг. Показание манометра на расстоянии h от дна равно $p_{\text{ман}}$ (рис. 2.9). Числовые данные берутся из таблицы 2.

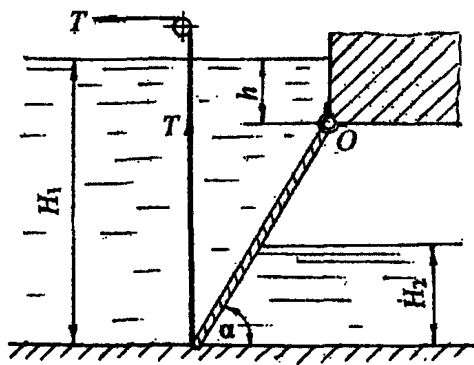


Рис. 2.10

Задание 10. Определить усилие T , которое нужно приложить к вертикальному тросу для открытия щита, перекрывающего канал прямоугольного сечения. Щит расположен под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту и закреплен шарнирно в т. O к опоре. Ширина щита в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа $B = 3,0$ м. Глубина воды перед щитом H_1 , за щитом H_2 .

Уровень воды над шарниром h . Масса щита $M = 500$ кг (рис. 2.10). Задание выполнить графо-аналитическим способом. Требуемые данные берутся из таблицы 2.

Таблица 2.

Величины		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	D , мм	560	570	580	590	600	610	620	630	640	650
	h , мм	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
2	a , мм	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
	H_1 , м	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	H_2 , м	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
3	P_{MB} , ат	-0,1	0,1	-0,11	0,11	-0,12	0,12	-0,13	0,13	-0,14	0,14
	d , мм	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
	H , м	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
4	b , мм	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850
	h , мм	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
	a , мм	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
	$P_{ман}$, ат	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
5	H , м	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
	h , м	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
	L , м	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
	α , град	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
6	α , град	40	45	50	55	60	60	65	70	75	80
	a , мм	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	H , мм	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
7	a , мм	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	$P_{ман}$, ат	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
	f	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
8	D , мм	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
	α , град	45	48	52	56	60	64	68	72	76	80
	$P_{ман}$, ат	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
9	d , мм	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400

	$D, \text{ мм}$	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480
	$h, \text{ м}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$p_{\text{ман}},$ ат	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
10	$H_1,$ м	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
	$H_2,$ м	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
	$h, \text{ м}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Примеры выполнения заданий курсовой работы по теме «Сила давления жидкости на плоские поверхности».

Пример 1. Прямоугольная крышка AB (рис. 2.11), расположенная под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту, перекрывает патрубок закрытого резервуара с водой. Высота патрубка $h = 600$ мм, ширина $b = 400$ мм. Крышка может поворачиваться вокруг шарнира A . Высота уровня воды над шарниром $a = 200$ мм. Давление на поверхности воды соответствует показанию U-образного ртутного манометра $h_{рт} = 80$ мм.

Определить силу натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении. Угол натяжения троса $\beta = 45^\circ$. Принять плотность воды $\rho = 10^3$ кг/м³.

Решение.

Для определения силы натяжения троса T для удержания крышки AB в закрытом положении необходимо определить силу от внешнего давления R_0 и силу давления воды $R_{ж}$.

Рассмотрим аналитический способ расчета давления и центра давления. Расчет проведем в следующей последовательности:

- рассчитывается сила давления жидкости и сила внешнего давления, при этом на чертеже обозначаются центральные оси плоской стенки и глубина погружения центра тяжести стенки от свободной поверхности (h_C);
- определяются точки приложения сил, на чертеже обозначается точка приложения силы давления жидкости (центр давления) и глубина погружения центра давления h_D ;
- показывается направление действия сил, при этом сила давления направлена по нормали к поверхности.

Определим силу от внешнего давления R_0 . Значение давления p_0 по показанию U-образного манометра получим из условия равновесия жидкости относительно плоскости уровня 0-0. Давление p_0 является избыточным:

$$p_0 = \rho_{pm} g h_{pm}; \quad p_0 = 13,6 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,08 \approx 10,7 \text{ кПа}.$$

Значение p_0 можно получить другим способом – перевести показание манометра 80 мм. рт. ст. в Па:

$$p_0 = 80 \cdot 133,3 \approx 10,7 \text{ кПа}.$$

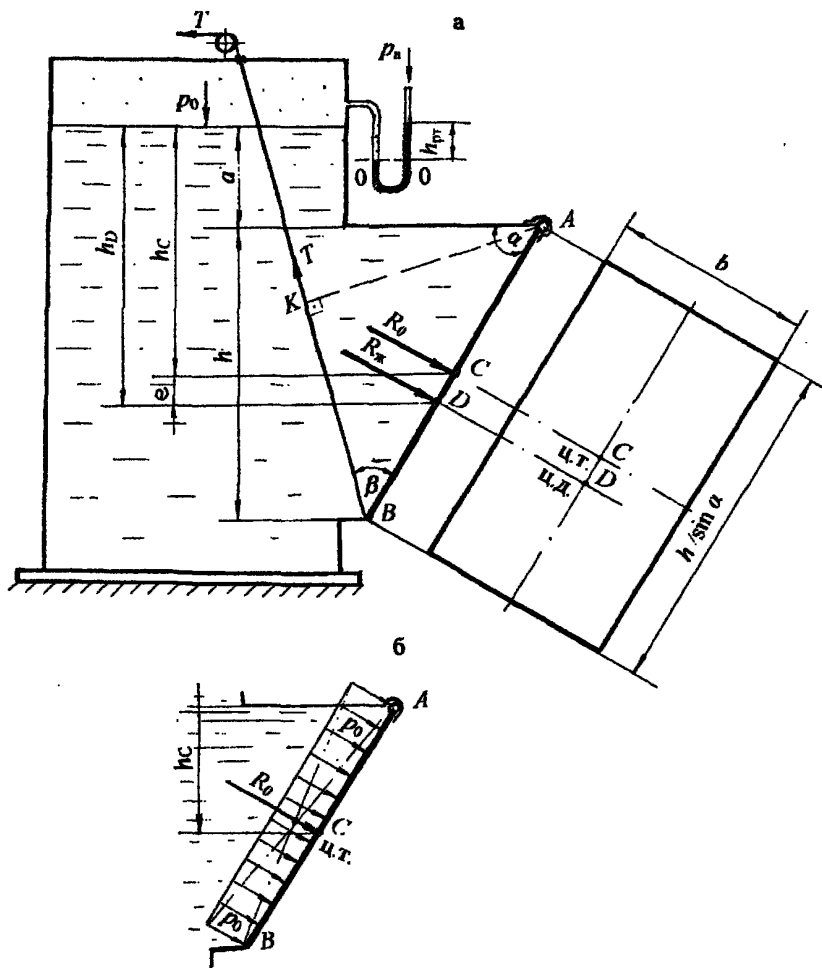


Рис. 2.11

Сила от внешнего давления есть $R_0 = p_0 \cdot A$, где A – площадь крышки в м^2 . Из чертежа $A = bh / \sin 60^\circ$. Тогда $R_0 = 10,7 \cdot 0,4 \cdot 0,693 = 2,97 \text{ кН}$.

Покажем линию действия и точку приложения силы R_0 . Эпюра давления p_0 представляет собой равномерно распределенную прямоугольную нагрузку; равнодействующая от такой нагрузки проходит через центр тяжести эпюры и приложена в центре тяжести стенки на глубина h_C (рис. 2.11б). Сила R_0 направлена по нормали из жидкости на стенку, как сила внешнего, избыточного давления.

Определим силу давления жидкости $R_{жс} = \rho g h_C A$, где $h_C = (a + h/2) = 0,5 \text{ м}$; глубину погружения центра тяжести стенки в жидкость h_C отсчитываем от свободной поверхности (рис. 2.11а). То есть $R_{жс} = \rho g (a + h/2) hb / \sin 60^\circ$.

Подставляя числовые значения, получаем

$$R_{жс} = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,693 \cdot 0,4 = 1,36 \text{ кН}.$$

Рассчитаем глубину погружения центра давления h_D (точки приложения силы R_D).

$$h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}, \quad \text{где} \quad I_C = \frac{bh^3}{12 \sin^2 \alpha} \quad - \quad \text{центральный}$$

момент инерции прямоугольной крышки относительно горизонтальной оси. Подставляя числовые значения, получаем $h_D = 0,56 \text{ м}$.

Эксцентриситет (понижение центра давления относительно центра тяжести) $e = \frac{h^2}{12h_C} = 0,06 \text{ м} = 60 \text{ мм}$ (рис. 2.11а).

Рассчитаем силу натяжения троса T . Для этого составим уравнение моментов относительно точки A $\sum M_A = 0$. В этом

случае $\frac{R_0 h}{2 \sin 60^\circ} + \frac{R_{жс} (h_D - a)}{\sin 60^\circ} - \frac{Th \sin 45^\circ}{\sin 60^\circ} = 0$. Отсюда находим $T = 2,35 \text{ кН}$.

Ответ: для удержания крышки в закрытом положении необходима сила натяжения троса $T \geq 2,35 \text{ кН}$.

Пример 2. В торцевой стенке цистерны, заполненной бензином, предусмотрена плоская круглая крышка диаметром $d = 1,6 \text{ м}$, укрепленная при помощи болтов. Определить силу давления бензина на крышку и точку приложения силы, если высота уровня бензина над нижней кромкой крышки $H = 2,0 \text{ м}$. На поверхности бензина действует вакуумметрическое давление $p_{\text{вак}} = 0,2 \text{ ат}$. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.12).

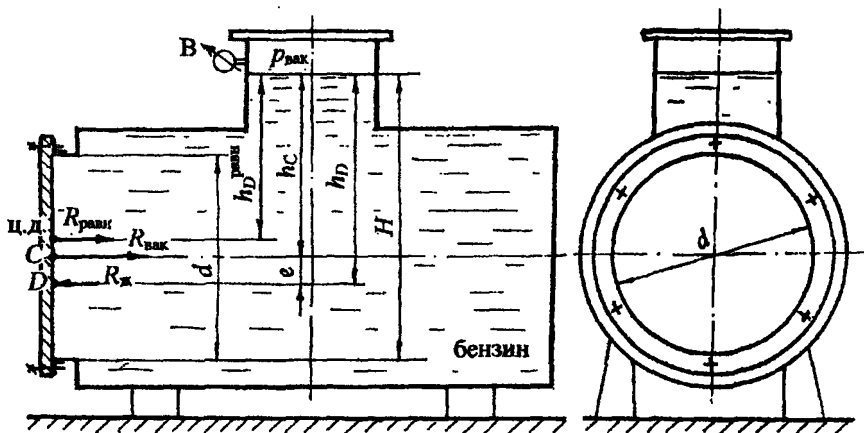


Рис. 2.12

Решение.

Для определения равнодействующей воспользуемся аналитическим методом. В этом случае $\vec{R}_{\text{равн}} = \vec{R}_0 + \vec{R}_{\text{ж}}$, или $R_{\text{равн}} = p_0 A + \rho g h_C A$.

Определим силу внешнего вакуумметрического давления $R_0 = R_{\text{вак}} = p_{\text{вак}} A$, где A — площадь крышки;

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14 \cdot 1,6^2 / 4 = 2,0 \text{ м}^2.$$

$$\text{Тогда } R_{\text{вак}} = 0,2 \cdot 98 \cdot 10^3 \cdot 2,0 = 39,4 \text{ кН}.$$

Данная сила приложена в центре тяжести крышки (т. С) и направлена по нормали внутрь жидкости, как сила отрицательного вакуумметрического давления.

Определим силу давления бензина на крышку $R_{ж} = \rho_{бенз} g h_C A$, где h_C – глубина погружения центра тяжести крышки, отсчитанная от свободной поверхности. Согласно геометрии чертежа $h_C = H - d/2 = 1,2$ м. Тогда

$$R_{ж} = 720 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 2,0 = 16,9 \text{ кН}.$$

Сила давления $R_{ж}$ приложена в центре давления на глубине h_D и направлена по нормали из жидкости. При этом глубина погружения центра давления есть $h_D = h_C + \frac{I_C \sin^2 \alpha}{h_C A}$.

Подставив числовые значения получаем $h_D = 1,2 + 0,13 = 1,33$ м. Эксцентриситет при этом $e \approx 0,13$ м.

Определим величину и положение равнодействующей $R_{равн}$ путем векторного сложения R_0 и $R_{ж}$. В числовом виде $R_{равн} = R_0 - R_{ж} = 22,5$ кН.

Положение равнодействующей определи исходя из теоремы Вариньона: момент от равнодействующей равен сумме моментов составляющих. Таким образом:

$$M_{R_{равн}} = M_{R_0} + M_{R_{ж}};$$

$$R_{равн} h_D^{равн} = R_0 h_C - R_{ж} h_D; \text{ отсюда}$$

$$h_D^{равн} = \frac{R_0 h_C - R_{ж} h_D}{R_{равн}} = 1,1 \text{ м. Равнодействующая направлена}$$

по нормали внутрь жидкости.

Ответ. $R_{равн} = 22,5$ кН, $h_D^{равн} = 1,1$ м.

Пример 3. Определить равнодействующую давления воды и положение центра давления на грани напорной грани плотины ABC, удерживающей напоры: $H_1 = 3,0$ м; $H_2 = 2,0$ м. Угол наклона наклонной грани плотины $\alpha = 60^\circ$. Длина плотины в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, $l = 10$ м (рис. 2.13). Решение выполнить графо-аналитическим методом.

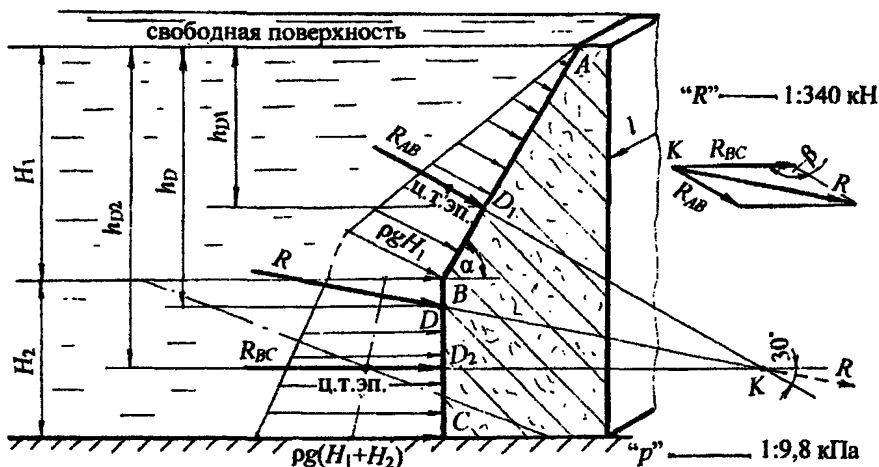


Рис. 2.13

Решение.

Графо-аналитический метод решения предусматривает выполнение чертежа в масштабе. Представим в в удобном выбранном масштабе сечение плотины и действующие напоры. Равнодействующая давления воды на грани плотины определяется путем векторного сложения сил, действующих на наклонную (R_{AB}) и вертикальную (R_{BC}) грани плотины:

$$\vec{R} = \vec{R}_{AB} + \vec{R}_{BC}$$

Расчет силы давления на плоские поверхности графо-аналитическим методом проведем по следующей методике.

- Определим давление воды в характерных точках плотины ABC :

$$p_A = 0; \quad p_B = \rho g H_1; \quad p_C = \rho g (H_1 + H_2);$$

$$p_B = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 3,0 = 29,4 \cdot 10^3 \text{ Па} = 29,4 \text{ кПа};$$

$$p_C = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 5,0 = 49,0 \cdot 10^3 \text{ Па} = 49,0 \text{ кПа}.$$

- Строим эпюры гидростатического давления воды. В выбранном масштабе откладываем величину давления в точках A , B , и C . Давление действует нормально к поверхности (рис. 2.13).

Эпюра давления на наклонную грань плотины представляет собой равномерную нагрузку в виде треугольника. Основание треугольника соответствует давлению $p_B = \rho g H_1$ отложенному по нормали к наклонной грани.

При построении эпюры давления на вертикальную грань, то же давление в точке B откладывается нормально к вертикальной грани плотины. В точке C откладываем давление $p_C = \rho g (H_1 + H_2)$. Для вертикальной грани эпюра давления представляет равномерную нагрузку в виде трапеции (рис. 2.13).

Рассчитаем силы давления воды на грани плотины:

$$R_{AB} = S_{\text{эп}_1} l = \frac{\rho g H_1^2}{2 \sin 60^\circ} l = 509,2 \text{ кН};$$

$$R_{BC} = S_{\text{эп}_2} l = \frac{\rho g H_1 + \rho g (H_1 + H_2)}{2} H_2 l = 784,0 \text{ кН}.$$

Определим линию действия сил R_{AB} и R_{BC} . Сила давления жидкости проходит через центр тяжести эпюры гидростатического давления. Центр тяжести эпюры в виде треугольной нагрузки расположен на расстоянии $2/3$ высоты треугольника, т.е. на расстоянии $2/3 \cdot H_1 / \sin 60^\circ$. Находим в масштабе центр тяжести треугольника и показываем линию действия силы R_{AB} . Сила проходит через центр тяжести треугольника и приложена нормально к наклонной грани

плотины в центре давления (точка D_1). Отмечаем на чертеже глубину погружения центра давления $h_{D1} = 2/3H_1$.

Для определения положения центра тяжести эпюры в виде трапеции рассмотрим геометрический способ определения центра тяжести трапеции:

- к меньшему основанию трапеции на его продолжение в любую сторону добавляем большее основание трапеции;
- к большему основанию в противоположную сторону прибавляем меньшее основание;
- полученные точки соединяются прямой;
- через середины оснований трапеции проводится дополнительная линия;
- точка пересечения двух линий построения является центром тяжести эпюры давления в виде трапеции.

Согласно данному методу показываем центр тяжести трапеции и через данную точку проводим силу R_{BC} по нормали к вертикальной грани. С учетом масштаба действующих напоров $H_{D2} = 4,1 \text{ м}$.

Определим величину и линию действия равнодействующей сил давления R путем векторного сложения сил R_{AB} и R_{BC} . Для данного случая точка пересечения составляющих сил (т. K) вынесена за пределы чертежа, а точка действия равнодействующей (т. D) перенесена по линии действия силы R до ее пересечения с гранью плотины. Глубину погружения центра давления h_D определяем по масштабу. В данном случае $h_D = 3,5 \text{ м}$.

Числовое значение равнодействующей найдем по теореме косинусов $R = \sqrt{R_{AB}^2 + R_{BC}^2 - 2R_{AB}R_{BC} \cos 150^\circ} = 1251,2 \text{ кН}$.

Ответ. Сила давления воды на напорную грань плотины $R = 1251,2 \text{ кН}$, глубина погружения центра давления $h_D = 3,5 \text{ м}$.

Тема № 3. «Сила давления жидкости на криволинейные поверхности».

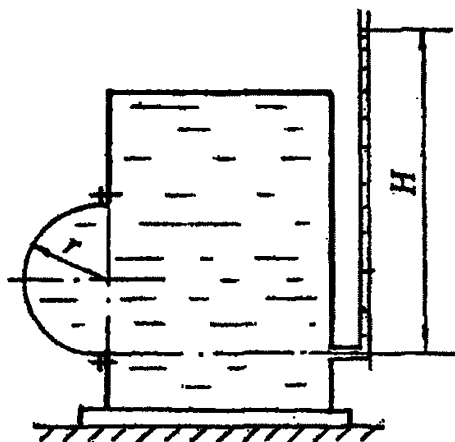


Рис. 3.1

Задание 1. Определить величину и угол наклона силы давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара (рис. 3.1), если радиус полусферы r , а показания пьезометра выведенного на уровень нижней кромки крышки H . Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}}=800 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

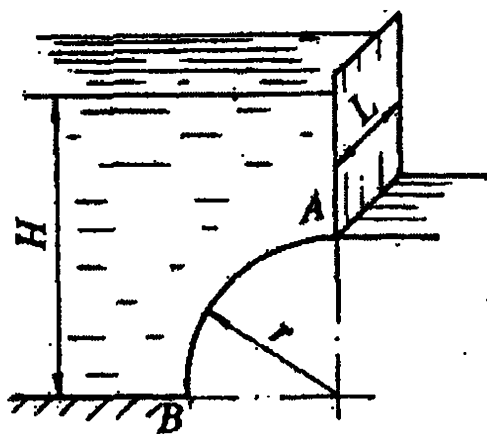


Рис. 3.2

Задание 2. Определить силу давления масла на цилиндрическую стенку резервуара AB (рис. 3.2), угол наклона силы и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара H , радиус цилиндрической части r , секторальный угол равен 90° ; длина образующей цилиндрической поверхности L . Принять плотность масла $\rho_{\text{масл}}=860 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3

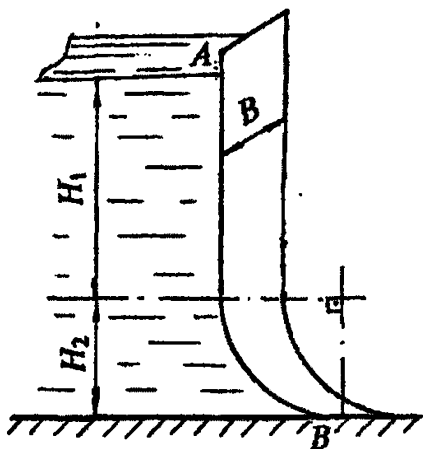


Рис. 3.3

Задание 3. Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB резервуара (рис. 3.3), если ширина резервуара B , напоры воды H_1 , H_2 . Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

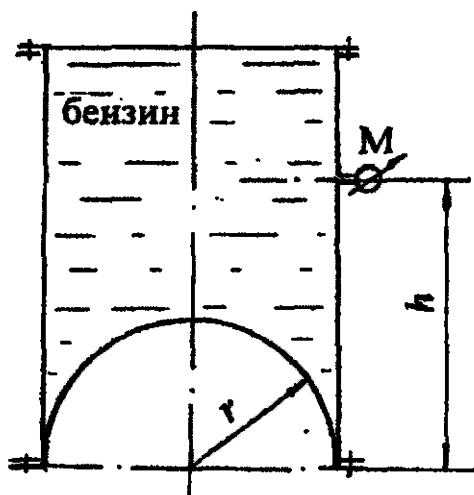


Рис. 3.4

Задание 4. Определить силу давления бензина на полусферическое дно цилиндрического резервуара (рис. 3.4) радиусом r , если показание манометра, установленного на расстоянии h от дна резервуара $p_{ман}$. Принять плотность бензина $\rho_{бенз}=720 \text{ кг/м}^3$. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

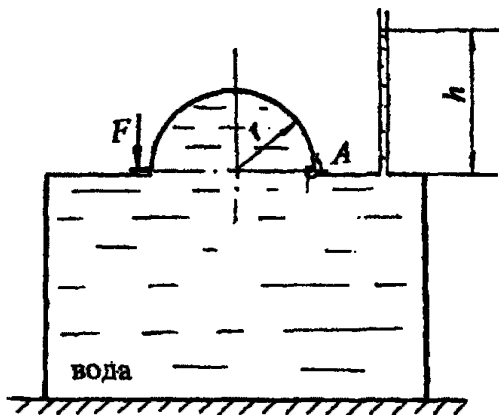


Рис. 3.5

Задание 5. Определить усилие F , которое нужно приложить к полусферической крышке резервуара с водой (рис. 3.5) для удержания ее в закрытом положении, если радиус сферы r . Крышка поворачивается вокруг шарнира в точке A . Показание пьезометра, установленного на уровне шарнира равно h . Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

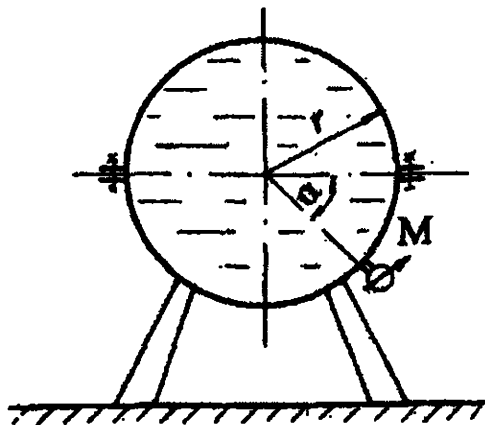


Рис. 3.6

Задание 6. Определить силу давления воды на верхнюю и нижнюю половины сферического резервуара радиусом r , полностью заполненного водой, а также растягивающие усилие в болтах фланцевого соединения (количество болтов N), если показание манометра установленного под углом 45° в нижней части резервуара равно $p_{\text{ман}}$ (рис. 3.6). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

Задание 7. Определить величину, угол наклона и глубину центра давления для равнодействующей давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.7) длиной L . Действующий напор H . Криволинейная стенка представляет собой часть цилиндрической поверхности с секторным углом φ . Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

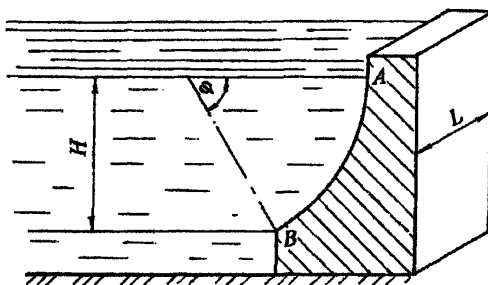


Рис. 3.7

Задание 8. Определить величину, угол наклона к горизонту и глубину центра давления воды на криволинейную стенку AB (рис. 3.8) длиной L , удерживающую напор H . Криволинейная стенка представляет собой часть цилиндрической поверхности с секторным углом φ . Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

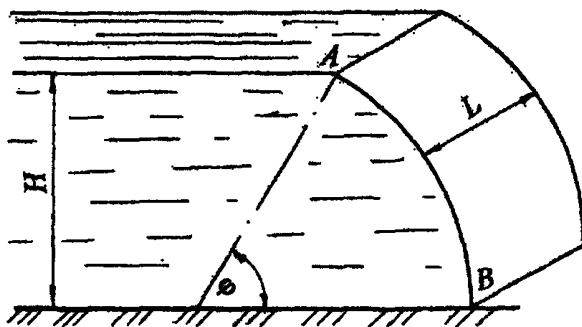


Рис. 3.8

Задание 9. Определить равнодействующую сил давления воды, угол наклона ее к горизонту и глубину погружения центра давления для цилиндрической поверхности AB с секторным углом φ . Длина поверхности L . Действующий напор слева H , справа $h = H/2$ (рис. 3.9). При решении представить чертеж в виде вертикального сечения криволинейной поверхности. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 3.

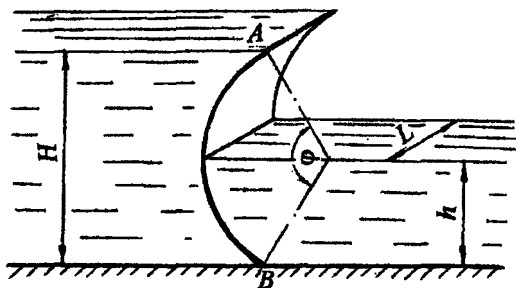


Рис. 3.9

Задание 10. Определить величину и угол наклона к горизонту равнодействующей сил давления воды на устройство в виде цилиндрического затвора (рис. 3.10), если диаметр цилиндра D , действующий напор слева H , справа $h = H/2$. Длина цилиндрического затвора L .

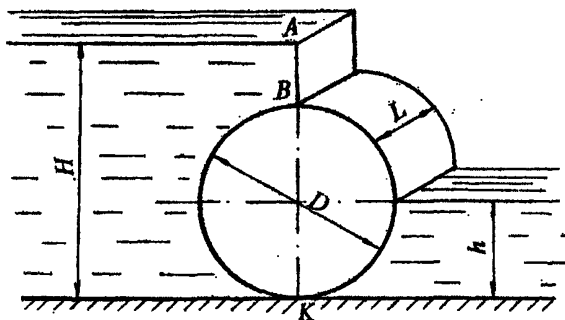


Рис. 3.10

Таблица 3.

Величины		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	r , м	0,10	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
	H , м	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
2	H , м	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00	1,1
	r , м	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
	L , м	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
3	B , м	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
	H_1 , м	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
	H_2 , м	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
4	r , м	0,20	0,25	0,30	0,35	0,4	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
	h , м	0,60	0,65	0,70	0,75	0,8	0,85	0,90	0,95	1,00	1,1
	$p_{ман, ат}$	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
5	r , м	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
	h , м	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
6	r , м	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
	N	4	6	4	6	4	6	8	6	4	8
	$p_{ман, ат}$	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
7	L , м	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	H , м					4,0					
	φ , град	45	60	45	60	45	60	45	60	45	60
8	L , м	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
	H , м	0,75	1,00	1,25	1,5	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00
	φ , град	45	60	45	60	45	60	45	60	45	60
9	φ , град	90	120	90	120	90	120	90	120	90	120
	L , м	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2
	H , м	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2
10	D , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
	H , м	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
	L , м	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Сила давления жидкости на криволинейные поверхности».

Пример 1. Цилиндрический затвор диаметром $D = 0.6$ м перекрывает прямоугольное отверстие в вертикальной стенке, удерживающей напор воды. Высота отверстия равна диаметру затвора, длина отверстия $L = 0,2$ м. Уровень воды над верхней кромкой затвора $h = 0,2$ м. Затвор может поворачиваться относительно горизонтальной оси и, перемещаясь, открывать отверстие (рис. 3.11).

Определить величину и угол наклона к горизонту силы давления воды на цилиндрический затвор.

Решение.

На рис. 3.11а показан общий вид затвора. Решение представим в плоском чертеже для вертикального сечения затвора, при этом длина затвора L перпендикулярна плоскости чертежа (рис. 3.11б). Решение проведем по следующей методике.

1. Выберем два направления x и y по которым определяем составляющие давления жидкости. При этом сила полного давления $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$. Для данной цилиндрической поверхности достаточно двух направлений, поскольку она имеет ось симметрии.

Начало координат выбираем на свободной поверхности. Ось y направляем вертикально вниз, так как положительное направление значения глубины отсчитывается от свободной поверхности вниз. Ось x направляем по свободной поверхности вправо по направлению действия жидкости (рис. 3.11б).

2. Определяем горизонтальную составляющую $R_x = \rho g y_c A_y$.

Криволинейную поверхность AB спроектируем внутрь жидкости на вертикальную плоскость. Получим вертикальную

проекцию AB' представляющую собой прямоугольник высотой D и шириной L (рис. 3.11в). Рассчитаем силу давления воды на данную вертикальную проекцию.

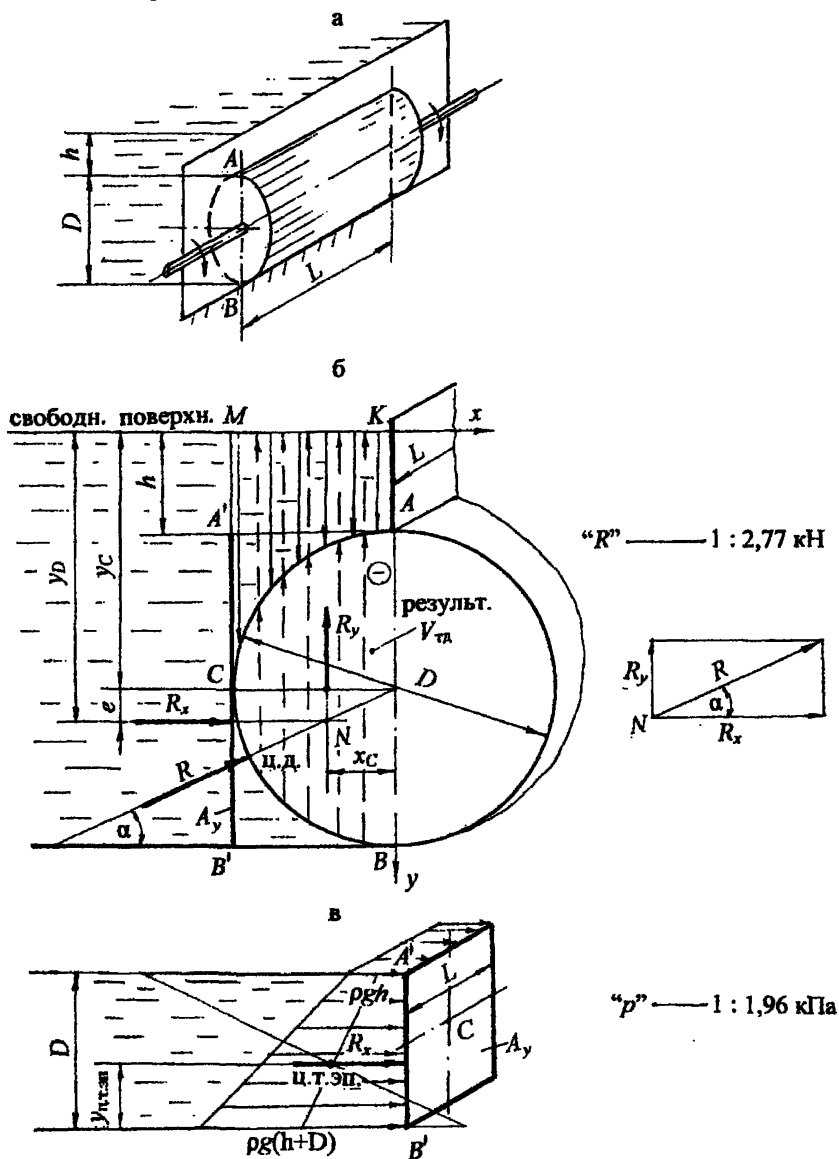


Рис. 3.11

Площадь вертикальной проекции $A_y = DL$. Глубина погружения центра тяжести C данной проекции $y_c = h + D/2 = 0,5$ м. Покажем на чертеже y_c . Рассчитаем горизонтальную составляющую $R_x = \rho g(h + D/2)DL = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 2,0 = 5,88 \cdot 10^3 = 5,88$ кН.

Определяем глубину погружения центра давления y_D для горизонтальной составляющей (глубину точки приложения силы R_x) $y_D = y_c + \frac{I_C}{y_c A_y}$, где I_C - центральный момент инерции относительно горизонтальной оси для вертикальной проекции криволинейной поверхности. При этом $I_C = \frac{LD^3}{12}$.

После подстановки данных получаем

$$y_D = y_c + \frac{LD^3}{12y_c DL} = y_c + \frac{D^2}{12y_c}; \text{ эксцентриситет } e = \frac{D^2}{12y_c};$$

$$y_D = 0,5 + \frac{0,6^3}{12 \cdot 0,5} = 0,56 \text{ м}; e = 0,06 \text{ м}.$$

Указываем на чертеже y_D , эксцентриситет e и положение силы R_x .

Горизонтальную составляющую R_x также можно определить графо-аналитическим методом: $R_x = S_{\text{пр}} L$.

Определим давление воды в точках A' и B' :

$$p_{A'} = \rho g h = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,2 = 1,96 \cdot 10^3 \text{ Па} = 1,96 \text{ кПа}.$$

$$p_{B'} = \rho g(h + D) = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,8 = 7,84 \cdot 10^3 \text{ Па} = 7,84 \text{ кПа}.$$

Построим эпюру гидростатического давления (рис. 3.11в). Эпюра представляет собой призму с основанием в виде трапеции высотой L , тогда

$$R_x = S_{\text{пр}} L = \frac{\rho g h + \rho g(h + D)}{2} DL = \rho g(h + D/2)DL.$$

Графически находим положение центра давления. Глубина погружения центра давления совпадает с положением

центра тяжести эпюры в виде трапеции (рис. 3.11в). Находим координату центра тяжести эпюры

$$y_{ц.т.эп.} = \frac{D(2p_{A'} + p_{B'})}{3(p_{A'} + p_{B'})} = 0,24 \text{ м.}$$

Центр тяжести трапеции можно также определить геометрическим построением.

На рис. 3.11в указываем $y_{ц.т.эп.}$, получим $y_D = h + D - y_{ц.т.эп.} = 0,56 \text{ м.}$

3. Определяем вертикальную составляющую R_y силы давления воды на цилиндрическую поверхность $R_y = \rho g V_{м.д.}$

Криволинейная поверхность имеет две части – AC и CB .

Строим тело давления для части AC . Из контура криволинейной части AC проводим вертикальные линии до свободной поверхности жидкости, получим реальное (положительное) тело давления в виде криволинейной призмы с основанием $AKMC$, построенное на смоченной поверхности AC и заполненное водой. В эпюре тела давления стрелки направляем вниз.

Для части криволинейной поверхности CB проведем вертикальные линии до свободной поверхности; получим отрицательное тело давления в виде криволинейной призмы с основанием $BCMK$, поскольку оно построено на несмоченной поверхности и не заполнено жидкостью. Стрелки в эпюре тела давления показаны пунктирно и направлены вверх.

Анализ построения двух давлений показывает, что в объеме $AKMC$ два тела давления взаимно компенсируются.

Результирующее тело давления отрицательно в виде полуцилиндра объемом $V_{м.д.} = \frac{\pi D^2}{8} L$.

Вертикальная составляющая R_y :

$$R_y = \rho g \frac{\pi D^2}{8} L = 10^3 \cdot 9,8 \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{8} \cdot 2,0 = 2,77 \cdot 10^3 \text{ Н} = 2,77 \text{ кН}.$$

Показываем линию действия и точку приложения R_y . Вертикальная составляющая приложена в центре тяжести тела

давления и направлена вверх. Центр тяжести полуцилиндра находится на расстоянии $x_C = 4r/3\pi = 0,13 \text{ м}$ от оси цилиндра.

На чертеже указываем расстояние x_C , центр тяжести полуцилиндра и направление силы R_y .

4. Определяем величину равнодействующей давления воды на цилиндрический затвор $R = \sqrt{5,88^2 + 2,77^2} = 6,5 \text{ кН}$.

Чтобы найти линию действия, направление и точку приложения равнодействующей R , по линии действия продолжим R_x и R_y до взаимного пересечения, получим точку N . Геометрическое сложение сил проведем вне чертежа. Вынесем точку N и покажем сложение сил в масштабе.

Параллельно по линии действия силу R перенесем в точку N на основном чертеже и продолжим ее до пересечения с криволинейной поверхностью. Равнодействующая R должна пройти через точку пересечения составляющих и центр криволинейной поверхности.

Точка пересечения равнодействующей с цилиндрической поверхностью является центром давления.

Угол α наклона равнодействующей R найдем из уравнения $\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_x}{R_y} = \frac{2,77}{5,88} = 0,47$, отсюда $\alpha = 25^\circ$.

Ответ: равнодействующая давления воды $R = 6,5 \text{ кН}$ направлена радиально под углом $\alpha = 25^\circ$.

Пример 2. Определить силу давления воды на четверть цилиндрической поверхности AB открытого резервуара, угол наклона силы к горизонту и глубину погружения центра давления, если глубина заполнения резервуара $H = 1,6$ м, радиус цилиндрической поверхности $r = 0,8$ м, длина резервуара $L = 5,0$ м (рис. 3.12).

Решение

На рис. 3.12а дан общий вид резервуара с цилиндрической поверхностью в изометрии. На рис. 3.12б представлено среднее сечение резервуара нормальной плоскостью.

Выбираем направления x и y , по которым определяются составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$.

Начало координат выбираем на свободной поверхности. Ось x направляем вправо по направлению действия жидкости, ось y – вертикально вниз.

Определяем горизонтальную составляющую $R_x = \rho g y_c A_y$. Спроектируем цилиндрическую поверхность AB на вертикальную плоскость. Получаем в проекции прямоугольник высотой $AB = r$ и шириной равной длине резервуара L . Площадь вертикальной проекции четверти цилиндра $A_y = rL$.

Находим глубину погружения центра тяжести вертикальной проекции y_c , которая отсчитывается от свободной поверхности жидкости $y_c = H - \frac{r}{2}$. Показываем y_c на чертеже (рис. 3.12б).

Рассчитываем горизонтальную составляющую $R_x = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 1,2 \cdot 0,8 \cdot 5,0 = 47,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 47,0 \text{ кН}$.

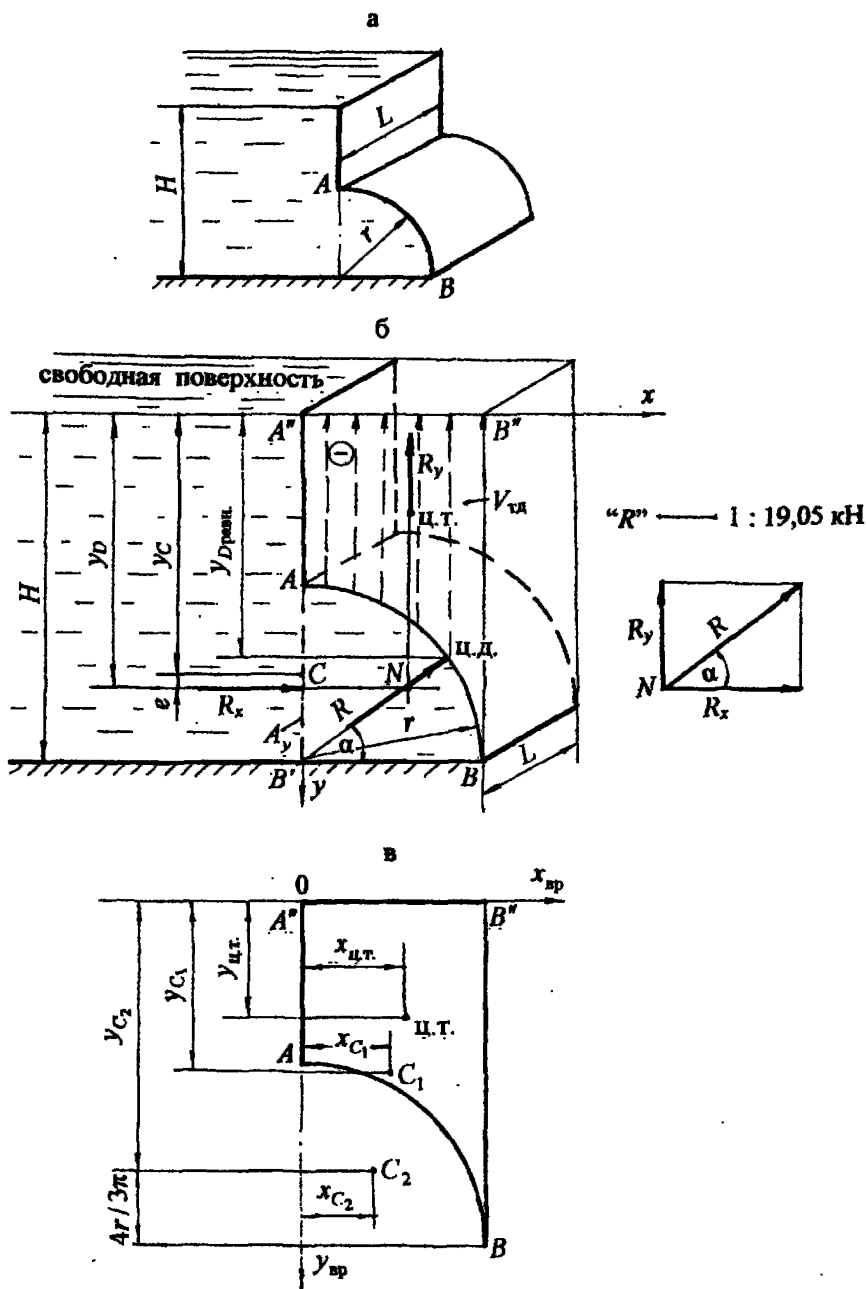


Рис. 3.12

Показываем направление и точку приложения силы R_x . Сила приложена в центре давления по нормали к вертикальной проекции AB на глубине y_D .

При этом $y_D = y_C + \frac{I_C}{y_C A_y}$. Здесь I_C – центральный момент инерции вертикальной проекции криволинейной поверхности относительно горизонтальной оси, т.е. $I_C = \frac{Lr^3}{12}$. Подставляя значения параметров получим

$$y_D = y_C + \frac{r^2}{12y_C} = 1,2 + \frac{0,64}{12 \cdot 1,2} = 1,244 \text{ м}.$$

При этом эксцентриситет равен $e = \frac{r^2}{12y_C} = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм}$. На чертеже (рис. 3.12б) указываем координату центра давления y_D , эксцентриситет e , направление и точку приложения силы R_x .

Определяем вертикальную составляющую $R_y = \rho g V_{m.d.}$.

Вертикальная составляющая равна силе тяжести жидкости в объеме тела давления. Чтобы найти объем тела давления построим эпюру тела давления. Из контура цилиндрической поверхности проведем вертикальные линии до продолжения свободной поверхности. Тело давления ограничено самой криволинейной поверхностью AB , вертикальными проектирующими плоскостями и горизонтальной проекцией криволинейной поверхности AB на продолжение горизонта свободной поверхности.

Очерченное тело давления построено на несмоченной части криволинейной поверхности AB , не заполнено жидкостью, поэтому оно считается отрицательным. Стрелки в эпюре тела давления направлены вверх. Тело давления представляет криволинейную призму с основанием $AA''B''B$ и высотой L .

Площадь основания тела давления можно рассматривать как разность площадей двух фигур: прямоугольника $S_1 = S_{\text{пря. AA``B``B}}$ и четверти круга $S_2 = S_{1/4\text{кр}}$. Тогда объем тела

$$\text{давления есть } V_{\text{т.д.}} = (S_{\text{пря. AA``B``B}} - S_{1/4\text{кр}})L = \left(rH - \frac{\pi r^2}{4} \right) L.$$

Тогда

$$R_y = \rho g \left(rH - \frac{\pi r^2}{4} \right) L = 10^3 \cdot 9,8 \cdot \left(0,8 \cdot 1,6 - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \right) \cdot 5,0 =$$

$$= 31,8 \cdot 10^3 \text{ Н} = 31,8 \text{ кН}.$$

Определим направление и точку приложения R_y . Сила R_y из центра тяжести тела давления будет направлена вверх, поскольку тело давления отрицательно.

Положение центра тяжести составной фигуры определим, пользуясь понятием статического момента площади. Согласно курсу «Сопротивления материалов» в данной точке координаты центра тяжести сложной фигуры рассчитываются по формулам

$$x_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 x_{C_1} - S_2 x_{C_2}}{S_1 - S_2}; \quad y_{\text{ц.т.}} = \frac{S_1 y_{C_1} - S_2 y_{C_2}}{S_1 - S_2}, \text{ где}$$

S_1 - площадь прямоугольника AA``B``B;

S_2 - площадь четверти круга;

x_1 и x_2 , y_1 и y_2 - координаты центров тяжести прямоугольника и четверти круга относительно осей $x_{\text{вр.}}$ и $y_{\text{вр.}}$.

На рис. 3.12в представлено основание тела давления AA``B``B. Временные оси $x_{\text{вр.}}$ и $y_{\text{вр.}}$ для удобства расчетов совпадают с направлением осей x и y на основном чертежа (рис. 3.12б).

Для расчета координат центра тяжести $x_{\text{ц.т.}}$ и $y_{\text{ц.т.}}$ фигуры AA``B``B имеем:

$$S_1 = rH = 1,28 \text{ м}^2; \quad x_{C_1} = \frac{r}{2} = 0,4 \text{ м}; \quad y_{C_1} = \frac{H}{2} = 0,8 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{\pi r^2}{4} = 0,50 \text{ м}^2 \quad x_{C_2} = \frac{4r}{3\pi} = 0,34 \text{ м}; \quad y_{C_2} = H - \frac{4r}{3\pi} = 1,26 \text{ м}$$

$$x_{ц.м.} = \frac{1,28 \cdot 0,4 - 0,50 \cdot 0,34}{1,28 - 0,50} = 0,44 \text{ м};$$

$$y_{ц.м.} = \frac{1,28 \cdot 0,8 - 0,50 \cdot 1,26}{1,28 - 0,50} = 0,51 \text{ м}.$$

Откладываем значения координат центра тяжести тела $x_{ц.м.}$ и $y_{ц.м.}$ на рис. 3.12в, показываем положение центра тяжести тела давления. В масштабе переносим положение центра тяжести тела давления на основной чертеж и показываем линию действия и точку приложения вертикальной составляющей R_y .

Определим величину равнодействующей сил давления R на цилиндрическую поверхность AB $R = \sqrt{47,0^2 + 31,8^2} = 60,5 \text{ кН}$.

Находим положение силы R . Геометрически сложим составляющие R_x и R_y : продолжим силы по линии действия до их взаимного пересечения, получим точку N , через которую проходит равнодействующая R .

Вынесем точку N за пределы чертежа и покажем сложение сил. Чтобы найти положение центра давления для равнодействующей R , силу R по линии действия параллельно перенесем в точку N на основной чертеж (рис. 3.12б) и продолжим ее до пересечения с криволинейной поверхностью AB .

Определим угол наклона равнодействующей к горизонту.

При этом $tg \alpha = \frac{R_y}{R_x} = 0,81$, отсюда $\alpha = 39^\circ$.

Глубину погружения центра давления для равнодействующей R рассчитаем по формуле $y_{D_{равн}} = H - r \sin 39^\circ = 1,6 - 0,8 \cdot 0,63 = 1,1 \text{ м}$.

Показываем на основном чертеже глубину погружения центра давления для равнодействующей (рис. 3.6б).

Ответ: сила давления воды на цилиндрическую поверхность $R = 60,5 \text{ кН}$ радиально направлена под углом $\alpha = 39^\circ$, приложена на глубине $y_{D_{равн}} = 1,1 \text{ м}$.

Пример 3. Определить силу давления бензина на полусферическую крышку закрытого резервуара. На поверхности бензина действует избыточное давление паров бензина $p_{\text{ман}} = 0,03$ ат. Крышка перекрывает круглое донное отверстие радиусом $r = 0,3$ м. Глубина заполнения резервуара $H = 0,9$ м. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 750$ кг/м³.

Решение.

На рис. 3.13а представлен общий вид резервуара с бензином в вертикальном разрезе.

Выберем следующий вариант решения: манометрическое давление на поверхности жидкости переводим в давление столба бензина, условно заменив манометр пьезометром, находим пьезометрическую высоту и положение условной свободной поверхности. Рассчитаем пьезометрический напор по показанию манометра

$$h_{p \text{ бенз}} = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho_{\text{бенз}} g} = \frac{0,03 \cdot 98 \cdot 10^3}{750 \cdot 9,8} = 0,4 \text{ м}.$$

На уровне свободной поверхности в резервуаре (рис. 3.13б) пунктиром указывается пьезометр, высота столба жидкости в котором соответствует $h_{p \text{ бенз}}$. По уровню жидкости в пьезометре указывается условная свободная поверхность, от которой отсчитываются координаты центров тяжести фигур и центра давления.

Дальнейший расчет проведем по следующей методике:

1. Выберем два направления x и y (рис. 3.13б) по которым определим составляющие силы давления с последующим их геометрическим сложением.

2. Определим горизонтальную составляющую $R_x = \rho_{\text{бенз}} g y_C A_y$.

Полусферическая поверхность AKB имеет две части: AK , на которую бензин действует слева и KB с действием бензина справа.

Чтобы определить горизонтальную силу на левую часть полусферы, спроектируем часть АК внутрь жидкости на вертикальную плоскость. В проекции получим полукруг площадью $A_y' = \frac{\pi r^2}{2}$. Проекция показана пунктирными линиями.

Затем спроектируем правую часть полусферы внутрь жидкости и получим такую же проекцию в виде полукруга площадью $A_y'' = \frac{\pi r^2}{2}$.

Найдем координаты центров тяжести данных проекций $y_C' = y_C'' = H + h_{p\text{ бенз}} - \frac{4r}{3\pi}$. Указываем координаты центров тяжести на чертеже (рис. 3.13б).

Горизонтальные силы слева и справа имеют вид $R_x' = \rho_{\text{бенз}} g y_C' A_y'$, $R_x'' = \rho_{\text{бенз}} g y_C'' A_y''$. Данные силы равны по величине и противоположны по направлению. Поскольку равны координаты центров тяжести проекций, то равны и координаты центров давления справа и слева, т.е. $y_D' = y_D'' = y_D$. Таким образом, после геометрического сложения составляющих горизонтальной силы получим, что $\vec{R} = \vec{R}_x' + \vec{R}_x'' = 0$, т.е. горизонтальная составляющая силы давления жидкости на полусферическую поверхность равна нулю.

3. Определим вертикальную составляющую силы давления на полусферическую поверхность $R_y = \rho_{\text{бенз}} g V_{\text{т.д.}}$.

Для построения тела давления из контура полусферы проведем вертикальные линии до условной свободной поверхности. Получим эпюру тела давления. Тело давления построено на смоченной части полусферы и заполнено жидкостью, значит оно положительное (действительное). Стрелками направленными вниз указывается действие бензина на полусферическую крышку (сила R_y также направлена вниз).

Горизонтальная проекция полусферы на условную свободную поверхность представляет круг.

Таким образом, объем тела давления есть объем цилиндра высотой $(H + h_{p \text{ бенз}})$, за вычетом объема полусферы:

$$V_{т.д.} = V_{цил.} - V_{полусф.} = \pi r^2 (H + h_{p \text{ бенз}}) - \frac{4\pi r^3}{3 \cdot 2} =$$

$$= \pi r^2 \left(H + h_{p \text{ бенз}} - \frac{2}{3} \right). \text{ Тогда вертикальная составляющая}$$

$$R_y = \rho_{бенз} g \pi r^2 \left(H + h_{p \text{ бенз}} - \frac{2}{3} \right) = 750 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 1,1 = 2284,8 \text{ Н} =$$

$$= 2,29 \text{ кН}.$$

Покажем линию действия и точку приложения вертикальной силы R_y . Линия действия силы совпадает с геометрической осью полусферической поверхности и цилиндра. Определим координату центра тяжести тела давления $y_{ц.т.}$. Временную ось $y_{вр.}$ совместим с осью y , тогда

$$y_{ц.т.} = \frac{S_2 y_{C_2} - S_1 y_{C_1}}{S_2 - S_1}, \text{ где}$$

$S_1 = \frac{\pi r^2}{2} = 0,14 \text{ м}^2$ - площадь полукруга (вертикального сечения полусферы);

$S_2 = 2r(H + h_{p \text{ бенз}}) = 0,78 \text{ м}^2$ - площадь прямоугольника;

$y_{C_1} = H + h_{p \text{ бенз}} - \frac{4r}{3\pi} = 1,17 \text{ м}$ - координата центра тяжести

C_1 полукруга;

$y_{C_2} = \frac{H + h_{p \text{ бенз}}}{2} = 0,65 \text{ м}$ - координата центра тяжести C_2

прямоугольника.

Используя данные значения получим $y_{ц.т.} = 0,54 \text{ м}$. Указываем на чертеже $y_{ц.т.}$ и положение центра тяжести тела давления.

Из центра тяжести тела давления вертикальную силу R_y направляем вниз. Поскольку горизонтальная сила равна нулю, на полусферическую поверхность действует только вертикальная сила.

Ответ: на полусферическую крышку резервуара по оси полусферы действует сила $R = R_y = 2,29 \text{ кН}$.

Тема № 4. «Расчет простых трубопроводных систем».

Задание 1. При закрытом кране на трубопроводе диаметром d и длиной l показания манометра перед краном $p_{\text{ман}}$.

Определить показание манометра при открытом кране, если слив воды происходит в мерную емкость. За время $t = 30$ с наполняется объем $W = 70,5$ л. Труба водопроводная с абсолютной шероховатостью $\Delta = 1,0$ мм. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками. Принять коэффициент вязкости воды $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (рис. 4.1). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

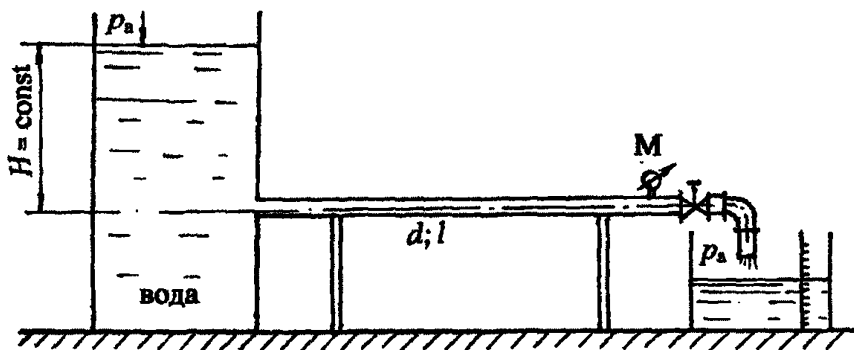


Рис. 4.1.

Задание 2. Из напорного бака с постоянным напором H вода подается в зумпф по двум трубам d_1, l_1 и d_2, l_2 . Определить расход воды в трубопроводе и скорость движения воды в каждой трубе. На трубе диаметром d_1 установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$. Учесть потери напора на входе в трубу с острыми кромками, а также при внезапном сужении ($\xi_{\text{в.с.}} = 0,38$). Трубы водопроводные нормальные (рис. 4.2.). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

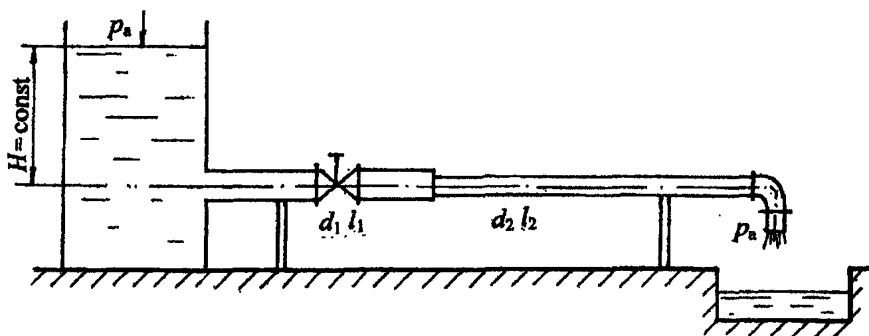


Рис. 4.2.

Задание 3. Из резервуара A в резервуар B вода передается по трубопроводу диаметром d , состоящему из трех участков длиной l_1 , l_2 , l_3 . Расход воды в системе равен Q . На входе в трубу установлена решетка без обратного клапана, на первом участке стоит вентиль с коэффициентом сопротивления $\xi_{\text{вент.}} = 5,0$ (рис. 4.3).

Напор воды в резервуаре A $H_1 = 1,5$ м, в резервуаре B — $H_2 = 2,5$ м. Определить показание манометра ($p_{\text{ман}2}$) на поверхности воды в резервуаре B , если показание манометра на поверхности воды в резервуаре A $p_{\text{ман}1} = 0,45$ ат. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм; кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с. Построить напорную и пьезометрическую линии. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

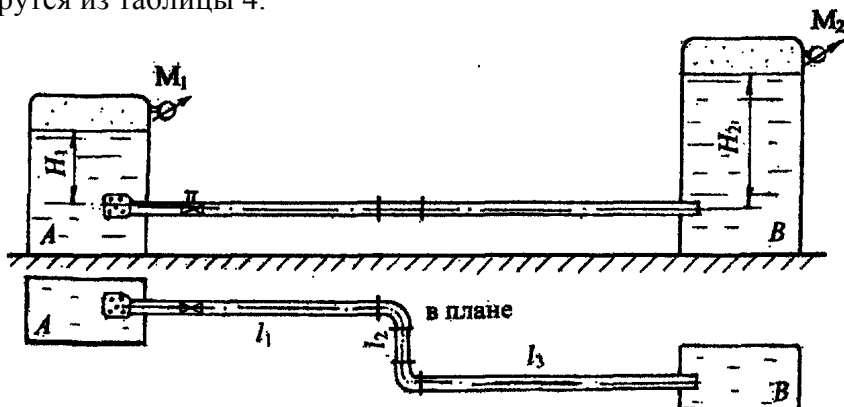


Рис. 4.3.

Задание 4. Определить расход воды из дозаторного резервуара *A* в резервуар *B* при постоянном напоре *H*, по трубам d_1, l_1 и d_2, l_2 . Трубы водопроводные нормальные. На трубе d_2 установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$.

Учесть потери напора на входе и выходе трубопроводной системы, а также при внезапном расширении трубопровода. Построить напорную и пьезометрическую линии, показать эпюру потерь напора (рис. 4.4). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

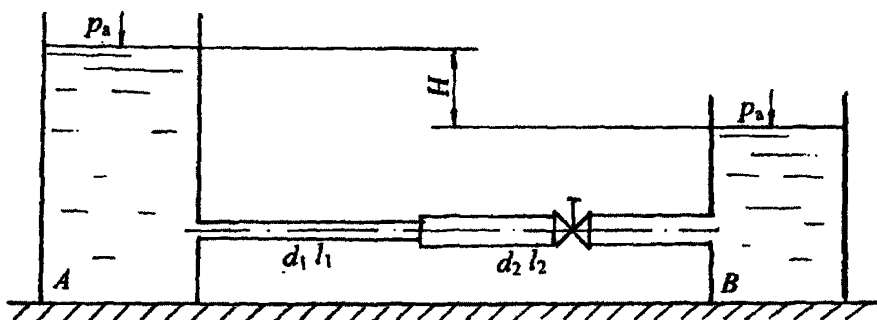


Рис. 4.4.

Задание 5. С помощью насоса в напорный бак подается вода на высоту *H*, диаметр трубы *h*, длина *l*. Показание манометра в начале трубопровода $p_{ман1}$, в конце $p_{ман2}$. Определить при каком коэффициенте сопротивления пробкового крана будет обеспечен расход *Q*. Принять абсолютную шероховатость трубы $\Delta = 0,5$ мм, коэффициент кинематической вязкости воды $\nu = 10^{-6}$ м²/с (рис. 4.5). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

Задание 6. Бензин из бензохранилища с помощью насоса подается в бензобак на высоту *H*. На поверхности бензина в

бензобаке поддерживается вакуум $p_{\text{вак}}$. Определить, каким должно быть манометрическое давление ($p_{\text{ман}}$ в ат) на выходе из насоса, при подаче Q , если транспортирование бензина

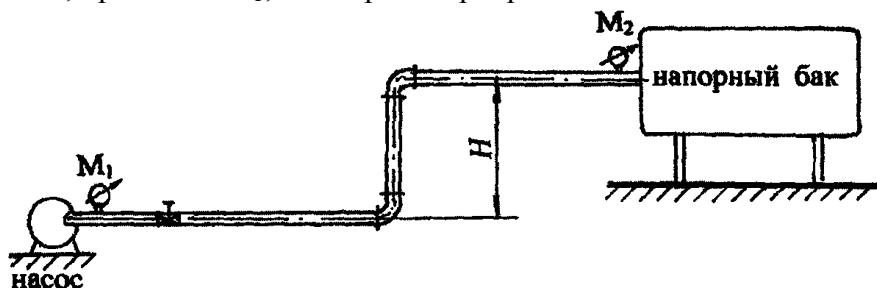


Рис. 4.5.

происходит по новой стальной трубе с абсолютной шероховатостью $\Delta = 0,05$ мм, диаметром d , длиной l , на трубе установлена задвижка Лудло со степенью закрытия $a/d = 5/8$. Учесть потери напора в двух коленах и на выходе из трубы в бензобак. Принять плотность бензина $\rho_{\text{бенз}} = 720$ кг/м³; коэффициент кинематической вязкости бензина $\nu_{\text{бенз}} = 0,65 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ (рис. 4.6). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

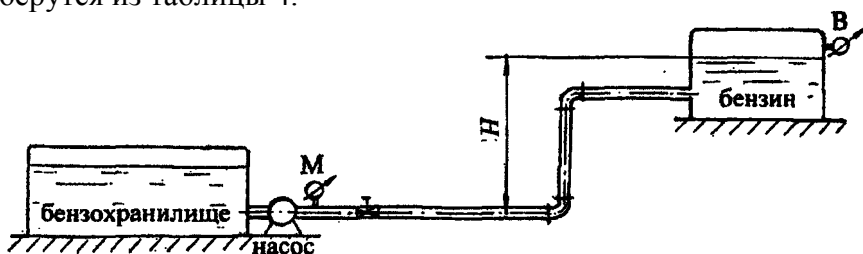


Рис. 4.6.

Задание 7. В пневмотранспортной системе регулирование скорости и расхода воздуха осуществляется с помощью задвижки и контролируется по U – образному спиртовому мановакуумметру, установленному на входном участке коллектора. Определить каким должно быть показание

мановакуумметра (h_{cn}) на трубе диаметром d , при расходе воздуха Q . Принять коэффициент сопротивления на входе в коллектор $\xi_{вх} = 0,2$; плотность воздуха $\rho_{возд} = 1,22 \text{ кг/м}^3$; плотность спирта $\rho_{cn} = 880 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4.7). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

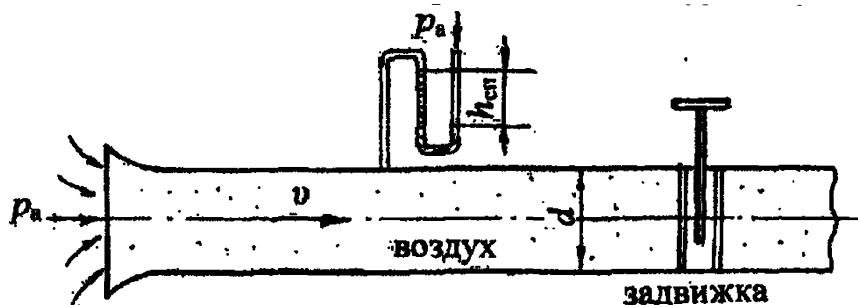


Рис. 4.7.

Задание 8. В плотине сделан водоспуск в виде железобетонной трубы с весьма хорошей бетонировкой диаметром d и длиной l . Напор над водоспуском при истечении в атмосферу H . Определить пропускную способность трубы Q , если она имеет водозаборную сетку без обратного клапана.

Как изменится пропускная способность трубы, если за водосливом напор поднимется до h (рис. 4.8). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

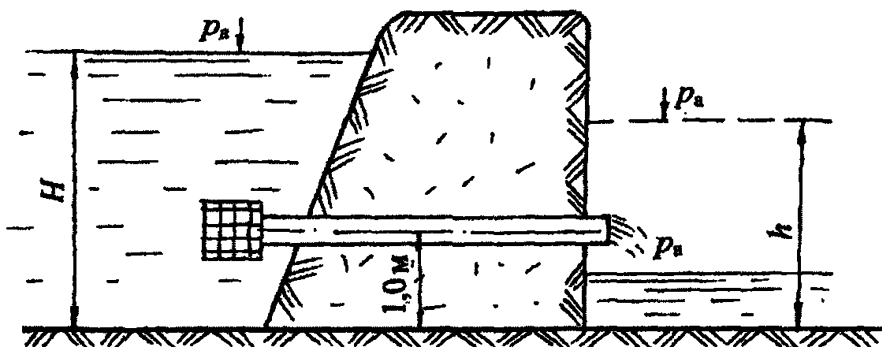


Рис. 4.8.

Задание 9. Определить показание U – образного спиртового манометра установленного на трубе Вентура в вентиляционном трубопроводе при значении диаметров d_1 и d_2 , если расход воздуха равен Q . Принять плотность воздуха $\rho_{\text{возд}} = 1,23 \text{ кг/м}^3$; плотность спирта $\rho_{\text{сп}} = 820 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент сопротивления трубы Вентура принять равным $\xi_{\text{вент.}} = 0,2$ (рис. 4.9). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 4.

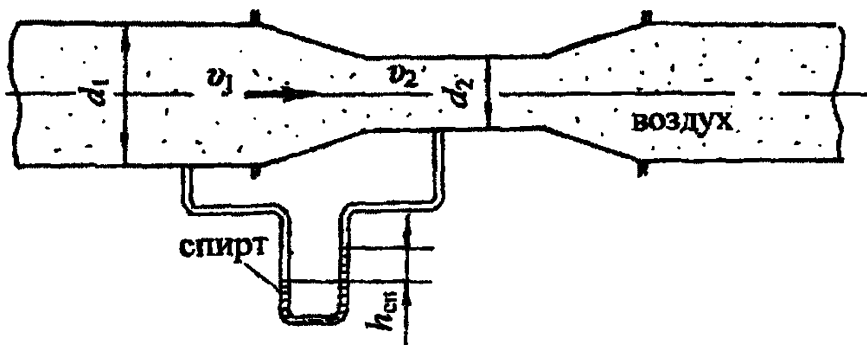


Рис. 4.9

Задание 10. Для измерения расхода воды в трубопроводе диаметром d_1 установлен расходомер Вентури с диаметром цилиндрической части d_2 . К широкой и узкой части расходомера подсоединены пьезометры в виде U – образной трубки, расстояние между которыми равно z . Пренебрегая потерями напора, определить скорости в широкой и узкой части трубы, а также расход воды в трубопроводе, если разность показаний пьезометров равна h . При расчете давлением столба воздуха в пьезометре пренебречь. Коэффициент Кориолиса принять равным единице ($\alpha = 1,0$) (рис. 4.10)

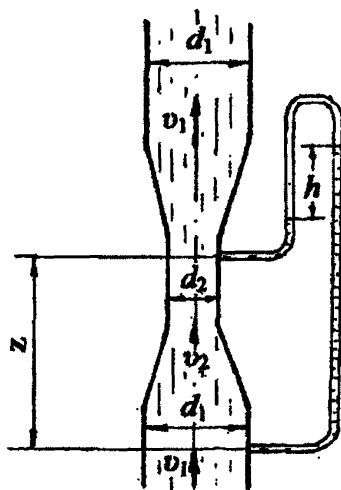


Рис. 4.10.

Таблица 4.

Величины		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$d, \text{мм}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	$l, \text{м}$	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5
	$P_{\text{ман}}, \text{ат}$	0,16	0,165	0,17	0,175	0,18	0,185	0,19	0,195	0,2	0,205
2	$H, \text{м}$	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
	$d_1, \text{мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_1, \text{м}$	4,3	4,4	4,6	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9	6,2	6,5
	$d_2, \text{мм}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	$l_2, \text{м}$	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	8,5	8,7
3	$d, \text{мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_1, \text{м}$	5,0	5,1	5,2	2,3	5,4	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1
	$l_2, \text{м}$	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1
	$l_3, \text{м}$	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,4	6,3	6,2	6,1	6,0
	$Q, \text{л/с}$	2,5	2,6	2,7	2,5	2,6	2,7	2,5	2,6	2,7	2,6
4	$H, \text{м}$	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1	4,3
	$d_1, \text{мм}$	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	$l_1, \text{м}$	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
	$d_2, \text{мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_2, \text{м}$	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9
5	$H, \text{м}$	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0
	$d, \text{мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l, \text{м}$	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110
	$P_{\text{ман1}}, \text{ат}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$P_{\text{ман2}}, \text{ат}$	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,85	0,9
	$Q, \text{л/с}$	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0
6	$H, \text{м}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
	$P_{\text{вак}}, \text{ат}$	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
	$Q, \text{л/с}$	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
	D, ММ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

	$l, м$	30	28	26	24	22	20	22	24	26	28
7	$d, мм$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$Q, л/с$	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
8	$d, мм$	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1100
	$l, м$	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
	$H, м$	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	4,9	5,2	5,5
9	$d_1, мм$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$d_2, мм$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	$Q, л/с$	72,5	74,0	75,5	77,0	78,5	80,0	81,5	83,0	84,5	86,0
10	$d_1, мм$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$d_2, мм$	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	$h, см$	34	37	40	42	44	46	48	50	52	54

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Расчет простых трубопроводных систем».

Пример 1. С помощью насоса по трубе диаметром $d = 50$ мм и длиной $l = 70$ м нефть подается в закрытый резервуар на высоту $H = 15$ м ($H = \text{const}$).

Определить показание мановакуумметра (p_{mv}), установленного на поверхности нефти в закрытом резервуаре, если показание манометра после насоса $p_{ман} = 1,3$ ат. Расход нефти $Q = 1,2$ л/с, плотность нефти $\rho_n = 900$ кг/м³, относительная вязкость по Энглеру $E = 4,0$. В системе установлен пробковый кран с углом закрытия $\alpha = 40^\circ$ и два колена к коэффициентом сопротивления $\xi_{кол} = 0,8$ (рис. 4.11).

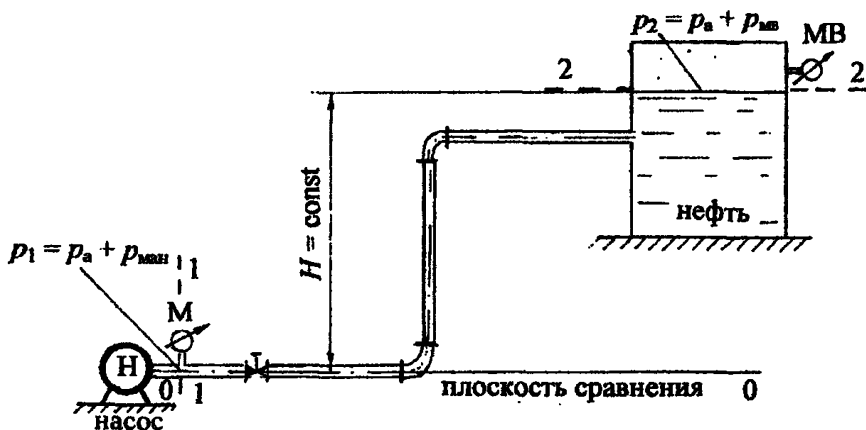


Рис. 4.11.

Решение.

Представленная трубопроводная система относится к первому типу простых систем.

Для определения показания мановакуумметра воспользуемся уравнением Бернулли. Согласно методике составления данного уравнения:

1. Выбираем два сечения: первое – в месте установки манометра, данное сечение проводим нормально к направлению движения жидкости, где скорость равна скорости движения нефти в трубе – v ; второе – по свободной поверхности в резервуаре, где давление определяется по мановакуумметру, а скорость равна нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 нумеруем по направлению движения жидкости, для того чтобы в уравнении потери напора в гидравлических сопротивлениях учитывались со знаком «+».

3. В выбранных сечениях принимаем абсолютное давление (с учетом атмосферного): $p_1 = p_a + p_{ман}$; $p_2 = p_a + p_{мв}$.

4. Плоскость сравнения 0-0 проводим через ось первого сечения: $z_1 = 0$; $z_2 = H$.

5. Записываем уравнение Бернулли в общем виде и производим подстановку всех параметров:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}};$$

$$z_1 = 0;$$

$$z_2 = H;$$

$$p_1 = p_a + p_{ман};$$

$$p_2 = p_a + p_{мв};$$

$$v_{1сеч.} = v; \alpha_1 = 2,0;$$

$$v_{2сеч.} = 0.$$

Заметим, что движущаяся нефть – вязкая жидкость поэтому предполагаем ламинарный режим течения ($\alpha_1 = 2,0$). Подставим имеющиеся параметры в уравнение Бернулли:

$$\frac{p_a}{\rho_n g} + \frac{p_{ман}}{\rho_n g} + \frac{2v^2}{2g} = H + \frac{p_a}{\rho_n g} + \frac{p_{мв}}{\rho_n g} + h_w.$$

После сокращений и преобразований получим:

$$\frac{p_{мв}}{\rho_n g} = \frac{p_{ман}}{\rho_n g} + \frac{2v^2}{2g} - H - h_w.$$

Рассчитаем слагаемые уравнения:

$$\frac{p_{ман}}{\rho_n g} = \frac{1,3 \cdot 9,8 \cdot 10^3}{900 \cdot 9,8} = 14,44 \text{ м}.$$

Скорость движения нефти в трубе рассчитываем через расход $v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,05^2} = 0,61 \text{ м/с}$; скоростной напор $\frac{v^2}{2g} = \frac{0,61^2}{2 \cdot 9,8} = 0,019 \text{ м}$ (малая величина).

Рассчитаем потери напора в гидравлических сопротивлениях $h_w = \sum h_r + h_l$; потери напора в местных сопротивлениях $\sum h_r = \sum \xi \frac{v^2}{2g}$, где $\sum \xi$ - сумма коэффициентов местных сопротивлений. Учет потерь напора в двух коленах и пробковом кране $\sum \xi = 2\xi_{\text{кол.}} + \xi_{\text{кр.}} + \xi_{\text{вых.}}$. Согласно табличным значениям получаем $\sum \xi = 2 \cdot 0,8 + 17,3 + 1,0 = 19,9$; тогда $\sum h_r = 19,9 \cdot 0,019 = 0,38 \text{ м}$.

Определим потери напора по длине $h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$. Для выбора расчетной формулы коэффициента гидравлического сопротивления λ определим режим движения жидкости по критерию Рейнольдса $Re = \frac{vd}{\nu}$. Определим коэффициент кинематической вязкости ν . Для его расчета воспользуемся значением относительной вязкости в градусах Энглера. По формуле Уббеллоде: $\nu = \left(0,0731^\circ E - \frac{0,0631}{^\circ E} \right) \cdot 10^{-4}$. Тогда $\nu = \left(0,0731 \cdot 4,0 - \frac{0,0631}{4,0} \right) \cdot 10^{-4} = 0,277 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Отсюда $Re = \frac{0,61 \cdot 0,05}{0,277 \cdot 10^{-4}} = 1101 < Re_{\text{кр}} = 2300$. Таким

образом действительно имеет место ламинарный режим течения нефти.

Для ламинарного режима коэффициент гидравлического сопротивления имеет вид $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$.

Определяем потери напора по длине:

$$h_l = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{64}{1101} \cdot \frac{70}{0,05} \cdot 0,019 = 1,54 \text{ м}.$$

Потери напора в гидравлических сопротивлениях

$$h_w = 0,38 + 1,54 = 1,92 \text{ м}.$$

Подставляя все полученные значения в уравнение Бернулли, получаем:

$$\frac{p_{мв}}{\rho_n g} = 14,44 + 0,019 \cdot 2 - 15,0 - 1,92 = -2,44 \text{ м}.$$

Знак «минус» говорит о том, что мановакуумметр работает как вакуумметр, при этом величина вакуума $p_{мв} = p_{вак.}$
 $= 2,44 \cdot \rho_n g = 2,44 \cdot 900 \cdot 9,8 = 21521 \text{ Па}$ или $p_{вак.} = 0,22 \text{ ат}$.

Ответ: показание мановакуумметра соответствует вакуумметрическому давлению $p_{мв} = p_{вак.} = 0,22 \text{ ат}$.

Пример 2. Вода из закрытого резервуара *A* поступает в открытый резервуар *B* при пропускной способности системы $Q = 15 \text{ л/с}$ по трубам: $d_1 = 75 \text{ мм}$; $l_1 = 8 \text{ м}$ и $l_2 = 12 \text{ м}$; $d_2 = 100 \text{ мм}$ и $l_3 = 15 \text{ м}$. Напоры воды в резервуарах постоянны относительно оси трубы: $H_1 = 1,5 \text{ м}$; $H_2 = 3,5 \text{ м}$ (рис. 4.12).

Определить показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в закрытом резервуаре, а также соответствующий манометрический напор ($H_{\text{ман}}$).

Принять абсолютную шероховатость труб $\Delta_1 = 0,5 \text{ мм}$; $\Delta_2 = 0,2 \text{ мм}$. Учесть местные сопротивления в системе: на входе в первую трубу; в пробковом кране при угле закрытия $\alpha = 30^\circ$; при внезапном расширении и на выходе из второй трубы.

Движение воды в системе считать установившимся ($Q = \text{const}$). Построить линию полного напора, пьезометрическую линию, эпюру потерь напора.

Решение.

Представленная схема относится к простым трубопроводным системам первого типа с истечением под уровень.

Для определения избыточного давления $p_{\text{ман}}$ на поверхности воды в резервуаре *A* воспользуемся уравнением Бернулли:

1. Выберем два сечения по свободным поверхностям в резервуарах, где скорость допустимо считать равной нулю.

2. Сечения 1-1 и 2-2 пронумеруем по направлению движения воды.

3. В выбранных сечениях учтем абсолютное давление $p_1 = p_a + p_{\text{ман}}$; $p_2 = p_a$.

4. Плоскость сравнения совместим с осью трубы, тогда $z_1 = H_1$; $z_2 = H_2$.

5. Запишем уравнение Бернулли в общем виде и решим его:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1^2 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2^2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}};$$

$$z_1 = H_1; \quad z_2 = H_2;$$

$$p_1 = p_a + p_{ман.}; \quad p_2 = p_a;$$

$$v_{1сеч.} = 0; \quad v_{2сеч.} = 0;$$

после подстановки и сокращений получим:

$$H_1 + \frac{p_{ман.}}{\rho g} = H_2 + h_w \text{ или } \frac{p_{ман.}}{\rho g} = H_2 + h_w - H_1.$$

В данной формуле необходимо определить величину потерь напора в гидравлических сопротивлениях h_w . Поскольку по условию необходимо представить графически распределение напора по длине системы, запишем потери напора по порядку по направлению движения воды:

$$h_w = h_{\text{вх.}} + h_{l_1} + h_{кр.} + h_{l_2} + h_{\text{в.р.}} + h_{l_3} + h_{\text{вых.}}$$

Все потери напора в гидравлических сопротивлениях пропорциональны скоростному напору, поэтому потери напора в трубе диаметром d_1 определим с учетом скоростного напора $\frac{v_1^2}{2g}$, а в трубе диаметром d_2 — $\frac{v_2^2}{2g}$.

Скорости v_1 и v_2 определим через расход Q :

$$v_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = 3,4 \text{ м/с}, \quad v_2 = \frac{Q}{\omega_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = 1,9 \text{ м/с}. \quad \text{При этом}$$

скоростные напоры соответственно равны $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м};$

$$\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}.$$

Рассчитаем потери напора в местных сопротивлениях.

Потери напора на входе в трубу диаметром d_1 :

$$h_{\text{вх.}} = \zeta_{\text{вх.}} \frac{v_1^2}{2g}, \text{ при этом } \zeta_{\text{вх.}} = 0,5 \text{ (табличное значение).}$$

Тогда $h_{\text{вх.}} = 0,5 \cdot 0,6 = 0,3 \text{ м}.$

Потери напора в пробковом кране $h_{кр.} = \zeta_{кр.} \frac{v_1^2}{2g}$,
аналогично предыдущему для $\alpha = 30^\circ$ $\zeta_{кр.} = 5,47$, получаем
 $h_{кр.} = 5,37 \cdot 0,6 = 3,3 \text{ м}$.

Потери напора при внезапном расширении $h_{в.р.} = \zeta_{в.р.} \frac{v_2^2}{2g}$,
где $\zeta_{в.р.} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 = 0,6$, тогда $h_{кр.} = 0,6 \cdot 0,2 = 0,12 \text{ м}$.

Потери напора на выходе из трубы в резервуар В:

$h_{вблх} = \zeta_{вблх} \frac{v_2^2}{2g}$, принимая $\zeta_{вблх} = 1,0$ получим $h_{вблх} = 0,2 \text{ м}$.

Определим потери напора по длине. В общем виде
 $h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$. Для труб с диаметрами d_1 и d_2 рассчитаем
коэффициенты гидравлического сопротивления λ_1 и λ_2 .

Выбор расчетной зависимости коэффициента λ зависит
от режима движения жидкости и шероховатости труб.
Рассчитаем числа Рейнольдса для каждой из труб.

$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\nu}$; $Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\nu}$, значение коэффициента
кинематической вязкости воды определяем таблично
 $\nu = 1,008 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$.

Получим $Re_1 = 255000$, $Re_2 = 190000$, т.е. режим
движения воды турбулентный.

Рассчитаем граничные значения для чисел Рейнольдса,
чтобы установить область сопротивления для обеих труб при
турбулентном режиме:

$$20 \frac{d_1}{\Delta_1} = 20 \frac{75}{0,5} = 3000; \quad 20 \frac{d_2}{\Delta_2} = 20 \frac{100}{0,3} = 10000;$$

$$500 \frac{d_1}{\Delta_1} = 500 \frac{75}{0,5} = 75000; \quad 500 \frac{d_2}{\Delta_2} = 500 \frac{100}{0,3} = 250000.$$

Для первой трубы $Re_1 = 250000 > 500 \frac{d_1}{\Delta_1}$ - т.е. имеет

место зона квадратичного сопротивления, коэффициент λ рассчитывается по формуле Шифринсона

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta_1}{d_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,5}{75} \right)^{0,25} = 0,032.$$

Тогда потери напора по длине на первом и втором участках $h_{l_1} = 0,032 \frac{8,0}{0,075} 0,6 = 2,0 \text{ м}$; $h_{l_2} = 0,032 \frac{12,0}{0,075} 0,6 = 3,0 \text{ м}$.

Для второй трубы $20 \frac{d_2}{\Delta_2} < Re_2 = 190000 < 500 \frac{d_2}{\Delta_2}$, имеет

место зона доквadraticного сопротивления, коэффициент λ рассчитываем по формуле Альтшуля:

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{68}{Re_2} + \frac{\Delta_2}{d_2} \right)^{0,25} = 0,024. \text{ Тогда потери напора на}$$

третьем участке $h_{l_3} = \lambda_2 \frac{l_3}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} = 0,024 \frac{15,0}{0,1} 0,2 = 0,7 \text{ м}$.

В этом случае

$$h_w = 0,3 + 2,0 + 3,3 + 3,0 + 0,12 + 0,7 + 0,2 = 9,62 \text{ м}.$$

После подстановки рассчитанных слагаемых получаем

$$\frac{p_{ман}}{\rho g} = 3,5 - 1,5 + 9,62 = 11,62 \text{ м}, \quad \text{то есть соответствующий}$$

манометрический напор $H_{ман} = 11,62 \text{ м}$.

Представим манометрическое давление в кПа :

$$p_{ман} = 11,62 \cdot \rho g = 11,62 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 113,9 \cdot 10^3 \text{ Па} = 113,9 \text{ кПа} = 1,16 \text{ ат}.$$

Построим линию полного напора.

От уровня жидкости в резервуаре А пунктиром указываем пьезометр, показание которого соответствует величине $\frac{p_{ман}}{\rho g}$. По уровню жидкости в пьезометре проводится

горизонтальная линия начального напора. До линии начального напора проводятся вертикальные линии по характерным сечениям трубопровода: входа в трубу; крана; внезапного расширения; выхода из трубы (рис. 4.12).

Откладываются по порядку, начиная от линии начального напора, по вертикали потери напора:

- на входе в виде скачка $h_{вх} = 0,3 \text{ м}$;
- по длине первого участка в виде наклонной прямой $h_{l_1} = 2,0 \text{ м}$;
- в кране в виде скачка $h_{кр.} = 3,3 \text{ м}$;
- по длине второго участка в виде наклонной прямой $h_{l_2} = 3,0 \text{ м}$;
- при внезапном расширении в виде скачка $h_{в.р.} = 0,12 \text{ м}$;
- по длине третьего участка $h_{l_3} = 0,7 \text{ м}$;
- на выходе в резервуар В в виде скачка $h_{вых.} = 0,2 \text{ м}$.

Линия полного напора заканчивается на свободной поверхности в резервуаре В (масштаб не выдержан).

Пьезометрическая линия проводится ниже линии полного напора на величину $\frac{v_1^2}{2g} = 0,6 \text{ м}$ для трубы диаметром d_1

и на величину $\frac{v_2^2}{2g} = 0,2 \text{ м}$ для трубы диаметром d_2 .

Пьезометрическая линия показана пунктиром.

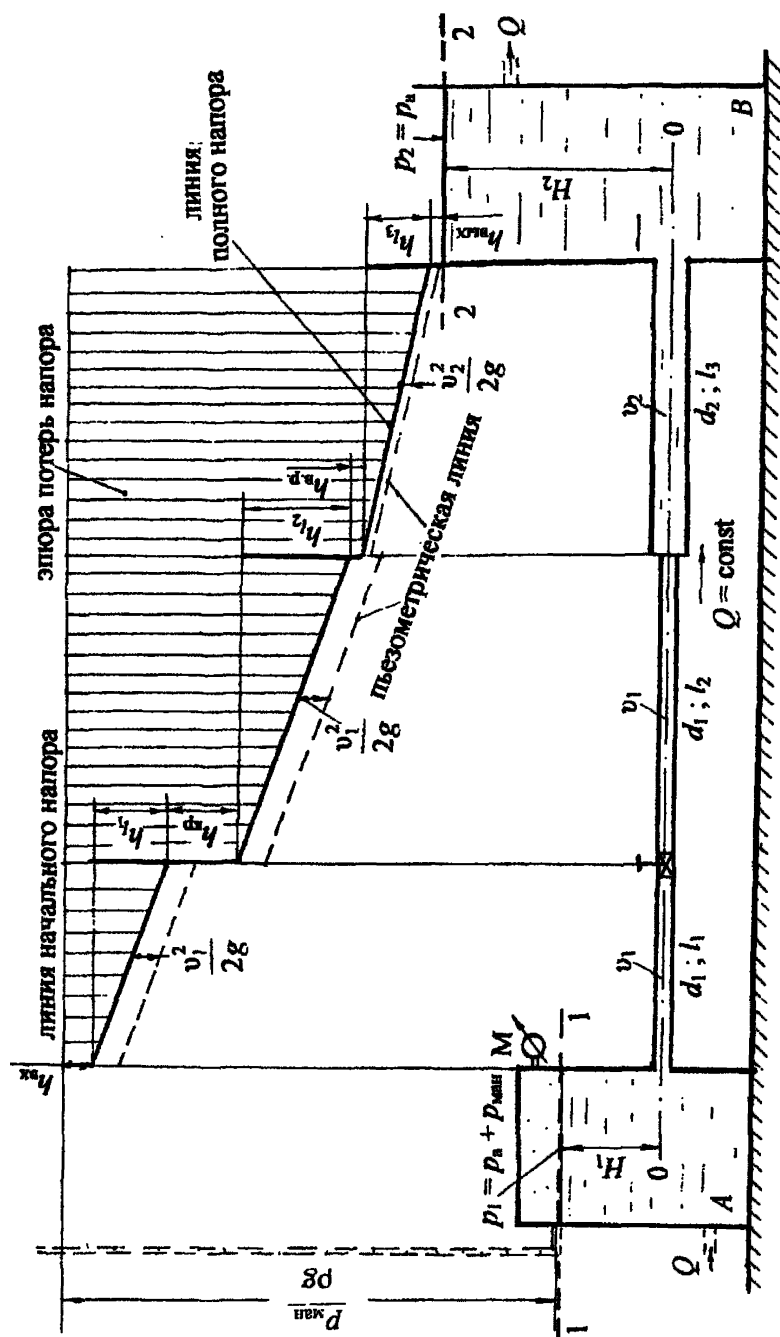


Рис. 4.12.

Строится эпюра потерь напора. Показываются вертикальные штриховые линии от линии начального напора до линии полного напора. Каждая вертикальная линия соответствует потерям напора от начала трубопровода до выбранного сечения. Графическое представление напоров закончено.

Ответ: показание манометра $p_{ман} = 1,16 \text{ ат}$, манометрический напор, соответствующий показанию манометра $H_{ман} = 11,6 \text{ м}$.

Пример 3. Рассчитать максимальную пропускную способность и высоту сифона, откачивающего воду из верхнего зумпфа в нижний, при неизменной разности уровней воды в зумпфах $H = 2,0$ м. Труба водопроводная нормальная диаметром $d = 150$ мм длиной $l_1 = 10$ м (до верхней точки сифона) и $l_2 = 20$ м. На входе в трубу установлена водозаборная сетка с обратным клапаном. Система имеет вентиль с коэффициентом сопротивления $\zeta_{\text{вент.}} = 7,0$, одно колено с углом поворота $\alpha = 90^\circ$ и два поворота трубы с углами $\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 60^\circ$. Величина предельного вакуума в верхней точке сифона $p_{\text{вак.}} = 0,55$ ат

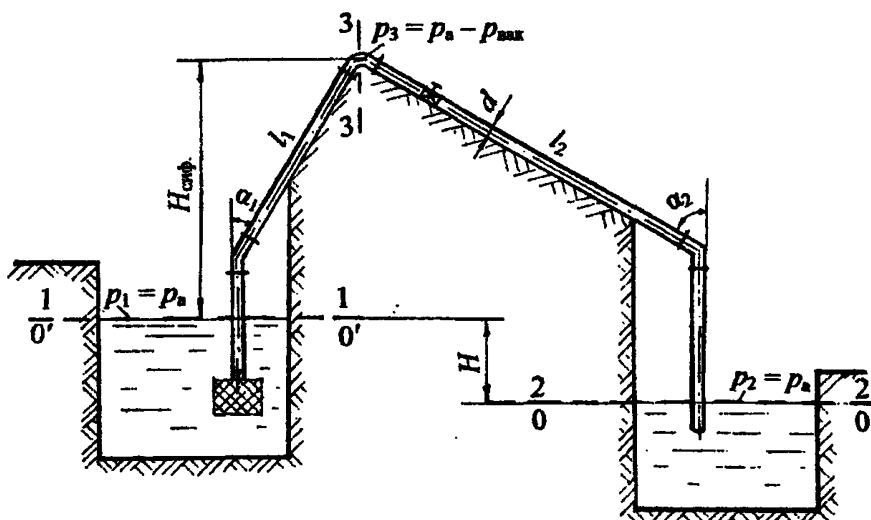


Рис. 4.13.

Решение.

При расчете сифона воспользуемся уравнением Бернулли.

Определим пропускную способность сифона (как простой трубопроводной системы с истечением под уровень).

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, проведенных по свободным поверхностям воды в зумпфах, где

скорости можно считать равными нулю ($v_{1сеч.} = v_{2сеч.} = 0$), а абсолютное давление – равным атмосферному ($p_1 = p_a; p_2 = p_a$). Так как резервуары открыты. Плоскость сравнения совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H; z_2 = 0$.

Запишем уравнение Бернулли и сделаем подстановку параметров

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

$$z_1 = H; \quad z_2 = 0;$$

$$p_1 = p_a; \quad p_2 = p_a;$$

$$v_{1сеч.} = 0; \quad v_{2сеч.} = 0;$$

После подстановки и сокращений получим $H = h_{w_{сиф}}$. То есть разность уровней жидкостей в резервуарах H (напор) должна быть такой, чтобы преодолеть гидравлическое сопротивление в трубопроводе $h_{w_{сиф}}$.

Определим потери напора в гидравлических сопротивлениях $h_{w_{сиф}} = \sum h_r + h_l = \sum \zeta \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \frac{v^2}{2g}$, или

$$h_{w_{сиф}} = \frac{v^2}{2g} \left(\sum \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right). \text{ Тогда получим:}$$

$$H = \frac{v^2}{2g} \left(\sum \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d} \right), \text{ тогда скорость движения воды в трубе}$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{\sum \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH}, \quad \text{при этом расход} \quad Q = \omega v,$$

$$\text{следовательно} \quad Q = \omega \sqrt{\frac{1}{\sum \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}} \sqrt{2gH}.$$

Обозначим $\mu_{сиф} = \sqrt{\frac{1}{\sum \zeta + \lambda \frac{l_1 + l_2}{d}}}$ - коэффициент

сопротивления сифона. Рассчитаем данный коэффициент.

Сумма коэффициентов местных сопротивлений

$$\sum \zeta = \zeta_{сетк} + \zeta_{кол_1} + \zeta_{кол_2} + \zeta_{кол_3} + \zeta_{вент} + \zeta_{вык}.$$

Пользуясь табличными данными находим

$$\sum \zeta = 10.0 + 0.2 + 0.37 + 0.55 + 7.0 + 1.0 = 19.12.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси) для нормальных водопроводных труб принимаем $\lambda = 0,0286$ для $d = 150$ мм.

Получим значение коэффициента расхода сифона:

$$\mu_{сиф} = \sqrt{\frac{1}{19,12 + 0,0286 \frac{30}{0,15}}} = 0,2.$$

Подставляя все значения в формулу расхода и учитывая, что площадь живого сечения трубы $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, получим

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \mu_{сиф} \sqrt{2gH} = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} \cdot 0,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 2,0} = 0,022 \text{ м}^3 / \text{с} = 22 \text{ л} / \text{с}.$$

Определим высоту сифона. За высоту сифона ($H_{сиф}$) принимается превышение верхней точки сифона над уровнем жидкости в питающем резервуаре (рис. 4.13).

Для расчета высоты сифона воспользуемся уравнением Бернулли для сечений 1-1 по свободной поверхности в питающем резервуаре и 3-3 – в верхней точке сифона. Сечение 3-3 проводим нормально к направлению движения воды, где скорость равна v , а абсолютное давление $p_3 = p_a - p_{вак}$. Плоскость сравнения 0` - 0` совместим с сечением 1-1, тогда $z_1 = 0$; $z_3 = H_{сиф}$.

Уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 3-3 имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} + h_{w_{1-3}}$$

$$z_1 = 0; \quad z_3 = H_{сиф};$$

$$p_1 = p_a; \quad p_3 = p_a - p_{вак};$$

$$v_1 = 0; \quad v_3 = v; \alpha = 1,0 \text{ (для круглой}$$

водопроводной трубы)

Потери напора в гидравлических сопротивлениях учитываются между сечениями 1-1 и 3-3:

$$h_{w_{1-3}} = \sum h_{r_{1-3}} + h_{l_{1-3}} = \sum \zeta_{1-3} \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l_1}{d} \frac{v^2}{2g}.$$

После подстановки данных в уравнение Бернулли получим:

$$H_{сиф} = \frac{p_{вак.}}{\rho g} - \frac{v^2}{2g} \left(1 + \sum \zeta_{1-3} + \lambda \frac{l_1}{d} \right).$$

Скорость движения воды в трубе рассчитаем зная величину расхода:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,022}{3,14 \cdot 0,15^2} = 1,25 \text{ м/с}.$$

Сумму коэффициентов местных сопротивлений учтем между сечениями 1-1 и 3-3: $\sum \zeta_{1-3} = \zeta_{септ.} + \zeta_{кол_1} + \zeta_{кол_2} = 10,57$.

$$\text{Вакуумметрический напор } H_{вак} = \frac{p_{вак}}{\rho g} = \frac{0,55 \cdot 98 \cdot 10^3}{10^3 \cdot 9,8} =$$

$$= 5,5 \text{ м}.$$

Значение коэффициента Дарси (λ) берется из предыдущего расчета $\lambda = 0,0286$.

После подстановки численных значений получим высоту сифона

$$H_{сиф} = 5,5 - \frac{1,25^2}{2 \cdot 9,8} \left(1 + 10,57 + 0,0286 \frac{10}{0,15} \right) = 4,4 \text{ м}.$$

Отсюда следует, что максимальная высота сифона определяется максимальным вакуумметрическим напором в

верхней точке сифона. Считается, что допустимый вакуум без образования разрыва турбулентности струи $H_{\text{вак.доп.}} = (6+7) \text{ м.}$ Значит, предельная высота сифона $H_{\text{сиф.мах.}} = (5+6) \text{ м.}$

Ответ: пропускная способность сифона $Q = 22 \text{ л/с;}$
высота сифона $H_{\text{сиф}} = 4,4 \text{ м.}$

Тема № 5. «Расчет сложных трубопроводных систем».

Задание 1. Водонапорная башня A с отметкой $22,0$ м питает два потребителя – B и C – через систему двух последовательно соединенных труб. Пьезометрический напор в конце первого участка h_p . Определить расход воды на первом участке (Q_1) и расход потребителя C (Q_C), а также отметку потребителя C . Принять расход потребителя B $Q_B = 10$ л/с. Диаметры и длины участков водопроводной системы соответственно $d_1, l_1; d_2, l_2$. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 5% от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 5.1). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

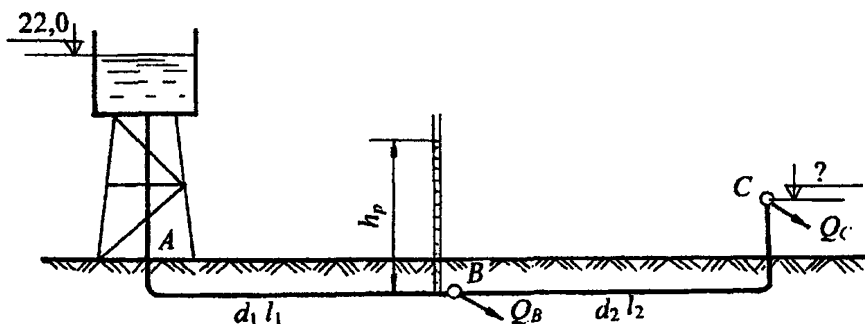


Рис. 5.1.

Задание 2. Из водонапорной башни A обеспечиваются водой три потребителя в точках B , C и D . Пропускная способность первого участка Q_1 ; расходы потребителей Q_B и Q_C . Определить расход потребителя D (Q_D), а также отметку свободной поверхности воды в водонапорной башне, если остаточный напор у потребителя D ($h_{ост.D}$) должен быть не менее 8 метров. Принять диаметры и длины участков труб: $d_1, l_1; d_2, l_2; d_3, l_3$. Трубы водопроводные нормальные, местные сопротивления составляют 10% от потерь по длине. Построить

пъезометрическую линию (рис. 5.2). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

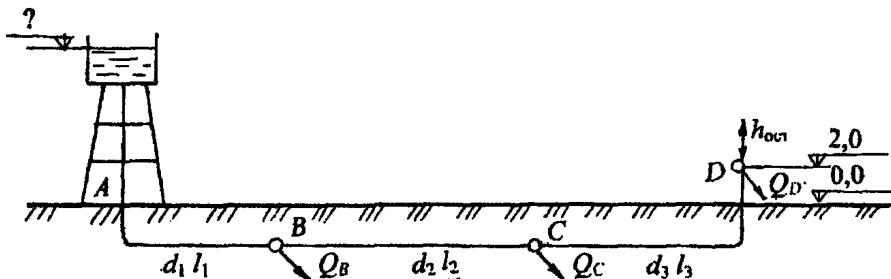


Рис. 5.2.

Задание 3. Из водонапорного бака А с избыточным давлением $p_{\text{ман}}$, по трем последовательно соединенным трубам вода подается потребителям В, С и D с одинаковыми расходами $Q_B = Q_C = Q_D = Q$. У потребителя D – выход воды в атмосферу. Определить расход воды на каждом участке трубы, диаметры и длины участков равны соответственно $d_1, l_1; d_2, l_2; d_3, l_3$. Действующий напор H считать постоянным. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери принять равными 10% от потерь по длине. Построить пъезометрическую линию (рис. 5.3). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

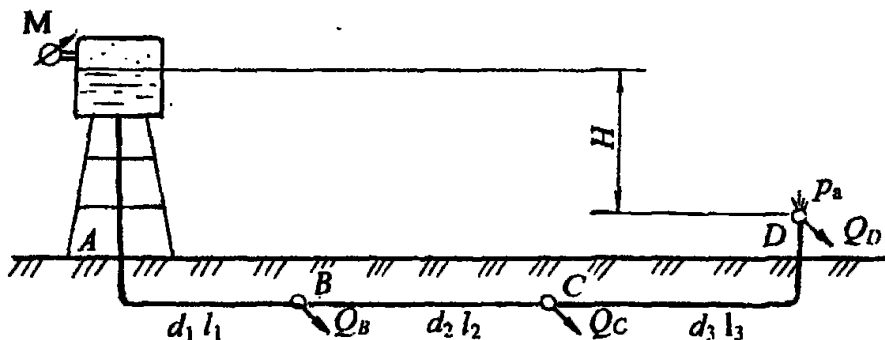


Рис. 5.3.

Задание 4. От насосной установки по трубопроводной системе с параллельным соединением труб вода подается двум потребителям – A и B – с расходами Q_A и Q_B . Длины и диаметры участков системы равны соответственно $d_1, l_1; d_2, l_2; d_3, l_3$. Высота подъема воды у потребителя B – H_B . Определить распределение расходов в параллельных участках труб, а также показание манометра установленного после насоса ($p_{ман}$). Местные сопротивления принять равными 5% от потерь по длине. Считать, что трубы водопроводные нормальные уложены на одном горизонте (рис. 5.4). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

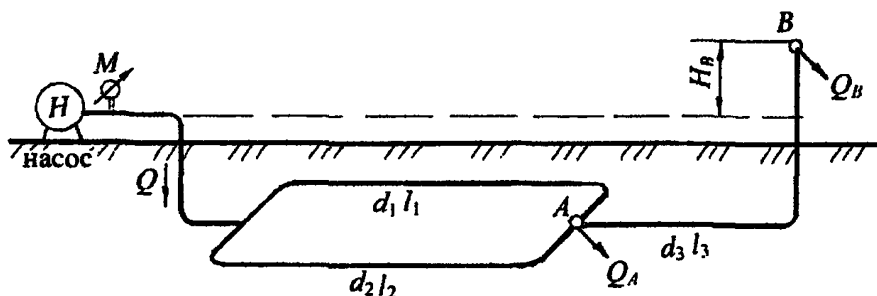


Рис. 5.4.

Задание 5. Тупиковая система (рис. 5.5) предназначена для снабжения водой четырех потребителей – A, B, C, D . Расходы потребителей: Q_A, Q_B, Q_C, Q_D .

Рассчитать диаметр труб на каждом участке при условии, что средняя скорость в трубах не должна превышать v_{cp} . Определить высоту водонапорной башни H , если остаточный напор ($h_{ост}$) у потребителей должен быть не менее 10 м/с. Длины участков сети l_1, l_2, l_3, l_4 . Трубы водопроводные нормальные. Потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10% от потерь по длине. Построить в аксонометрии пьезометрическую линию. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

Задание 6. Два цеха обогатительной фабрики B и C с расходами Q_B и Q_C питаются от насосной установки. Отметки на

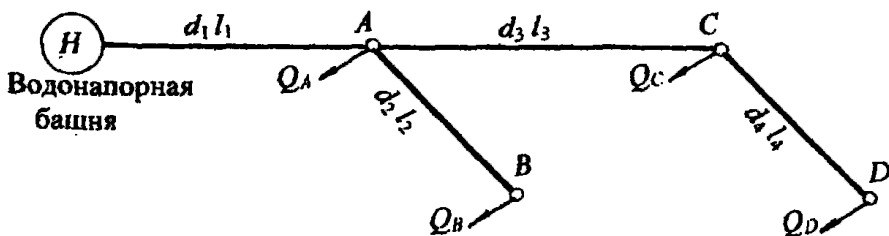


Рис. 5.5.

которые надо поднять воду у потребителей h_B и h_C ; диаметры и длины трубопроводов соответственно $d_2, l_2; d_3, l_3$. Определить расход воды на магистральном участке (Q_1), рассчитать диаметр трубы первого участка (d_1) при условии, что эксплуатационная скорость не должна превышать $v_{экс}$, длина первого участка $l_1 = 600$ м. Рассчитать показание манометра ($p_{ман}$), установленного после насоса. Трубы водопроводные нормальные. Потери в местных сопротивлениях принять равными 10% от потерь по длине (рис. 5.6). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

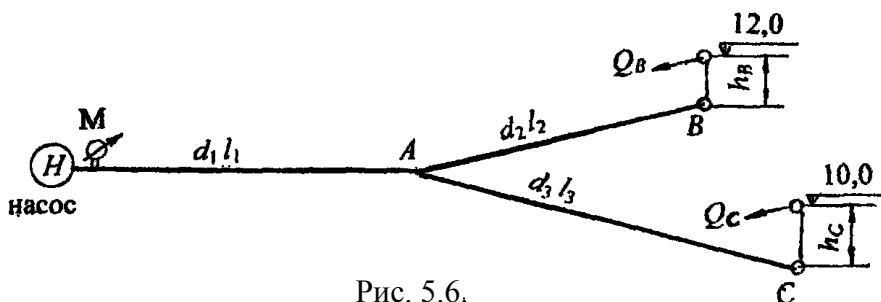


Рис. 5.6.

Задание 7. Определить каким должно быть давление на поверхности воды в закрытом резервуаре ($p_{ман1}$), из которого по системе труб с кольцевым соединением вода поступает в другой

закрытый резервуар с давлением на поверхности $p_{ман2}$. Общий расход воды в системе Q .

Длины и диаметры водопроводной сети $d_1, l_1; d_2, l_2; d_3, l_3, d_4, l_4$. Разность уровней воды в резервуарах равна H . Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 10% от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию (рис. 5.7). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

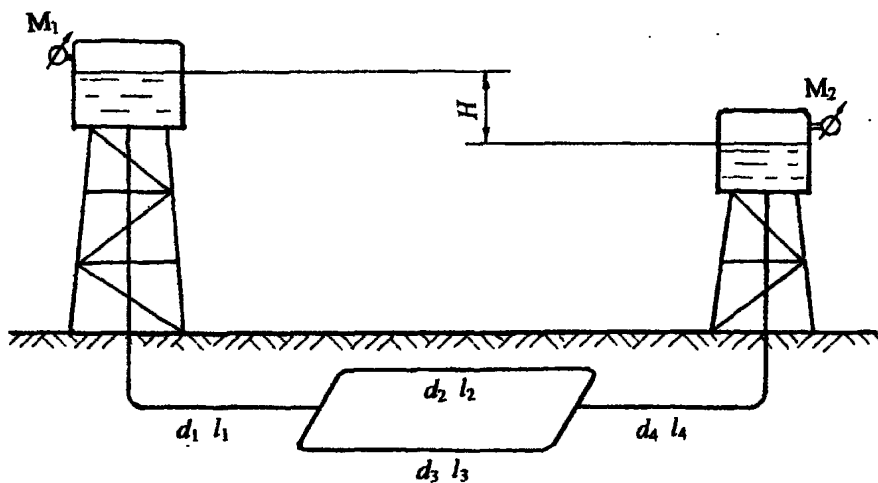


Рис. 5.7.

Задание 8. Из двух напорных резервуаров А и С вода подается потребителю В с расходом Q_B . Определить расходы воды из резервуаров Q_A и Q_C , построить пьезометрическую линию, если длины и диаметры участков сети $d_1, l_1; d_2, l_2$. Отметка резервуара А равна 18 м, резервуара С –11 м. Трубы водопроводные нормальные. Местные сопротивления принять равными 5% от потерь по длине (рис. 5.8). Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

Задание 9. Насос дающий подачу Q перекачивает воду в резервуар по трем параллельным трубам под уровень H . Определить показание манометра $p_{\text{ман}}$, установленного на линии нагнетания, а также расходы воды в каждой трубе. Принять диаметры и длины параллельных участков как $d_1, l_1; d_2, l_2; d_3, l_3$. Трубы водопроводные нормальные. Местные потери составляют 10% от потерь в трубах.

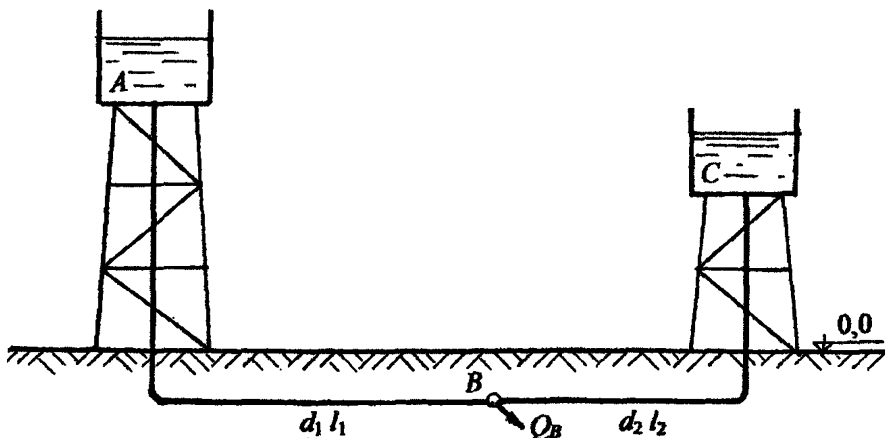


Рис. 5.8.

Оценить как изменится показание манометра, если один или два параллельных водопровода будут отключены. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

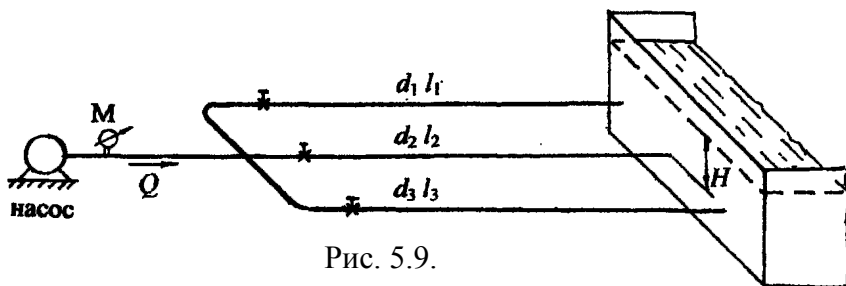


Рис. 5.9.

Задание 10. Из напорного бака A вода подается двум потребителям B и C (рис. 5.10), на отметку 3 м при необходимых расходах Q_B и Q_C по трубам $d_1, l_1; d_2, l_2$. На первом трубопроводе предусмотрена непрерывная подача воды в виде путевого расхода $Q_{\text{пут.}}$.

Определить отметку уровня воды в напорном баке A . Трубы водопроводные нормальные, потери напора в местных сопротивлениях принять равными 10% от потерь напора по длине. Требуемые числовые значения берутся из таблицы 5.

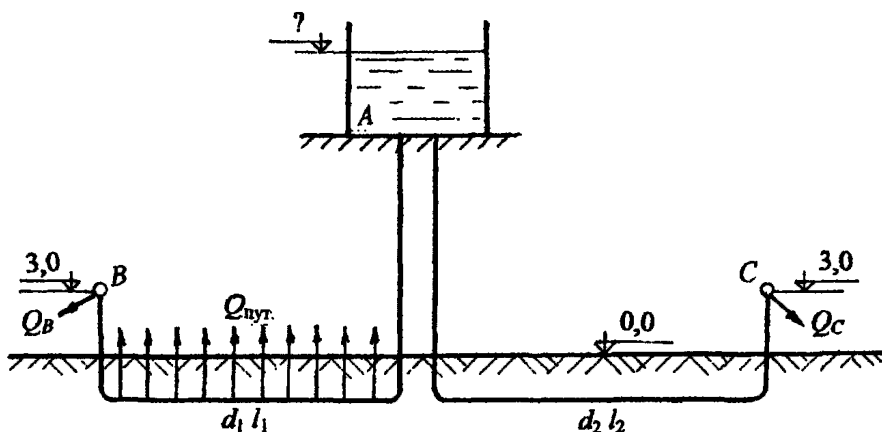


Рис. 5.10.

Таблица 5.

Величины		Последняя цифра зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$h_p, м$	13,0	13,5	14,0	14,5	15	15,5	16	16,5	17,0	17,5
	$Q_B, л/с$	8,5	9,1	9,4	9,7	10	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5
	$d_1, мм$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_1, м$	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750
	$d_2, мм$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_2, м$	400	440	460	480	500	520	540	560	580	600
2	$Q_1, л/с$	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
	$Q_B, л/с$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$Q_C, л/с$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$d_1, мм$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	$l_1, м$	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
	$d_2, мм$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_2, м$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	$d_3, мм$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_3, м$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
3	$p_{ман}, кПа$	18,2	18,4	18,8	19,2	19,6	20,0	20,4	20,8	21,2	21,6
	$d_1, мм$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	$l_1, м$	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700
	$d_2, мм$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_2, м$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	$d_3, мм$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_3, м$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
	$H, м$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

4	$Q_A, \text{ л/с}$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$Q_B, \text{ л/с}$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$d_1, \text{ мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_1, \text{ м}$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	$d_2, \text{ мм}$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_2, \text{ м}$	660	670	680	690	700	710	720	730	740	750
	$d_3, \text{ мм}$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_3, \text{ м}$	560	570	580	590	600	620	640	660	680	700
	$H_B, \text{ м}$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0	10,5	11,0
5	$Q_A, \text{ л/с}$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	$Q_B, \text{ л/с}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	$Q_D, \text{ л/с}$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$Q_C, \text{ л/с}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$v_{cp}, \text{ м/с}$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
	$l_1, \text{ м}$	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950
	$l_2, \text{ м}$	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
	$l_3, \text{ м}$	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750
	$l_4, \text{ м}$	270	290	320	340	350	370	380	390	410	430
6	$Q_B, \text{ л/с}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	$Q_C, \text{ л/с}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$h_B, \text{ м}$	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
	$h_C, \text{ м}$	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
	$d_2, \text{ мм}$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_2, \text{ м}$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	$d_3, \text{ мм}$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_3, \text{ м}$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
	$v_{экс}, \text{ М/С}$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,2	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
7	$p_{ман2}, \text{ ат}$	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25

	$d_1, \text{ мм}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	$l_1, \text{ м}$	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550
	$d_2, \text{ мм}$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_2, \text{ м}$	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
	$d_3, \text{ мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_3, \text{ м}$	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
	$d_4, \text{ мм}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	$l_4, \text{ м}$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
	$H, \text{ м}$	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
8	$Q_B, \text{ л/с}$	8,0	8,5	9,0	8,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
	$d_1, \text{ мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_1, \text{ м}$	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
	$d_2, \text{ мм}$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_2, \text{ м}$	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
9	$Q, \text{ л/с}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	$H, \text{ м}$	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
	$d_1, \text{ мм}$	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	$l_1, \text{ м}$	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475
	$d_2, \text{ мм}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$l_2, \text{ м}$	380	385	390	395	400	405	410	415	420	425
	$d_3, \text{ мм}$	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	$l_3, \text{ м}$	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475
10	$Q_B, \text{ л/с}$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$Q_C, \text{ л/с}$	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35
	$d_1, \text{ мм}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	$l_1, \text{ м}$	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	$d_2, \text{ мм}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

	$l_2, \mathcal{M}$	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700
	$Q_{nym},$ π/c	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Расчет сложных трубопроводных систем».

Пример 1. Сложная система с водонапорной башней включает кольцевое соединение труб и доставляет воду двум потребителям (рис. 5.11).

Определить отметку уровня воды в водонапорной башне, питающей два потребителя: A с расходом $Q_A = 18 \text{ л/с}$ и C с расходом $Q_C = 32 \text{ л/с}$. Система включает магистральный трубопровод $d_1 = 150 \text{ мм}$; $l_1 = 600 \text{ м}$; два параллельно проложенных трубопровода $d_2 = 150 \text{ мм}$; $l_2 = 550 \text{ м}$; $d_3 = 100 \text{ мм}$; $l_3 = 400 \text{ м}$ и трубопровод $d_4 = 200 \text{ мм}$; $l_4 = 720 \text{ м}$, подающий воду потребителю C . Остаточный напор у потребителя C должен быть не менее 10 м .

Трубы водопроводные нормальные. Местные потери напора принять равными 10% от потерь по длине. Построить пьезометрическую линию.

Решение.

При расчете сложных систем с параллельным соединением труб будем руководствоваться следующей методикой:

1. Распределение расхода (пропускная способность). На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующем индексу диаметра трубы (рис. 5.11).

Расход на первом участке равен сумме расходов потребителей: $Q_1 = Q_A + Q_C = 50 \text{ л/с} = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сумма расходов в параллельных трубопроводах равна расходу потребителя C : $Q_2 + Q_3 = Q_C = 32 \text{ л/с} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}$.

Пропускная способность четвертого участка равна расходу потребителя C : $Q_4 = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. Приравняем потери напора по длине в параллельных трубопроводах кольца, чтобы найти распределение расхода в параллельных участках $h_{l_2} = h_{l_3}$ или $A_2 Q_2^2 l_2 = A_3 Q_3^2 l_3$. Отсюда

$Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{A_2 l_2}{A_3 l_3}}$. По таблицам определяем $A_2 = 31,18 \text{ c}^2/\text{м}^6$, $A_3 = 265 \text{ c}^2/\text{м}^6$, тогда $Q_3 = Q_2 \sqrt{\frac{31,18 \cdot 550}{255 \cdot 400}} = 0,4 Q_2$. Подставляя Q_3 в выражение для Q_2 получим $Q_2 + 0,4 Q_2 = 0,032$ или $Q_2 = 0,023 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда $Q_3 = 0,009 \text{ м}^3/\text{с}$.

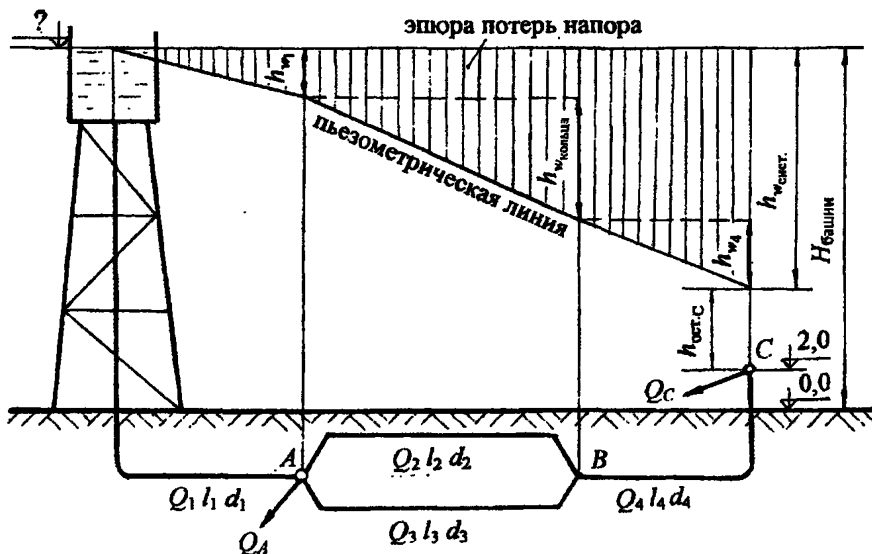


Рис. 5.11

3. Геодезическая высота или отметка уровня воды в водонапорной башне относительно нулевой отметки:

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + h_{\text{ост.с}} + h_{w_{\text{сист.}}}.$$

Рассчитаем потери напора в системе

$$h_{w_{\text{сист.}}} = 1,1(h_{l_1} + h_{l_{\text{кольца}}} + h_{l_4}), \quad \text{где } 1,1 - \text{ поправочный}$$

коэффициент на местные сопротивления (согласно условия задачи), $h_{l_{\text{кольца}}}$ - потери напора по длине в кольце, учтем их по

одной из ветвей, например по второй: $h_{l_{\text{кольца}}} = h_{l_2}$.

Потери напора в системе:

$$h_{w_{\text{сис.}}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_4 Q_4^2 l_4), \quad \text{при} \quad \text{этом}$$

$A_1 = 2,11 \text{ с}^2 / \text{м}^6$; $A_4 = 6,78 \text{ с}^2 / \text{м}^6$, тогда

$$h_{w_{\text{сис.}}} = 1,1(2,11 \cdot 0,05^2 \cdot 600 + 31,18 \cdot 0,023^2 \cdot 550 + 6,78 \cdot 0,032^2 \cdot 720) = 3,5 + 10,0 + 5,5 = 19,0 \text{ м}.$$

Для построения пьезометрической линии имеем потери напора на каждом участке: $h_{w_1} 3,5 \text{ м}$, $h_{w_{\text{кольца}}} = h_{w_2} = h_{w_3} = 10 \text{ м}$, $h_{w_4} = 5,5 \text{ м}$.

Для построения эпюры откладываем в масштабе потери напора на каждом участке и строим пьезометрическую (напорную) линию.

Находим отметку уровня воды в водонапорной башне

$$H_{\text{башни}} = 2,0 + 19,0 + 10,0 = 31,0 \text{ м}$$

Ответ: отметка уровня воды в водонапорной башне равна 31,0 м.

Пример 2. Тупиковая водопроводная система имеет пять участков труб, длины и диаметры которых указаны на рис 5.12. В системе четыре потребителя с расходами: $Q_A = 10 \text{ л/с}$; $Q_B = 18 \text{ л/с}$; $Q_C = 12 \text{ л/с}$; $Q_D = 8 \text{ л/с}$; на пятом участке равномерная подача воды с путевым расходом $Q_{\text{пут.}} = 15 \text{ л/с}$.

Определить высоту водонапорной башни H , рассчитать диаметры труб на первом и третьем участках системы, при условии, что эксплуатационная скорость $v_{\text{экс.}} \leq 1,4 \text{ м/с}$.

Принять $l_1 = 500 \text{ м}$; $l_3 = 450 \text{ м}$; $d_2 = 150 \text{ мм}$; $l_2 = 550 \text{ м}$; $d_4 = 125 \text{ мм}$; $l_4 = 600 \text{ м}$; $d_3 = 150 \text{ мм}$; $l_5 = 700 \text{ м}$. Потери напора в местных сопротивлениях составляют 5% от потерь по длине.

Построить пьезометрическую линию.

Решение.

Решение задачи будем проводить по следующей схеме:

1. Обозначим на схеме (рис. 5.12) расходы на каждом участке с соответствующими индексами и найдем их значения.

Первый участок является магистральным для всех потребителей $Q_1 = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D + Q_{\text{пут.}} = 0,063 \text{ м}^3/\text{с}$.

Третий участок магистральным для потребителей C и D и путевого расхода $Q_3 = Q_C + Q_D + Q_{\text{пут.}} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для второго и четвертого участков:

$$Q_2 = Q_B = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_4 = Q_C = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитаем диаметр труб на первом и третьем

участках: $d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{\text{экс.}}}}$. Получим $d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,063}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,239 \text{ м}$,

принимаем $d_1 = 250 \text{ мм}$; $d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,035}{3,14 \cdot 1,4}} = 0,178 \text{ м}$, принимаем $d_3 = 200 \text{ мм}$.

3. Определим потери напора на участках 1-4 с учетом местных сопротивлений: $h_w = 1,05 h_l = 1,05 A Q^2 l$.

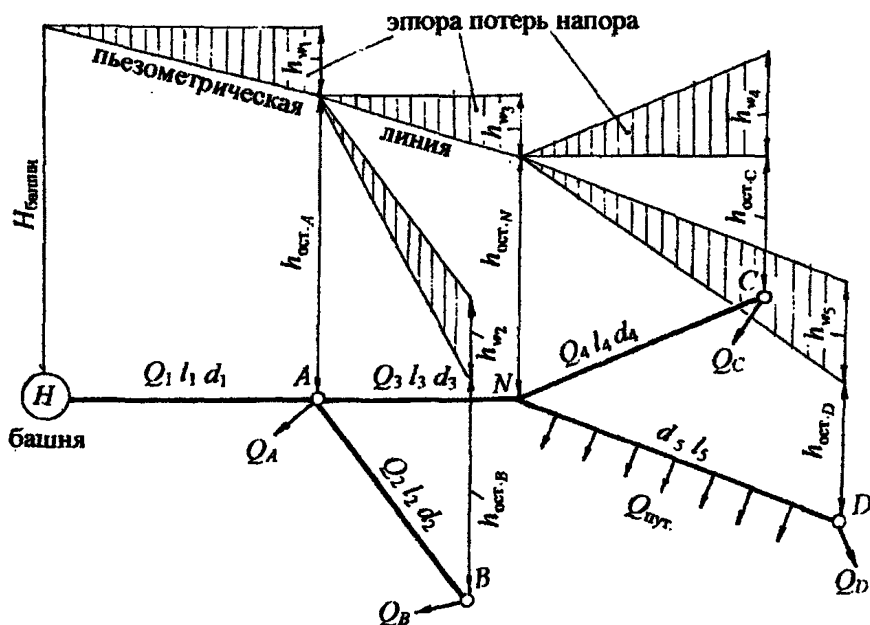


Рис. 5.12.

Для всех диаметров труб выбираем значения коэффициентов $A_1 = 2,11 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_4 = 81,6 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_5 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$.

Получим $h_{w1} = 1,05 \cdot 2,11 \cdot 0,063^2 \cdot 500 = 4,4 \text{ м}$, аналогично $h_{w2} = 5,8 \text{ м}$, $h_{w3} = 3,9 \text{ м}$, $h_{w4} = 7,4 \text{ м}$.

Потери напора на пятом участке с учетом путевого расхода ($Q_{нум}$) и транзитного расхода потребителя D (Q_D) определяется в виде:

$$h_{w5} = 1,05 A_5 l_5 \left(Q_D^2 + Q_D Q_{нум} + \frac{Q_{нум}^2}{3} \right) = 5,9 \text{ м}.$$

Рассчитаем потери напора по трем направлениям к потребителям B , C и D , принимая последовательное соединение труб:

$$h_{w_B} = h_{w_{1-2}} = h_{w_1} + h_{w_2} = 10,2 \text{ м}; \quad h_{w_C} = h_{w_{1-3-4}} = h_{w_1} + h_{w_3} + h_{w_4} = 15,7 \text{ м}$$

$$h_{w_D} = h_{w_{1-3-5}} = h_{w_1} + h_{w_3} + h_{w_5} = 14,2 \text{ м}$$

Определим высоту водонапорной башни

$H = (h_{w_{напр.}} + h_{ост.})_{\max}$, в данной задаче остаточный напор у всех конечных потребителей принимаем равным 10 м, поэтому, сравниваем потери напора по всем направлениям и выбираем максимальные, такими являются потери напора до потребителя С: $h_{w_C} = h_{w_{\max}} = 15,7 \text{ м}$. Таким образом, высота водонапорной башни: $H = h_{w_C} + h_{ост.} = 15,7 + 10,0 = 25,7 \text{ м}$

5. Строим пьезометрическую линию. Для первого и третьего участков пьезометрическую линию построим в вертикальной плоскости, для других участков пьезометрическую линию представим в изометрии путем параллельного переноса направления трубопровода (рис. 5.12).

Из построения пьезометрической линии следует, что остаточные напоры у всех потребителей, кроме потребителя С, больше 10,0 м. Вертикальной штриховкой показана эпюра потерь напора.

Пример 3. Из водонапорной башни A , на поверхности воды в которой действует избыточное давление ($p_{\text{ман}}$), по трем последовательно соединенным трубам подается вода трем потребителям с расходами: $Q_B = 15 \text{ л/с}$; $Q_C = 8 \text{ л/с}$; $Q_D = 12 \text{ л/с}$. Диаметры и длины участков системы принять: $d_1 = 200 \text{ мм}$; $l_1 = 700 \text{ м}$; $d_2 = 150 \text{ мм}$; $l_2 = 600 \text{ м}$; $d_3 = 125 \text{ мм}$; $l_3 = 500 \text{ м}$. Остаточный (свободный) напор у потребителя D должен быть не менее 10 м . Действующий напор водонапорной башни $H = 15 \text{ м}$ считать постоянным (рис. 5.13).

Определить каким должно быть показание манометра ($p_{\text{ман}}$) на поверхности воды в башне для обеспечения водой потребителей при условии, что местные сопротивления составляют 10% от потерь по длине. Трубы водопроводные нормальные. Построить пьезометрическую линию.

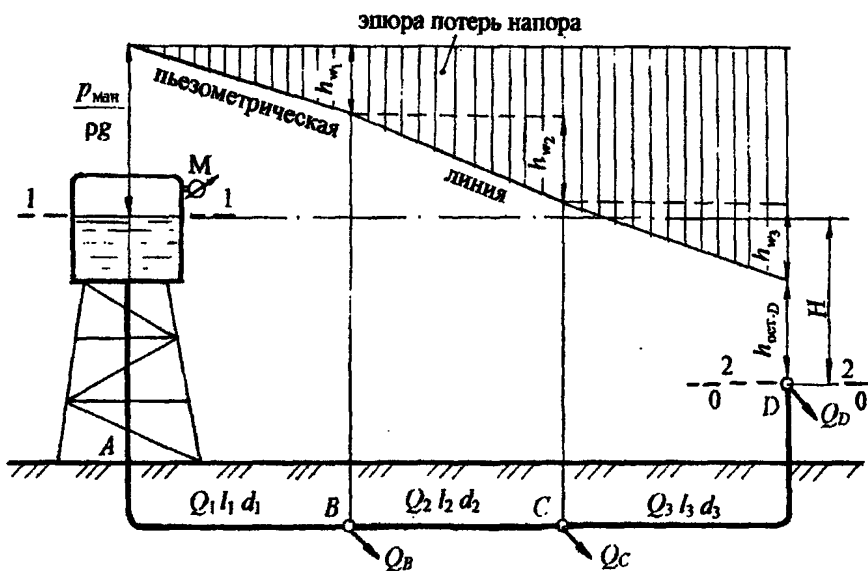


Рис. 5.13.

Решение.

Для расчета системы воспользуемся уравнением Бернулли по следующей методике:

1. Выбираем два сечения по свободной поверхности воды в башне, где скорость воды можно считать равной нулю и у потребителя D .

2. Сечения нумеруем по направлению движения воды: 1-1 по свободной поверхности воды, где установлен манометр, 2-2 по трубопроводу у потребителя D .

3. В выбранных сечениях учитываем атмосферное давление: $p_1 = p_a + p_{ман}$; $p_2 = p_a + \rho g h_{осмD}$.

4. Плоскость сравнения 0-0 совместим с сечением 2-2, тогда $z_1 = H$; $z_2 = 0$.

5. Записываем уравнение Бернулли в общем виде и производим подстановку параметров:

$$\begin{aligned} z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} &= z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}; \\ z_1 &= H; & z_2 &= 0; \\ p_1 &= p_a + p_{ман}; & p_2 &= p_a + \rho g h_{осмD}; \\ v_1 &= 0; & v_2 &= v; \alpha_2 = 1,0; h_{w_{1-2}} = h_{w_{сум}}. \end{aligned}$$

После подстановки параметров получим

$$H + \frac{p_a}{\rho g} + \frac{p_{ман}}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\rho g h_{осмD}}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + h_{w_{сум}}.$$

В данном случае скоростным напором $\frac{v^2}{2g}$ как малой величиной можно пренебречь, поэтому после соответствующих сокращений принимает вид:

$$H + \frac{p_{ман}}{\rho g} = h_{осмD} + h_{w_{сум}}. \text{ То есть за счет избыточного}$$

напора $\frac{p_{ман}}{\rho g}$ на поверхности воды в башне и действующего напора H происходит преодоление всех сопротивлений в

системе $h_{w_{\text{сист}}}$ и обеспечение остаточного напора у потребителя $D - h_{\text{осм}D}$.

Определим потери напора в системе $h_{w_{\text{сист}}}$.
Вспользуемся методикой расчета сложных систем:

1. Распределение расхода. На каждом участке вводим обозначение расхода с индексом, соответствующим индексу диаметра трубы Q_1, Q_2, Q_3 .

Рассчитаем расход на каждом участке через расходы потребителей:

$$Q_1 = Q_B + Q_C + Q_D = 35 \text{ л/с} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_2 = Q_C + Q_D = 20 \text{ л/с} = 0,02 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_3 = Q_D = 12 \text{ л/с} = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определим потери напора в системе $h_{w_{\text{сист}}}$. При последовательном соединении труб потери напора на всех участках суммируются. С учетом поправочного коэффициента на местные сопротивления получим $h_{w_{\text{сист}}} = 1,1(h_{l_1} + h_{l_2} + h_{l_3})$, отсюда следует $h_{w_{\text{сист}}} = 1,1(A_1 Q_1^2 l_1 + A_2 Q_2^2 l_2 + A_3 Q_3^2 l_3)$. При этом $A_1 = 6,78 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 31,18 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 81,60 \text{ с}^2/\text{м}^6$.

Для построения пьезометрической линии нужно знать потери напора на каждом участке трубопровода, поэтому:

$$h_{w_1} = 1,1 A_1 Q_1^2 l_1 = 1,1 \cdot 6,78 \cdot 0,035^2 \cdot 700 = 6,4 \text{ м};$$

$$h_{w_2} = 1,1 A_2 Q_2^2 l_2 = 1,1 \cdot 31,18 \cdot 0,02^2 \cdot 600 = 8,2 \text{ м};$$

$$h_{w_3} = 1,1 A_3 Q_3^2 l_3 = 1,1 \cdot 81,6 \cdot 0,012^2 \cdot 500 = 6,5 \text{ м};$$

$$h_{w_{\text{сист}}} = 6,4 + 8,2 + 6,5 = 21,1 \text{ м}$$

Найдем показание манометра на поверхности воды в водонапорной башне $\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{w_{\text{сист}}} + h_{\text{осм}D} - H = 16,1 \text{ м}$, отсюда

$$\frac{p_{\text{ман}}}{\rho g} = h_{w_{\text{сист}}} + h_{\text{осм}D} - H = 16,1 \text{ м}, \text{ отсюда}$$

$$p_{\text{ман}} = 16,1 \cdot \rho g = 16,1 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 157 \cdot 10^3 \text{ Па} = 157 \text{ кПа}.$$

Ответ: показание манометра $p_{\text{ман}} = 157 \text{ кПа}$.

Список литературы.

1. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод/ Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб и доп. — М.: Недра, 1991. — 331 с.
2. Гудилин Н.С., Кривенко Е.М., Маховиков Б.С., Пастоев И.Л./ Гидравлика и гидропривод/ Учебник для вузов. — 4-е изд., перераб и доп. — М.: Горная книга, 2007. — 520 с.
3. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 731 с.
4. Часс С.И. Гидромеханика в примерах и задачах: Учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006, 206 с.

Приложение

Таблица 1.

Плотность, коэффициент кинематической вязкости, условная вязкость некоторых жидкостей.

Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Кинематический коэффициент вязкости ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Условная вязкость °Е (ВУ)
Вода пресная	998	1,008	1,0
Этиловый спирт	790	1,52	1,04
Ртуть	13546	0,16	-
Воздух	1,22	14,9	-
Бензин при t=15°С	740-780	0,83-0,93	-
Керосин	820	2,5	1,13
Нефть	810-930	25,0-27,0	3,7-4,0
Масло турбинное	900	20,0-48,0	3,0-6,7
Масло трансформаторное	884	28,0-30,0	4,05-4,30

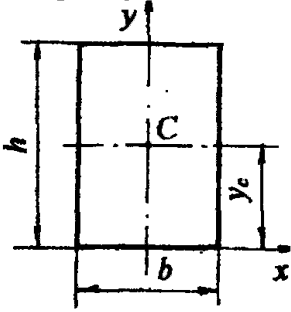
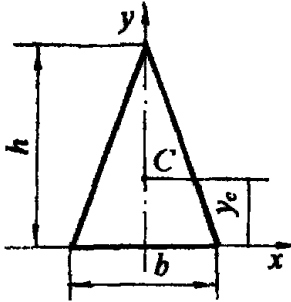
Таблица 2.

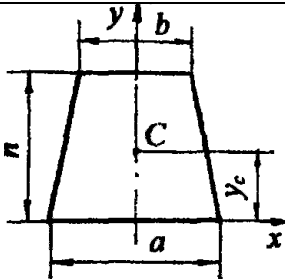
Соотношение между единицами давления

Единица	Па (Н/м ²)	кгс/см ² (ат)	кгс/м ²	мм. вод. ст.	м вод.ст.	мм. рт.ст.	бар
1 Па (Н/м²)	1	10,2·10 ⁻⁶	0,102	0,102	102·10 ⁶	750·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
1 кгс/см² (ат)	9,81·10 ⁴	1	10 ⁴	10 ⁴	10	735,6	0,981
1 кгс/м²	9,81	10 ⁻⁴	1	1	10 ⁻³	73,56·10 ⁻³	98,1·10 ⁻⁶
1 мм. вод.ст.	9,81	10 ⁻⁴	1	1	10 ⁻³	73,56	98,1·10 ⁻⁶
1 м вод.ст.	9,81·10 ³	0,1	10 ³	10 ³	1	73,56	98,1·10 ⁻³
1 мм. рт.ст.	133,3	1,36·10 ⁻³	13,6	13,6	13,6·10 ⁻³	1	1,33·10 ⁻³
1 бар	10 ⁵	1,02	10,2·10 ³	10,2·10 ³	10,2	750	1

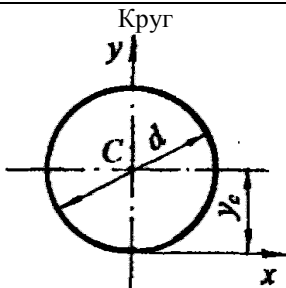
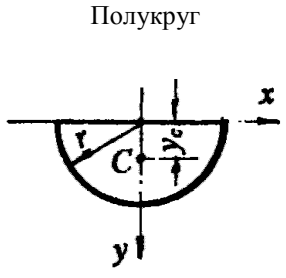
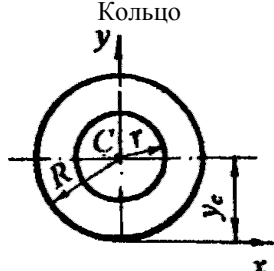
Таблица 3.

Координаты центров тяжести и моменты инерции плоских фигур относительно горизонтальной центральной оси

Плоская фигура	Координата центра тяжести y_C	Площадь фигуры A	Момент инерции I_C
Прямоугольник 	$\frac{h}{2}$	bh	$\frac{bh^3}{12}$
Треугольник 	$\frac{h}{3}$	$\frac{bh}{2}$	$\frac{bh^3}{36}$
Трапеция равнобедренная	$\frac{h(a+2b)}{3(a+b)}$	$\frac{h(a+b)}{2}$	$\frac{h^3(a^2+b^2+4ab)}{2(a+b)}$

			
---	--	--	--

Продолжение таблицы 3

Круг 	$\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi d^4}{64}$
Полукруг 	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{\pi r^2}{2}$	$\frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} r^4$
Кольцо 	R	$\pi(R^2 - r^2)$	$\pi \frac{(R^4 - r^4)}{4}$

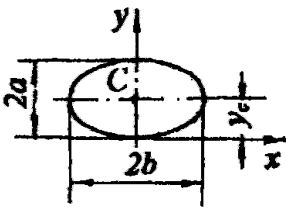
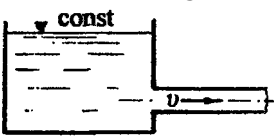
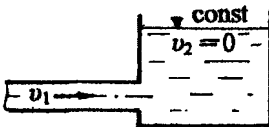
Эллипс 	a	πab	$\frac{\pi a^3 b}{4}$
---	-----	----------	-----------------------

Таблица 4.

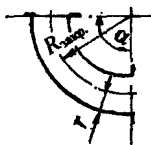
Местные сопротивления

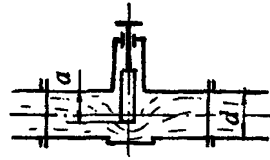
Тип, схема местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления ζ
Вход в трубу $h_{\text{вх}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v^2}{2g}$ 	При острых кромках $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$; при закругленных кромках и плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,2$; при весьма плавном входе $\zeta_{\text{вх}} = 0,05$.
Внезапное расширение $h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.}} \frac{v_2^2}{2g}$ 	$\zeta_{\text{в.р.}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$
Выход из трубы в резервуар больших размеров, выход под уровень $h_{\text{вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{v_1^2}{2g}$	$\zeta_{\text{вых}} = 1,0$

															
Внезапное сужение $h_{с.с.} = \zeta_{с.с.} \frac{v_2^2}{2g}$ 	$\zeta_{с.с.} = f\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$ <table><tr><td>$\frac{\omega_2}{\omega_1}$</td><td>0,01</td><td>0,1</td><td>0,2</td><td>0,4</td><td>0,6</td><td>0,8</td></tr><tr><td>$\zeta_{с.с.}$</td><td>0,50</td><td>0,45</td><td>0,40</td><td>0,30</td><td>0,2</td><td>0,1</td></tr></table>	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	$\zeta_{с.с.}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,2	0,1
$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,01	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8									
$\zeta_{с.с.}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,2	0,1									

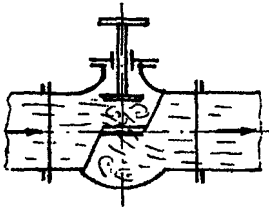
Продолжение таблицы 4

Поворот трубы (колесо)								
а) колесо без закругления								
								
	Угол α°	30	40	50	60	70	80	90
	$\zeta_{закр}$	0,2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9	1,1

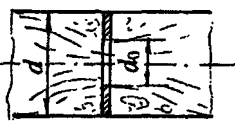
б) колесо с закруглением при $\alpha = 90^\circ$						
$h_{закр} = \zeta_{закр} \frac{v^2}{2g}$						
						
	$r/R_{закр}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
	$\zeta_{закр}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294
	$r/R_{закр}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$\zeta_{закр}$	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978

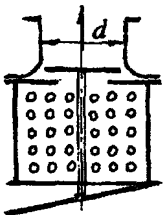
Задвижка Лудло					
					
	a/d	Полное открытие	1/4	3/8	
	$\zeta_{зав}$	0,12	0,28	0,81	
	a/d	1/2	5/8	3/4	7/8
	$\zeta_{зав}$	2,06	5,25	17,0	978

Пробковый кран, $Re \geq 10^4$ 	α°	5	10	20	30
	$\zeta_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47
	α°	40	50	60	
	$\zeta_{кр}$	17,3	52,6	206	

Вентиль		Полностью открытый $Re \geq 10^4$						
	$d, \text{ мм}$	40	80	100	150	200	250	300
	$\zeta_{вент}$	4,9	4,0	4,1	4,4	4,7	5,1	5,4

Окончание таблицы 4

Диафрагма в трубе 	$Re \geq 10^4$							
	$\frac{d_0^2}{d^2}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	$\zeta_{диаф}$	224	60,2	19,2	9,8	4,4	2,4	1,22

Всасывающий кран с сеткой, $Re \geq 10^4$ 	$d, \text{ мм}$	40	70	100	200	300	500
	$\zeta_{сетк}$	12	8,5	7,0	4,7	3,7	2,5

Для ориентировочных расчетов:
при наличии обратного клапана $\zeta_{сетк} = 10,0$;
при отсутствии обратного клапана $\zeta_{сетк} = 5 \div 6$.

Таблица 5

Коэффициенты сопротивления колен водопроводных труб при $\alpha = 90^\circ$

$d, \text{ мм}$	50	100	150	200	250	300
$\zeta_{\text{кол.}}$	0,76	0,39	0,37	0,37	0,40	0,45
$d, \text{ мм}$	350	400	450	500	600	700
$\zeta_{\text{кол.}}$	0,45	0,42	0,42	0,46	0,47	0,48

Таблица 6

Значения эквивалентной абсолютной шероховатости Δ_z в трубах

Материал и вид трубы	Состояние трубы	$\Delta_z, \text{ мм}$
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0,001
Бесшовные стальные	Новые и чистые, тщательно уложенные	0,014
	После нескольких лет эксплуатации	0,2

Окончание таблицы 6

Стальные сварные	Новые и чистые	0,06
	С незначительной коррозией после очистки	0,15
	Умеренно заржавленные	0,5
	Старые заржавленные	1,0
	Сильно заржавленные или с большими отложениями	3,0
Чугунные	Новые асфальтированные	0,12
	Новые без покрытия	0,3
	Бывшие в употреблении	1,0
	Очень старые	3,0
Бетонные	Новые из предварительно напряженного бетона	0,03

	Новые центробежные	0,2
	Бывшие в употреблении	0,3+0,8
	Из необработанного бетона	1,0-3,0

Таблица 7

Значения коэффициентов шероховатости n и $1/n$ (для формул Павловского, Агроскина, Маннинга)

Категория	Характеристика поверхности	n	$1/n$
I	Исключительно гладкие поверхности, покрытые эмалью	0,09	111
II	Весьма тщательно остроганные доски, хорошо пригнанные. Штукатурка из чистого цемента	0,010	100
III	Лучшая цементная штукатурка. Чистые новые гончарные, чугунные и железные трубы, хорошо уложенные и соединенные	0,011	90,9
IV	Неостроганные доски, хорошо пригнанные. Водопроводные трубы в нормальных условиях; весьма чистые водопроводные трубы; весьма хорошая бетонировка	0,012	83,3

Окончание таблицы 7

V	Тесовая кладка, хорошая кирпичная кладка. Водосточные трубы в нормальных условиях. Несколько загрязненные водопроводные трубы	0,013	76,9
VI	Загрязненные трубы (водопроводные и водосточные); средняя кирпичная кладка, бетонировка каналов в средних условиях	0,014	71,4
VII	Средняя кирпичная кладка, облицовка из тесаного камня в средних условиях. Значительно загрязненные водостоки. Брезент по деревянным рейкам	0,015	66,7
VIII	Хорошая бутовая кладка, старая кирпичная кладка, сравнительно грубая бетонировка. Гладкая, весьма хорошо разработанная скала	0,017	58,8

Таблица 8

Значения величин C , λ , K и $1/K^2 = A$ для нормальных
водопроводных труб, рассчитанные по формуле акад. Н.Н.
Павловского при $n = 0.012$

$d, \text{мм}$	C	λ	$K, \text{м}^3/\text{с}$	$A, \text{с}^2/\text{м}^6$
50	44,79	0,0391	0,00987	10340,0
75	47,45	0,349	0,0287	1214,0
100	49,48	0,0321	0,0614	265,0
125	51,07	0,0301	0,111	81,60
150	52,42	0,0286	0,179	31,18
200	54,62	0,0263	0,384	6,78
250	56,40	0,0247	0,692	2,11
300	57,90	0,0234	1,121	0,794
350	59,18	0,0224	1,684	0,354
400	60,31	0,0216	2,397	0,174
450	61,28	0,0209	4,259	0,0932
500	62,28	0,0202	4,324	0,0532
600	63,91	0,0192	6,999	0,0204
700	65,32	0,0184	10,517	0,00904
800	66,58	0,0177	14,965	0,00495
900	67,70	0,0170	20,430	0,00239
1000	68,72	0,0166	26,485	0,00137

Таблица 9

Значение коэффициента удельного сопротивления $A, \text{с}^2/\text{м}^6$ для
расчета трубопроводов (при квадратичном законе
сопротивления) в зависимости от абсолютной шероховатости Δ

Диаметр $d, \text{мм}$	$\Delta = 0,2 \text{ мм}$	$\Delta = 0,5 \text{ мм}$	$\Delta = 1,0 \text{ мм}$
50	7570	10000	12900
75	886	1160	1460
100	194	252	313
125	62,6	80,0	95,2
150	23,1	29,3	36,2
200	5,08	6,45	7,81
250	1,58	1,98	2,40
300	0,607	0,709	0,917
400	1,35	0,167	0,201
500	0,0422	0,0518	0,062

Содержание

Введение

Тема №1: «Гидростатическое давление в жидкости».

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Гидростатическое давление в жидкости».

Тема № 2. «Сила давления жидкости на плоские поверхности».

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Сила давления жидкости на плоские поверхности».

Тема № 3. «Сила давления жидкости на криволинейные поверхности».

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Сила давления жидкости на криволинейные поверхности».

Тема № 4. «Расчет простых трубопроводных систем».

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Расчет простых трубопроводных систем».

Тема № 5. «Расчет сложных трубопроводных систем».

Примеры выполнение заданий курсовой работы по теме «Расчет сложных трубопроводных систем».

Список литературы

Приложение

Содержание

Учебное издание

Кривоченко Алексей Викторович

ГИДРОМЕХАНИКА

Методические указания по выполнению курсовой работы

Компьютерная верстка А.В.Кривоченко

Подписано в печать _____.____.2022

Формат 60×90 1/16

Уч.-изд.л.2,06

Рег. №

Заказ

Бумага офсетная

Печать офсетная

Тираж 100 экз.

Отпечатано с авторского оригинала в редакционно-
издательском отделе СОФ МГРИ
Старый Оскол, ул. Ленина 14/13