

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Экология и рациональное использование водных ресурсов»**

**Р. Н. ВОСТРОВА**

# **ГИДРАВЛИКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Пособие по выполнению контрольных работ № 1 и № 2**

*Одобрено методической комиссией ФБО*

Гомель 2006

УДК. 626/627/ (075.8)  
А162

Р е ц е н з е н т – зав. кафедрой «Тепловозы и тепловые двигатели», канд.  
техн. наук., доцент С.Я.Френкель(БелГУТ).

## **Вострова Р. Н.**

А162 Гидравлика и гидравлические машины. Пособие по выполнению контрольных работ № 1и № 2 для студентов ФБО специальности - 1-37 02 02. Гомель: БелГУТ, 2006. – 65 с.

Приведены варианты задач к контрольным работам № 1 и № 2 и методические указания по их решению. Предназначено для самостоятельной работы студентов ФБО специальности 1-37 02 02 "Подвижной состав железнодорожного транспорта", специализации 1-37 02 02 01 "Вагоны"; 1-37 02 01 "Тяговый состав железнодорожного транспорта", специализации 1-37 02 01-01 "Тяговый состав железнодорожного транспорта (Тепловозы)"

**УДК. 626/627/ (075.8)**

© Р. Н. Вострова, 2006.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие требования к выполнению контрольной работы № 1 и № 2.....	4.....
1 Варианты заданий на контрольную работу № 1.....	7.....
2 Варианты заданий на контрольную работу № 2.....	17.....
3 Методические указания к решению задач контрольной работы № 1.....	22.....
4 Методические указания к решению задач контрольной работы № 2.....	44.....
5 Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины.....	48.....
Приложение А. Справочные данные.....	54.....
Приложение Б Образец оформления обложки.....	58.....
Приложение В Базовая программа дисциплины «Гидравлика и гидравлические машины».....	59.....
Список литературы.....	65.....

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1, 2**

Контрольные работы № 1, 2 студентами специальности 1-37 02 02 "Подвижной состав железнодорожного транспорта" выполняется с целью закрепления знаний, полученных при самостоятельном изучении дисциплины «Гидравлика и гидравлические машины», и приобретения навыков практического применения этих знаний для решения инженерных задач. Контрольной работой № 1 предусматривается решение восьми задач по следующим темам:

- определение давления в покоящейся жидкости;
- определение силы давления жидкости на плоские стенки;
- определение силы давления жидкости на криволинейные поверхности;
- относительный покой жидкости;
- решение задач с применением закона Архимеда;
- определение расхода при истечении жидкости через отверстия и насадки;
- применение закона Паскаля для решения задач механики;
- применение уравнения Бернулли для решения задач механики.

В процессе выполнения контрольной работы № 2 необходимо решить две задачи. Решение первой задачи посвящается построению трубопроводной характеристики трубопровода с учетом потерь напора, определению рабочей точки и характеристик центробежного насоса, работающего на трубопроводную систему. Вторая задача посвящается определению параметров объемного гидропривода. Справочные данные, необходимые для решения задач приведены в *ПРИЛОЖЕНИИ А* или в справочной литературе [2].

Выполнять контрольные работы следует после тщательного изучения, указанных выше тем, по рекомендуемой литературе. Важным фактором в изучении дисциплины является посещение студентом лекционных занятий, где лектор детально излагает разделы дисциплины, согласно базовой программе (*ПРИЛОЖЕНИЕ В*) и поясняет, как изученные законы можно применить для решения практических задач. Конспект лекций окажет незаменимую помощь при подготовке к экзамену. Задания на контрольную работу выдаются преподавателем на лекционных занятиях.

Если же такая «теория» покажется слишком краткой, тогда нужно обратиться к более объёмистым книгам и учебникам, список которых приведён в конце пособия. Эта литература имеется в библиотеке БелГУТа. В действительности же книг по «Гидравлика и гидравлические машины» великое множество. По возможности используйте и другие учебники. Подойдут и старые, но с ними поосторожней — ведь единицы измерения в них внесистемные, не всегда в единой системе измерений (СИ). Впрочем, ничего страшного, ведь во многих наших задачах условие специально задано во внесистемных единицах. Правила перевода единиц измерения в единицы единой системы измерений содержатся в приложении А.

Решение задачи рекомендуется приводить с пояснительным рисунком. Оформляются задачи на листах писчей бумаги форматом А4 (210x297). Первый лист — титульный. Все последующие листы оформляются рамкой. Образец оформления титульного листа приведен в *ПРИЛОЖЕНИИ Б*.

На последнем листе приводится список литературы, ссылки на которую указываются в тексте при решении задачи в квадратных скобках.

Все математические действия, применяемые при решении задач, должны быть пояснены. Следует соблюдать также и определенный порядок выполнения математических действий. Сначала записывается расчетная формула, затем проставляются значения всех величин, входящих в формулу, и затем записывается ответ.

Например,

$$V_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \cdot V_1 = \left(\frac{0,2}{0,1}\right)^2 \cdot 1 = 4 \text{ м/с.}$$

Результаты промежуточных вычислений приводить не нужно. Полученный ответ обязательно снабжается размерностью. Отсутствие размерности или же неправильное ее проставление считается за ошибку и учитывается при общей оценке работы.

Рисунки к задачам выполнять в соответствие с вычислениями в тексте. Указывать на чертеже все размеры, силы и другие величины, вычисление, которых производится в тексте.

Прорецензированная работа сопровождается заключением рецензента: «К защите» или «К защите не допускается». Допущенная к защите работа может содержать и замечания рецензента. Все они в подготовленной к защите работе должны быть исправлены при проведении работы над ошибками, которая оформляется обычно на последних листах.

Студент в процессе защиты должен хорошо владеть теорией, знать формулы и логически стройно доказывать их применение, ориентироваться в размерностях, а также должен уметь доказать правильность выполненного им решения.

Защита контрольных работ производится в субботу, два раза в месяц, согласно расписанию, утвержденному деканатом ФБО.

Студент должен помнить о том, что если он сдал работу на проверку во время сессии, то не исключена возможность того, что преподаватель не проверит ее на следующий день, так как срок проверки работы не более 6 – ти дней со дня подачи. Поэтому работы должны быть сданы на кафедру для проверки заблаговременно. Работы, сданные уже после прибытия на сессию, могут ко дню экзамена оказаться не только не защищенными, но и не прорецензированными. А это влечет за собой не допуск к экзамену.

Студент, не явившийся на экзамен, лишает себя возможности сдать экзамен за три попытки. У него остается только две попытки сдать экзамен в рамках семестра по срокам, установленным деканатом ФБО.

Выбор варианта осуществляется по учебному шифру. Студенты, у которых последняя цифра шифра – нечётное число, решают задачи № 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 и 15, Если последняя цифра шифра – чётное число, то № 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 и 16. Исходные данные для решения задач принимаются из таблиц по последней цифре шифра.

# 1 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 1

**Задача 1.1.** В закрытом резервуаре налита вода. Определить высоту  $h$  поднятия ртути в дифманометре и высоту  $h_2$  поднятия воды в закрытом пьезометре, если показание пружинного манометра, подключенного на уровне точки А, равно  $p_m$ . (рисунок 1.1). Атмосферное давление  $p_{ат}$  считать нормальным, глубина погружения точки А равна  $h_1$ . Плотность ртути  $\rho = 13600 \text{ кг/м}^3$ , воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$

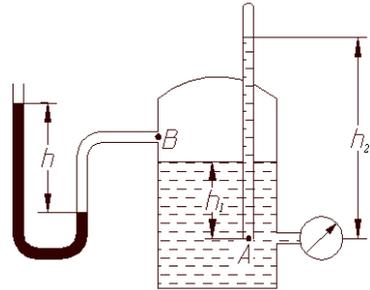


Рисунок 1.1

Исходные данные принять по таблице 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные		Номер вариантов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Высота, м	$h_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Манометрическое Давление в точке А на глубине $h_1$		210 кПа	2 ат.	260 кПа	2 кг/см <sup>2</sup>	275 кПа	5 ат.	180 кПа	790 мм.рт.ст.	20 м вод.ст	200 кПа

**Задача 1.2.** Резервуары А и В частично заполнены жидкостью разной плотности (соответственно  $\rho_1 = 998 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 1029 \text{ кг/м}^3$  газом, причем к резервуару А подключен баллон с (рисунок 1.2). Высота столба ртути в правой трубке дифманометра  $h$ , а расстояние от уровня свободной жидкости в резервуарах до мениска ртути в левой трубке  $h_1$ . Какое необходимо создать манометрическое давление  $p_m$  на свободной поверхности в резервуаре В ?

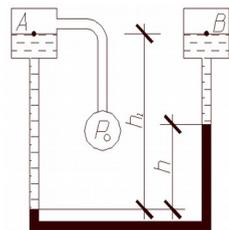


Рисунок 1.2

кг/м<sup>3</sup>)  
газом

поверхнос  
трубке р  
давление

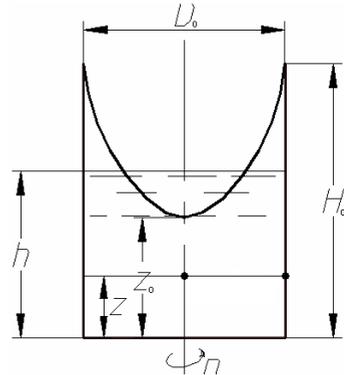
Исходные данные принять по таблице 1.2.

Таблица 1.2

Исходные данные		Номер вариантов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Высота, м	$h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$h_1$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Давление, кПа	$p_a$	160	170	150	120	110	100	200	100	165	175

**Задача 1.3.** В цилиндрическом сосуде диаметром  $D_0$  и высотой  $H_0$  налита начальный уровень  $h$  (рисунок 1.3).

- 1) будет ли выплескиваться вода, если вращаться с постоянной частотой
- 2) на каком расстоянии  $z_0$  от дна будет самая низшая точка свободной поверхности
- 3) С какой частотой нужно вращать вода поднялась до краев сосуда?



сосуде вода с Определить б. сосуд в. вращения п. находится поверхности сосуда, чт

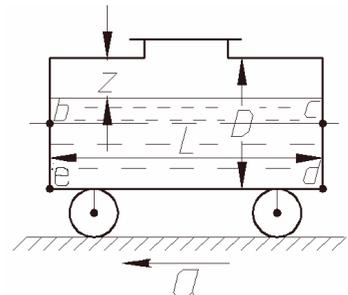
Рисунок 1.3  
таблица 1.3.

Исходные данные принять по

Таблица 1.3

Исходные данные		Номер вариантов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Высота, м	$H_0$	1,1	1,2	0,9	1,0	1,3	1,5	0,5	1,7	0,6	1,4
	$h$	0,45	0,5	0,6	0,6	0,5	0,2	0,3	0,4	0,25	0,5
Диаметр, м	$D_0$	0,5	0,6	0,5	0,45	1	0,7	0,3	0,9	0,25	0,4
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$n$	85	90	110	132	100	95	86	85	158	98

**Задача 1.4.** Цистерна диаметром  $D$  и  $L$ , наполненная нефтью, движется горизонтально с постоянным ускорением  $a$  (рисунок 1.4). Расстояние от свободной поверхности верхнего края цистерны  $z$ . Определить



длин (рису нефт

величину манометрического давления в точках e, b, c, d плоских торцевых стен цистерны.

Рисунок 1.4

Исходные данные принять по таблице 1.4.

Таблица 1.4

Исходные данные		Номер вариантов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Точка		e	b	d	c	e	d	b	e	c	b
Параметры, м	z	0,2	0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	0,35	0,6	0,1
	D	1,5	2,0	2,2	1,7	2,0	2,5	1,9	1,8	2,2	2,1
Длина, м	L	5,0	6,0	5,2	5,5	4,5	6,0	5,5	4,0	6,0	4,6
Ускорение, м/с <sup>2</sup>	a	-2,0	-1,4	2,3	0,8	-5	2	-5	-6	5	-3,2

**Задача 1.5.** Треугольное отверстие ABC в вертикальной стенке закрытого резервуара, представляющее равносторонний треугольник, закрыто щитом (рисунок 1.5). Определить равнодействующую силу гидростатического давления бензина на щит и точку ее приложения, если заданы линейные размеры: h, a и манометрическое давление  $p_m$  на свободной поверхности бензина.

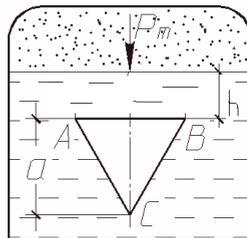


Рисунок 1.5

Исходные данные принять по таблице 1.5.

Таблица 1.5

Наименование исходных величин		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Линейные величины, м	a	1,2	1,5	1,3	1,4	1,8	1,9	1,6	1,8	2,0	2,2
	h	2,0	2,1	2,2	2,4	2,3	2,5	2,8	3,2	3,6	4,0

Манометрическое давление рм	2 ат.	260 кПа	2 кГ/см <sup>2</sup>	275 кПа	5 ат..	180 кПа	790 мм. рт.ст.	20 м вод.ст	200 кПа	1 ат.
-----------------------------	-------	---------	----------------------	---------	--------	---------	----------------	-------------	---------	-------

**Задача 1.6.** Квадратное отверстие  $a \times a$  в вертикальной стенке резервуара закрыто плоским клапаном, который удерживается в закрытом состоянии грузом массой  $M$  на плече  $b$  (рисунок 1.6). Определить величину массы груза  $M$ , необходимую для удержания щита в закрытом состоянии, если глубина воды в резервуаре  $h_1$  и величина  $c = 0,5$  м.

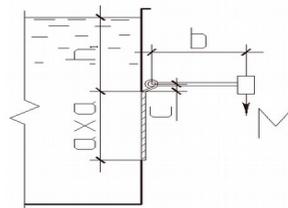


Рисунок 1.6

Исходные данные принять по таблице 1.6.

Таблица 1.6

Наименование исходных величин		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Глубина жидкости или линейная величина $h_1$ , м		2,0	3	3,2	2,4	2,5	3,4	2,8	3,2	3,6	4,0
Линейные величины, м	a	1,2	1,3	1,05	1,4	1	1,7	1,6	1,8	2,0	2,2
	b	1,6	1,7	1,6	1,8	1,5	2,1	2,0	2,2	2,4	2,6
Масса груза $M$ , кг		80	90	110	100	95	110	120	140	160	180

**Задача 1.7.** Определить растягивающее усилие воспринимаемое болтами полусферической крышки резервуара (рисунок 1.7), если показание манометра, установленного на глубине  $h$ , равно  $p_m$ , радиус крышки  $R$  и плотность бензина  $\rho = 700$  кг/м<sup>3</sup>.

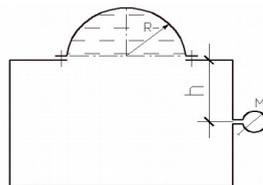


Рисунок 1.7

Исходные данные принять по таблице 1.7.

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Глубина $h$ , м	2,5	1	0	3,0	1,5	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Радиус элемента $R$ , м	4,1	3,5	3,8	4,0	3,6	4,4	4,8	4,6	4,2	4,0
Манометрическое давление на глубине $h$ , $p_m$	260 кПа	2 кГ/см <sup>2</sup>	275 кПа	5 ат..	180 кПа	790 мм. рт.ст.	20 м вод.ст	200 кПа	1 ат.	1 кГ/см <sup>2</sup>

Таблица 1.7

**Задача 1.8.** В промежуточном окне вертикальной стенки резервуара установлен на цапфах цилиндрический затвор диаметром  $D$  и шириной  $B$  (рисунок 1.8). Уровень воды перед затвором равен  $H$ .

Определить усилие, действующее на цапфы, и момент относительно оси вращения в положении, показанном на рисунке 1.8 и в положении затвора, повернутого на  $180^\circ$ .

Рисунок 1.8

Исходные данные принять по таблице 1.8

Таблица 1.8

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7 <sub>H</sub>	8	9	0
Глубина $H$ , м	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	3
Диаметр затвора $D$ , м	1,0	0,5	1,2	0,6	1,3	0,7	1,1	0,8	1,2	1,5
Ширина затвора $B$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

**Задача 1.9.** Под каким давлением  $p$  (рисунок 1.9) нужно подать жидкость в бесштоковую полость гидроцилиндра, чтобы поршень начал двигаться вправо, преодолевая силу  $F_1 = 5F$  на штоке, если давление в штоковой полости  $p_1$ ?

На какую силу сжатия  $F_n$

нужно отрегулировать пружину предохранительного клапана, чтобы он открывался при возрастании силы на штоке до величины  $1,3F_1$ , если диаметр входного отверстия (седла) клапана  $d_1$ , а давление  $p_2 = 0$ . Силы трения не учитывать.

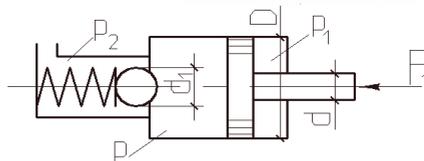


Рисунок 1.9

Исходные данные принять по таблице 1.9.

Таблица 1.9

Исходные данные	Номер варианта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Диаметр, мм	$D$	63	80	100	125	160	130	150	140	180	200
	$d$	32	40	50	63	80	65	75	70	90	100
	$d_1$	30	30	35	40	45	40	45	50	60	50

Давление, Мпа	$p_1$	0,8	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	1,5	1,1	2,2
Сила, Н	F	200	300	400	500	600	150	250	350	450	720

**Задача 1.10.** Определить силу золотника (рисунок 1.10), если вакуумметра  $p_v$ , избыточное полости между поршнями  $p_1$ , от места установки манометра до тяжести  $2H$ , диаметры поршней  $0,15d$ , диаметр штока  $D_1$ , плотность  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ .

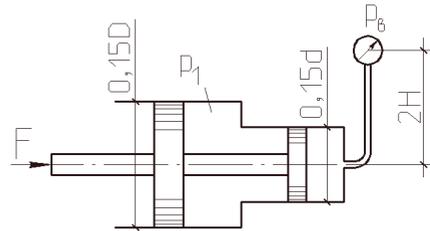


Рисунок 1.10

Исходные данные принять по таблице 1.10.

Таблица 1.10

Исходные данные		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Диаметр, мм	D	63	80	100	125	160	130	150	140	180	200
	d	300	400	500	600	800	650	750	700	900	1000
	$D_1$	32	35	38	37	40	42	44	45	48	50
Высота, м	H	0,3	0,32	0,35	0,4	0,45	0,43	0,5	0	0,6	0,3
Давление, Мпа	$p_1$	0,8	0,1	0,4	0,6	0,8	0,7	0,6	0,5	0,1	0,2
	$p_v$	0,08	0,09	0,03	0,095	0,085	0,07	0,06	0,05	0,01	0,02

**Задача 1.11.** Определить осадку  $Y$  и остойчивость плавания в воде деревянного (рисунок 1.11). Размеры бруса: высота  $0,1 h$ ,  $0,02 b$ , длина  $l$ . Относительная плотность  $\rho_r$ . Вычислить наименьшую ширину  $b_1$ , при брус будет еще остойчив.

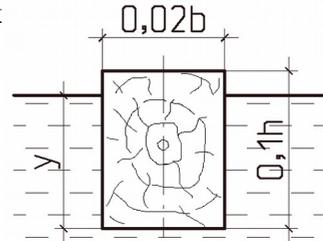


Рисунок 1.11

Исходные данные принять по таблице 1.11.

Таблица 1.11

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Относительная	0,95	0,85	0,8	0,70	0,65	0,5	0,7	0,9	0,60	1

Плотность $\epsilon_p$										
Плотность Воды $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	999	989	1000	990	1000	998	997	995	1000
Длина $l$ , м	3	4	5	6	7	8	9	4	8	2
Ширина $b$ , м	5	6	7	8	9	3,5	3	2	10	8
Высота $h$ , м	1,3	1,4	1,8	2,2	2,4	1,5	3	2,3	2,6	3,5

**Задача 1.12.** На понтоне с размерами дна  $l \times 0,5 b$ , высотой борта 1,2 м и массой  $m_n$  перевозят котел массой  $m_k$ , центр тяжести котла расположен на высоте 1 м над палубой понтона (рисунок 1.12). Определить осадку  $Y$  и проверить остойчивость понтона, считая, что масса понтона распределена равномерно, а центр тяжести его расположен на 0,8 м ниже палубы.

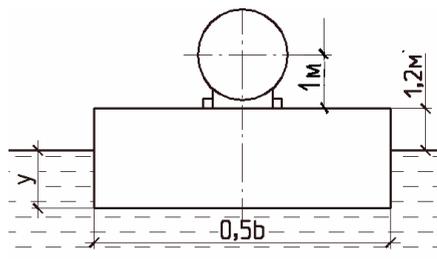


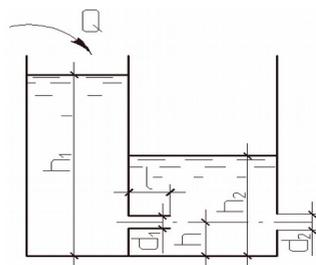
Рисунок 1.2

Исходные данные принять по таблице 1.12.

Таблица 1.12

Исходные данные	Номер варианта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Плотность воды $\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	999	989	1000	990	1000	998	997	995	1000	
Длина $l$ , м	3	4	5	6	7	8	9	4	8	2	
Ширина $b$ , м	5	6	7	8	9	4	3	2	10	8	
Высота $h$ , м	1,3	1,4	1,8	2,2	2,4	1,5	3	2,3	2,6	3,5	
Масса, т	$m_n$	4	5	6	7	8	9	5	6	9	3
	$m_k$	6	8	10	12	16	12	10	11	18	6

**Задача 1.13.** В вертикальной стенке, разделяющей резервуар на две части, расположено круглое отверстие с диаметром  $d_1$  и насадком длиной  $l = 6d_1$  (рисунок 1.13). В наружной стенке имеется другое отверстие диаметром  $d_2$ . Центры



обоих отверстий расположены на высоте  $h$  от дна. Уровень воды в левой части резервуара  $h_1$ , расход через отверстия  $Q = Q_1 = Q_2$ . Определить уровень  $h_2$  воды в правой части резервуара и диаметр  $d_2$  отверстия в наружной стенке.

Рисунок 1.13

Исходные данные принять по таблице 1.13.

Таблица 1.13

Исходные данные		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Пара-метр	$d_1$ , мм	50	40	33	45	25	40	44	45	30	35
	$h_1$ , м	1,2	1,0	2,4	0,9	1,1	1,5	1,6	1,8	1,5	1,0
	$h$ , см	20	10	20	15	22	10	15	20	15	17
Расход $Q$ , л/с		3,1	2,7	4,0	2,8	5,2	4,0	3,5	5,0	2,5	4,0
Виды насадков											
внешний цилиндрический		+			+	+				+	
внутренний цилиндрический				+			+		+		+
конический сходящийся			+					+			

**Задача 1.14.** Какое избыточное давление  $p_m$  воздуха нужно поддерживать в баке (рисунок 1.14), чтобы его опорожнение происходило в два раза быстрее, чем при атмосферном давлении над уровнем воды; каким будет при этом время опорожнения бака? Диаметр бака  $D_1$ , уровень его начального заполнения  $H_1$ . Истечение происходит через цилиндрический насадок диаметром  $d$ , коэффициент расхода которого  $\mu = 0,82$ .

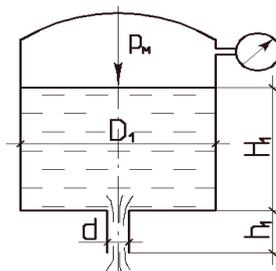


Рисунок 1.14

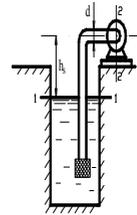
Исходные данные принять по таблице 1.14.

Таблица 1.14

Исходные данные		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Пара-	$D_1$ , м	0,8	1,0	1,2	1,5	2,5	2,4	3,5	2,5	1,5	2,0

мет-ры	d, см	1,0	3,5	3,0	2,5	2,0	3,5	2,2	3,0	3,1	1,0
	H <sub>1</sub>	2,5	3,0	2,0	1,1	2,7	3,0	2,5	3,0	1,2	2,8

**Задача 1.15.** Центробежный насос подаёт воду температурой  $T$  для обмывки колёсных пар вагонов (рисунок 1.15). Расход воды составляет  $Q$ . Всасывающая труба насоса диаметром  $d$ , общей длиной  $l$  имеет два поворота под углом  $90^\circ$  и приёмный клапан, коэффициент сопротивления которого  $\zeta$ .



Определить максимально возможную высоту установки оси насоса  $h_0$  над уровнем воды в отстойнике, исходя из условия, что давление воды при вводе в насос должно быть на  $0,02$  МПа выше давления парообразования, равного  $p_{\text{п}}$ .

Рисунок 1.15

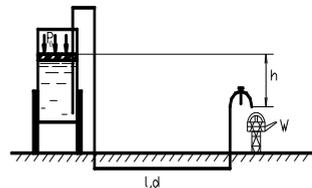
Абсолютное давление на свободной поверхности жидкости в отстойнике принять равным  $0,1$  МПа. Эквивалентная шероховатость поверхности трубы  $\Delta_3=0,2$  мм, плотность воды  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Исходные данные принять по таблице 1.15.

Таблица 1.15

Исходные данные	Номер варианта										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
Q, м <sup>3</sup> /с	1,7	2	3	4	7	6	8	12	15	14	
d, см	50	50	70	80	100	110	120	130	140	150	
l, м	19	15	20	25	20	15	18	22	26	16	
T, °C	20	30	40	50	60	70	80	90	40	50	

**Задача 1.16.** Смазкоразборочная колонка соединяется с выжимным резервуаром трубопроводом, имеющим длину  $l$  и диаметр  $d$ ; разность отметок выливного отверстия колонки и линии свободной поверхности смазки в баке  $h=0,2$  м. Температура смазки  $T$ . На трубопроводе имеются 4 поворота под углом  $90^\circ$  и вентиль с прямоочным движением жидкости. Плотность смазки  $\rho=900$  кг/м<sup>3</sup>. Кинематический коэффициент вязкости масла  $\nu$  определить из



справочника [2]. Эквивалентная шероховатость поверхности трубы  $\Delta_э=0,07$  мм. Определить избыточное давление  $p_0$ , которое нужно создать на поверхности выжимного резервуара, чтобы обеспечить наполнение маслѐнки имеющей ёмкость  $W$ , из смазкоразборочной колонки за 30 с. Рисунок 1.16

Исходные данные принять по таблице 1.16

Таблица 1.16

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q, м <sup>3</sup> /с	1,7	2	3	4	7	6	8	12	15	14
d, см	50	50	70	80	100	110	120	130	140	150
l, м	19	15	20	25	20	15	18	22	26	16
T, °C	20	30	40	50	60	70	80	90	40	50
Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
W, л	6	7	8	9	6,5	7,5	8,5	5	5,5	7
d, см	15	20	20	25	15	20	35	25	15	20
l, м	100	120	140	160	180	200	100	110	130	150
T, °C	20	30	40	50	60	70	80	90	40	50

## 2 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 2

**Задача 2.1.** Центробежный насос марки 4К-18, характеристики которого при частоте вращения  $n = 2900$  об/мин приведены на рисунке 2.1, подает воду температурой  $T$  в резервуар, расположенный на высоте  $H_н$ , по трубопроводу, имеющему длину  $l$ , диаметр  $d$ , эквивалентную шероховатость  $\Delta_э = 0,07$  мм.

Требуется:

1. Начертить слева от графика у шкалы  $H=f(Q)$  схему насосно-силовой установки. На ней кружком показать насос, линиями — всасывающий и напорный трубопроводы, уровни воды в приемном и напорном резервуарах.

2. Вычислить значение потребных напоров  $H$  при подачах, равных 5, 10, 20 л/с, и нанести на график характеристик насоса  $H=f(Q)$  характеристику трубопровода.

3. Определить рабочую точку насоса  $A_1$  и соответствующие ей значения: подачи насоса  $Q_{A_2}$  напора  $H_{A_1}$ , мощности  $N_{A_1}$ , КПД  $\eta_{A_1}$  и вакуумметрической допустимой высоты всасывания  $H_{\text{вак}}^{\text{доп}}$  для насосного колеса диаметром 148 мм (характеристики, соответствующие этому диаметру, на чертеже показаны сплошными линиями).

4. Определить, как изменятся подача, напор, мощность и КПД насоса, если геометрическая высота расположения напорного резервуара увеличится по сравнению с заданной высотой  $H_r$  на  $\Delta H_r$ .

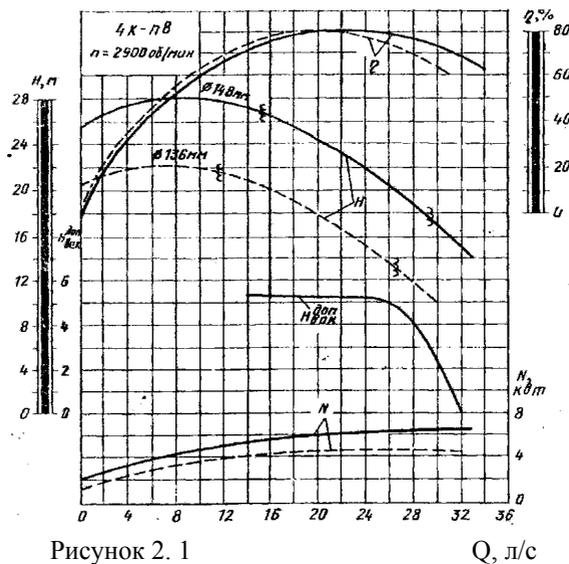


Рисунок 2.1

$Q$ , л/с

Исходные данные принять по таблице 2.1.

Таблица 2.1

Исходные данные	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$H_r$ , м	12	-2	10	-3	20	-4	14	-8	2	-6
$l$ , м	100	150	50	10	300	400	95	66	4	200
$d$ , мм	100	75	100	50	125	100	100	75	50	100

$\Delta H_r, \text{ м}$	6	0	2	0	2	4	3	0	1	0
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50	10	20	30	60	40

**Задача 2.2.** Для создания принудительной циркуляции в водяной системе охлаждения тепловоза используется центробежный насос, характеристики которого при частоте вращения  $n=2900$  об/мин приведены на рисунке 2.2. Насос работает на трубопровод, имеющий длину  $l$  и диаметр  $d$ . Геометрическая высота подъема воды  $H_r$ , эквивалентная шероховатость  $\Delta_s = 0,07$  мм. Температура воды  $T$ .

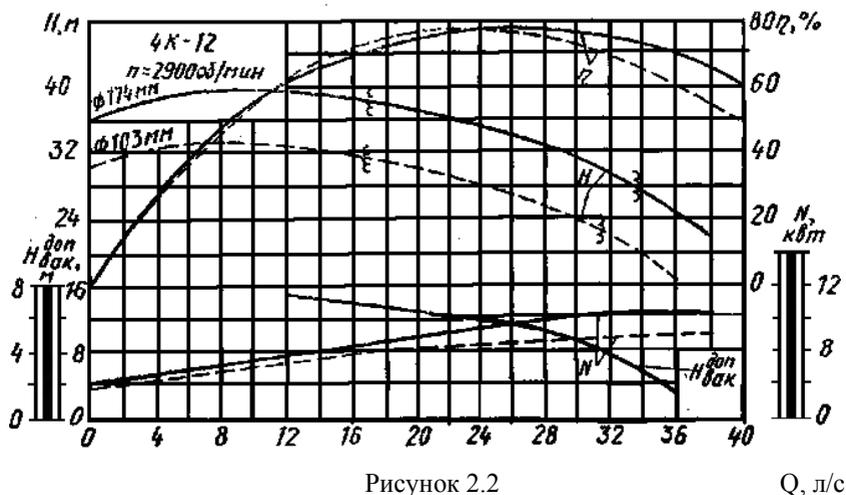


Рисунок 2.2

$Q, \text{ л/с}$

Требуется:

1. Вычислить значения потребных напоров  $H$  при подачах  $Q$ , равных 5, 10, 20 л/с, и построить в координатах  $H=f(Q)$  характеристики насоса и характеристики трубопровода.

2. Определить рабочую точку насоса  $A_1$  и соответствующие ей значения подачи насоса  $Q_{A_1}$ , напора  $H_{A_1}$ , мощности  $N_{A_1}$ , КПД  $\eta_{A_1}$  и допустимой вакуумметрической высоты всасывания  $H_{\text{вак}}^{\text{дон}}$  для насосного колеса диаметром 174 мм (характеристики, соответствующие этому диаметру, на чертеже показаны сплошными линиями).

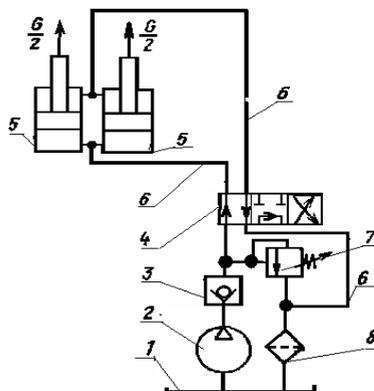
3. Установить, как изменяется напор и подача воды при снижении частоты вращения до  $n_2$ .

Исходные данные принять по таблице 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l$ , м	14	10	8	7	22	20	17	18	16	20
$d$ , мм	50	50	50	50	75	75	75	50	50	50
$n_2$ , об/мин	2500	2200	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800
$H_r$ , м	0	1	0	1,5	0	2	0	1	0	0,5
$T$ , °C	50	40	50	60	70	80	50	40	50	60

**Задача 2.3.** На рисунке 2.3 приведена схема гидравлического привода. Гидропривод состоит из бака для рабочей жидкости 1, насоса 2, обратного клапана 3, распределителя 4, силовых гидроцилиндров 5, гидролиний 6, предохранительного клапана 7, фильтра 8.



Исходные данные:

1. Усилие  $G$ , приходящееся на штоки двух силовых цилиндров.

2. Скорость движения поршня  $v = 0,3 \text{ м/с}$

3. Длина гидролиний  $l=15$  м. На трубопроводе имеются: обратный клапан, распределитель, два

Рисунок 2.3

параллельно расположенных силовых гидроцилиндра, фильтр, семь поворотов под углом  $90^\circ$ , три прямоугольных тройника.

4. Рабочая жидкость - трансформаторное масло АМГ-10,  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

5. Общий КПД насоса  $\eta = 0,85$ ;

объемный КПД силового гидроцилиндра  $\eta_0 = 0,95$ .

Требуется определить:

1. Внутренний диаметр гидроцилиндра (диаметр поршня)  $d_n$ , диаметр штока  $d_{ш}$ .

2. Диаметр трубопроводов  $d_t$ .

### 3. Подачу, напор и мощность насоса.

Диаметр штока  $d_{ш}$  и скорость движения масла  $U$  в трубопроводе определяются в зависимости от давления в гидросистеме.

Таблица 2.3

Номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G$ , кН*	85	20	30	40	50	60	70	80	90	100

**Задача 2.4.** На рисунке 2.4 приведена схема гидропривода. Гидропривод состоит из бака для рабочей жидкости 1, насоса 2, обратного клапана 3, распределителя 4, гидроцилиндров 5, гидролиний 6, предохранительного клапана 7, фильтра 8.

Исходные данные:

1. Усилие  $G$ , передаваемое двумя цилиндрами рабочему органу.

2. Скорость движения рабочего органа  $v = 0,2 \text{ м/с}$ .

3. Длина трубопровода от насоса до фильтра  $l = 12 \text{ м}$ . На трубопроводе имеются: обратный клапан, распределитель, два параллельно расположенных силовых цилиндра, фильтр, девять поворотов под углом  $90^\circ$ , три прямоугольных тройника.

4. Рабочая жидкость — веретенное масло,  $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$ ,  $v = 0,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

5. Общий КПД насоса  $\eta = 0,85$ ; объемный КПД силового гидроцилиндра  $\eta = 0,90$ .

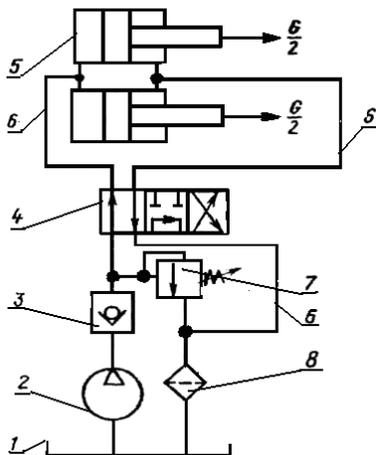


Рисунок 2.4

Требуется определить:

1. Внутренний диаметр гидроцилиндра (диаметр поршня)  $d_{п}$ , диаметр штока  $d_{ш}$ .

2. Диаметр трубопроводов  $d_{т}$ .

3. Подачу, напор и мощность насоса.

Указание. Диаметр штока  $d_{ш}$  и скорость движения масла  $U$  в трубопроводах определяется в зависимости от давления в гидросистеме. Значения  $d_{ш}$  и  $U$  приведены в пункте 4 методических указаний к решению задачи.

Исходные данные принять по таблице 2.4.

Таблица 2.4

Номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G, \text{кН}^*$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	85

### 3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1

**Задачи 1.1, 1.2** решаются с использованием основного уравнения гидростатики

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + h\gamma, \quad (3.1)$$

где  $p_0$  - давление, приложенное к поверхности жидкости, Па ;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, Н/м<sup>3</sup>.

При помощи уравнения (3.1) можно определить давление в любой точке покоящейся жидкости. Это давление, складывается из двух величин: давления  $p_0$  на внешней поверхности жидкости и давления, обусловленного весом вышележащих слоев жидкости.

Из основного уравнения гидростатики видно, что какую бы точку в объеме всего сосуда мы не взяли, на нее всегда будет действовать давление, приложенное к внешней поверхности жидкости  $p_0$ .

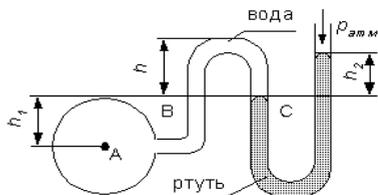
Другими словами давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости по всем направлениям одинаково.

Это положение известно под названием *закона Паскаля*. Поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется *поверхностью уровня*. В обычных условиях поверхности уровня представляют собой горизонтальные плоскости.

Задачи по определению гидростатического давления решаются следующим образом:

1. На чертеже обозначают линии равного давления.
2. Определив поверхность с известным давлением, находят давление на следующей поверхности, применяя уравнение (3.1).
3. Решают уравнение относительно искомого параметра.

Предположим, что необходимо определить манометрическое давление в трубопроводе, заполненном водой (рисунок 3.1). К трубопроводу



присоединен жидкостный манометр. Высота столба ртути в манометре  $h_2 = 25$  см. Центр трубопровода (точка А) расположен на  $h_1 = 40$  см ниже линии раздела между водой и ртутью.

Линия равного давления пройдет по точкам В и С. Находим давление в точке В. Точка В расположена выше точки А на величину  $h_1$ , следовательно, давление в точке В будет равно

$$p_B = p_A - \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_1. \quad (3.2)$$

В точке С давление будет такое же, как в точке В

Рисунок 3.1

$$p_C = p_B = p_A - \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_1. \quad (3.3)$$

Определим давление в точке С, подходя, справа

$$p_C = p_{\text{атм}} + \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h_2. \quad (3.4)$$

Приравнивая правые части уравнений (3.3) и (3.4), получаем

$$p_A - \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_1 = p_{\text{атм}} + \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h_2. \quad (3.5)$$

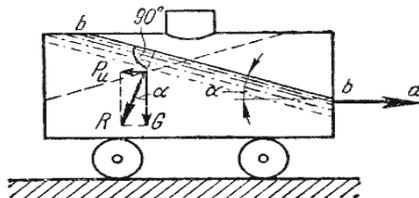
Отсюда манометрическое давление в трубопроводе

$$\begin{aligned} p_A - p_{\text{атм}} &= p_M = \rho_{\text{рт}} \cdot g \cdot h_2 - \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot h_1 \\ p_M &= 13,6 \cdot 9,81 \cdot 0,25 - 1 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = \\ &= 29,43 \text{ кН/м}^2 = 29,43 \text{ кПа} \end{aligned} \quad (3.6)$$

**Задача 1.3.** Как уже отмечалось выше, поверхность, во всех точках которой давление одинаково, называется *поверхностью уровня* или *поверхностью равного давления*. При неравномерном или непрямолинейном движении на частицы жидкости кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется *относительным покоем*.

Рассмотрим пример такого относительного покоя.

Определим поверхности уровня в жидкости, находящейся в цистерне, в то время как цистерна движется по горизонтальному пути с постоянным ускорением  $a$  (рисунок 3.2).



К объему жидкости массой  $m$  в этом случае приложены ее вес  $G = mg$  и сила инерции  $P_u$ , равная по величине  $ma$ . Равнодействующая

$R = \sqrt{(mg)^2 + (ma)^2}$  этих сил направлена к вертикали под углом  $\alpha$ , тангенс которого равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g}$$

Рисунок 3.2

Так как свободная поверхность, как поверхность равного давления, нормальна к указанной равнодействующей, то она в данном случае представит собой уже не горизонтальную плоскость, а наклонную, составляющую угол  $\alpha$  с горизонтом.

Учитывая, что величина этого угла зависит только от величины ускорения, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости.

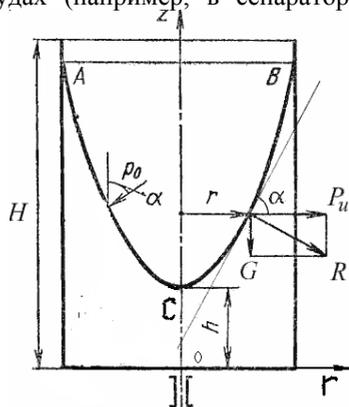
Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом  $\alpha$ . Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон свободной поверхности обратился бы в другую сторону (рисунок 3.2, пунктир).

**Задача 1.4.** Решение задач с применением уравнения Л. Эйлера для покоящейся идеальной жидкости можно производить в приведенной последовательности:

1. Разместить рассматриваемый объем жидкости в пространственной системе координат.
2. Приложить все действующие на жидкость массовые (сила тяжести и инерции) и поверхностные (сила давления) силы.
3. Записать уравнение Л.Эйлера для рассматриваемой задачи.
4. Найти уравнение свободной поверхности.
5. Решить уравнение относительно искомой величины.

Рассмотрим часто встречающийся в практике случай относительного покоя жидкости во вращающихся сосудах (например, в сепараторах и центрифугах, применяемых для разделения жидкостей). В этом случае (рисунок 3.3) на любую частицу жидкости при ее относительном равновесии действуют массовые силы: сила тяжести

$$G = mg, \text{ Н} \quad (3.7)$$



и центробежная сила

$$P_u = m\omega^2 r, \quad (3.8)$$

где  $r$  - расстояние от частицы до  
оси вращения,  $m$ ;

$\omega$  - угловая скорость вращения  
сосуда,  $c^{-1}$ .

Поверхность жидкости нормальна в каждой точке к равнодействующей этих сил  $R$ . Уравнение Л.Эйлера, применительно к задаче, примет вид Рисунок 3.3

$$dp = (\omega^2 \cdot x \cdot dx + \omega^2 \cdot y \cdot dy - g \cdot dz),$$

Проинтегрируем уравнение Л.Эйлера

$$p = \rho \left( \frac{\omega^2 \cdot x^2}{2} + \frac{\omega^2 \cdot y^2}{2} - g \cdot z \right) + C.$$

(3.9)

Для точки  $0$ ,  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=h$ ,  $p=p_a$ , тогда постоянная интегрирования  $C = p_a + \rho \cdot g \cdot h$ . и уравнение примет вид

$$p = p_a + \rho \cdot g \cdot h + \rho \left( \frac{\omega^2 \cdot x^2}{2} + \frac{\omega^2 \cdot y^2}{2} - g \cdot z \right).$$

Необходимо также помнить, что  $x = y = r$ , а  $x^2 + y^2 = r^2$ .

Из чертежа находим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_u}{G} = \frac{m\omega^2 r}{mg}. \quad (3.10)$$

С другой стороны:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dr}, \quad (3.11)$$

где  $z$  - координата точки, расположенной на поверхности жидкости на расстоянии  $r$  от оси вращения.

Таким образом, получаем:

$$\frac{\omega^2 r}{g} = \frac{dz}{dr}, \quad (3.12)$$

откуда

$$dz = \frac{\omega^2}{g} r dr, \quad (3.13)$$

или после интегрирования

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + C. \quad (3.14)$$

В точке пересечения кривой АСВ с осью вращения  $r = 0$ ,  $z = h$ . Следовательно, постоянная интегрирования  $C = h$ , тогда уравнение свободной поверхности жидкости:

$$z = h + \frac{\omega^2 r^2}{2g}, \quad (3.15)$$

т.е. кривая АСВ является параболой, а свободная поверхность жидкости параболоидом. С учетом полученного уравнения можно определить искомые значения неизвестных в задаче величин, если принять к сведению, что объем параболоида вращения:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot z,$$

(3.16)

где  $r$  – координата точки на свободной поверхности жидкости, соответствующая координате  $z$ .

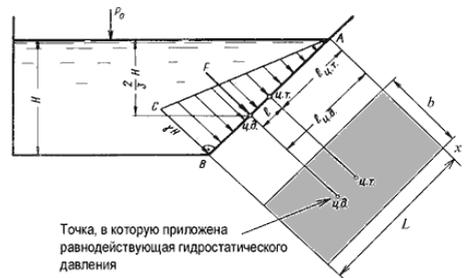
**Задача 1.5, 1.6.** Пусть мы имеем резервуар с наклонной стенкой, заполненный жидкостью удельным весом  $\gamma$ . Ширина стенки в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, равна  $b$  (рисунок. 3.4). Стенка условно показана развернутой относительно оси  $AB$  и заштрихована на рисунке. Построим график изменения избыточного гидростатического давления на стенку  $AB$ .

Так как избыточное гидростатическое давление изменяется по линейному закону  $P = \gamma gh$ , то для построения графика, называемого эпюрой давления, достаточно найти давление в двух точках, например  $A$  и  $B$ .

Избыточное гидростатическое давление в точке  $A$  будет равно

$$p_A = \gamma h = \gamma \cdot 0 = 0. \quad (3.17)$$

Давление в точке  $B$ :



$$p_B = \gamma h = \gamma H. \quad (3.18)$$

Рисунок 3.4

где  $H$  - глубина жидкости в резервуаре.

Согласно первому свойству гидростатического давления, оно всегда направлено по внутренней нормали к поверхности воздействия. Следовательно, гидростатическое давление в точке В, величина которого равна  $\gamma H$ , направлено перпендикулярно к стенке АВ. Соединив точку А с концом отрезка  $\gamma H$ , получим треугольную эпюру распределения давления АВС с прямым углом в точке В. Среднее значение давления будет равно

$$\frac{\gamma H + 0}{2} = \frac{\gamma H}{2}. \quad (3.19)$$

Если площадь наклонной стенки  $S = bL$ , то равнодействующая гидростатического давления равна

$$F = \frac{\gamma H}{2} S = \gamma S h_c, \quad (3.20)$$

где  $h_c = H/2$  - глубина погружения центра тяжести плоской поверхности под линию свободной поверхности жидкости.

Однако, точка приложения равнодействующей силы гидростатического давления ц.д. не будет совпадать с центром тяжести плоской поверхности. Эта точка находится на расстоянии  $e$  от центра тяжести и равна отношению момента инерции площадки относительно центральной оси к статическому моменту этой же площадки.

$$e = \frac{J_{Ax}}{e_{ц.т.} S}, \quad (3.21)$$

где  $J_{Ax}$  - момент инерции площади  $S$  относительно центральной оси, параллельной  $Ax$ .

В частном случае, когда стенка имеет форму прямоугольника размерами  $b$  и  $l$  и одна из его сторон лежит на свободной поверхности с атмосферным давлением, центр давления (ц.д.) находится на расстоянии  $l/3$  от нижней стороны площадки.

**Задача 1.7, 1.8.** Для определения силы гидростатического давления на криволинейную поверхность необходимо выполнить расчет в следующей последовательности:

1. Разместить объем рассматриваемой жидкости в пространственной системе координат.
2. Приложить все действующие на криволинейную поверхность силы.
3. Определить положение пьезометрической плоскости.
4. Определить равнодействующую силу гидростатического давления.
5. Определить положение центра тяжести и линию действия равнодействующей силы гидростатического давления.

Пусть жидкость заполняет резервуар, правая стенка которого представляет собой цилиндрическую криволинейную поверхность ABC, перпендикулярную плоскости чертежа (рисунок 3.5), ширина поверхности ABC (размер, уходящий за плоскость чертежа)  $b$ .

Плоскость свободной поверхности с атмосферным давлением на ней, является пьезометрической плоскостью.

Если в условии задачи нет линии свободной поверхности, то положение пьезометрической плоскости (плоскости, проходящей по показаниям пьезометров) находим, отложив от точки подключения манометра вертикально вверх расстояние равное

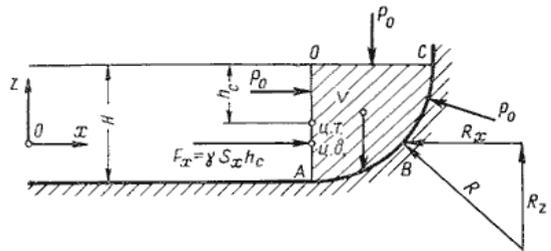


Рисунок 3.5

$$h_p = p/\gamma, \quad (3.22)$$

где  $p$  – давление в точке подключения манометра.

Объем жидкости в отсеке АОСВ находится в равновесии. Это значит, что силы, действующие на поверхности выделенного объема  $V$ , и силы веса взаимно уравновешиваются.

Схема к определению равнодействующей гидростатического давления на цилиндрическую поверхность. Предположим, что выделенный объем  $V$  представляет собой твердое тело того же удельного веса, что и жидкость (объем заштрихован).

Левая поверхность этого объема – вертикальная проекция криволинейной поверхности ABC на плоскость  $yOz$  (на чертеже вертикальная стенка АО) имеет площадь

$$S_z = bH, \quad (3.33)$$

Если спроецировать криволинейную поверхность ABC на вертикальную плоскость  $yOx$ , то получим проекцию площадью  $S_x = OC \cdot b$ .

Сила избыточного гидростатического давления на площадь  $S_x$ , равна

$$F_x = \gamma S_x h_c, \quad (3.34)$$

где  $h_c$  – глубина погружения центра тяжести вертикальной проекции  $S_x$  под линией свободной поверхности (пъезометрической плоскостью).

С правой стороны на отсек будет действовать реакция  $R$  цилиндрической поверхности. Реакцию  $R$  разложим на две составляющие  $R_x$  и  $R_z$ .

Из действующих поверхностных сил осталось учесть только давление на свободной поверхности  $p_0$ .

На объем  $ABC0$  будет действовать сила веса жидкости

$$G = \gamma V, \quad (3.35)$$

направленная вертикально вниз.

Спроецируем все силы на ось  $Ox$ :

$$F_x - R_x = 0 \text{ откуда } F_x = R_x = \gamma S_x h_c. \quad (3.36)$$

Теперь спроецируем все силы на ось  $Oz$ :

$$R_z - G = 0 \text{ откуда } R_z = G = \gamma V, \quad (3.37)$$

где  $V$ - объем тела давления, это объем, заключенный между криволинейной поверхностью, линиями, проецирующими ее на пъезометрическую плоскость и самой пъезометрической плоскостью.

Составляющая силы гидростатического давления по оси  $Oy$  обращается в нуль, значит  $R_y = F_y = 0$ .

Таким образом, реакция цилиндрической поверхности в общем случае равна

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_z^2 + R_y^2}. \quad (3.38)$$

а поскольку реакция цилиндрической поверхности равна равнодействующей гидростатического давления  $R=F$ , то делаем вывод, что

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2 + F_y^2}. \quad (3.39)$$

Точка приложения равнодействующей силы гидростатического давления находится на расстоянии эксцентриситета от центра тяжести вертикальной

проекции криволинейной поверхности  $S_x$ . Эта точка носит название – центр давления (ц.д.). Величина эксцентриситета  $e$  определяется уравнением

$$e = \frac{J_{Ax}}{L_{ц.д.} S}, \quad (3.40)$$

где  $J_{Ay}$  - момент инерции площади  $S_x$  относительно центральной оси, параллельной  $Oy$ ;

$$S_x = S, L_{ц.д.} = h_c. \quad (3.41)$$

**Задача 1.9, 1.10.** Задачи, решение которых основано на законе Паскаля, можно решать с применением основного уравнения гидростатики:

$$p = p_0 + \rho g h = p_0 + h \gamma. \quad (3.42)$$

*Закон Паскаля* является следствием основного уравнения гидростатики. Давление, приложенное к поверхности жидкости, передается без изменения всем точкам жидкости и по всем направлениям.

При этом необходимо помнить, что сила давления равна произведению давления, оказываемого на площадку, на площадь этой площадки.

$$P = p S. \quad (3.43)$$

Задачи с использованием закона Паскаля можно решать по следующей схеме:

1. Приложить все действующие на поршни силы.
2. Записать уравнения для определения этих сил.
3. Решить уравнения относительно неизвестного.

**Задача 1.11, 1.12.** Задачи с использованием в ходе решения закона Архимеда решаются следующим способом:

1. Прикладываем все силы, действующие на плавающее тело.
2. Составляем необходимое количество уравнений, равное количеству неизвестных.
3. Решаем систему уравнений относительно искомой величины.

*На тело, погруженное в жидкость или газ действует выталкивающая сила ( $P_A$ ), численно равная весу жидкости в объеме погруженной части тела ( $V_{п.ч.}$ ).*

$$P_A = \rho_{ж} g V_{п.ч.} \quad (3.44)$$

Сила направлена вертикально вверх и приложена в центре водоизмещения. *Центр водоизмещения* – центр тяжести погруженной части тела.

Для однородного тела плавающего на поверхности справедливо соотношение

$$\frac{V_{\text{погр}}}{V} = \frac{\rho_m}{\rho_{\text{ж}}} \quad (3.45)$$

где:  $V$  - объем плавающего тела;

$\rho_m$  - плотность тела.

$\rho_m / \rho_{\text{ж}}$  - относительная плотность тела.

Существующая теория плавающего тела довольно обширна, поэтому мы ограничимся рассмотрением лишь гидравлической сущности этой теории.

*Запасом плавучести* называют силу, равную весу жидкости в объеме надводной части плавающего тела.

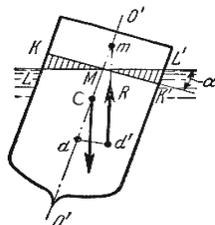
Способность плавающего тела, выведенного из состояния равновесия, вновь возвращаться в это состояние называется *остойчивостью*. Условия остойчивости выполняются, если центр тяжести лежит ниже центра водоизмещения и если оба центра в условии равновесного плавания лежат на одной вертикальной прямой – оси плавания.

Вес жидкости, взятой в объеме погруженной части судна называют *водоизмещением*, а точку приложения равнодействующей давления (т.е. центр давления) - *центром водоизмещения*. Объем погруженной части тела называют – *объемом водоизмещения* ( $V_{\text{п.ч.т}}$ ). При нормальном положении судна центр тяжести  $C$  и центр водоизмещения  $d$  лежат на одной вертикальной прямой  $O'-O''$ , представляющей ось симметрии судна и называемой осью плавания (рисунок 3.6). Плоскость пересечения поверхности тела с плоскостью свободной поверхности называют *плоскостью плавания*.

Пусть под влиянием внешних сил судно наклонилось на некоторый угол  $\alpha$ , часть судна  $KLM$  вышла из жидкости, а часть  $K'L'M'$ , наоборот, погрузилось в нее. При этом получили новое положение центра водоизмещения  $d'$ . Приложим к точке  $d'$  подъемную силу  $R$  и линию ее действия продолжим до пересечения с осью симметрии  $O'-O''$ . Полученная точка  $m$  называется *метацентром*, а отрезок  $mC = h_m$  (расстоянии от центра тяжести до метацентра) называется *метацентрической высотой*. Метацентрическую высоту можно рассчитать при помощи уравнения:

$$h_m = (I_s / V_{\text{п.ч.т}}) - e, \quad (3.46)$$

где  $I_s$  – центральный момент инерции площади



плоскости плавания относительно продольной оси.

$e$  – эксцентриситет (расстояние между центром тяжести и центром водоизмещения).

Будем считать  $h_m$  положительной, если точка  $M$  лежит выше точки  $C$ , и отрицательной - в противном случае.

Теперь рассмотрим условия равновесия судна:

если  $h > 0$ , то судно возвращается в

- 1) первоначальное положение;
- 2) если  $h = 0$ , то это случай безразличного равновесия;
- 3) если  $h < 0$ , то это случай неустойчивого равновесия, при котором продолжается дальнейшее опрокидывание судна.

Следовательно, чем ниже расположен центр тяжести и, чем больше метацентрическая высота, тем больше будет остойчивость судна.

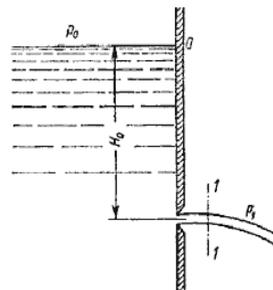
Рисунок 3.6

**Задача 1.13.** В процессе истечения жидкости из резервуаров через отверстия и насадки (короткие трубки различной формы) в атмосферу или пространство, заполненное газом или той же жидкостью потенциальная энергия, которой обладает жидкость, находящаяся в резервуаре, преобразуется в кинетическую энергию свободной струи.

*Основным вопросом*, который интересует в данном случае, является определение скорости истечения и расхода жидкости для различных форм отверстий и насадков.

Рассмотрим большой резервуар с жидкостью под давлением  $p_0$ , имеющий малое круглое отверстие в стенке на достаточно большой глубине  $H_0$  от свободной поверхности

Жидкость вытекает в воздушное пространство с давлением  $p_1$ . Отверстие в толстой стенке, но с заострением выходной Струя, отрываясь от кромки отверстия, сжимается. Такое сжатие обусловлено изменением движения жидкости от радиального стенки, к осевому в струе.



выполн  
кромки  
нескол  
вдоль

Рисунок 3.7

Степень сжатия струи оценивается коэффициентом сжатия

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_o} = \left( \frac{d_c}{d_o} \right)^2, \quad (3.47)$$

где  $S_c$  и  $S_o$  - площади поперечного сечения струи и отверстия соответственно;

$d_c$  и  $d_o$  - диаметры струи и отверстия соответственно.

Скорость истечения жидкости через отверстие

$$v = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (3.48)$$

где  $H$  - напор, определяется как

$$H = H_0 + \frac{P_0 - P_1}{\rho g}, \quad (3.49)$$

$\varphi$ - коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}, \quad (3.50)$$

где  $\alpha$  - коэффициент Кориолиса;

$\zeta$ - коэффициент сопротивления отверстия.

Расход жидкости определяется как произведение действительной скорости истечения на фактическую площадь сечения:

$$Q = S_c v = \underbrace{\varepsilon S_o}_{S_c} \underbrace{\varphi \sqrt{2gH}}_v, \quad (3.51)$$

Произведение  $\varepsilon$  и  $\varphi$  принято называть коэффициентом расхода, т.е.

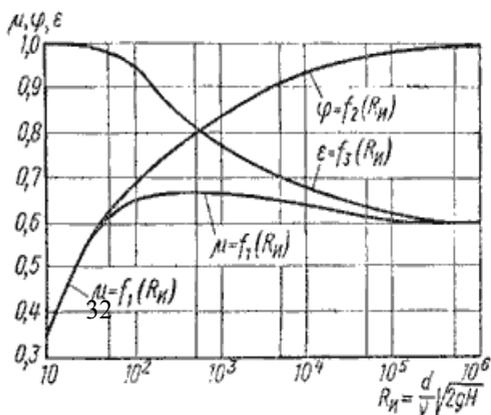
$$\mu = \varepsilon \varphi.$$

В итоге получаем расход

$$Q = \mu S_o \sqrt{2gH} = \mu S_o \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (3.52)$$

где  $\Delta P$  - расчетная разность давлений, под действием которой происходит истечение.

Значение коэффициента сжатия  $\varepsilon$ , сопротивления  $\zeta$ ,



скорости  $\varphi$  и расхода  $\mu$  для круглого отверстия можно определить по эмпирически построенным зависимостям. На рисунке 3.8 показаны зависимости коэффициентов  $\varepsilon$ ,  $\zeta$  и  $\mu$  от числа Рейнольдса, подсчитанного для скорости идеальной жидкости

Рисунок 3. 8

$$Re_u = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu}, \quad (3.53)$$

где  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ .

Если жидкость истекает не в атмосферу, а в пространство, заполненное этой же жидкостью (рисунок 3.9), то такой случай называется *истечением под уровень*, или истечением через затопленное отверстие.

В этом случае вся кинетическая энергия струи теряется на вихреобразование, как при внезапном расширении.

Скорость истечения в сжатом сечении струи

$$v = \varphi\sqrt{2gH}, \quad (3.54)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости;  
 $H$  - расчетный напор,

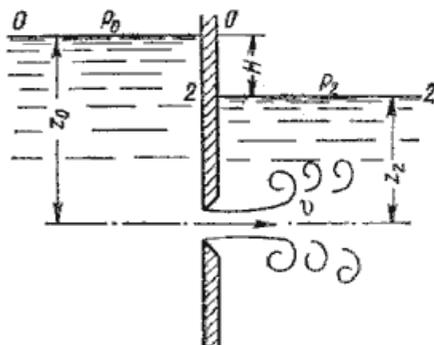


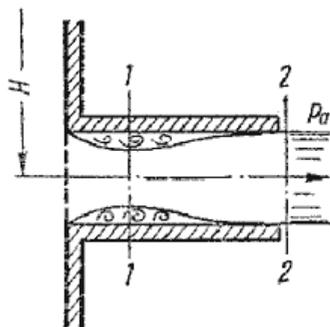
Рисунок 3. 9

$$H = H_0 + \frac{P_0 - P_2}{\rho g}. \quad (3.55)$$

Расход жидкости равен

$$Q = S_2 v = \underbrace{\varepsilon S_0}_{\xi} \underbrace{\varphi \sqrt{2gH}}_v = \mu S_0 \sqrt{2gH} \quad (3.56)$$

Таким образом, имеем те же расчетные формулы, что и при истечении в атмосферу, только напор  $H$  в данном случае представляет собой разность гидростатических напоров по обе стороны стенки, т.е. скорость и



расход жидкости в данном случае не зависят от высот расположения отверстия.

Внешним цилиндрическим насадком называется короткая трубка длиной, равной (3,5-7) диаметров (рисунок 3.10).

Скорость и расход жидкости, истекающей через насадок, определяется по тем же формулам, что и через отверстие. Коэффициент расхода  $\mu$ , зависящий от относительной длины насадка  $l / d$  и числа Рейнольдса, и коэффициент скорости  $\varphi$  определяется по справочнику в зависимости от формы насадка[2].

Рисунок 3.10

**Задача 1.14.** Рассмотрим случай опорожнения открытого в атмосферу сосуда при постоянно изменяющемся напоре, при котором течение является неустановившемся (рисунок 3.11).

Однако если напор, а следовательно, и скорость истечения изменяются медленно, то движение в каждый момент времени можно рассматривать как установившееся, и для решения задачи применить уравнение Бернулли.

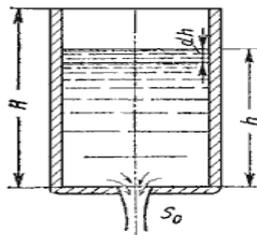


Рисунок 3.11

Пусть переменная высота уровня жидкости в сосуде  $h$ , площадь поперечного сечения резервуара на этом уровне  $S$ , площадь отверстия  $S_0$ . Запишем уравнение для определения объема, вытекающего из резервуара за промежуток времени  $dt$ :

$$S dh = -Q dt$$

или

$$S dh = \underbrace{-\mu S_0 \sqrt{2gh}}_{-Q} \cdot dt, \quad (3.57)$$

где  $dh$  - изменение уровня жидкости за время  $dt$ .

Отсюда время полного опорожнения сосуда высотой  $H$

$$t = -\frac{1}{\mu S_0 \sqrt{2g}} \int_{h=H}^{h=0} S \frac{dh}{\sqrt{h}}. \quad (3.58)$$

Если будет известен закон изменения площади  $S$  по высоте  $h$ , то интеграл можно подсчитать. Для призматического сосуда  $S = \text{const}$ , следовательно, время его полного опорожнения

$$t = \frac{2SH}{\mu \sigma_0 \sqrt{2gH}} \quad (3.58 \text{ a})$$

Из этого выражения следует, что время полного опорожнения призматического сосуда в два раза больше времени истечения того же объема жидкости при постоянном напоре, равном первоначальному.

**Задача 1.15, 1.16.** Задачи решаются с применением уравнения Бернулли. Для двух произвольных сечений 1-1 и 2-2 потока идеальной жидкости (рисунок 3.12) уравнение Бернулли имеет следующий вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const} \quad (3.59)$$

Так как сечения 1-1 и 2-2 взяты произвольно, то полученное уравнение можно переписать иначе:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{const} \quad (3.60)$$

и прочесть так: сумма трех членов уравнения Бернулли для любого сечения потока идеальной жидкости есть величина постоянная. С энергетической точки зрения каждый член уравнения представляет собой определенные виды энергии:  $z_1$  и  $z_2$  - удельные энергии положения, характеризующие потенциальную энергию в сечениях 1-1 и 2-2;  $\frac{P_1}{\rho g}$  и  $\frac{P_2}{\rho g}$  - удельные энергии давления, характеризующие потенциальную энергию давления в тех же сечениях;  $\frac{v_1^2}{2g}$  и  $\frac{v_2^2}{2g}$  - удельные кинетические энергии в тех же сечениях. Следовательно, согласно уравнению Бернулли, *полная удельная энергия идеальной жидкости в любом сечении постоянна.*

Уравнение Бернулли можно истолковать и чисто геометрически. Дело в том, что каждый член уравнения имеет линейную размерность. Глядя на рисунок 3.12, можно заметить, что

$z_1$  и  $z_2$  - геометрические высоты сечений 1-1 и 2-2 над плоскостью сравнения;

$$\frac{P_1}{\rho g} \text{ и } \frac{P_2}{\rho g}$$

пьезометрические  
высоты;

$$\frac{v_1^2}{2g} \text{ и } \frac{v_2^2}{2g}$$

скоростные высоты в  
указанных сечениях.

В этом случае  
уравнение Бернулли  
можно прочесть так:  
сумма

геометрической,  
пьезометрической и  
скоростной высоты  
для идеальной  
жидкости есть  
величина постоянная.

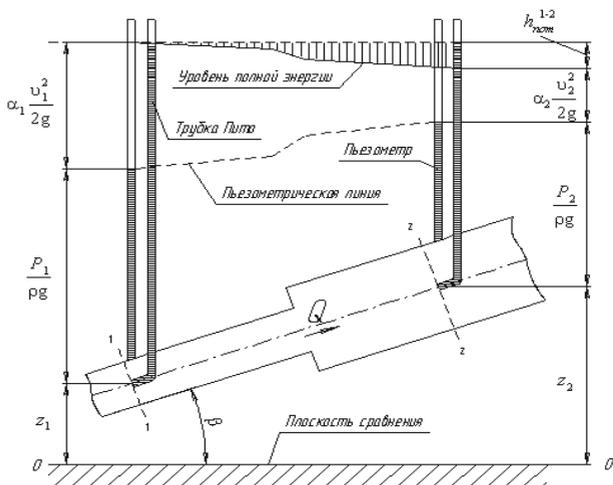


Рисунок 3. 12

Уравнение Бернулли для  
потока реальной жидкости несколько отличается от уравнения

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const} \quad (3.61)$$

При движении реальной вязкой жидкости возникают силы трения, на преодоление которых жидкость затрачивает энергию. В результате полная удельная энергия жидкости в сечении 1-1 будет больше полной удельной энергии в сечении 2-2 на величину потеряннной энергии

Потерянная энергия или потерянный напор обозначаются  $h_{\text{пот}}^{1-2}$  и имеют также линейную размерность. Уравнение Бернулли для реальной жидкости имеет вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{\text{пот}}^{1-2} = H = \text{const} \quad (3.62)$$

Из рисунка 3.12 видно, что по мере движения жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2 потерянный напор все время увеличивается (потерянный напор выделен вертикальной штриховкой). Таким образом, уровень

первоначальной энергии, которой обладает жидкость в первом сечении, для второго сечения будет складываться из четырех составляющих: геометрической высоты, пьезометрической высоты, скоростной высоты и потеряннго напора между сечениями 1-1 и 2-2.

Два коэффициента  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , которые называются коэффициентами Кориолиса и зависят от режима течения жидкости ( $\alpha = 2$  для ламинарного режима,  $\alpha = 1$  для турбулентного режима).

Потерянная высота  $h_{пот}^{1-2}$  складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока)

$$h_{пот}^{1-2} = h_{пот} + h_{м} \quad (3.63)$$

где  $h_{пот}$  - потери напора по длине, м.

$h_{м}$  - потери на местные сопротивления, м.

$$h_{пот} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (3.64)$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, который для ламинарного потока вычисляется по выражению:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (3.65)$$

Где  $Re$  – число Рейнольдса, которое служит для определения режимов движения жидкости.

*Ламинарным* называется слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсации скорости и давления. При ламинарном течении жидкости в прямой трубе постоянного сечения все линии тока направлены параллельно оси трубы, при этом отсутствуют поперечные перемещения частиц жидкости.

*Турбулентным* называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений. Наряду с основным продольным перемещением жидкости наблюдаются поперечные перемещения и вращательные движения отдельных объемов жидкости. Переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается при определенной скорости движения жидкости. Эта скорость называется *критической*  $v_{кр}$ .

Значение этой скорости прямо пропорционально кинематической вязкости жидкости и обратно пропорционально диаметру трубы.

$$v_{кр} = \frac{\nu}{d} \cdot k, \quad (3.66)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$k$  - безразмерный коэффициент;

$d$  - внутренний диаметр трубы, м.

Входящий в эту формулу безразмерный коэффициент  $k$ , одинаков для всех жидкостей и газов, а также для любых диаметров труб. Этот коэффициент называется *критическим числом Рейнольдса*  $Re_{кр}$  и определяется следующим образом:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} d}{\nu}. \quad (3.67)$$

Как показывает опыт, для труб круглого сечения  $Re_{кр}$  примерно равно 2320. Таким образом, критерий подобия Рейнольдса позволяет судить о режиме течения жидкости в трубе. При  $Re < Re_{кр}$  течение является ламинарным, а при  $Re > Re_{кр}$  течение является турбулентным.

Точнее говоря, вполне развитое турбулентное течение в трубах устанавливается лишь при  $Re$  примерно равно 4000, а при  $Re = 2300 \dots 4000$  имеет место переходная, критическая область.

Режим движения жидкости напрямую влияет на степень гидравлического сопротивления трубопроводов. Если число Рейнольдса лежит в диапазоне  $4000 < Re < 10(d / \Delta_3)$  коэффициент  $\lambda$  определяется по полуэмпирической формуле Блазиуса

$$\lambda_r = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (3.68)$$

Для определения существует также эмпирическая формула П.К. Конакова, которая применима для гидравлически гладких труб

$$\lambda_r = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2} \quad (3.69)$$

Во второй области, расположенной между линий II и пунктирной линией справа, коэффициент  $\lambda$  зависит одновременно от двух параметров - числа  $Re$  и относительной шероховатости  $\Delta/r_0$ , которую можно заменить на  $\Delta_3$ . Для определения коэффициента  $\lambda$  в этой области может служить универсальная формула А.Д. Альтшуля:

$$\lambda_{\Gamma} = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\Sigma}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (3.70)$$

где  $\Delta_{\Sigma}$  - эквивалентная абсолютная шероховатость, м.

Характерные значения  $\Delta_{\Sigma}$  (в мм) для труб из различных материалов приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А:

Третья область - область больших  $Re$  и  $\Delta/\Gamma_0$ , где коэффициент  $\lambda$  не зависит от числа  $Re$ , а определяется лишь относительной шероховатостью (область расположена справа от пунктирной линии). Это *область шероховатых труб*, в которой все линии с различными шероховатостями параллельны между собой. Эту область называют областью автомодельности или режимом квадратичного сопротивления, т.к. здесь гидравлические потери пропорциональны квадрату скорости.

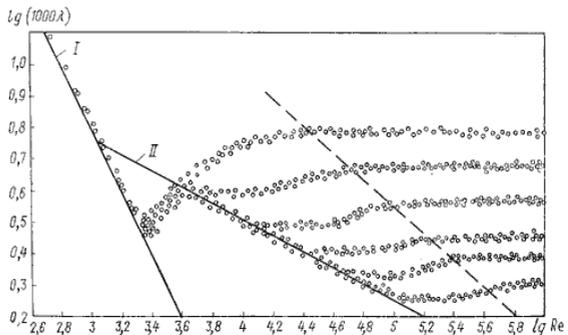
Определение  $\lambda$  для этой области производят по упрощенной формуле Шифринсона:

$$\lambda_{\Gamma} = 0,11 \left( \frac{\Delta_{\Sigma}}{d} \right)^{0,25} \quad (3.71)$$

или по формуле Прандтля - Никурадзе:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\Gamma}}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta_{\Sigma}}{3,71d} \right). \quad (3.72)$$

Коэффициент гидравлического трения можно получить из графика Никурадзе (рисунок 3.13). Потери напора, определяемые по Вейсбаха-Дарси, можно определить,



Рисунок

формул

3.13

зная коэффициент гидравлического сопротивления, который определяется в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  и от эквивалентной шероховатости  $\Delta_{\Sigma}$ . Для удобства сводные данные по определению  $\lambda$  представлены в ПРИЛОЖЕНИИ А.

Потери напора на местные сопротивления определяются в зависимости от вида местного сопротивления по уравнению

$$h_{\text{расш}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} . \quad (3.73)$$

Это выражение является следствием *теоремы Борда*, которая гласит, что потеря напора при внезапном расширении русла равна скоростному напору, определенному по разности скоростей.

Выражение  $(1 - S_1/S_2)^2$  обозначается греческой буквой  $\zeta$  (дзета) и называется коэффициентом потерь, таким образом

$$h_{\text{расш}} = \zeta \frac{v_1^2}{2g} . \quad (3.74)$$

Полная потеря напора в случае внезапного сужения определится по формуле

$$h_{\text{суж}} = \zeta_{\text{суж}} \frac{v_2^2}{2g} , \quad (3.75)$$

где коэффициент сопротивления для сужения трубопровода определяется по полуэмпирической формуле И.Е. Идельчика:

$$\zeta_{\text{суж}} = 0,5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right) = 0,5 \left( 1 - \frac{1}{n} \right) , \quad (3.76)$$

где  $n = S_1/S_2$  - степень сужения.

При выходе трубы из резервуара больших размеров, когда можно считать, что  $S_2/S_1 = 0$ , а также при отсутствии закругления входного угла, коэффициент сопротивления  $\zeta_{\text{суж}} = 0,5$ .

Потери напора в случае постепенного сужения русла (данное местное сопротивление представляет собой коническую сходящуюся трубу, которая называется *конфузором*) потери напора определяются при помощи уравнения

$$h_{\text{конф}} = \frac{\lambda_r}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{v_2^2}{2g} , \quad (3.77)$$

где коэффициент сопротивления конфузора определяется по формуле

$$\zeta_{\text{кол}} = \frac{\lambda_T}{8 \cdot \sin(\alpha/2)} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right), \quad (3.78)$$

в которой  $n = S_1/S_2$  - степень сужения.

При внезапном повороте (колена) потери тем больше, чем больше угол  $\delta$ . Потерю напора рассчитывают по формуле

$$h_{\text{кол}} = \zeta_{\text{кол}} \frac{v^2}{2g}, \quad (3.79)$$

где  $\zeta_{\text{кол}}$  - коэффициент сопротивления колена круглого сечения, который определяется по графику в зависимости от угла колена  $\delta$  (рисунок 3.14).

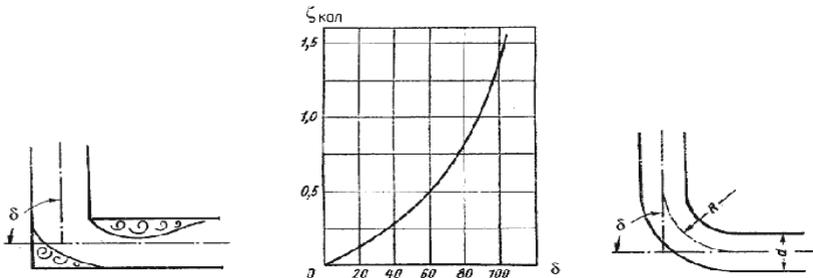


Рисунок 3.14

Плавность поворота значительно уменьшает интенсивность вихреобразования, а следовательно, и сопротивление отвода по сравнению с коленом. Это уменьшение тем больше, чем больше относительный радиус кривизны отвода  $R/d$ .

Коэффициент сопротивления отвода  $\zeta_{\text{отв}}$  зависит от отношения  $R/d$ , угла  $\delta$ , а также формы поперечного сечения трубы.

Для отводов круглого сечения с углом  $\delta = 90^\circ$  и  $R/d \geq 1$  при турбулентном течении можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$\zeta'_{\text{отв}} = 0,051 + \frac{0,19d}{R}. \quad (3.80)$$

Для углов  $\delta \leq 70^\circ$  коэффициент сопротивления

$$\zeta_{\text{отв}} = 0,9 \zeta'_{\text{отв}} \sin \delta, \quad (3.81)$$

а при  $\delta \geq 100^\circ$

$$\zeta_{\text{отв}} = \left( 0,7 + \frac{\delta}{90} 0,35 \right) \zeta'_{\text{отв}}, \quad (3.82)$$

Потеря напора в колене определится как

$$h_{\text{отв}} = \zeta_{\text{отв}} \frac{v^2}{2g}. \quad (3.83)$$

Местные сопротивления трубопроводной арматуры можно определить по справочной литературе [2].

С помощью уравнения Бернулли решается задачи в следующей последовательности:

1. Выбирают два сечения по длине потока 1-1 и 2-2, таким образом, чтобы для одного из них были известны величины  $p$ ,  $v$ ,  $g$ , а для другого сечения один или несколько параметров подлежали определению.
2. Намечают линию сравнения так, чтобы были известны  $z_1$  и (или)  $z_2$ .
3. При двух неизвестных для второго сечения используют уравнение неразрывности движения жидкости  $v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$ .
3. Решают уравнения относительно неизвестного.

#### 4 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 2

**Задачи 2.1, 2.2.** Перед решением задач следует изучить: характеристики центробежных насосов; работу центробежного насоса на сеть; зависимость напора, подачи и мощности насоса от частоты вращения; пересчет рабочих характеристик центробежных насосов на другую частоту вращения; последовательную и параллельную работу насосов на сеть [1, 3, 4]. Каждая предлагаемая задача состоит из двух вопросов.

При ответе на первый вопрос определяют рабочую точку насоса.

Для определения рабочей точки насоса следует на заданную характеристику насоса  $H = f(Q)$ , вычерченную на миллиметровке, наложить в том же масштабе характеристику трубопровода, построенную по уравнению:

$$H = H_r + h = H_r + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (4.1)$$

где  $H_r$  - геометрическая высота подъема жидкости, не зависящая от расхода и равная разности отметок уровней жидкости в напорном и приемном резервуарах;

$h$  - потеря напора, м;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;

$l$  - длина трубопровода, м;

$v$  - скорость движения жидкости, м/с;

$d$  - диаметр трубопровода, м;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

При расчете характеристики трубопровода следует задаваться несколькими значениями  $Q$ , равными 0, 5, 10, 20, и для каждого из них вычислить значения  $H$ . Расчеты свести в таблицу.

Точка пересечения характеристики насоса  $H$  с характеристикой трубопровода определит рабочую точку насоса  $A_1$ . Соответствующие ей напор  $H_{A_1}$ , подача  $Q_{A_1}$ , КПД насоса  $\eta_{A_1}$  и мощность  $N_{A_1}$  определяются способом, указанным на рисунке 4.1.

При ответе на второй вопрос следует воспользоваться методическими указаниями в каждой задаче, приведенными ниже.

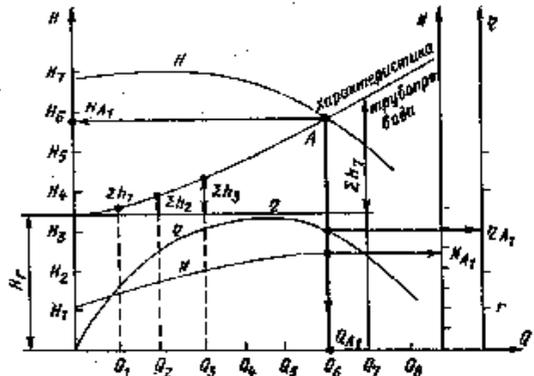
**Задача 2.1.** Необходимо построить характеристику трубопровода при измененной величине геометрической высоты подъема жидкости.

**Задача 2.2** Необходимо определить новую рабочую точку насоса при неизменной характеристике трубопровода и новой характеристике насоса.

Для построения новой характеристики насоса при частоте вращения  $n_2$  следует на заданной характеристике насоса  $H = f(Q)$  при  $n_1$  взять несколько произвольных точек

(например для  $Q$ , равных 0, 10, 20, 30 л/с) и для каждой из них снять с графика соответствующее значение  $H$ . Далее, используя уравнения гидродинамического подобия лопастных машин

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2,$$



(4.2)

Рисунок 4.1

следует вычислить для каждой точки новые значения расхода  $Q_2$  и напора  $H_2$ . По новым значениям  $Q_2$  и  $H_2$  построить новые точки и через них провести новую характеристику насоса  $H$ . Точка пересечения новой характеристики насоса с характеристикой трубопровода определит новую и рабочую точку насоса.

**Задачи 2.3, 2.4.** Перед решением этих задач следует изучить раздел гидравлических машин, посвященный устройству и принципу действия объемного гидравлического привода и гидропередачи, устройству силовых гидроцилиндров, распределительных устройств, предохранительных и редуцирующих клапанов и устройств [1, 3, 5]. При расчете гидравлической передачи рекомендуется придерживаться следующей последовательности:

1. Начертить схему гидравлической передачи.
2. Определить давление  $p$  в силовом цилиндре гидродвигателя в зависимости от величины усилия, прикладываемого к штоку одного поршня (см. таблицу 4.1).

Таблица 4.1

Усилие $G$ , кН	Давление $p$ , МН/м <sup>2</sup>
10 – 20	$\leq 6$
20 – 30	$\leq 10$
30 – 50	$\leq 12$
50 – 100	$\leq 16$

Следует помнить, что в условии дано усилие, приходящееся на штоки всех цилиндров.

3. Зная величину усилия  $G$ , приходящегося на один цилиндр гидродвигателя, и задавшись величиной давления  $p$ , следует вычислить площадь цилиндра гидродвигателя, определить его диаметр и по полученному значению  $d_{ц}$  подобрать стандартный диаметр.

По стандарту приняты следующие внутренние диаметры гидроцилиндров: 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 180, 200, 220 мм.

4. Определить диаметр штока, помня, что соотношение диаметра штока  $d_{ш}$  и внутреннего диаметра цилиндра  $d_{ц}$  зависит от давления в гидросистеме и определяется следующим образом:

- 1) площадь цилиндра при одностороннем штоке

$$S_u = \frac{\pi d_u^2}{4};$$

(4.3)

2) площадь цилиндра при двустороннем штоке

$$S_u = \frac{\pi}{4}(d_u^2 - d_w^2).$$

(4.4)

3) соотношение диаметров штока и поршня при  $p$  до 10 МН/м<sup>2</sup>

$$\frac{d_w}{d_u} = 0,5;$$

(4.5)

4) соотношение диаметров штока и поршня при  $p$  свыше 10 МН/м<sup>2</sup>

$$\frac{d_w}{d_u} = 0,7.$$

(4.6)

5) по полученным значениям  $d_w$  выбрать стандартные диаметры штока.

По стандарту приняты следующие диаметры штоков: 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 140, 160, 180 мм.

5. Определить расход масла в цилиндре гидродвигателя и подачу насоса.

6. Определить диаметр трубопроводов  $d_T$  гидросистемы, задавшись скоростью движения масла. В напорных трубопроводах  $v = 4 \div 6$  м/с. По полученному значению  $d_T$  подобрать стандартный диаметр трубопровода. По ГОСТ 12445-80 приняты следующие диаметры трубопровода: 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80 мм.

7. Установить соответствующие этим диаметрам фактические скорости движения жидкости в трубопроводах.

8. С учетом фактических скоростей определить потери напора в трубопроводах гидросистемы. Их следует рассчитывать как «короткие», т.е. учитывать потери напора по длине и в местных сопротивлениях.

Для местных сопротивлений при числах Рейнольдса  $Re < 10^5$  часто применяют выражение местных гидравлических потерь через эквивалентные длины трубопровода, т.е. фактическую длину трубопровода увеличивают на длину, эквивалентную по своему сопротивлению местным сопротивлениям, и тогда расчетная длина трубопровода  $l_p$  складывается из фактической  $l$  и эквивалентной  $L_e$  длины:

$$L_s = \frac{d}{\lambda} \sum \xi, \quad (4.7)$$

где  $d$  – диаметр трубопровода, м;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;

$\sum \xi$  – сумма значений коэффициентов местных сопротивлений.

Значения коэффициентов местных сопротивлений, встречающиеся в гидравлических передачах, приведены в *ПРИЛОЖЕНИИ А*.

9. Определить напор насоса,

$$H = \frac{p_\phi}{\rho g} + h, \quad (4.8)$$

где  $p_\phi$  – фактическое давление в силовом цилиндре,

$h$  – потери напора.

Фактическое давление в силовом цилиндре

$$p_\phi = \frac{G}{S_{\text{стц}}}, \quad (4.9)$$

где  $G$  – усилие, приходящееся на шток одного цилиндра;

$S_{\text{стц}}$  – площадь цилиндра стандартного диаметра.

10. Вычислить мощность насоса

$$N = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta}. \quad (4.10)$$

## 5 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1 История развития дисциплины «Гидравлика и гидравлические машины». Труды Архимеда, Леонардо да-Винчи. Вклад в развитие науки Ньютона, Паскаля, Торичелли. Работы Ломоносова, Бернулли, Эйлера.

2 Первая в истории человечества гидравлическая машина, гидравлическая передача. Исследования Н.Жуковского, Феттингера. Наши современники и их вклад в развитие дисциплины.

3 Понятие «жидкость». Капельная, реальная, идеальная, упругая жидкость.

4 Силы, действующие в жидкости. Массовые и поверхностные.

5 Механические характеристики жидкости. Физические свойства капельной жидкости (сжимаемость, вязкость, поверхностное натяжение, температурное расширение, капиллярность, испаряемость, растворимость газов.)

6 Гидростатическое давление (ГД). Два основных свойства ГД (с доказательством).

7 Гидростатическое давление: атмосферное, избыточное, вакуумметрическое, абсолютное.

8 Понятие нормального атмосферного давления, технической и физической атмосферы. Единицы измерения давления.

9 Основное уравнение гидростатики (вывод). Закон Паскаля. Устройство, в принципе действия, которого лежит закон Паскаля.

10 Гидростатический парадокс. Героновы фонтаны, устройство, принцип действия.

11 Приборы, применяемые для измерения давления (атмосферного, избыточного, вакуумметрического). Устройство, принцип действия. Класс точности приборов.

12 Дифференциальные уравнения покоящейся идеальной жидкости (Уравнения Л.Эйлера). Вывод уравнений.

13 Относительный покой жидкости. Пример применения уравнений Л.Эйлера для покоящейся идеальной жидкости для решения практических задач.

14 Определение силы гидростатического давления на плоскую стенку, расположенную под углом к горизонту. Центр давления.

15 Положение центра давления в случае прямоугольной площадки, верхняя кромка которой лежит на уровне свободной поверхности.

16 Определение силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Эксцентриситет. Объем тела давления.

17 Закон Архимеда. Вывод уравнения для определения Архимедовой силы. Центр водоизмещения.

18 Условия плавания и остойчивости тела. Метацентр. Метацентрическая высота. Ватерлиния. Осадка. Запас плавучести.

19 Виды движения жидкости (установившееся, неустановившееся, равномерное, неравномерное, напорное, безнапорное).

20 Элементы потока жидкости (линия тока, поверхность тока, трубка тока, элементарная струйка, площадь живого сечения).

21 Понятие расхода жидкости. Определение скорости осредненной по живому сечению.

22 Уравнение неразрывности потока. Вывод уравнения. Применение уравнения к решению практических задач.

23 Уравнение Д.Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.

24 Геометрический смысл уравнения Бернулли.

25 Энергетический смысл уравнения Бернулли. Полный напор. Напорная и пьезометрическая линии.

26 Гидравлические элементы живого сечения (площадь живого сечения, длина смоченного периметра, гидравлический радиус).

27 Два режима движения жидкости (ламинарный и турбулентный).

28 Опыты О.Рейнольдса. Критические числа Рейнольдса. Определение числа Рейнольдса.

29 Потери напора. Определение потерь напора по длине при ламинарном режиме движения. Вывод уравнения Пуазейля. Закон Пуазейля.

30 Уравнение Вейсбаха-Дарси (вывод). Коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения) в случае ламинарного движения.

31 Определение коэффициента Дарси в случае начального участка ламинарного движения.

32 Определение коэффициента Дарси в случае движения с теплообменом.

33 Определение потерь напора при ламинарном режиме движения при движении в зазоре.

34 Определение потерь напора по длине в случае больших перепадов давления.

35 Определение коэффициента Дарси при турбулентном режиме движения. 36 Коэффициент эквивалентной шероховатости. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.

37 Уравнения для определения коэффициента Дарси в случае области гладкого трения, доквадратичного и квадратичного сопротивления.

38 Графики Никурадзе. Определение коэффициента Дарси опытным путем.

39 Графики Мурина. Определение коэффициента Дарси опытным путем.

40 Виды местных сопротивлений.

41 Определение потерь напора на местные сопротивления.

42 Вывод общего уравнения Вейсбаха.

43 Определение коэффициентов местных сопротивлений для внезапного и плавного расширения, внезапного и плавного сужения, поворота трубы на  $90^{\circ}$ .

44 Явление кавитации. Критическое число кавитации.

45 Уравнение Д.Бернулли для потока реальной жидкости, пьезометрический и гидравлический уклон.

46 Геометрический и энергетический смысл уравнения Д.Бернулли для потока реальной жидкости.

47 Дифференциальные уравнения движущейся идеальной жидкости (уравнения Л.Эйлера). Вывод уравнений.

48 Определение скорости и расхода при истечении жидкости через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном расходе. Коэффициенты сжатия, скорости и расхода. Уравнение Торичелли.

49 Истечение жидкости под уровень через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре.

50 Определение времени опорожнения сосуда.

51 Вывод уравнения траектории струи. Определение дальности отлета струи.

52 Истечение жидкости через насадки. Устройство и принцип действия насадка Вентури, Борда, расходящегося и сходящегося внешних насадков. Определение расхода и скорости.

53 Коэффициенты сжатия, скорости и расхода насадков. Уравнения для определения скорости и расхода насадка.

54 Явление гидравлического удара. Скорость распространения ударной волны (формула Н.Жуковского).

55 Определение превышения давления в трубопроводе при гидроударе. Фаза и период гидроудара.

56 Прямой и не прямой гидроудар. Определение превышения давления.

57 Устройство и принцип действия гидротарана (достоинства и недостатки).

58 Способы борьбы с возникновением гидроудара в трубопроводе.

59 Гидравлический расчет трубопроводов. Трубопроводы простые и сложные, короткие и длинные.

60 Построение трубопроводной характеристики. Статический напор, потребный напор.

61 Построение трубопроводной характеристики при параллельном и последовательном соединении коротких трубопроводов.

62 Расчет длинных трубопроводов. Определение магистрали. Понятие коэффициента расхода. Построение трубопроводной характеристики в случае тупикового трубопровода.

63 Подбор насоса, работающего на трубопроводную систему. Построение трубопроводной характеристики. Определение потребного

напора. Поле насосов. Характеристики насоса. Определение рабочей точки насоса.

64 Основы теории подобия. Геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

65 Критерии подобия: числа Рейнольдса, Вебера, Струхала, Маха, Фруда, Эйлера, Ньютона.

66 История развития гидравлических машин. Вклад М.Ломоносова, Л.Эйлера, наших современников в развитие теории создания гидравлических машин.

67 Классификация насосов. Классификация гидродвигателей.

68 Энергия потока жидкости, параметры: мощность и давление.

69 Основные параметры насосов. Напор, мощность, к.п.д., подача, допустимая высота всасывания. Баланс мощности в насосе.

70 Объемные поршневые гидромашин. Принцип действия и классификация.

71 Устройство, принцип действия поршневого насоса одиночного действия.

72 Устройство, принцип действия поршневого насоса двойного действия.

73 Определение подачи поршневого насоса одиночного действия. Построение графика подачи.

74 Определение подачи поршневого насоса двойного действия. Построение графика подачи.

75 Действительная подача поршневого насоса. Объемный к.п.д.

76 Мощность, потребляемая поршневым насосом. Индикаторная диаграмма.

77 Определение к.п.д. поршневого насоса. Запас мощности на случай перегрузки.

78 Устройство и принцип действия радиально-поршневых насосов. Кинематическая схема. Секундная подача. Достоинства и недостатки.

79 Устройство и принцип действия аксиально-поршневого насоса. Ход поршня. Теоретическая производительность.

80 Шестеренные насосы. Устройство и принцип действия. Достоинства и недостатки.

81 Принцип действия и устройство силовых гидроцилиндров. Их классификация.

82 Устройство и принцип действия силовых гидроцилиндров одностороннего действия. Усилие на штоке. Скорость перемещения поршня.

83 Устройство и принцип действия силового гидроцилиндра двустороннего действия. Усилие на штоке. Скорость перемещения поршня.

84 Устройство и принцип действия квадрантов. Определение удельной подачи.

85 Классификация лопастных насосов. Схема центробежного насоса.

86 Принцип действия, устройство и область применения осевого насоса.

87 Принцип действия и устройство активных и реактивных лопастных турбин.

88 Устройство и принцип действия пропеллерных турбин.

89 Кинематика частицы жидкости в канале центробежного насоса. Треугольники скоростей.

90 Вывод основного уравнения лопастных машин.

91 Влияние формы лопастей центробежного насоса на напор. Коэффициент закручивания. Коэффициент реактивности.

92 Определение числа лопастей центробежного насоса.

93 Определение гидравлических потерь в лопастном насосе.

94 Действительный напор лопастного насоса с учетом потерь.

95 Характеристики центробежного лопастного насоса. Помпаж.

96 Кавитационные испытания лопастного насоса.

97 Гидродинамическое подобие в лопастных насосах. Пересчет характеристики насоса на другую частоту вращения.

98 Коэффициент быстроходности в лопастных насосах.

99 Устройство и принцип действия осевого насоса.

100 Характеристики осевого насоса.

101 Гидродинамические передачи. Устройство и принцип действия гидротрансформатора. К.п.д., мощность, крутящие моменты гидротрансформатора.

102 Характеристики гидротрансформатора. Его назначение.

103 Устройство и принцип действия гидромурфты. Характеристики гидромурфты.

104 Назначение, устройство и принцип действия объемных гидроприводов. Достоинства и недостатки. Рабочие жидкости.

105 Регулирование объемных гидроприводов.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30
$P_{\text{н.п.}}, \text{кПа}$	0,9	1,2	1,8	2,4	2,4	4,3

Таблица А.2 – Зависимость коэффициента кинематической вязкости воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	7	10	12
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0179	0,0152	0,0143	0,0131	0,0124
$t, ^\circ\text{C}$	15	17	20	25	30
$\nu, \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,0114	0,0109	0,0101	0,009	0,008

Таблица А.2 – Размерности величин в различных системах измерения

Величина	СИ	Перевод в другие единицы
Длина	$\text{м}$	$1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1000 \text{ мм}$
Объём	$\text{м}^3$	$1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3 = 1000 \text{ л}$
Сила, вес	$\text{Н}$	$10 \text{ Н} \approx 1 \text{ кгс} = 10^{-3} \text{ тс}$
Вязкость кинематическая	$\text{м}^2/\text{с}$	$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Стокс}$
Давление	$\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$	$101325 \text{ Па} = 1 \text{ физ. ат}$ соответствует $10,33 \text{ м вод. ст.}$ или $760 \text{ мм рт. ст.}$

Таблица А.3 – Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование вида местного сопротивления	Коэффициент местного сопротивления $\xi$
Вентиль с изменением направления движения жидкости на $90^\circ$	2,5 – 3
Вентиль с прямоточным движением жидкости	0,5 – 1
Распределительные устройства и обратные клапаны	2 – 3
Значительное расширение потока при поступлении жидкости в гидроцилиндры	0,8 – 0,9
Штампованные или сверленные угольники под $90^\circ$	2
Прямоугольные тройники: для отводимого под углом $90^\circ$ потока	1 – 1,2
для транзитного потока	0,1 – 0,2
Выход жидкости из цилиндров в трубы	0,5
Приемный клапан	10
Кран управления (при угле поворота $5^\circ$ )	0,05
Фильтр	$\approx 12$
Закругление трубы под $90^\circ$	

**Таблица А 4 - Определение коэффициента гидравлического трения**

Режим движения		Число Рейнольдса	Определение $\lambda$
Ламинарный		$Re < 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$ или $\lambda = \frac{75}{Re}$
Переходный		$2300 < Re < 4000$	<i>Проектирование трубопроводов не рекомендуется</i>
Турбулентный	1-я область	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (ф-ла Блазиуса) $\lambda_r = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$ (ф-ла Конакова)
	2-я область	$10 \frac{d}{\Delta_s} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтуля)
	3-я область	$Re > 560 \frac{d}{\Delta_s}$	$\lambda_r = 0,11 \left( \frac{\Delta_s}{d} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_r}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta_s}{3,71d} \right)$ (ф-ла Никурадзе)

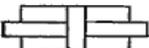
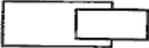
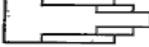
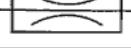
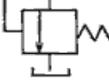
**Таблица А 5 - Величины  $\lambda$  и  $K$  для круглых труб, подсчитанные по полной формуле академика Н. Н. Павловского при  $n = 0,012$**

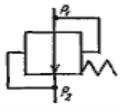
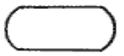
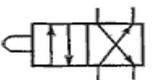
d, мм	50	75	100	150	200	250	300	350	400
$\lambda$	0,0391	0,0349	0,0321	0,0286	$\frac{0,026}{3}$	0,0247	0,0234	0,0224	0,0216
$K, \frac{m^3}{c}$	0,0099	0,0287	0,0614	0,1794	$\frac{0,383}{7}$	0,6921	1,1206	1,6842	2,3970

**Таблица А 6 - Эквивалентная шероховатость для труб из различного материала**

Стекло	0
Трубы, тянутые из латуни, свинца, меди	0...0,002
Высококачественные бесшовные стальные трубы	0,06...0,2
Стальные трубы	0,1...0,5
Чугунные асфальтированные трубы	0,1...0,2
Чугунные трубы	0,2...1,0

Таблица А 7 - Условные обозначения основных гидроэлементов

Обозначение	Описание элемента
	Гидронасос нерегулируемый с постоянным направлением потока
	Гидронасос нерегулируемый с реверсивным направлением потока
	Гидронасос регулируемый
	Гидромотор нерегулируемый с постоянным направлением потока
	Гидромотор нерегулируемый с реверсивным направлением потока
	Гидромотор регулируемый
	Гидроцилиндр поршневой с односторонним штоком
	Гидроцилиндр поршневой с двухсторонним штоком
	Гидроцилиндр плунжерный
	Гидроцилиндр телескопический
	Гидроцилиндр с торможением в конце хода
	Дроссель настраиваемый
	Дроссель регулируемый
	Клапан напорный

	Клапан перепада давлений ( $P_1 - P_2 = \text{const}$ )
	Клапан обратный
	Гидрозамок
	Гидроаккумулятор грузовой
	Гидроаккумулятор пружинный
	Гидроаккумулятор пневмогидравлический
	Фильтр
	Теплообменник
	Гидропреобразователь
	Гидробак с атмосферным давлением
	Гидробак с давлением выше атмосферного
	Гидрораспределитель четырехлинейный двухпозиционный с управлением от кулачка
	Гидрораспределитель четырехлинейный трехпозиционный с ручным управлением и перекрытым потоком в исходной позиции
	Гидрораспределитель четырехлинейный трехпозиционный с электромагнитным управлением и закольцованным потоком в исходной позиции

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Образец оформления обложки к контрольным работам № 1, № 2**

**Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский государственный университет транспорта**

**Кафедра «Экология и рациональное использование  
водных ресурсов»**

**Контрольная работа № 1  
по дисциплине  
«Гидравлика и гидравлические машины»**

**Выполнил студент  
группы ЗТ – 41  
Иванов А.П.  
Учебный шифр ЗТ – 262**

**Принял преподаватель  
к.т.н., доцент Вострова Р.Н.**

**Индекс и домашний адрес:  
246004 г.Гомель,  
ул.Привокзальная, д.б., кв.15.**

**Гомель  
2006**

*ПРИЛОЖЕНИЕ В*

(обязательное)

## **Базовая программа дисциплины «Гидравлика и гидравлические машины»**

### **1 Цели и задачи**

Дисциплина «Гидравлика и гидравлические машины» - одна из фундаментальных дисциплин общетехнического цикла, служит основой для изучения профилирующих дисциплин студентов механических специальностей.

#### *1.1 Цели дисциплины*

- дать учащимся знания по основным разделам гидростатики, гидродинамики для понимания процессов, совершающихся в гидро- и пневмосистемах, а также в узлах трения механизмов;
- дать знания о гидромашинах, гидродинамических передачах, объемных гидроприводах, и средствах гидроавтоматики, пневмоприводах и средствах пневмоавтоматики, применяемых на автотранспорте.

#### *1.2 Задачи дисциплины*

- изучение свойств капельной жидкости;
- изучение основных законов покоящейся и движущейся жидкости и умение применить их для решения практических инженерных задач;
- дать представление о состоянии и перспективах использования гидро- и систем в машиностроении;
- дать представление об основных видах гидравлического транспортного оборудования и принципах действия;
- дать представление об основах проектирования машин с использованием гидропневмосистем ;
- привить умение использовать расчетные методики для проектирования гидропередач;
- привить навыки исполнения и чтения гидравлических схем;
- привить навыки проведения лабораторных испытаний гидравлической техники, а так же работы с контрольно-измерительными приборами.

Настоящая программа является базовой. Планом предусмотрено изучение дисциплины в седьмом семестре. Кроме лекционного курса запланировано проведение лабораторных работ, практических занятий и выполнение двух контрольных работ.

## 2 Наименование тем и их содержание

### 2.1 Введение

Предмет механики жидких сред. Вклад ученых Архимеда, Паскаля, Ньютона, Торричелли, Бернулли, Эйлера, Рейнольдса, Шези, Вентури, Ломоносова, Жуковского, Колмогорова, Леви, Гуржиенко, Железнякова и др. в развитие науки. Методика современных исследований. Примеры гидромеханических задач из отраслей техники. Объект изучения, физическое строение жидкости и газов.

Понятие "жидкость". Свойства жидкости: плотность, удельный вес, относительная плотность, вязкость, текучесть, сжимаемость, капиллярность, растворимость газов, поверхностное натяжение, температурное расширение, сопротивление растяжению. Капельная, упругая, идеальная и реальная жидкость. Гипотеза сплошности. Ньютоновские жидкости. Аномалии воды. Силы, действующие в жидкости: массовые и поверхностные. Единичная массовая сила.

### 2.2 Статика жидкости

Гидростатическое давление. Единицы измерения давления. Атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давление. Техническая и физическая атмосфера. Свойства гидростатического давления. Вывод основного уравнения гидростатики. Закон Паскаля. Гидростатический парадокс.

Героновы фонтаны. Приборы для измерения гидростатического давления. Металлический манометр, пьезометр, микроманометр, вакуумметр. Класс точности прибора, относительная и приведенная погрешность. Достоинства и недостатки приборов.

Определение силы давления жидкости на плоскую площадку, расположенную под углом  $\alpha$  к горизонту. Определение модуля силы, направления и линии действия. Центр давления. Определение центра давления в случае прямоугольной площадки, одна сторона которой лежит на линии свободной поверхности.

Определение силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Определение горизонтальной и вертикальной составляющей силы, направления и линии действия. Объем тела давления. Эксцентриситет. Определение толщины стенки трубопровода.

Доказательство закона Архимеда. Архимедова сила. Условия плавания и устойчивости тела. Центр водоизмещения, ватерлиния, плавучесть тела. Плоскость плавания, ось плавания, осадка. Метацентр, метацентрическая высота. Запас плавучести.

Абсолютный и относительный покой жидких сред. Уравнения Эйлера. Модель идеальной (невязкой) жидкости. Напряжения сил вязкости,

обобщенная гипотеза Ньютона.

### 2.3 Гидродинамика

Два метода описания движения жидкостей и газов. Виды движения жидкости: установившееся и неустановившееся, равномерное и неравномерное, напорное и безнапорное. Элементы потока жидкости поверхность тока, трубка тока, элементарная струйка. Нормальное (живое) сечение. Понятие о линиях тока. Расход элементарного потока и расход через поверхность. Площадь живого сечения. Расход воды: объемный, массовый, весовой. Средняя и мгновенная скорость движения жидкости.

Уравнение неразрывности движения жидкости, уравнение неразрывности (сплошности) потока (вывод).

Вывод уравнения Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости. Геометрический смысл уравнения Бернулли. Геометрический, пьезометрический и скоростной напор. Полный напор, единица измерения. Использование трубки Пито для определения скоростного напора. Пьезометрическая и напорная линии. Энергетический смысл уравнения Бернулли. Полная удельная энергия единицы веса жидкости.

Уравнения Эйлера для элементарной струйки идеальной движущейся жидкости. Гидравлические элементы живого сечения.

Два режима движения жидкости: ламинарный и турбулентный. Опыты О.Рейнольдса. Нижний критический предел числа Рейнольдса. переходная область. Определение толщины ламинарного слоя.

Гидравлические сопротивления, их физическая природа и классификация. Структура формул для вычисления потерь энергии. Данные о гидравлическом коэффициенте трения. Зоны сопротивления. Ламинарный поток в трубе и приведение его к одномерной модели. Потери напора. Потери напора на гидравлическое трение при ламинарном режиме движения. Коэффициент Дарси. Вывод уравнения Пуазейля. Получение уравнения Вейсбаха-Дарси.

Случаи, когда теория определения коэффициента Дарси при ламинарном движении требует корректировки. Начальный участок ламинарного движения, движение в зазоре, движение с теплообменом, движение с большими перепадами давления.

Турбулентное течение в трубах, физическая природа турбулентных напряжений. Законы распределения скоростей и сопротивлений при турбулентных течениях в трубах. Определение коэффициента Дарси в случае турбулентного движения жидкости. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы, Эквивалентная шероховатость. Область гладкого, вязкого трения, доквадратичная и квадратичная область сопротивления. Графики Никурадзе-Мурина.

Местные гидравлические сопротивления. Потери напора на местные сопротивления. Вывод уравнения Борда. Коэффициент местного сопротивления. Общее уравнение Вейсбаха. Коэффициенты местного сопротивления для различных сопротивлений. Зависимость коэффициента местного сопротивления от числа Рейнольдса и геометрических параметров. Частные виды местных сопротивлений.

Явление кавитации, число кавитации. Способы борьбы с явлением кавитации в гидромашинах.

Одномерные потоки жидкостей и газов. Одномерная модель и приведение к ней плавноизменяющихся течений.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Пьезометрический и гидравлический уклоны. Частный случай закона сохранения энергии.

Истечение жидкости через отверстия и насадки. Определение расхода и скорости истечения. Истечение через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре. Коэффициенты скорости, сжатия и расхода. Истечение под уровень. Определение времени опорожнения резервуара.

Истечение через насадки. Насадки Вентури, Борда. Коноидальный насадок. Определение скорости и расхода при истечении через насадок. Коэффициенты скорости, расхода и сжатия при истечении через насадок.

Явление гидравлического удара. Модель гидроудара. Прямая и обратная ударная волна. Фаза и период гидроудара. Прямой и не прямой гидроудар. Определение превышения давления при прямом и не прямом гидроударе. Формула Н.Жуковского. Мероприятия по предотвращению гидроудара. Гидравлический таран. Изотермическое и адиабатное движение газа в трубах.

Построение зависимости потребного напора от расхода в случае последовательного соединения трубопроводов. Построение зависимости потребного напора от расхода в случае параллельного соединения трубопроводов. Выбор насоса, работающего на трубопроводную систему.

Основы теории подобия. Геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. Подобие гидромеханических процессов. Числа и критерии подобия. Критериальные числа. Критерии Ньютона, Вебера, Струхалея, Фруда, Рейнольдса. Методы моделирования. Понятие о методе размерностей

#### *2.4 Общие сведения о гидромашинах*

Общая классификация гидромашин. Принцип действия насосов, гидродвигателей и гидропередат. Рабочие жидкости гидропередат.

Общие сведения о насосах. Основные параметры: подача (расход), давление (напор), мощность, КПД. Баланс мощности в гидромашинах. Допустимая высота всасывания. Кавитация.

Лопастные насосы. Основы теории лопастных насосов. Центробежные насосы. Осевые насосы. Основное уравнение центробежных насосов. Характеристики центробежных насосов. Основы теории гидродинамического подобия насосов. Работа насоса на сеть. Последовательное и параллельное включение насосов.

Гидродинамические передачи. Назначение и область применения. Устройство, принцип действия и классификация. Характеристики гидродинамических передач. Общие закономерности. Гидродинамические муфты, устройство и рабочий процесс гидромуфты. Основные параметры, уравнения и характеристики.

Совместная работа гидромуфты с двигателем. Регулирование гидромуфт. Гидродинамические трансформаторы, устройство, классификация, характеристика.

Объемные насосы. Общие сведения, принцип действия, основные свойства и классификация, области применения. Кривошипно-поршневые насосы. Роторные насосы. Устройство и область применения.

Объемные гидравлические двигатели. Силовые гидроцилиндры, их назначение и устройство. Расчет цилиндров. Поворотные гидродвигатели. Роторные гидродвигатели-гидромоторы. Расчет крутящего момента и мощности на валу гидромотора.

Объемный гидропривод и средства гидроавтоматики. Принцип действия объемного гидропривода. Классификация объемных гидроприводов по характеру движения выходного звена и другим признакам; Условные обозначения элементов гидропривода (гидродвигатели, гидроаппаратура, фильтры, гидроаккумуляторы, гидрролинии).

Гидроаппаратура и элементы гидроавтоматики. Распределительные устройства: назначение, принцип действия и основные типы. Клапаны: принцип действия, устройство и характеристики. Дроссельные устройства, назначение, принцип действия. Фильтры и гидроаккумуляторы. Типовые схемы гидропривода СДМ. Основы теории и расчета объемного гидропривода.

### *3 Практические занятия*

3.1. Гидростатика. Решение задач по определению гидростатического давления (абсолютного, избыточного, вакуумметрического). Исследования свойств жидкости. Решение задач. Закон Паскаля. Решение задач с использованием закона Паскаля.

Определение силы гидростатического давления на плоскую стенку, расположенную под углом к горизонту. Определение центра давления.

Определение равнодействующей силы гидростатического давления на криволинейную поверхность. Определение вертикальной и горизонтальной составляющей силы гидростатического давления. Понятие эксцентриситета. Объем тела давления. Решение задач. Построение эпюры гидростатического

давления. Закон Архимеда. Определение выталкивающей силы. Метацентр, метацентрическая высота. Решение задач.

3.2 Гидродинамика. Основное уравнения неразрывности потока. Решение задач. Уравнение Бернулли для реальной жидкости. Решение задач. Потери напора по длине. Уравнение Вейсбаха-Дарси. Потери напора на местные сопротивления. Общее уравнение Вейсбаха. Решение задач.

Построение трубопроводной характеристики. Выбор насоса, работающего на трубопроводную систему. Определение рабочей точки и характеристик насоса.

Параллельная и последовательная работа насосов. Построение суммарной характеристики насосов. Пересчет характеристик насоса на другую частоту вращения.

Построение схемы объемного гидропривода.

#### *4 Лабораторные работы*

4.1 Изучение режимов движения жидкости.

4.2 Опытная проверка уравнения Бернулли.

#### *5 Контрольные работы*

Контрольная работа №1 включает решение восьми задач, с использованием знаний и применением законов, изученных в разделе 2.2, 2.3.

Контрольная работа № 2 включает в себя две задачи. Первая посвящена расчету и построению трубопроводной характеристики, определению потребного напора и подачи насоса. Определение рабочей точки насоса.

Вторая задача посвящена расчету схемы объемного гидропривода.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Угинчус А.А., Чугаева Е. А. Гидравлика Л.: Стройиздат. – 1971.- 375 с.

2 Справочник по гидравлике / Под ред. проф. В. А. Большакова. Киев: Вища школа. – 1977. – 280 с.

3 Баица Т. М. и др. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. – Машиностроение, 1982. – 423 с.

4 Абрамович В.А., Вострова Р.Н., Овчинников В.М. Расчет объемного гидропривода. Гомель. РИО БелГУТа, 1995. – с.

5 Вострова Р.Н. и др. Гидравлический расчет напорных трубопроводов, построение трубопроводной характеристики и выбор насосов с применением вычислительной техники. РИО БелГУТа, 1997. – 12 с.

