

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С. М. Кирова»

Кафедра теплотехники и гидравлики

## **ГИДРАВЛИКА**

Учебно-методический комплекс по дисциплине  
для студентов специальности 270102.65 «Промышленное и гражданское  
строительство» всех форм обучения

Сыктывкар 2012

**УДК 621.22**  
**ББК 30.123**  
**Г46**

Рекомендован к изданию в электронном виде кафедрой теплотехники и гидравлики  
Сыктывкарского лесного института 11 мая 2012 г.

Утвержден к изданию в электронном виде советом технологического факультета  
Сыктывкарского лесного института 21 июня 2012 г.

**Составитель:**  
кандидат химических наук, доцент **Т. Л. Леканова**

**Гидравлика** [Электронный ресурс] : учеб.-метод. комплекс по  
Г46 дисциплине для студ. спец. 270102.65 «Промышленное и гражданское  
строительство» всех форм обучения : самост. учеб. электрон. изд. /  
Сыкт. лесн. ин-т ; сост.: Т. Л. Леканова. – Электрон. дан. –  
Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. –  
Загл. с экрана.

В издании помещены материалы для освоения дисциплины  
«Гидравлика». Приведены рабочая программа курса, сборник  
описаний лабораторных работ, методические указания по различным  
видам работ.

УДК 621.22  
ББК 30.123

---

*Самостоятельное учебное электронное издание*

Составитель: **Леканова** Тамара Леонардовна

### **ГИДРАВЛИКА**

Электронный формат – pdf. Объем 5,4 уч.-изд. л.  
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет  
имени С. М. Кирова» (СЛИ),  
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, [institut@sfi.komi.com](mailto:institut@sfi.komi.com), [www.sli.komi.com](http://www.sli.komi.com)

Редакционно-издательский отдел СЛИ.

© СЛИ, 2012  
© Леканова Т.Л., составление, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Рабочая программа специальности 270102.65 «Промышленное и гражданское строительство»	4
<b>Рекомендации по самостоятельной подготовке студентов</b>	23
Методические рекомендации по самостоятельному изучению тем	23
Методические рекомендации по самостоятельной подготовке к практическим занятиям	27
Методические рекомендации по самостоятельной подготовке к лабораторным работам	38
Методические рекомендации по самостоятельному выполнению контрольных работ для студентов заочной и сокращенной форм обучения	40
<b>Контроль знаний студентов</b>	54
Тестовые материалы, используемые при контроле знаний студентов	54
Задания к аудиторной контрольной работе, используемые при контроле знаний студентов	66
Критерии оценки знаний студентов	68
<b>Сборник описаний лабораторных работ</b>	69

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М.  
Кирова»  
(СЛИ)

"Согласовано"  
Декан лесотранспортного  
факультета  
\_\_\_\_\_ А. Н. Юшков  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

«Утверждаю»  
Зам. директора по учебной и научной  
работе  
\_\_\_\_\_ Л. А. Гурьева  
"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине: «Гидравлика»

обязательная

для подготовки дипломированного специалиста

по направлению 270000 "Архитектура и строительство"

специальность: 270102 «Промышленное и гражданское строительство»

Кафедра "Теплотехники и гидравлики"

Курс

Семестр

	<u>очное</u>	<u>очно-заочное</u>	<u>заочное</u>	<u>сокращенное</u>
Всего часов	98	98	98	98
В том числе аудиторных	48	30	12	12
из них:				
лекции	16	10	4	4
лабораторные	16	10	4	4
практические	16	10	4	4
самостоятельная работа	50	68	86	86
экзамен	-	-	-	-
контрольная работа (2)	-	-	4	4
зачет	5	6	3	4
контроль			4	4

Сыктывкар 2012

Рабочая программа составлена в соответствии с Государственным стандартом высшего образования по направлению 270000 "Архитектура и строительство" для специальности: 270102 «Промышленное и гражданское строительство»

Переработанную программу составил: к.х.н., доцент \_\_\_\_\_Леканова Т.Л.

Рабочая программа по дисциплине «Гидравлика» обсуждена на заседании кафедры "Теплотехники и гидравлики"

Протокол № 9 от " 11 " мая 2012г.

Заведующий кафедрой, к.х.н., доцент \_\_\_\_\_Т. Л. Леканова

Рабочая программа рассмотрена и одобрена методической комиссией технологического факультета

Протокол № 11 от " 06 " июня 2012г.

Председатель комиссии:

декан лесотранспортного факультета. \_\_\_\_\_ А. Н. Юшков

### **1.1. Цель и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе**

## **Цель преподавания дисциплины**

Целью преподавания дисциплины "Гидравлика" является обеспечение теоретической и практической подготовки специалистов, выполняющих проектирование, конструирование, строительство и эксплуатацию зданий. Данный курс обеспечивает глубокое понимание сущности основных законов равновесия и движения жидкостей с целью решения инженерных задач.

### **1.2. Задачи изучения дисциплины**

В результате изучения курса "Гидравлика" студент должен иметь представление:

- об общих законах статики и динамики жидкости;
- о методах расчета основных параметров и характеристик процессов с использованием жидкости;
- о перспективных разработках и исследованиях в области гидравлики;
- о назначении и области применения гидравлических машин и оборудования;
- о перспективных разработках и исследованиях в области гидравлики.

### **Требования к знаниям и умениям**

- основные понятия, законы гидравлики; физические свойства капельных жидкостей; практические приложения законов гидростатики и гидродинамики;
- методы решения основных задач гидростатики и гидродинамики, имеющих практическую направленность;
- определять основные размеры и параметры гидравлических машин;
- читать и выполнять чертежи со специальными обозначениями гидравлических машин и аппаратуры в соответствии с ГОСТами.

## **Государственный стандарт**

**Трудоемкость по стандарту - 98 часов, аудиторных занятий – 48 часов, самостоятельная работа – 50 часа.**

Вводные сведения. Основные физические свойства жидкостей и газов. Основы кинематики. Общие законы и управления статики и динамики жидкостей и газов. Силы, действующие в жидкостях. Абсолютный и относительный покой (равновесие) жидких сред. Модель идеальной (невязкой) жидкости. Общая интегральная форма уравнений количества движения и момента количества движения. Подobie гидромеханических процессов. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах. Турбулентность и ее основные статистические характеристики. Конечно-разностные формы уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса. Общая схема применения численных методов и их реализация на ЭВМ. Одномерные потоки жидкостей и газов.

### **1.3. Перечень дисциплин и тем, усвоение которых студентом необходимо для изучения данной дисциплины**

Для полноценного усвоения учебного материала по дисциплине "Гидравлика" студентам необходимо иметь знания по математике, физике, теоретической механике, сопротивлению материалов, теории машин и механизмов.

## **2. Содержание дисциплины.**

## 2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

№ п/п	Краткое содержание занятий	Кол. часов
1	Вводные сведения. Предмет и задачи курса. Основные физические свойства жидкостей и газов на примере плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.	1
2	Гидростатика. Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных единицах. Общие законы и уравнения статики жидкостей и газов. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Виды напора. Закон Паскаля и его практическое применение. Абсолютный и относительный покой (равновесие) жидких сред	1
3	Сила давления жидкости на плоские, криволинейные стенки. Приборы для измерения давления	1
4	Основы кинематики. Гидродинамика. Скорость и расход жидкости. Установившиеся и неустановившиеся потоки. Уравнение неразрывности. Общие законы и уравнения динамики жидкостей и газов. Уравнение неразрывности. Дифференциальные уравнения несжимаемой жидкости (уравнение Навье Стокса). Виды движения вязкой жидкости.	1
5	Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой жидкости). Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Некоторые практические применения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.	1
6	Общая интегральная форма уравнения количества движения. Подобие гидромеханических процессов. Константы подобия, инварианты подобия. Критерии гидродинамического подобия. Теоремы подобия. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах.	
7	Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса, его критические значения. Скорость и расход жидкости при ламинарном режиме движения жидкости (закон Стокса, уравнение Пуазейля). Турбулентность и ее основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Применение численных методов на ЭВМ.	1
8	Одномерные потоки жидкостей. Распределение скоростей по сечению потока. Расчет коэффициента гидравлического трения.	1
9	Потери напора на местные сопротивления. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений.	0,5
10	Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре. Модуль расхода. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.	1
11	Гидравлический расчет трубопроводов.	1
12	Неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Гидравлический удар. Формула Жуковского Н.Е. Практическое использование гидроудара.	1
13	Гидравлические машины. Общие сведения. Классификация. Основные параметры	1
14	Насосы. Классификация. Определение теоретического напора. Характеристики ц/б насоса, работа насоса в сети. Основное уравнение центробежного насоса.	1

15	Гидродинамические передачи. Назначение, принцип действия, классификация. Основные параметры. Гидромурфты, гидротрансформаторы.	0,5
16	Гидропривод. Классификация гидроприводов. Рабочие жидкости. Гидродвигатели. Гидроаппаратура направляющая. Гидроаппаратура регулирующая.	1
17	Вспомогательные устройства. Определение основных параметров объемного гидропривода. Дроссельное регулирование, объемное регулирование гидропривода.	0,5
18	Гидропневмоприводы. Гидро-и пневмотранспорт.	0,5
	Всего часов	16

## **2.2. Лабораторные занятия, их наименование, объем в часах для очной формы обучения**

№ п/п	Наименование работ	Количество часов
1	2	3
	Лаборатория «Гидромеханических процессов и аппаратов» ауд. 309 (II)	
1.	Изучение поля скоростей потока в трубопроводах	4
2.	Определение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода	4
3.	Определение энергетических характеристик центробежного вентилятора. Работа центробежного вентилятора на сеть.	4
4.	Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть.	4
	Всего часов	16

## **2.3. Лабораторные занятия, их наименование, объем в часах для очно-заочной формы обучения**

№ п/п	Наименование работ	Количество часов
1	2	3
	Лаборатория «Гидромеханических процессов и аппаратов» ауд. 309 (II)	
1.	Изучение поля скоростей потока в трубопроводах	2
2.	Определение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода	2
3.	Определение энергетических характеристик центробежного вентилятора. Работа центробежного вентилятора на сеть.	3
4.	Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть.	3
	Всего часов	10

## **2.4. Лабораторные занятия, их наименование, объем в часах для заочной и сокращенной формы обучения**



№ п/п	Наименование работ	Количество часов
1	2	3
	Лаборатория «Гидромеханических процессов и аппаратов» ауд. 309 (II)	
1.	Изучение поля скоростей потока в трубопроводах	1
2.	Определение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода	1
3.	Определение энергетических характеристик центробежного вентилятора. Работа центробежного вентилятора на сеть.	1
4.	Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть.	1
	Всего часов	4

Содержание и методика выполнения лабораторных работ изложены в учебных пособиях и методических указаниях, составленных коллективом преподавателей и сотрудников кафедры, и приведены в списке дополнительной литературы [5, 6].

### 2.5 Практические занятия, их объем в часах для очной формы обучения

№ п/п	Наименование темы занятий	Кол-во часов
1	2	3
1.	Физические свойства жидкостей и газов. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики.	2
2.	Определение давления жидкости на плоские и криволинейные стенки.	2
3.	Закон Паскаля, гидравлический пресс. Относительный покой жидкости.	2
4.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение неразрывности.	2
5.	Определение коэффициента гидравлического трения. Потери напора по длине и на местные сопротивления.	2
6.	Расчет гидравлически коротких и длинных трубопроводов.	2
7.	Истечение жидкости через отверстия и насадки при постоянном и переменном напоре.	2
8.	Насосы. Определение теоретического напора. Энергетические характеристики насосов.	2
	Всего часов	16

### 2.6 Практические занятия, их объем в часах для очно- заочной формы обучения

№ п/п	Наименование темы занятий	Кол-во часов
1	2	3
1.	Физические свойства жидкостей и газов. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики.	1
2.	Определение давления жидкости на плоские и криволинейные стенки.	1
3.	Закон Паскаля, гидравлический пресс. Относительный покой жидкости.	1

4.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение неразрывности.	1
5.	Определение коэффициента гидравлического трения. Потери напора по длине и на местные сопротивления.	2
6.	Расчет гидравлически коротких и длинных трубопроводов.	1
7.	Истечение жидкости через отверстия и насадки при постоянном и переменном напоре.	2
8.	Насосы. Определение теоретического напора. Энергетические характеристики насосов.	1
	Всего часов	10

### 2.7 Практические занятия, их объем в часах для заочной и сокращенной формы обучения

№ п/п	Наименование темы занятий	Кол-во часов
1	2	3
1.	Физические свойства жидкостей и газов. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики.	0,5
2.	Определение давления жидкости на плоские и криволинейные стенки.	0,5
3.	Закон Паскаля, гидравлический пресс. Относительный покой жидкости.	0,5
4.	Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение неразрывности.	0,5
5.	Определение коэффициента гидравлического трения. Потери напора по длине и на местные сопротивления.	0,5
6.	Расчет гидравлически коротких и длинных трубопроводов.	0,5
7.	Истечение жидкости через отверстия и насадки при постоянном и переменном напоре.	0,5
8.	Насосы. Определение теоретического напора. Энергетические характеристики насосов.	0,5
	Всего часов	4

### 2.8. Самостоятельная работа и контроль успеваемости для очной формы обучения

№ п./п.	Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1	2	3	4
1.	Проработка лекционного материала по учебной литературе и конспекту	9	ФО
2.	Подготовка к лабораторным работам	8	ОЛР
3.	Подготовка к практическим занятиям	8	
4.	Подготовка к зачету	14	зачет
5.	Изучение тем, не рассмотренных на лекциях	11	ФО, Э
	Всего часов	50	

### 2.9. Самостоятельная работа и контроль успеваемости для

### очно – заочной формы обучения

№ п./п.	Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1	2	3	4
1.	Проработка лекционного материала по учебной литературе и конспекту	5	ФО
2.	Подготовка к лабораторным работам	5	ОЛР
3.	Подготовка к практическим занятиям	5	
4.	Подготовка к зачету	30	зачет
5.	Изучение тем, не рассмотренных на лекциях	23	ФО, зачет
	Всего часов	68	

### 2.10. Самостоятельная работа и контроль успеваемости для заочной и сокращенной формы обучения

№ п./п.	Вид самостоятельных работ	Число часов	Вид контроля успеваемости
1	2	3	4
1.	Проработка лекционного материала по учебной литературе и конспекту	2	ФО
2.	Подготовка к лабораторным работам	2	ОЛР
3.	Подготовка к практическим занятиям	2	
4.	Выполнение контрольных работ	20	КР
5.	Подготовка к зачету	34	зачет
6.	Изучение тем, не рассмотренных на лекциях	26	зачет
	Всего часов	86	

Текущая успеваемость студентов контролируется фронтальным опросом (ФО), опросом по результатам лабораторных работ (ОЛР). Итоговая успеваемость определяется на зачете (з). Студенты допускаются к зачету после прохождения лабораторных работ и защиты контрольных работ (з/о, сфо).

### 2.11. Распределение часов по темам и видам занятий для студентов очной формы обучения

№ п/п	Наименование тем	Всего	Количество часов				Форма контроля успеваемости
			В том числе				
			лекции	лаб. раб.	практ.	сам. раб.	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вводные сведения. Предмет и задачи курса. Основные физические свойства жидкостей и газов на примере плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.	2,5	1	-	1	0,5	ФО зачет
2.	Гидростатика. Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных	4	1	0,5	1	1,5	ФО зачет ОЛР

	единицах. Общие законы и уравнения статики жидкостей и газов. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Виды напора. Закон Паскаля и его практическое применение. Абсолютный и относительный покой жидкости (равновесие) жидких сред						
3.	Сила давления жидкости на плоские, криволинейные стенки. Приборы для измерения давления	3,5	1	0,5	1	1	ФО зачет
4.	Гидродинамика. Скорость и расход жидкости. Установившиеся и неустановившиеся потоки. Общие законы и уравнения динамики жидкостей и газов. Уравнение неразрывности. Дифференциальные уравнения несжимаемой жидкости (уравнение Навье Стокса). Виды движения вязкой жидкости.	4	1	1	1	1	ФО зачет ОЛР
5.	Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой жидкости). Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Некоторые практические применения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.	4,5	1	1	1	1,5	ФО зачет
6.	Общая интегральная форма уравнения количества движения. Подобие гидромеханических процессов. Константы подобия, инварианты подобия. Критерии гидродинамического подобия. Теоремы подобия. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах.	2	-	-	-	2	ФО, зачет
7.	Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса, его критические значения. Скорость и расход жидкости при ламинарном режиме движения жидкости (закон Стокса, уравнение Пуазеля). Турбулентность и ее основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Применение численных методов на ЭВМ.	7,5	1	3	1	2,5	ФО зачет ОЛР
8.	Одномерные потоки жидкостей. Распределение скоростей по сечению потока. Расчет коэффициента гидравлического трения.	5,5	1	2	1	1,5	ФО зачет ОЛР
9.	Потери напора на местные сопротивления. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений.	5,5	1	2	1	1,5	ФО Э ОЛР

10.	Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре. Модуль расхода. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.	3,5	1	-	1	1,5	ФО зачет
11.	Гидравлический расчет трубопроводов.	3,5	1	1	1	0,5	ФО,О ЛР
12.	Неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Гидравлический удар. Формула Жуковского Н.Е. Практическое использование гидроудара.	5,5	1	1	1	2,5	ФО Э
13.	Гидравлические машины. Общие сведения. Классификация. Основные параметры	4,5	1	1	1	1,5	ФО зачет ОЛР
14.	Насосы. Классификация. Определение теоретического напора. Характеристики ц/б насоса, работа насоса в сети. Основное уравнение центробежного насоса.	7	1	3	1	2	ФО Э ОЛР
15.	Гидродинамические передачи. Назначение, классификация. Основные параметры. Гидромолоты, гидротрансформаторы.	4,5	1	-	1	2,5	ФО зачет
16.	Гидропривод. Классификация гидроприводов. Рабочие жидкости. Гидродвигатели. Гидроаппаратура направляющая. Гидроаппаратура регулирующая.	3,5	1	-	1	1,5	ФО зачет
17.	Вспомогательные устройства. Определение основных параметров объемного гидропривода. Дроссельное регулирование, объемное регулирование гидропривода.	3,5	1	-	1	1,5	ФО зачет
18.	Гидропневмоприводы. Гидро-и пневмотранспорт.	4,5	-	-	-	4,5	
19.	Изучение тем, не рассмотренных на лекциях	5				5	
20.	Подготовка к эзачету	14				14	зачет
	Всего	98	16	16	16	50	

### 2.12.Распределение часов по темам и видам занятий для студентов очно – заочной формы обучения

№ п/п	Наименование тем	Все го	Количество часов				Форма контроля успеваемости
			В том числе				
			лекци и	лаб. раб	практ	сам. раб.	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вводные сведения. Предмет и задачи курса. Основные физические свойства жидкостей и газов на примере	2	1	-	-	1	ФО зачет

	плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.						
2.	Гидростатика. Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных единицах. Общие законы и уравнения статики жидкостей и газов. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Виды напора. Закон Паскаля и его практическое применение. Абсолютный и относительный покой жидкости (равновесие) жидких сред	3,5	-	0,5	1	2	ФО зачет ОЛР
3.	Сила давления жидкости на плоские, криволинейные стенки. Приборы для измерения давления	3,5	-	0,5	1	2	ФО зачет
4.	Гидродинамика. Скорость и расход жидкости. Установившиеся и неуставившиеся потоки. Общие законы и уравнения динамики жидкостей и газов. Уравнение неразрывности. Дифференциальные уравнения несжимаемой жидкости (уравнение Навье Стокса). Виды движения вязкой жидкости.	4	1	1	-	2	ФО ОЛР зачет
5.	Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой жидкости). Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Некоторые практические применения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.	4	-	1	1	2	ФО зачет
6.	Общая интегральная форма уравнения количества движения. Подобие гидромеханических процессов. Константы подобия, инварианты подобия. Критерии гидродинамического подобия. Теоремы подобия. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах.	3	-	-	-	3	ФО зачет
7.	Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса, его критические значения. Скорость и расход жидкости при ламинарном режиме движения жидкости (закон Стокса, уравнение Пуазеля). Турбулентность и ее основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Применение численных методов на ЭВМ.	5	1	1	-	3	ФО зачет ОЛР

8.	Одномерные потоки жидкостей. Распределение скоростей по сечению потока. Расчет коэффициента гидравлического трения.	4	-	1	1	2	ФО зачет ОЛР
9.	Потери напора на местные сопротивления. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений.	4	-	1	1	2	ФО зачет ОЛР
10.	Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре. Модуль расхода. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.	3	1	-	-	2	ФО зачет
11.	Гидравлический расчет трубопроводов.	3	1	1	-	1	ФО ОЛР
12.	Неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Гидравлический удар. Формула Жуковского Н.Е. Практическое использование гидроудара.	5	-	1	1	3	ФО зачет
13.	Гидравлические машины. Общие сведения. Классификация. Основные параметры	4	-	1	1	2	ФО зачет ОЛР
14.	Насосы. Классификация. Определение теоретического напора. Характеристики ц/б насоса, работа насоса в сети. Основное уравнение центробежного насоса.	4	-	1	1	2	ФО зачет ОЛР
15.	Гидродинамические передачи. Назначение, классификация. Основные параметры. Гидромурфты, гидротрансформаторы.	3	1	-	-	2	ФО зачет
16.	Гидропривод. Классификация гидроприводов. Рабочие жидкости. Гидродвигатели. Гидроаппаратура направляющая. Гидроаппаратура регулирующая.	4	1	-	1	2	ФО зачет
17.	Вспомогательные устройства. Определение основных параметров объемного гидропривода. Дроссельное регулирование, объемное регулирование гидропривода.	4	1	-	1	2	ФО зачет
18.	Гидропневмоприводы. Гидро-и пневмотранспорт.	5	2	-	-	3	зачет
19.	Подготовка к зачету	30				30	зачет
	Всего	98	10	10	10	68	

### 2.13. Распределение часов по темам и видам занятий для студентов

**заочной формы обучения**

№ п/п	Наименование тем	Всего	Количество часов				Форма контроля успеваемости
			В том числе				
			лекции	лаб. раб.	практич	сам. раб.	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вводные сведения. Предмет и задачи курса. Основные физические свойства жидкостей и газов на примере плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.	1,0	-	-	0,5	0,5	ФО зачет
2	Гидростатика. Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных единицах. Общие законы и уравнения статики жидкостей и газов. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Виды напора. Закон Паскаля и его практическое применение. Абсолютный и относительный покой жидкости (равновесие) жидких сред	2,5	0,5	-	0,5	1,5	ФО зачет
3	Сила давления жидкости на плоские, криволинейные стенки. Приборы для измерения давления	3,5	0,5	-	0,5	2,5	ФО зачет
4	Гидродинамика. Скорость и расход жидкости. Установившиеся и неустановившиеся потоки. Общие законы и уравнения динамики жидкостей и газов. Уравнение неразрывности. Дифференциальные уравнения несжимаемой жидкости (уравнение Навье Стокса). Виды движения вязкой жидкости.	3	-	-	-	3	ФО зачет
5	Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой жидкости). Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Некоторые практические применения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.	4,5	0,5	1	0,5	2,5	ФО зачет ОЛР
6.	Общая интегральная форма уравнения количества движения. Подобие гидромеханических процессов. Константы подобия, инварианты подобия. Критерии	2	-	-	-	2	ФО, зачет



	гидродинамического подобия. Теоремы подобия. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах.						
7	Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса, его критические значения. Скорость и расход жидкости при ламинарном режиме движения жидкости (закон Стокса, уравнение Пуазейля). Турбулентность и ее основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Применение численных методов на ЭВМ.	4	-	1	-	3	ФО зачет ОЛР
8	Одномерные потоки жидкостей. Распределение скоростей по сечению потока. Расчет коэффициента гидравлического трения.	3,5	0,5	1	-	2	ФО зачет ОЛР
9	Потери напора на местные сопротивления. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений.	3	0,5	1	-	1,5	ФО зачет ОЛР
10	Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре. Модуль расхода. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.	4,5	-	-	2	2,5	ФО зачет
11	Гидравлический расчет трубопроводов.	1,5	-	-	-	1,5	ФО,
12	Неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Гидравлический удар. Формула Жуковского Н.Е. Практическое использование гидроудара.	2	0,5	-	-	1,5	ФО зачет
13	Гидравлические машины. Общие сведения. Классификация. Основные параметры	1,5	-	-	-	1,5	ФО, зачет
14	Насосы. Классификация. Определение теоретического напора. Характеристики ц/б насоса, работа насоса в сети. Основное уравнение центробежного насоса.	3	0,5	-	-	2,5	ФО зачет
15	Гидродинамические передачи. Назначение, классификация. Основные параметры. Гидромурфты, гидротрансформаторы.	2	0,5	-	-	1,5	ФО, зачет
16	Гидропривод. Классификация гидроприводов. Рабочие жидкости. Гидродвигатели. Гидроаппаратура направляющая. Гидроаппаратура регулирующая.	1,5	-	-	-	1,5	ФО зачет

17	Вспомогательные устройства. Определение основных параметров объемного гидропривода. Дроссельное регулирование, объемное регулирование гидропривода.	1,5	-	-	-	1,5	ФО зачет
18	Гидропневмоприводы. Гидро-и пневмотранспорт.	3,5	-	-	-	3,5	зачет
19	Выполнение контрольных работ	20				20	
20	Подготовка к зачету	34				34	зачет
	Всего	98	4	4	4	82	

Контрольные работы студентами заочной формы обучения выполняются согласно литературе [4].

### 3. Вопросы к зачету по дисциплине «Гидравлика»

1. Основные физические свойства жидкостей и газов на примере плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.
2. Приборы для измерения давления.
3. Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных единицах.
4. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера.
5. Основное уравнение гидростатики.
6. Пьезометрическая и приведенная высоты, вакуум, напор и удельная потенциальная энергия.
7. Относительный и абсолютный покой жидкости.
8. Закон Паскаля и его практическое применение.
9. Сила давления жидкости на плоскую стенку. Центр давления.
10. Сила давления жидкости на криволинейную стенку. Центр давления.
11. Плавание тел. Закон Архимеда. Остойчивость плавающего тела.
12. Понятие о струйчатой модели потока.
13. Уравнение постоянства расхода для установившегося движения жидкости
14. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости.
15. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной жидкости. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли.
16. Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости.
17. Практические приложения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.
18. Уравнение равномерного движения жидкости (формула Шези).
19. Гидравлический и пьезометрический уклон.
20. Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса и его критические значения. Эпюры скоростей.
21. Расход жидкости при ламинарном режиме движения.
22. Движение жидкости через плоскую щель.
23. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы. Пульсация скоростей и осредненная скорость.
24. Классификация потерь напора.
25. Потери напора на местные сопротивления (внезапное расширение).

26. Потери напора на преодоление сил трения, определение коэффициента гидравлического трения расчетным путем.
27. Расчет трубопровода с непрерывным расходом по его длине.
28. Расчет гидравлически коротких трубопроводов.
29. Расчет сифонного трубопровода.
30. Гидравлический удар в трубопроводе.
31. Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре.
32. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.
33. Поршневые насосы. Устройство. Создаваемый напор. Производительность. Потребляемая мощность. Индикаторная диаграмма поршневого насоса.
34. Производительность центробежного насоса. Законы пропорциональности. Рабочая характеристика насоса. Уравнение центробежного насоса.
35. Центробежные насосы. Классификация центробежных насосов. Устройство и принцип действия. Действительный напор насоса.
36. Воздушные колпаки поршневых насосов.
37. Гидромуфты. Гидротрансформаторы. Назначение. Принцип действия. Характеристики.
38. Распределительная контрольно-регулирующая аппаратура. Назначение. Принцип действия.
39. Дроссельное регулирование гидроприводов. Назначение. Принцип работы.
40. Объемное регулирование гидроприводов. Назначение. Принцип работы.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

##### **Основная учебная литература**

1. Кудинов, В. А. Гидравлика [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. А. Кудинов ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Абрис, 2012. – 199 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/117490/>.

##### **Дополнительная учебная, учебно-методическая литература**

1. Гидравлика [Текст] : сб. описаний лаб. работ по направлениям : 653300 "Эксплуатация транспорта и транспортного оборудования" спец. 190601 "Автомобили и автомобильное хозяйство", 651600 "Технологические машины и оборудование" спец. 150405 "Машины и оборудование лесного комплекса", 656300 "Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств", спец. 250401 "Лесоинженерное дело", 653600 "Транспортное строительство" спец. 270205 "Автомобильные дороги и аэродромы", 660300 "Агроинженерия" спец. 110301 "Механизация сельского хозяйства и 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства", 653300 "Эксплуатация транспорта и транспортного оборудования" 190603 "Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (по отраслям)", 653500 "Строительство спец. 270102 "Промышленное и гражданское строительство", 656300 "Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств" спец. 250403 "Технология деревообработки" / Федеральное агентство по образованию, Сыкт. лесн. ин-т (фил.), С.-Петерб. гос. лесотехн. акад., Каф. теплотехники и гидравлики ; сост. Н. А. Корычев [и др.]. – Сыктывкар : СЛИ, 2006. – 58 с.

2. Гидравлика и гидравлические машины [Текст] : учеб. пособие для студ. направлений бакалавриата 110800 "Агроинженерия", 151000 "Технологические машины и оборудование", 190600 "Эксплуатация транспортных средств", 250400 "Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих

производств" и спец. 190601 "Автомобили и автомобильное хозяйство", 190603 "Сервис транспортных и технологических машин и оборудования", 150405 "Машины и оборудование лесного комплекса", 110301 "Механизация сельского хозяйства", 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства", 250401 "Лесоинженерное дело", 250403 "Технология деревообработки" всех форм обучения / А. Ф. Триандафилов, С. Г. Ефимова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн. ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, Каф. теплотехники и гидравлики. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – 212 с.

3. Гидравлика и гидравлические машины [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. направлений бакалавриата 110800 "Агроинженерия", 151000 "Технологические машины и оборудование", 190600 "Эксплуатация транспортных средств", 250400 "Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств" и спец. 190601 "Автомобили и автомобильное хозяйство", 190603 "Сервис транспортных и технологических машин и оборудования", 150405 "Машины и оборудование лесного комплекса", 110301 "Механизация сельского хозяйства", 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства", 250401 "Лесоинженерное дело", 250403 "Технология деревообработки" всех форм обучения / А. Ф. Триандафилов, С. Г. Ефимова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн. ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, Каф. теплотехники и гидравлики. – Электрон. текстовые дан. (1 файл в формате pdf: 8,7 Мб). – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – on-line. – Систем. требования: Acrobat Reader (любая версия). – Загл. с титул. экрана. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com/ft/301-000222.pdf>.

4. Гидравлика и гидропривод [Текст] : учеб. программа, метод. указ. и контрольные задания к расчетно-графическим работам для студ. спец. 150405, 270205, 190601, 190603, 110301, 110202 очной формы обучения / Федеральное агентство по образованию, Сыкт. лесн. ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова", Каф. теплотехники и гидравлики ; сост.: А. Ф. Триандафилов, С. Г. Ефимова, В. Т. Чупров. – Сыктывкар : СЛИ, 2007. – 76 с.

5. Гидравлика и гидропривод [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов вузов / Н. С. Гудилин [и др.] ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Горная книга, 2007. – 520 с. – (Горное машиностроение). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/83717/>.

6. Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" / под ред. С. П. Стесина. – Москва : Академия, 2005. – 336 с. – (Высшее профессиональное образование).

7. Гидравлика, гидромашин и гидропневмопривод [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. направления подготовки дипломированных специалистов "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" / под ред. С. П. Стесина. – 4-е изд., стер. – Москва : Академия, 2008. – 336 с. – (Высшее профессиональное образование).

8. Гроховский, Д. В. Основы гидравлики и гидропривод [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д. В. Гроховский ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Санкт-Петербург : Политехника, 2012. – 239 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/124242/>.

9. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. 050502 "Технология и предпринимательство" и 050501 "Профессиональное обучение (агроинженерия)" / А. А. Калекин. – Москва : Мир, 2005. – 512 с.

10. Калицун, В. И. Гидравлика, водоснабжение и канализация [Текст] = Termal insulation in industri, theory and valuation : учеб. пособие для вузов / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 2003. – 397 с.
11. Калицун, В. И. Гидравлика, водоснабжение и канализация [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. "Пром. и гражданское стр-во" / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 2004. – 397 с.
12. Кудинов, В. А. Гидравлика [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлениям подготовки (спец.) в области техники и технологии / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 3-е изд., стер. – Москва : Высш. шк., 2008. – 199 с.
13. Лапшев, Н. Н. Гидравлика [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по направлению подготовки "Строительство" / Н. Н. Лапшев. – Москва : Академия, 2007. – 270 с.
14. Лебедев, Н. И. Гидравлика, гидравлические машины и объемный гидропривод [Текст] : учеб. пособие для студ.-заочников по дисциплине "Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод" / Н. И. Лебедев ; М-во образования Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т леса. – 2-е изд., стер. – Москва : МГУЛ, 2003. – 232 с.
15. Малашкина, В. А. Гидравлика [Электронный ресурс] : учебное пособие для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов / В. А. Малашкина ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – 2-е изд., стер. – Москва : Московский государственный горный университет, 2012. – 103 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/99675/>.
16. Марон, В. И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. И. Марон ; Издательство "Лань" (ЭБС). – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 256 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/3189/>.
17. Ухин, Б. В. Инженерная гидравлика [Текст] : учеб. пособие для студ., обучающихся по направлению 653500 "Строительство" / Б. В. Ухин, Ю. Ф. Мельников ; под ред. Б. В. Ухина. – Москва : АСВ, 2007. – 344 с.

#### **Дополнительная литература**

1. Ерахтин, Б. М. Строительство гидроэлектростанций в России [Текст] : учебно-справочное пособие гидростроителя / Б. М. Ерахтин, В. М. Ерахтин. – Москва : АСВ, 2007. – 732 с.
2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик ; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1992. – 672 с.
3. Кремлёвский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ [Текст] : справочник. Кн. 1. Расходомеры переменного перепада давления, расходомеры переменного уровня, тахометрические расходомеры и счетчики / П. П. Кремлёвский ; ред. : Е. А. Шорников. – 5-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2002. – 409 с.
4. Курганов, А. М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения [Текст] : справочник / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров ; под ред. А. М. Курганова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Ленинград : Стройиздат, 1986. – 440 с.
5. Лукиных, А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и докеров по формуле акад. Н. Н. Павловского [Текст] : справ. пособие / А. А. Лукиных, Н. А. Лукиных. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тверь : [б. и.], 2005. – 152 с.
6. Повышение эффективности работы гидропривода лесных машин [Текст] : [монография] / А. Н. Юшков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн.

ин-т – фил. ГОУ ВПО "С.-Петерб. гос. лесотехн. акад. им. С. М. Кирова". – Сыктывкар : СЛИ, 2011. – 108 с.

7. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – 3-е изд., перераб. доп. – Ленинград : Химия, 1982. – 592 с.

8. Химическая гидродинамика [Текст] : справочное пособие / А. М. Кутепов [и др.]. – Москва : БЮРО КВАНТУМ, 1996. – 336 с.

9. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб [Текст] : справ. пособие / Ф. А. Шевелев. – 6-е изд., доп. и перераб. – Тверь : [б. и.], 2005. – 117 с.

## Рекомендации по самостоятельной подготовке студентов

### Методические рекомендации по самостоятельному изучению тем

Самостоятельная работа студентов по изучению отдельных тем дисциплины включает поиск учебных пособий по данному материалу, проработку и анализ теоретического материала [1], контроль знаний по данной теме с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

Наименование темы	Контрольные вопросы и задания
<p>Введение. Предмет и задачи курса. Физические свойства жидкостей и газов на примере плотности, удельного объема, вязкости, поверхностного натяжения.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Что изучает гидравлика?</li> <li>2. Какие жидкости относятся к Ньютоновским?</li> <li>3. Какие физические свойства жидкостей применяются в решении инженерных задач?</li> <li>4. Для чего используется понятие «идеальной» жидкости?</li> <li>5. Чем отличаются плотность и удельный вес жидкости при атмосферном давлении?</li> <li>6. Чему равна сила вязкостного сопротивления?</li> <li>7. В каких единицах в системе СИ измеряются динамическая и кинематическая вязкость?</li> <li>8. Какие сорта рабочих жидкостей применяются в летний и зимний период эксплуатации гидропривода?</li> </ol>
<p><u>Гидростатика.</u> Гидростатическое давление и его свойства. Физический смысл. Размерность в системных и внесистемных единицах. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Виды напора. Закон Паскаля и его практическое применение. Абсолютный и относительный покой (равновесие) жидких сред.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сколько Па в одной атмосфере?</li> <li>2. Чем отличается напор от давления?</li> <li>3. Что такое градиент давления?</li> <li>4. Какова сущность второго свойства гидростатического давления?</li> <li>5. Выразите равновесие жидкости в системе уравнений Эйлера и приведенном уравнении, получите из приведенного уравнения основное уравнение гидростатики.</li> <li>6. Почему пьезометром измеряют сравнительно небольшие давления?</li> <li>7. В каких единицах измеряется гидростатический напор?</li> <li>8. В чем суть графического метода решения практических задач?</li> <li>9. Чему равна центробежная сила при постоянной угловой скорости вращения сосуда?</li> <li>10. Как называется расстояние между центром тяжести и центром давления?</li> </ol>
<p>Сила давления жидкости на плоские, криволинейные стенки. Приборы для измерения давления.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Какая площадь присутствует в формуле определения силы давления на наклонную стенку?</li> <li>2. Где приложена сила давления на наклонную стенку?</li> <li>3. Какой объем жидкости влияет при определении вертикальной силы давления на сферическую стенку?</li> <li>4. Чему равен угол наклона результирующей силы</li> </ol>

	<p>давления на сферическую стенку?</p> <p>5. Почему стеклянная трубка пьезометра (прибора для измерения давления) выбирается не более 12 мм?</p>
<p>Основы кинематики. Гидродинамика. Скорость и расход жидкости. Установившиеся и неустановившиеся потоки. Уравнение неразрывности. Общие законы и уравнения динамики жидкостей и газов. Уравнение неразрывности. Дифференциальные уравнения несжимаемой жидкости (уравнение Навье Стокса). Виды движения вязкой жидкости.</p>	<p>1. Почему гидродинамика рассматривает установившееся движение?</p> <p>2. Как определяется гидравлический радиус?</p> <p>3. Какие параметры включает уравнение неразрывности движущейся жидкости?</p> <p>4. Как зависит скорость жидкости от площади поперечного сечения в трубе при постоянном значении расхода?</p> <p>5. Обоснуйте применение уравнения неразрывности в гидродинамике.</p> <p>6. Напишите формулу Вейсбаха для определения потерь на преодоление местных сопротивлений.</p> <p>7. Как определяются потери напора по длине?</p>
<p>Модель идеальной (невязкой) жидкости. Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой жидкости). Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Некоторые практические применения уравнения Бернулли для определения скорости и расхода жидкости.</p>	<p>1. Чем отличается уравнение Бернулли для идеальной жидкости и для реальной жидкости?</p> <p>2. Что такое трубка Вентури?</p> <p>3. В каких единицах измеряется каждый член уравнения Бернулли?</p> <p>4. Для чего применяют идеальную жидкость?</p> <p>5. Чем отличаются уравнение Бернулли для идеальной и реальной жидкости?</p> <p>6. Из каких потерь складывается потерянный напор?</p> <p>7. Какие слагаемые уравнения Бернулли представляют удельную потенциальную энергию, и какие – удельную кинетическую энергию?</p> <p>8. Какие инженерные задачи, связанные с движущейся жидкостью, решаются с применением уравнения Бернулли?</p>
<p>Общая интегральная форма уравнения количества движения. Подобие гидромеханических процессов. Константы подобия, инварианты подобия. Критерии гидродинамического подобия. Теоремы подобия. Общее уравнение энергии в интегральной и дифференциальной формах.</p>	<p>1. Какими должны быть соотношения геометрических величин, скоростей и действующих сил в двух подобных системах?</p> <p>2. Что такое геометрический масштаб, масштаб времени и масштаб сил, если соблюдено геометрическое, кинематическое и динамическое подобие?</p> <p>3. Физический смысл критериев Фруда и Рейнольдса?</p>
<p>Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса, его критические значения. Скорость и расход жидкости при ламинарном режиме движения жидкости (закон Стокса, уравнение Пуазейля).</p>	<p>1. Какой физический смысл безразмерного числа Рейнольдса?</p> <p>2. Чему равно критическое число Рейнольдса, когда бывает ламинарный режим и наступает турбулентный режим движения жидкости?</p> <p>3. При каких значениях числа Рейнольдса имеют место гидравлически шероховатые поверхности, что</p>



Турбулентность и ее основные характеристики. Уравнение Рейнольдса. Применение численных методов на ЭВМ.	такое эквивалентная шероховатость?
Одномерные потоки жидкостей. Распределение скоростей по сечению потока. Расчет коэффициента гидравлического трения.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чем отличаются эпюры скоростей для ламинарного и турбулентного потока?</li> <li>2. По каким формулам определяется коэффициент трения в турбулентном потоке в случае гидравлически гладкой и шероховатой поверхности?</li> <li>3. Что такое эквивалентная шероховатость?</li> </ol>
Потери напора на местные сопротивления. Формула Вейсбаха. Коэффициенты местных сопротивлений.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Напишите формулу Вейсбаха для определения потерь на преодоление местных сопротивлений.</li> <li>2. Как определяются потери напора по длине?</li> <li>3. В каких единицах измеряется потеря напора на местные сопротивления, и какие виды местного сопротивления имеют большой коэффициент местного сопротивления?</li> <li>4. Какие местные сопротивления бывают в сложном трубопроводе?</li> <li>5. Где больше коэффициент местного сопротивления на вентиле и на повороте?</li> <li>6. От каких факторов зависит кавитация?</li> </ol>
Скорость и расход истечения жидкости из резервуаров при постоянном напоре. Модуль расхода. Продолжительность опорожнения резервуаров при переменном напоре.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чему равен коэффициент расхода при истечении через отверстие и насадок?</li> <li>2. Почему при определении времени истечения жидкости берется разность напоров в емкостях?</li> </ol>
Гидравлический расчет трубопроводов.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чему равен условный проход трубопровода?</li> <li>2. Для чего рекомендуют малые скорости движения жидкости в трубопроводе?</li> <li>3. Объясните ненужность местных сопротивлений при расчете длинных трубопроводов?</li> <li>4. Чему равен коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме движения жидкости?</li> </ol>
Неустановившееся движение несжимаемой жидкости. Гидравлический удар. Формула Жуковского Н.Е. Практическое использование гидроудара.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Какие функции присутствуют при неустановившемся движении жидкости?</li> <li>2. Чему равна скорость распространения ударной волны?</li> <li>3. Чем отличаются прямой и непрямой гидравлический удар?</li> <li>4. Какое движение жидкости рассматривает гидродинамика?</li> </ol>
Гидравлические машины. Общие сведения. Классификация. Основные параметры	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Для чего служат гидравлические машины?</li> <li>2. Чем отличаются динамические гидромашины от объемных?</li> <li>3. Объясните принцип работы, технические показатели, рабочие характеристики центробежных насосов.</li> </ol>

	<p>4. Что такое рабочая точка насоса, его мощность и КПД?</p> <p>5. Назовите основные детали в конструкции одноступенчатого центробежного насоса с односторонним подводом жидкости к рабочему колесу.</p> <p>6. В какую энергию преобразуется часть мощности насоса при его дроссельном регулировании?</p> <p>7. Какие преимущества имеет регулирование изменением частоты вращения рабочего колеса насоса перед дроссельным регулированием?</p> <p>8. Чему равен напор при параллельной работе насосов?</p> <p>9. Чему равна подача при последовательной работе насосов?</p>
<p>Насосы. Классификация. Определение теоретического напора. Характеристики ц/б насоса, работа насоса в сети. Основное уравнение центробежного насоса.</p>	<p>1. На какие насосы классифицируются центробежные насосы по создаваемому напору и числу рабочих колес?</p> <p>2. Чему равен расход многоступенчатого насоса?</p> <p>3. Что такое рабочая точка?</p> <p>4. Какие участки насосной системы включает сеть?</p> <p>5. Чем измеряется напор насоса?</p>
<p>Гидродинамические передачи. Назначение, принцип действия, классификация. Основные параметры. Гидромурфты, гидротрансформаторы.</p>	<p>1. На каком принципе работают гидромурфты и турбины?</p> <p>2. От каких параметров зависят обороты рабочего колеса гидротрансформатора и гидромурфты?</p> <p>3. Что такое «скольжение» колес?</p>
<p>Гидропривод. Классификация гидроприводов. Рабочие жидкости. Гидродвигатели. Гидроаппаратура направляющая. Гидроаппаратура регулирующая.</p>	<p>1. Для чего служит объемный гидропривод?</p> <p>2. Чем обеспечивается взаимосвязь между элементами и устройствами гидропривода?</p> <p>3. Какие аппараты относятся к направляющим и регулирующим?</p> <p>4. Чем обеспечивается возвратно – поступательное движение рабочего органа?</p> <p>5. Какие параметры определяют крутящий момент, мощность и КПД гидропривода вращательного движения?</p> <p>6. Какими аппаратами осуществляется регулирование давления и расхода сжатого воздуха?</p> <p>7. В чем отличие температуры умеренного холодного климата эксплуатации, может ли быть выбран в районах Крайнего Севера аппаратура с обозначением тропического климата?</p> <p>8. Для чего служит пневмораспределитель?</p> <p>9. Чем обеспечивается синхронизация хода штоков пневмоцилиндров?</p> <p>10. Какой способ регулирования скорости рабочего органа целесообразно применять для гидропривода большой мощности?</p>

<p>Вспомогательные устройства. Определение основных параметров объемного гидропривода. Дроссельное регулирование, объемное регулирование гидропривода.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Какие требования предъявляются к гидробаку?</li> <li>2. Для чего служат гидробак, холодильник, фильтр и гидроаккумулятор?</li> <li>3. Для чего предназначены гидрорапределители, какие виды управления существуют?</li> <li>4. На каком принципе работает центрифуга для очистки рабочей жидкости?</li> <li>5. Что такое рабочая температура рабочей жидкости?</li> <li>6. Для чего разрабатывается принципиальная схема?</li> <li>7. Где применяется следящий гидропривод?</li> <li>8. Какие существуют уплотнения подвижных и неподвижных соединений?</li> </ol>
<p>Гидропневмоприводы. Гидро- и пневмотранспорт.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Приведите типы гидроприводов по виду источника энергии.</li> <li>2. Опишите нерегулируемый и регулируемый гидропривод. Приведите способы регулирования.</li> <li>4. Как определить расход жидкости через зазор, образованный двумя цилиндрическими поверхностями.</li> <li>5. Зарисуйте принципиальные схемы гидроприводов.</li> <li>6. В чем преимущества регулируемых гидроприводов. Недостатки гидроприводов.</li> </ol>

### Методические рекомендации по самостоятельной подготовке к практическим занятиям

Самостоятельная работа студентов предусматривает подготовку к практическим занятиям и самоконтроль знаний по темам с помощью нижеперечисленных вопросов и заданий.

Наименование темы занятий	Контрольные вопросы и задания
<p>Физические свойства жидкостей и газов. Гидростатическое давление. Основное уравнение гидростатики.</p>	<p><i>Задача 1.</i> Канистра, заполненная бензином и не содержащая воздуха, нагрелась на солнце до температуры <math>50^{\circ}C</math>. На сколько повысилось давление бензина внутри канистры, если бы она была абсолютно жесткой? Начальная температура бензина <math>20^{\circ}C</math>. Модуль объемной упругости бензина принять равным <math>E = 1300 \text{ кПа}</math>, коэффициент температурного расширения <math>\beta_t = 8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{град}}</math>.</p> <p><i>Задача 2.</i> Определить абсолютное давление воды в трубопроводе если U-образной ртутный манометр, подключенный по схеме (рис. 1-1) показал перепад <math>\Delta h = 500 \text{ мм рт.ст.}</math> Барометрическое давление <math>760 \text{ мм рт.ст.}</math></p>

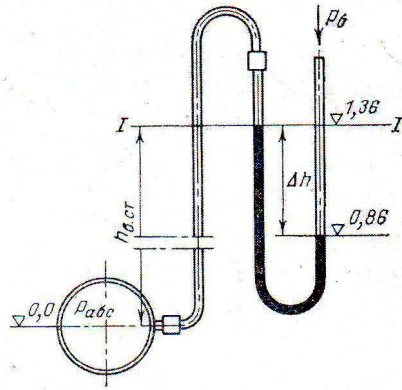


Рис. 1-1

**Задача 3.** Конденсатоотводчик с поплавком, открытым сверху (рис. 1-2), работает на перепаде давлений  $2 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ . Определить наполнение поплавка, при котором клапан откроется, если известны: емкость поплавка  $V = 5 \text{ л}$ , диаметр отверстия выпускного клапана  $d = 5 \text{ мм}$  и масса поплавка  $m = 1,5 \text{ кг}$ . Плотность конденсата  $\rho_{\text{ко}} = 945 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

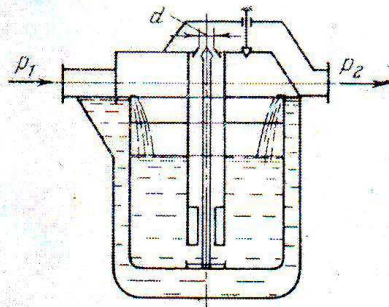


Рис. 1-2

**Задача 4.** Два резервуара, заполненные спиртом и водой, соединены между собой трехколенным манометром, в котором находятся спирт, ртуть, вода и воздух (рис. 1-3). Положение уровней жидкостей измеряется относительно одной общей плоскости. Уровень спирта в левом резервуаре  $h_1 = 0,8 \text{ м}$ , уровень воды в правом -  $h_6 = 0,7 \text{ м}$ . Давление в резервуарах контролируется с помощью манометра и вакуумметра. Определить разность давлений в резервуарах, если в трехколенном манометре установилось следующее положение уровней жидкостей:  $h_2 = 0,5 \text{ м}$ ,  $h_3 = 0,3 \text{ м}$ ,  $h_4 = 0,58 \text{ м}$ ,  $h_5 = 0,15 \text{ м}$  ( $\rho_{\text{сп}} = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $\rho_{\text{рт}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ).

$$\rho_{рт} = 13600 \frac{кг}{м^3}, \rho_{возд} = 1,3 \frac{кг}{м^3}.$$

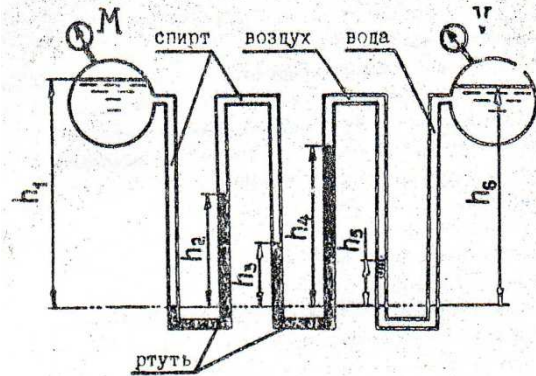


Рис. 1-3

**Задача 5.** Определить массу колокола, имеющего диаметры  $D_1 = 0,1$  м,  $D_2 = 0,2$  м,  $D_3 = 0,4$  м, если глубина его погружения в воду при плавании в закрытом сосуде  $H = 0,3$  м, подъем уровня воды внутри колокола  $h = 0,1$  м, а избыточное давление на поверхности воды вне колокола  $p_m = 20$  кПа (рис. 1-4).

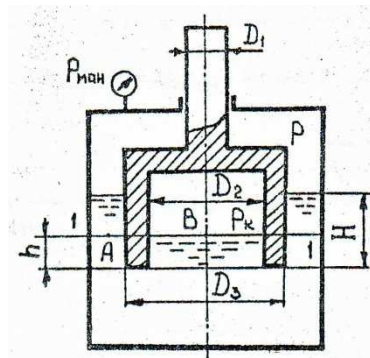


Рис. 1-4

*Контрольные вопросы:*

1. Какие физические свойства жидкостей применяются в решении инженерных задач?
2. Для чего используется понятие «идеальной» жидкости?
3. Чем отличаются плотность и удельный вес жидкости при атмосферном давлении?
4. Чему равна сила вязкостного сопротивления?
5. В каких единицах в системе СИ измеряются динамическая и кинематическая вязкость?

Определение давления жидкости на плоские и криволинейные стенки.

**Задача 1.** Отверстие в боковой вертикальной стенке закрытого резервуара, представляющее собой равносторонний треугольник со стороной  $a = 0,5$  м, закрыто крышкой (рис. 2-1). Определить силу давления воды на крышку, если горизонтальное основание треугольного отверстия расположено на

глубине  $H = 1,5 \text{ м}$ , а манометрическое давление на свободной поверхности  $p_m = 50 \text{ кПа}$ .

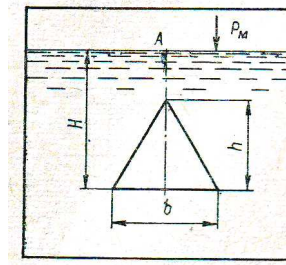


Рис. 2-1

*Задача 2.* Щитовой затвор должен автоматически опрокидываться для пропуска воды при уровне последней  $H_1 \geq 6 \text{ м}$  (рис. 2-2). Щит проворачивается на цапфах  $O$  диаметром  $d = 0,4 \text{ м}$ . Ширина щита  $b = 8 \text{ м}$ , его угол наклона  $\alpha = 60^\circ$ . Найти на каком расстоянии  $x$  должна быть расположена ось поворота щита, если под ним имеется постоянный уровень воды  $H_2 = 3 \text{ м}$ , определить силу  $P$ , воспринимаемую его опорами в момент опрокидывания.

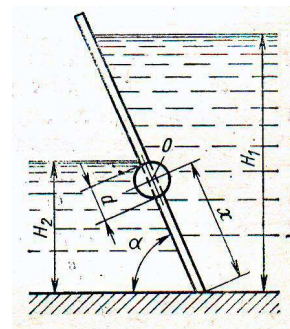


Рис. 2-2

*Задача 3.* Определить силу гидростатического давления воды на 1 м ширины нижней криволинейной части сооружения (рис. 2-4), если  $H = 1,3 \text{ м}$ ,  $r = 0,5 \text{ м}$ .

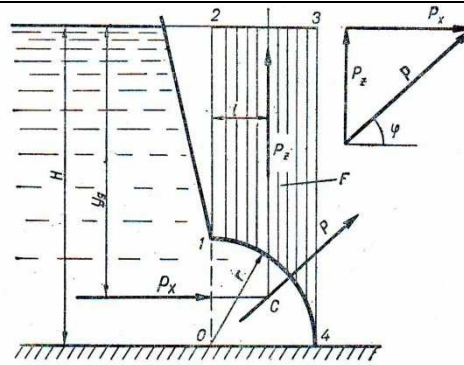


Рис. 2-3

*Контрольные вопросы:*

1. Где приложена сила давления на наклонную стенку?
2. Какой объем жидкости влияет при определении вертикальной силы давления на сферическую стенку?
3. Чему равен угол наклона результирующей силы давления на сферическую стенку?

Закон Паскаля, гидравлический пресс. Относительный покой жидкости.

*Задача 1.* Система из двух поршней (рис. 3-1), соединенных штоком, находится в равновесии. Определить силу, сжимающую пружину. Жидкость, находящаяся между поршнями и в бачке, - масло с плотностью  $\rho = 870 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Диаметры:  $D = 80 \text{ мм}$ ;  $d = 30 \text{ мм}$ ; высота  $H = 1000 \text{ мм}$ ; избыточное давление  $p_0 = 10 \text{ кПа}$ .

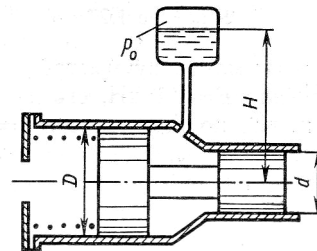


Рис. 3-1

*Задача 2.* Гидравлический домкрат (рис. 3-2) имеет диаметр большего поршня  $D = 250 \text{ мм}$ , а диаметр меньшего поршня  $d = 25 \text{ мм}$ , коэффициент полезного действия  $\eta = 0,8$ . Плечи рычага:  $a = 1 \text{ м}$ ,  $b = 0,2 \text{ м}$ . Определить усилие, которое необходимо приложить на конце рычага, чтобы поднять груз  $G = 20 \text{ кН}$ .

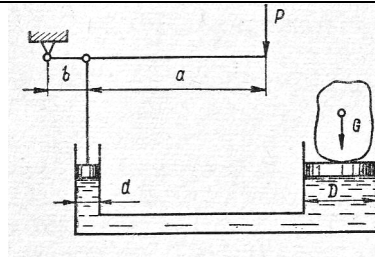


Рис. 3-2

**Задача 3.** Топливный бак автомобиля длиной  $L = 0,6$  м, шириной  $b = 5$  м и высотой  $H = 0,2$  м движется с ускорением  $a = 3,27 \frac{M}{c^2}$  (рис. 3-3). Определить минимальное количество топлива в баке, обеспечивающее его подачу без подсоса воздуха. Считать, что бензопровод установлен в центре горизонтальной проекции бака, его диаметр мал по сравнению с длиной бака,  $h = 10$  мм.

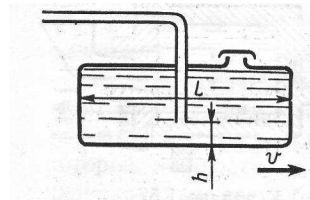


Рис. 3-3

**Задача 4.** В сосуд высотой  $H = 0,3$  м залита жидкость до уровня  $h = 0,2$  м (рис. 3-4). Определить до какой угловой скорости можно раскрутить сосуд, с тем, чтобы жидкость не выплеснулась из него, если его диаметр  $D = 100$  мм.

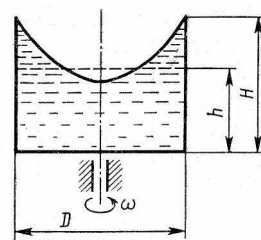


Рис. 3-4

*Контрольные вопросы:*

1. В каких единицах измеряется гидростатический напор?
2. В чем суть графического метода решения практических задач?
3. Чему равна центробежная сила при постоянной



угловой скорости вращения сосуда?  
 4. Как называется расстояние между центром тяжести и центром давления?

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение неразрывности.  
 Определение коэффициента гидравлического трения. Потери напора по длине и на местные сопротивления.

*Задача 1.* Вода движется в трубопроводе диаметром  $D = 25 \text{ мм}$ , в котором находится гидродинамическая трубка диаметром  $d = 25 \text{ мм}$  (рис. 4-1). Определить: а) скорость движения воды в трубопроводе, если показание гидродинамической трубки  $h = 0,1 \text{ м}$ ; б) показание гидродинамической трубки  $h$ , если скорость воды в сечении трубопровода, несущем гидродинамическую трубку,  $w = 2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

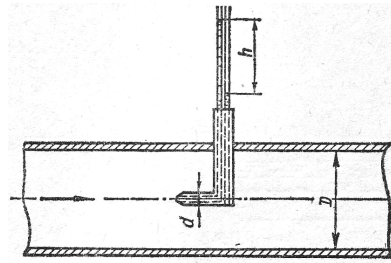


Рис. 4-1

*Задача 2.* Из верхнего резервуара в нижний поступает вода при  $t = 45^{\circ}\text{C}$  по новому стальному сифонному трубопроводу (рис. 4-2) диаметром  $D = 25 \text{ мм}$ , длиной  $l = 14 \text{ м}$  и расходом  $V = 0,5 \frac{\text{л}}{\text{с}}$ , а расстояние от начала трубопровода до сечения 1-1 равно  $4 \text{ м}$ . Определить: а) разность уровней  $H$  в резервуарах; б) превышение наивысшей точки сифона над уровнем воды в верхнем резервуаре  $h$  при условии, что полное давление  $p_1$  в сечении 1-1 не должно быть менее  $50 \text{ кПа}$ ; в) вакуум в наивысшей точке сифона при превышении ее отметки над уровнем воды в верхнем резервуаре  $h = 2,5 \text{ м}$ .

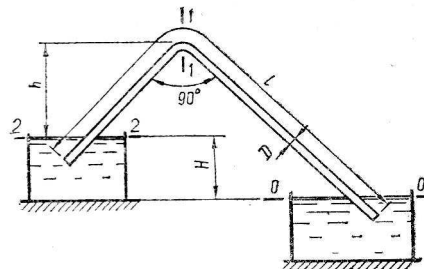


Рис. 4-2

**Задача 3.** Центробежный насос (рис. 4-3) подает воду с температурой  $t = 15^{\circ}\text{C}$  по стальной трубе диаметром  $d = 125\text{ мм}$  и длиной  $l_n = 27\text{ м}$  при геометрической высоте нагнетания  $h_n = 30\text{ м}$ . Определить: а) расход воды в трубопроводе, если в сечении  $x-x$  давление  $p_x = 0,26\text{ МПа}$ ; б) давление  $p_x$  в сечении  $x-x$  при расходе  $V = 16\frac{\text{л}}{\text{с}}$ .

*Примечание:* В первом приближении при решении задачи следует принимать квадратичную область гидравлических сопротивлений и затем уточнить значение  $\lambda$ .

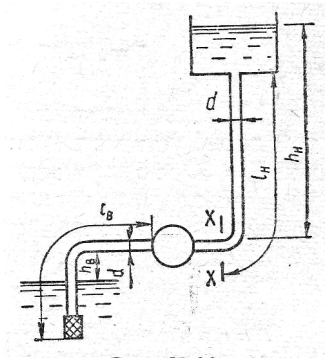


Рис. 4-3

**Задача 4.** Резервуары  $A$  и  $B$  соединены горизонтальной чугунной трубой переменного сечения (рис 4-4) с длинами участков  $l_1 = 10\text{ м}$ ,  $l_2 = 6\text{ м}$  и диаметрами  $d_1 = 50\text{ мм}$  и  $d_2 = 75\text{ мм}$ . По трубе движется вода при температуре  $t = 18^{\circ}\text{C}$  и напоре  $H = 8\text{ м}$ . Определить: а) расход в трубопроводе и построить пьезометрическую линию, если в резервуаре  $A$  манометрическое давление на свободной поверхности воды  $p_m = 0,02\text{ МПа}$ , а  $h = 1\text{ м}$ ; б) абсолютное давление  $p_0$  на свободной поверхности воды в резервуаре, необходимое для пропуска воды по трубе с расходом  $V = 10\frac{\text{л}}{\text{с}}$  и  $h = 2\text{ м}$ .

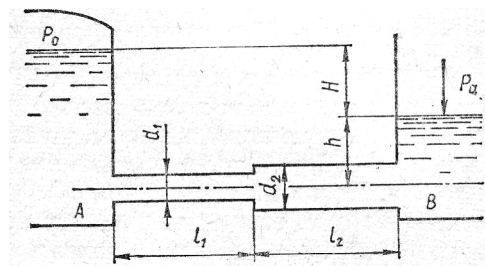


Рис.4-4

*Контрольные вопросы:*

1. Чем отличается уравнение Бернулли для идеальной жидкости и для реальной жидкости?
2. Для чего применяют идеальную жидкость?
3. Как определяются потери напора по длине?
4. В каких единицах измеряется потеря напора на местные сопротивления, и какие виды местного сопротивления имеют большой коэффициент местного сопротивления?
5. Какие местные сопротивления бывают в сложном трубопроводе?

Расчет гидравлически коротких и длинных трубопроводов.

*Задача 1.* Определить давление в напорном баке  $p$ , необходимое для получения скорости истечения из брандспойта  $w_2 = 20 \frac{м}{с}$  (рис. 5-1). Длина шланга  $l = 20 м$ ; диаметр  $d_1 = 20 мм$ ; диаметр выходного отверстия брандспойта  $d_2 = 10 мм$ . Высота уровня воды в баке над отверстием брандспойта  $H = 5 м$ . Учесть местные гидравлические сопротивления при входе в трубу  $\xi_1 = 0,5$ ; в кране  $\xi_2 = 3,5$ ; в брандспойте  $\xi_3 = 0,1$ , который отнесен к скорости  $w_2$ . Шланг считать гидравлически гладким. Вязкость воды  $\nu = 0,01 Ст$ .

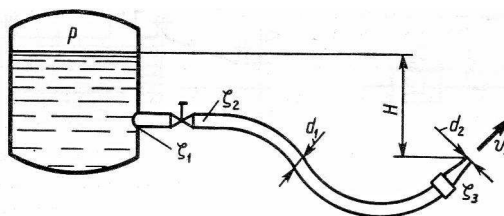


Рис. 5-1

*Задача 2.* Вода перетекает из бака  $A$  в резервуар  $B$  по трубе диаметром  $d = 25 мм$  и длиной  $l = 10 м$  (рис. 5-2). Определить расход воды, если избыточное давление в баке  $p_1 = 200 кПа$ ; высоты уровней  $H_1 = 1 м$ ,  $H_2 = 5 м$ . Режим истечения считать турбулентным. Коэффициенты сопротивления принять: на входе  $\xi_1 = 0,5$ ; в вентиле  $\xi_2 = 4$ ; в коленах  $\xi_3 = 0,2$ ; на трение  $\lambda = 0,025$ .

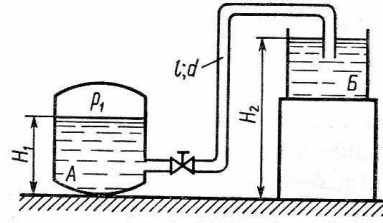


Рис. 5-2

**Задача 3.** Определить расход воды, протекающий из верхнего в нижний резервуар по системе труб, показанной на схеме (рис. 5-3). Разность уровней воды в баках  $H = 6$  м. Диаметры труб (мм) указаны на схеме. Длина труб:  $l_1 = 100$  м,  $l_2 = 200$  м,  $l_3 = 100$  м. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб.

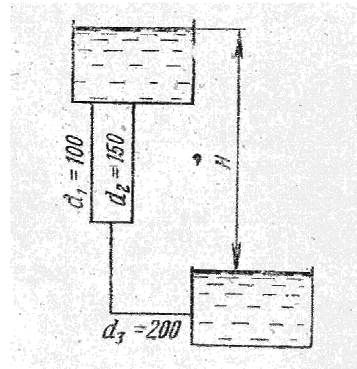


Рис. 5-3

**Контрольные вопросы:**

1. Чему равен условный проход трубопровода?
2. Для чего рекомендуют малые скорости движения жидкости в трубопроводе?
3. Объясните ненужность местных сопротивлений при расчете длинных трубопроводов?

Истечение жидкости через отверстия и насадки при постоянном и переменном напоре.

**Задача 1.** Сравнить расходы при перетекании воды из верхнего открытого бака в нижний (рис.6-1) через цилиндрическую трубу диаметром  $d = 300$  мм и через диффузор с тем же диаметром входа и выходным диаметром  $D = 600$  мм, если уровни в баках постоянны, а высоты  $a = 0,8$  м,  $b = 1,4$  м,  $c = 0,6$  м. Коэффициент сопротивления плавно сходящегося входного участка  $\xi = 0,05$ , коэффициент потерь в диффузоре  $\xi_l = 0,25$  и коэффициент сопротивления трения в трубе  $\lambda = 0,025$ .

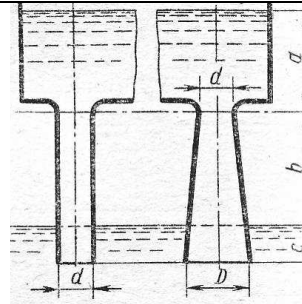


Рис. 6-1

**Задача 2.** Сосуд «Мариотта» представляет собой плотно закрытый сосуд (рис. 6-2), в крышке которого укреплена трубка, сообщающая сосуд с атмосферой. Трубка может быть укреплена на различной высоте. В стенке сосуда имеется отверстие диаметром  $d_0 = 10 \text{ мм}$ , через которое происходит истечение в атмосферу. Какое давление установится в сосуде на уровне нижнего обреза трубки при истечении? Определить скорость истечения и опорожнения сосуда «Мариотта» от верха до нижнего обреза трубки. Объемом жидкости в трубке и сопротивлением при истечении пренебречь ( $\varepsilon = 1$ ).

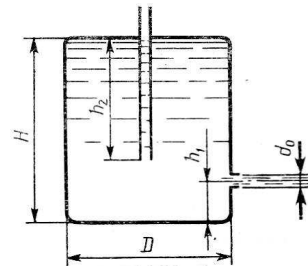


Рис. 6-2

*Контрольные вопросы:*

1. Чему равен коэффициент расхода при истечении через отверстие и насадок?
2. Почему при определении времени истечения жидкости берется разность напоров в емкостях?

Насосы. Определение теоретического напора. Энергетические характеристики насосов.

**Задача 1.** Центробежный насос с заданной при  $n = 1600 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$  характеристикой (рис. 7-1) перекачивает воду из резервуара с отметкой  $\nabla 5 \text{ м}$  в резервуар с отметкой  $\nabla 16 \text{ м}$  по трубопроводам размерами  $l_1 = 10 \text{ м}$ ,  $d_1 = 100 \text{ мм}$  ( $\sum \xi_1 = 2$ ,  $\lambda_1 = 0,025$ ) и  $l_2 = 30 \text{ м}$ ,  $d_2 = 75 \text{ мм}$  ( $\sum \xi_2 = 12$ ,  $\lambda_2 = 0,027$ ).

а) определить подачу, напор насоса, его мощность. б) найти частоту вращения насоса, необходимую для увеличения его подачи на 50 %.

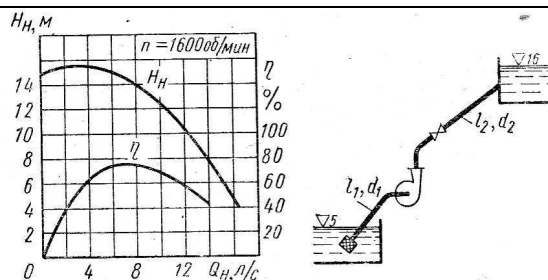


Рис. 7-1

**Задача 2.** Центробежный насос осуществляет циркуляцию воды в кольцевом трубопроводе с компенсационным бачком, открытым в атмосферу (рис.7-2). Определить мощность при  $n = 900 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$  (характеристика насоса задана), если температура перекачиваемой воды  $60^{\circ}\text{C}$ , приведенная длина трубопровода (с учетом местных сопротивлений) 200 м, его диаметр 0,1 м и коэффициент сопротивления трения 0,025.

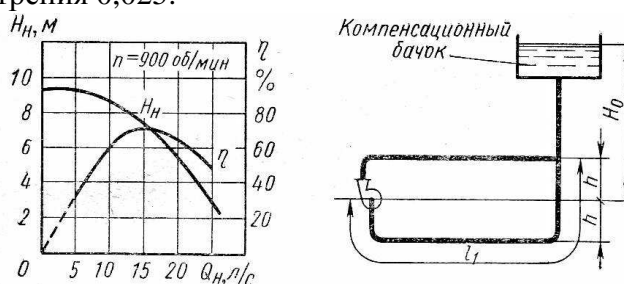


Рис.7-2

**Контрольные вопросы:**

1. На какие насосы классифицируются центробежные насосы по создаваемому напору и числу рабочих колес?
2. Чему равен расход многоступенчатого насоса?
3. Что такое рабочая точка?
4. Какие участки насосной системы включает сеть?

### Методические рекомендации по самостоятельной подготовке к лабораторным работам

Самостоятельная работа студентов по подготовке к лабораторным работам по сборнику описаний лабораторных работ, оформлению отчетов и защите лабораторных работ включает проработку и анализ теоретического материала, описание проделанной экспериментальной работы с приложением графиков, таблиц, расчетов, а также самоконтроль знаний по теме лабораторной работы с помощью нижеперечисленных контрольных вопросов и заданий.

Наименование темы	Контрольные вопросы и задания
-------------------	-------------------------------

<p>Изучение поля скоростей потока в трубопроводах.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. В чем отличие местной (локальной) скорости от средней скорости при течении газа или жидкости по трубопроводу?</li> <li>2. Режимы движения потоков, критерий Рейнольдса.</li> <li>3. Эпюры скоростей для ламинарного и турбулентного потоков.</li> <li>4. Как рассчитывается средняя скорость потока газа в трубопроводе?</li> <li>5. Соотношение средней и максимальной скоростей для ламинарного и турбулентного потоков.</li> <li>6. Как устроена напорная трубка?</li> <li>7. Как устроен и работает микроанометр?</li> <li>8. Определение плотности воздуха с учетом его влажности.</li> </ol>
<p>Определение гидравлических сопротивлений напорного трубопровода.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. На преодоление каких потерь затрачивается энергия при движении жидкости по трубопроводу?</li> <li>2. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?</li> <li>3. Что такое средняя скорость потока?</li> <li>4. Как влияет шероховатость на потери энергии?</li> <li>5. Как экспериментально определить коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления?</li> <li>6. Как проявляются на изменение величины коэффициента трения условия протекания жидкости при различных режимах движения?</li> <li>7. Как определить шероховатость трубы?</li> <li>8. Почему сужение, расширение, вентиль, муфтовое закругление оказывают различные сопротивления?</li> <li>9. Как в работе измеряют расход воды, текущей по трубопроводу?</li> <li>10. Физический смысл критериев Эйлера и Рейнольдса?</li> <li>11. Как определить полный перепад давления (напор) в системе?</li> </ol>
<p>Определение энергетических характеристик центробежного вентилятора. Работа центробежного вентилятора на сеть.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Работа и устройство центробежного вентилятора.</li> <li>2. Как устроена и работает гидродинамическая трубка?</li> <li>3. Почему при определении характеристики вентилятора можно изменять расход воздуха сменной шайбой, а при определении характеристики сети нельзя?</li> <li>4. Какой физический смысл имеют характеристика сети и рабочая точка?</li> <li>5. В чем отличие дифференциального микроанометра от обычного дифманометра?</li> <li>6. Для чего служит тахометр?</li> </ol>

	7. Для чего проверяют значения критерия Рейнольдса при наименьшем расходе воздуха?
Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть.	1. Какое назначение имеет спиральный улиткообразный канал? 2. Какие зависимости называются энергетическими характеристиками насоса? 3. Что представляют собой законы пропорциональности? 4. Из чего складывается напор, теряемый в сети? 5. Какой физический смысл имеет рабочая точка? 6. Какой физический смысл имеет характеристика сети? 7. Почему центробежный насос пускают в работу при закрытой задвижке на нагнетательной линии?

### Методические рекомендации по самостоятельному выполнению контрольных работ для студентов заочной и сокращенной форм обучения

Согласно учебному плану по специальности предусмотрено выполнение двух контрольных работ. Каждый студент выполняет две контрольные работы по индивидуальному заданию.

Номера задач определяются по таблице в зависимости от сочетания букв фамилии студента (контрольная работа № 1 – три задачи, контрольная работа № 2 – три задачи). Номер первой задачи устанавливается по первой букве фамилии, второй – по второй букве фамилии, третьей – по третьей букве фамилии. Вариант исходных данных к задачам устанавливается по последней цифре зачетной книжки студента.

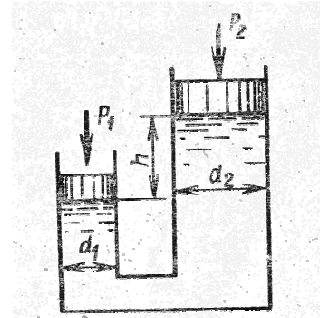
Например, фамилия студента *Иванов*, номера задач: контрольная работа № 1 – 2, 6, 11; контрольная работа № 2 – 17, 21, 26.

Буква фамилии	Номера задач в контрольных работах					
	Задача 1	Задача 2	Задача 3	Задача 4	Задача 5	Задача 6
а, б, в, г, д, е, ё	1	6	11	16	21	26
ж, з, и, к, л	2	7	12	17	22	27
м, н, о, п, р, с	3	8	13	18	23	28
т, у, ф, х, ц, ч	4	9	14	19	24	29
ш, щ, ь, ы, ь, э, ю, я	5	10	15	20	25	30

### Задачи контрольных работ

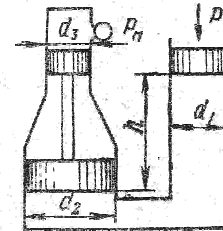


1. На поршень одного из сообщающихся сосудов, наполненных водой, действует сила  $P_1 = \dots$ кН. Какую силу  $P_2$  нужно приложить ко второму поршню, чтобы уровень воды под ним был  $h = \dots$ м выше уровня воды под первым поршнем? Диаметр первого поршня  $d_1 = \dots$ мм,  $d_2 = \dots$ мм.



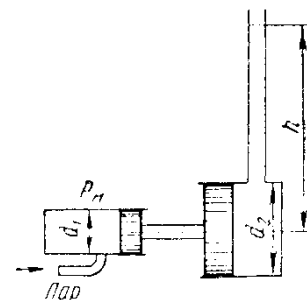
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1$ , кН	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5
$P_2$ , кН	0,4	0,6	0,8	0,5	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5
$d_1$ , мм	200	200	150	300	300	200	200	150	300	250
$d_2$ , мм	400	300	300	450	600	300	400	300	450	500
Ответ: $P_2$ , кН	1,90	1,37	3,43	1,90	3,62	1,08	2,59	3,69	1,01	3,05

2. Определить манометрическое давление  $p_m$  в верхней части одного из сообщающихся сосудов, наполненных водой, под действием силы  $P$ , приложенной к поршню правого сосуда. Исходные данные:  $P = \dots$ кН,  $d_1 = \dots$ мм,  $d_2 = \dots$ мм,  $d_3 = \dots$ мм,  $h = \dots$ м.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ , кН	200	100	300	250	150	400	300	200	500	350
$d_1$ , мм	200	150	250	200	150	250	200	150	250	200
$d_2$ , мм	400	300	500	300	500	400	500	400	300	300
$d_3$ , мм	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150
$h$ , м	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
Ответ: $p_m$ , МПа	1,12	0,25	1,71	0,35	2,34	0,64	2,62	0,87	1,01	0,49

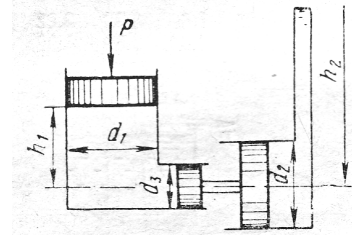
3. Определить высоту  $h$ , на которую может поднять воду прямодействующий паровой насос при следующих данных: диаметр цилиндров  $d_1 = \dots$ мм,  $d_2 = \dots$ мм, манометрическое давление в паровом цилиндре  $p_m = \dots$ МПа.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_m$ , кН	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3
$d_1$ , мм	100	100	100	150	150	150	200	200	200	200
$d_2$ , мм	200	250	300	250	300	350	300	350	400	450

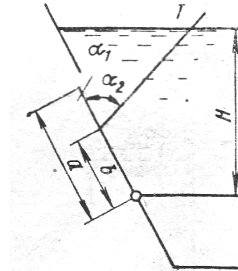
Ответ: $h$ , мН	7,5	6,4	5,51	18,1	10,0	5,55	17,8	9,8	12,5	5,93
-----------------	-----	-----	------	------	------	------	------	-----	------	------

4. Какую силу  $P$  нужно приложить к поршню левого сосуда, наполненного водой, чтобы уравновесить давление воды на поршень правого сосуда? Исходные данные:  $d_1 = \dots$  мм,  $d_2 = \dots$  мм,  $d_3 = \dots$  мм,  $h_1 = \dots$  м,  $h_2 = \dots$  м.



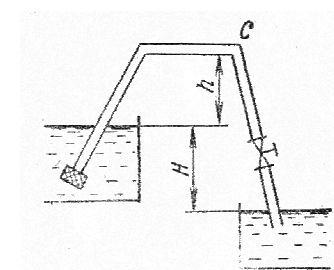
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d_1$ , мм	300	250	300	350	250	200	250	300	300	250
$d_2$ , мм	400	300	300	500	500	300	450	600	600	450
$d_3$ , мм	200	150	200	250	200	100	150	200	250	200
$h_1$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$h_2$ , м	1,2	1,4	2,8	1,5	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0
Ответ: $P$ , кН	3,04	2,45	3,95	4,99	2,62	2,10	3,24	4,59	3,50	2,04

5. Квадратное отверстие со стороной  $a = \dots$  м в наклонной стенке резервуара с водой закрыто поворотным щитом. Определить натяжение каната  $T$  при следующих данных:  $b = \dots$  м,  $H = \dots$  м,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots$  °



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$ , м	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,8
$b$ , м	0,4	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6
$H$ , м	1,2	1,1	1,6	1,4	1,3	1,8	1,6	1,5	2,0	1,7
$\alpha_1 = \alpha_2$ °	60	45	30	60	45	30	60	45	30	45
Ответ: $T$ , кН	2,66	5,23	21,11	2,63	5,57	20,95	5,21	10,16	33,33	7,98

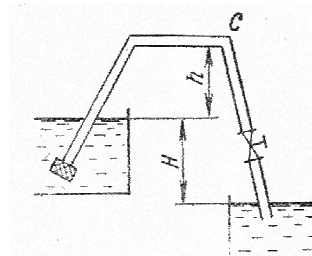
6. Из одного резервуара в другой вода поступает по сифонному трубопроводу длиной  $l = \dots$  м и диаметром  $d = \dots$  мм. Определить расход воды  $V$  при разности уровней в резервуарах  $H = \dots$  м. Трубопровод снабжен приемным клапаном с сеткой ( $\xi_{\text{кл}} = 5$ ) и задвижкой ( $\xi_{\text{зад}} = 4$ ). Потерями напора в коленах и на выход из трубы пренебречь. Коэффициент сопротивления трения  $\lambda = 0,03$ . Найти вакуум в опасной точке сифона, если дина участка трубопровода до этой точки  $l_1 = \dots$  м и ее возвышение над уровнем воды в верхнем резервуаре  $h = \dots$  м.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l$ , м	30	40	50	40	50	30	50	30	40	40

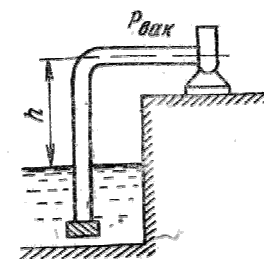
$d$ , мм	75	100	75	100	75	100	75	100	75	100
$H$ , м	5	6	6	5	7	5	5	6	5	7
$l_1$ , м	20	25	30	25	30	20	30	20	25	25
$h$ , м	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Ответ: $V$ , л/с	9,5	18,6	8,9	17,0	9,6	18,4	8,1	20,1	8,7	20,1
$h_{\text{вак}}$ , м	5,4	6,9	5,9	6,3	6,4	6,4	5,2	7,1	5,2	7,6

7. По сифонному трубопроводу длиной  $l = \dots$  м и диаметром  $d = \dots$  мм нужно обеспечить расход бензина  $V = \dots$  л/с. Определить необходимую разность уровней в резервуарах  $H$  и вакуум  $p_{\text{вак}}$  в опасной точке сифона С, если длина участка трубопровода до этой точки  $l_1 = \dots$  м, а ее возвышение над уровнем в верхнем резервуаре  $h = \dots$  м. Трубопровод имеет приемный клапан с сеткой ( $\xi_{\text{кл}} = 6$ ) и задвижку ( $\xi_{\text{зад}} = 3$ ). Потери на поворотах не учитывать. Коэффициент сопротивления трения  $\lambda = 0,025$ . Объемный вес бензина  $\rho_6 = 750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .



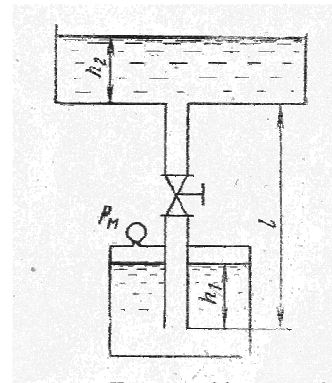
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l$ , м	20	30	40	20	30	40	20	30	40	30
$d$ , мм	100	75	100	75	100	75	100	75	100	75
$V$ , л/с	18,7	7,8	16,0	11,0	17,1	9,3	16	10	16	10
$l_1$ , м	10	15	20	10	15	20	10	15	20	15
$h$ , м	4	3	2	2	4	3	4	2	3	3
Ответ: $H$ , м	4	3	4	5	4	5	3	5	4	5
$p_{\text{вак}}$ , кПа	51	37	34	40	50	46	45	39	42	47

8. Определить максимально допустимую высоту установки насоса  $h$  над уровнем воды в бассейне при следующих данных: производительность насоса  $V = \dots$  л/с; допустимый вакуум во всасывающей трубке  $p_{\text{вак}} = \dots$  кПа; длина всасывающей трубы  $l = \dots$  м; диаметр  $d = \dots$  мм. Всасывающая труба снабжена приемным клапаном с сеткой ( $\xi_{\text{кл}} = 6$ ) и имеет сварное колено ( $\xi_{\text{кол}} = 1,2$ ). Коэффициент сопротивления трения определить по эквивалентной шероховатости  $\Delta = 0,2$  мм, предполагая наличие квадратичной зоны сопротивления.



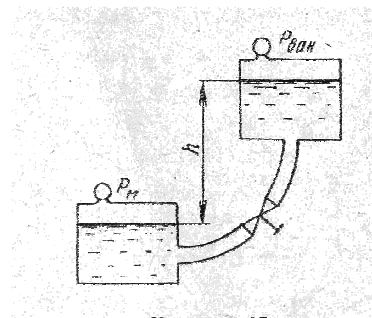
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	й 3	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	30	15	45	15	45	30	45	30	15	30
$l$ , м	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10
$d$ , мм	200	150	250	150	250	200	250	200	150	200
$p_{\text{вак}}$ , кПа	60	65	60	65	60	65	60	65	60	65
Ответ: $h$ , м	5,62	6,13	5,63	6,19	5,64	6,08	5,66	6,10	5,64	6,12

9. Вода подается из нижнего закрытого бака в верхний открытый бак по вертикальной трубе за счет избыточного давления в нижнем баке  $p_m = \dots$ кПа. Определить расход воды  $V$  при следующих данных:  $d = \dots$ мм,  $l = \dots$ м,  $h_1 = h_2$ . Коэффициент сопротивления трения определить по эквивалентной шероховатости  $\Delta = 0,2$  мм, предполагая наличие квадратичной зоны сопротивления. Коэффициенты местных сопротивлений: входа в трубу  $\xi_{вх} = 0,5$ , вентиля  $\xi_{вент} = 4,5$ , выхода из трубы  $\xi_{вых} = 1,0$ .



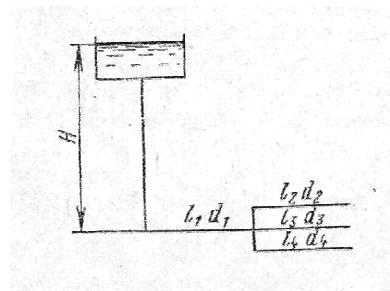
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l$ , м	3	3,5	4	3,5	4	3	4	3	3,5	3
$d$ , мм	100	125	150	150	125	100	125	100	100	125
$p_m$ , кПа	65	65	65	70	70	70	75	80	75	75
Ответ: $V$ , л/с	24,9	36,4	47,9	57,0	36,0	26,7	39,0	29,8	26,6	44,5

10. Из нижнего бака с избыточным давлением  $p_m = \dots$ кПа по новой стальной трубе подается бензин в верхний бак, в котором поддерживается вакуум  $p_{вак} = \dots$ кПа. Разность уровней в баках  $h = \dots$ м, длина трубы  $l = \dots$ м, диаметр  $d = \dots$ мм. При каком значении коэффициента сопротивления вентиля  $\xi_{вент}$  будет подаваться расход  $V = \dots$ л/с? Потерями на вход в трубу и выход из нее пренебречь. Коэффициент сопротивления трения определить по формуле П.Н. Коцакова для гидравлически гладких труб. Объемный вес бензина  $\rho_0 = 750$  кг/м<sup>3</sup>, кинематический коэффициент вязкости  $\nu_0 = 0,008$ см<sup>2</sup>/с.



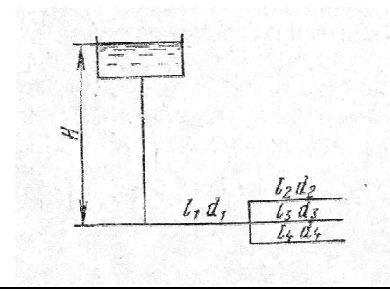
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_m$ , кПа	30	45	60	75	90	90	75	60	45	30
$p_{вак}$ , кПа	60	45	30	30	15	30	15	45	30	75
$h$ , м	2	3	4	2	3	4	2	3	4	4
$l$ , м	10	12	14	16	18	10	15	14	16	18
$d$ , мм	75	100	75	100	75	100	75	100	75	100
$V$ , л/с	18	30	16	40	20	40	20	35	16	35
Ответ: $\xi_{вент}$	9,7	10,2	8,8	6,9	6,8	7,7	7,0	8,8	5,7	7,4

11. Определить общий расход воды  $V$ , поступающей по системе труб под напором  $H = \dots$  м. Диаметр труб  $d_1 = \dots$  мм,  $d_2 = d_3 = d_4 = \dots$  мм. Длины труб  $l_1 = \dots$  м,  $l_2 = l_3 = l_4 = \dots$  м. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб.



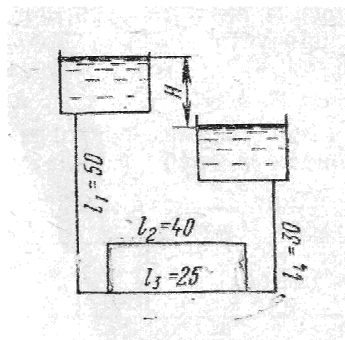
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$ , м	2,27	7,1	6,02	4,61	2,68	4,64	5,12	2,72	2,67	2,6
$d_1$ , мм	150	75	100	125	150	125	150	200	100	125
$K_1$ , л/с	179,4	28,7	61,4	110,8	179,4	110,8	179,4	383,7	61,4	110,8
$d_2, d_3, d_4$ , мм	125	50	75	100	125	100	125	150	75	100
$K_2, K_3, K_4$ , л/с	110,8	9,9	28,7	61,4	110,8	61,4	110,8	179,4	28,7	61,4
$l_1$ , м	160	40	80	120	160	120	160	200	80	120
$l_2 = l_3 = l_4$ , м	80	20	40	60	80	60	80	100	40	60
Ответ: $V$ , л/с	20	10	15	20	25	20	30	40	10	15

12. Определить при каком напоре  $H$  система труб пропустит расход воды  $V = \dots$  л/с. Диаметры труб:  $d_1 = \dots$  мм,  $d_2 = d_3 = d_4 = \dots$  мм. Длины труб:  $l_1 = \dots$  м,  $l_2 = l_3 = l_4 = \dots$  м. При расчете воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	15	30	20	20	20	10	10	25	15	40
$d_1$ , мм	100	150	150	125	125	75	100	150	125	200
$K_1$ , л/с	61,4	179,4	179,4	110,8	110,8	28,7	61,4	179,4	110,8	383,7
$d_2, d_3, d_4$ , мм	75	125	125	100	100	50	75	125	100	150
$K_2, K_3, K_4$ , л/с	28,7	110,8	110,8	61,4	61,4	9,9	28,7	110,8	61,4	179,4
$l_1$ , м	80	160	160	120	120	40	80	100	120	200
$l_2 = l_3 = l_4$ , м	40	80	80	60	60	20	40	80	60	100
Ответ: $H$ , м	6,02	5,12	2,27	4,64	4,61	7,10	2,67	2,68	2,60	2,72

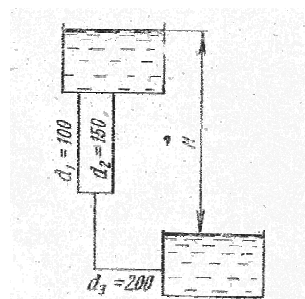
13. Определить при какой разности уровней воды в баках  $H$  по системе труб будет протекать расход воды  $V = \dots$  л/с. Диаметры труб  $d_1 = \dots$  мм,  $d_2 = \dots$  мм,  $d_3 = \dots$  мм,  $d_4 = \dots$  мм. Длины труб указаны на схеме. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб.



Исходные	Значения для вариантов
----------	------------------------

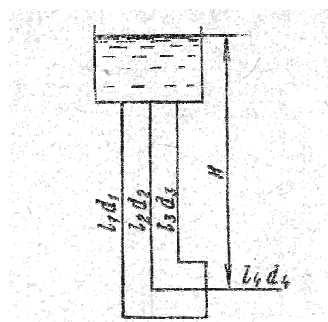
данные	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	10	12	14	16	18	18	16	14	12	10
$d_1$ , мм	100	125	125	100	100	125	125	100	100	125
$K_1$ , л/с	61,4	110,8	110,8	61,4	61,4	110,8	110,8	61,4	61,4	110,8
$d_2$ , мм	75	100	100	75	100	75	100	75	75	100
$K_2$ , л/с	28,7	61,4	61,4	28,7	61,4	28,7	61,4	28,7	28,7	61,4
$d_3$ , мм	100	75	100	75	75	100	100	75	100	75
$K_3$ , л/с	61,4	28,7	61,4	28,7	28,7	61,4	61,4	28,7	61,4	28,7
$d_4$ , мм	125	150	150	125	125	150	150	125	125	150
$K_4$ , л/с	110,8	179,4	179,4	110,8	110,8	179,4	179,4	110,8	110,8	179,4
Ответ: $H$ , м	1,93	1,32	1,39	6,50	6,46	2,78	1,81	4,95	2,78	0,92

14. Определить расход воды, протекающий из верхнего в нижний резервуар по системе труб, показанной на схеме. Разность уровней воды в баках  $H = \dots$  м. Диаметры труб (мм) указаны на схеме. Длина труб:  $l_1 = \dots$  м,  $l_2 = \dots$  м,  $l_3 = \dots$  м. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб:  $K_1 = 61,4$  л/с,  $K_2 = 179,4$  л/с,  $K_3 = 383,7$  л/с.



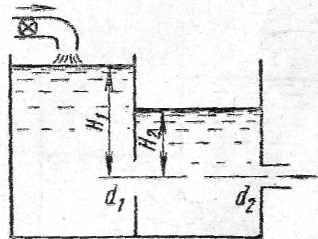
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$ , м	6	8	10	12	14	14	12	10	8	6
$l_1$ , м	100	90	75	65	50	70	85	75	65	90
$l_2$ , м	200	180	150	130	100	140	170	150	130	180
$l_3$ , м	100	130	150	170	200	180	160	150	120	110
Ответ: $V$ , л/с	41,0	47,9	55,7	63,0	70,7	65,8	58,3	55,7	54,7	42,4

15. Определить при каком напоре  $H$  по системе труб будет протекать расход воды  $V \dots$  л/с. Диаметры труб:  $d_1 = d_2 = d_3 = \dots$  мм,  $d_4 = \dots$  мм. Длина труб:  $l_1 = l_2 = l_3 = \dots$  м,  $l_4 = \dots$  м. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб.



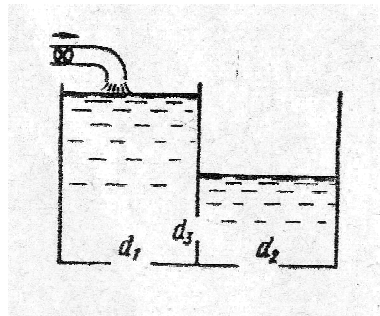
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	20	30	40	10	15	20	10	15	20	25
$d_1, d_2, d_3$ , мм	100	125	150	75	100	125	50	75	100	125
$K_1, K_2, K_3$ , л/с	61,4	110,8	179,4	28,7	61,4	110,8	9,9	28,7	61,4	110,8
$d_4$ , мм	125	150	200	100	125	150	75	100	125	150
$K_4$ , л/с	110,8	179,4	383,7	61,4	110,8	179,4	28,7	61,4	110,8	179,4
$l_1=l_2=l_3$ , м	60	80	100	40	60	80	20	40	60	80
$l_4$ , м	120	160	200	80	120	160	40	80	120	160
Ответ: $H$ , м	4,64	5,12	2,72	2,67	2,60	2,27	7,10	6,02	4,61	2,68

16. В бак, разделенный тонкой перегородкой на два отсека, поступает расход воды  $V = \dots$  л/с. В перегородке имеется отверстие диаметром  $d_1 = \dots$  мм. Из второго отсека вода сливается наружу через цилиндрический насадок диаметром  $d_2 = \dots$  мм. Определить глубину воды в отсеках над центром отверстий.



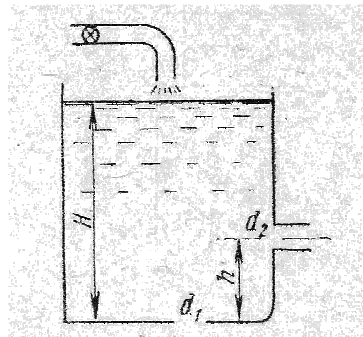
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	28	26	20	20	20	30	25	20	25	20
$d_1$ , мм	100	75	100	75	100	75	100	75	75	100
$d_2$ , мм	75	75	50	50	75	75	75	50	50	50
Ответ: $H_1$ , м	4,74	7,23	9,3	10,6	2,43	9,63	3,79	10,7	16,6	8,76
$H_2$ , м	3,06	2,64	7,9	7,9	1,56	3,51	2,44	8,0	12,3	7,9

17. В бак разделенный тонкой перегородкой на два отсека, поступает расход воды  $V = \dots$  л/с. В дне каждого отсека имеются одинаковые отверстия диаметром  $d_1 = d_2 = \dots$  мм, а в перегородке – отверстие диаметром  $d_3 = \dots$  мм. Определить расходы через донные отверстия  $V_1$ ,  $V_2$ .



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V$ , л/с	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
$d_1 = d_2$ , мм	100	100	100	150	125	75	75	75	100	125
$d_3$ , мм	150	125	100	150	100	75	100	125	75	75
Ответ: $V_1$ , л/с	15,7	17,4	19,9	21,1	24,7	23,5	22,5	22,7	30,9	35,9
$V_2$ , л/с	14,3	14,6	14,9	10,3	13,3	16,5	19,5	21,3	13,1	12,1

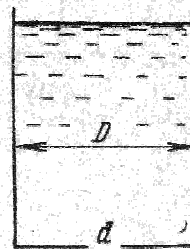
18. В баке, имеющем в дне отверстие диаметром  $d_1 = \dots$  мм и в стенке отверстие, снабженное цилиндрическим насадком, диаметром  $d_2 = \dots$  мм, установился уровень воды на высоте  $H = \dots$  м. Определить, какой расход воды  $V$  поступает в бак, если центр бокового отверстия возвышается над дном бака на высоту  $h = \dots$  м.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d_1$ , мм	100	75	125	100	75	125	100	75	125	125
$d_2$ , мм	60	75	100	100	60	75	75	100	60	125
$H$ , м	2,0	1,8	1,6	1,4	2,0	1,6	1,8	1,4	1,8	1,6

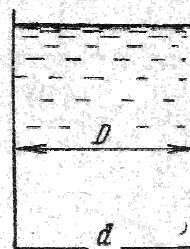
$h, \text{ м}$	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3
Ответ: $V, \text{ л/с}$	35,9	73,8	71,4	55,5	30,1	60,9	47,9	44,2	57,3	93,4

19. Определить, какой объем воды  $W$  был налит в цилиндрический бак диаметром  $D = \dots \text{ м}$ , если вся вода вытекла из него через отверстие в дне диаметром  $d = \dots \text{ мм}$  за время  $t = \dots \text{ с}$ . Какое время  $t_1$  потребуется для опорожнения такого же объема воды, если уменьшить диаметр бака в полтора раза?



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$D, \text{ м}$	1,0	1,4	0,8	0,9	1,3	0,7	0,8	1,2	0,6	0,7
$d, \text{ мм}$	100	125	75	100	125	75	100	125	75	100
$t, \text{ с}$	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50
Ответ: $W, \text{ м}^3$	0,53	0,45	0,26	0,45	0,76	0,23	0,83	0,62	0,45	0,75
$t_1, \text{ с}$	40	33,3	40	33,3	40	33,3	40	33,3	40	33,3

20. Призматический бак высотой  $H = \dots \text{ м}$  с дном площадью  $S = \dots \text{ м}^2$  соединен с резервуаром цилиндрическим насадком диаметром  $d = \dots \text{ мм}$ . Расстояние от дна бака до центра отверстия  $h = \dots \text{ м}$ . Определить, за какое время наполнится бак, если уровень воды в резервуаре не меняется.

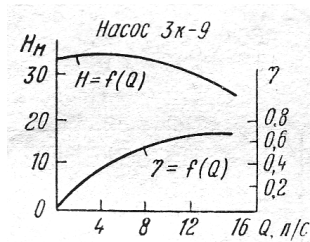


Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H, \text{ м}$	2	1,5	2	1,5	2	1,5	2,5	2,2	2,2	2,2
$S, \text{ м}^2$	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6
$d, \text{ мм}$	50	40	60	50	40	60	50	40	60	50
$h, \text{ м}$	0,5	0,4	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5
Ответ: $t, \text{ с}$	199	216	111	176	371	145	222	261	144	250

21 - 25. Определить мощность на валу центробежного насоса, подающего воду по трубопроводу длиной  $l = \dots \text{ м}$  и диаметром  $d = 150 \text{ мм}$ , если геометрическая высота подъема жидкости  $H_z = \dots \text{ м}$  и необходимый свободный напор  $h_{св.} = \dots \text{ м}$ . Коэффициент сопротивления трения трубопровода  $\lambda = 0,025$ .

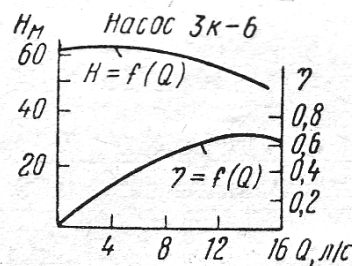
Исходные данные	Значения для вариантов задачи 21									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ м}$	800	900	800	1110	1000	1200	1400	1300	1600	1700
$H_z, \text{ м}^2$	13	15	10	12	10	13	10	11	14	12
$h_{св.}, \text{ м}$	14	12	17	14	16	13	15	14	10	12
Насос марки ЗК-9										





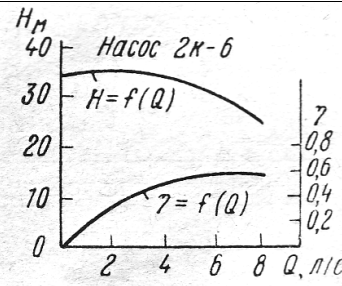
Исходные данные	Значения для вариантов задачи 22									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ м}$	2400	2700	3000	3300	3200	3600	3000	3400	3300	3600
$H_z, \text{ м}^2$	30	21	32	22	24	30	32	24	34	25
$h_{св}, \text{ м}$	17	25	13	22	20	13	13	20	10	18

Насос марки 3К-6



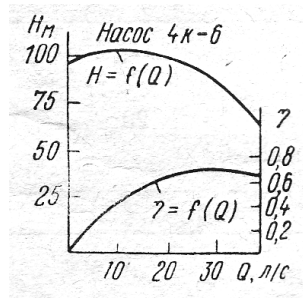
Исходные данные	Значения для вариантов задачи 23									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ м}$	1500	1400	3000	2800	4500	1400	1500	3000	2800	4300
$H_z, \text{ м}^2$	15	19	14	18	13	15	10	14	18	20
$h_{св}, \text{ м}$	14	10	14	10	14	14	19	14	10	7

Насос марки 2К-6

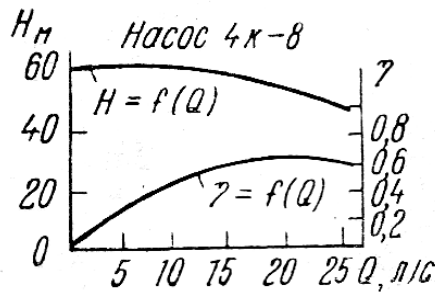


Исходные данные	Значения для вариантов задачи 24									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ м}$	450	500	550	650	700	800	850	550	1100	750
$H_z, \text{ м}^2$	50	60	68	56	44	57	52	63	51	49
$h_{св}, \text{ м}$	30	20	10	20	30	15	20	15	15	25

Насос марки 4К-6



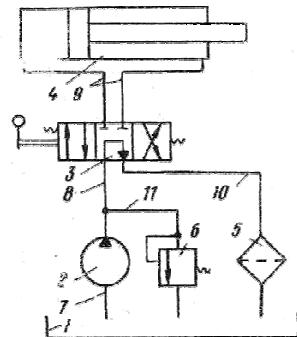
Исходные данные	Значения для вариантов задачи 25									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$l, \text{ м}$	800	700	1000	1100	1400	1300	800	1000	1200	1500
$H_z, \text{ м}^2$	35	28	30	34	35	30	40	33	37	35
$h_{св}, \text{ м}$	15	22	18	13	10	15	10	15	10	10
Насос марки 4К-8										



26. На рисунке приведена принципиальная схема нерегулируемого объемного гидропривода возвратно-поступательного движения. Известны следующие величины: диаметр силового гидроцилиндра  $D_{ц} = 80 \text{ мм}$ ; диаметр штока  $D_{ш} = 40 \text{ мм}$ ; рабочий ход штока  $S = 630 \text{ мм}$ ; усилие на штоке при рабочем ходе  $P = \dots \text{ кН}$ ; сила трения в уплотнениях поршня и штока гидроцилиндра  $P_{тр} = \dots \text{ кН}$ ; частота рабочих циклов  $i = \dots \text{ 1/с}$ ; потеря давления в золотнике при расходе  $V_3^* = \dots \text{ л/с}$  составляет  $\Delta p_3^* = \dots \text{ МПа}$ ; потеря давления в фильтре при расходе  $V_{ф}^* = \dots \text{ л/с}$  составляет  $\Delta p_{ф}^* = \dots \text{ МПа}$ .

Требуется определить:

1. Потребную подачу насоса  $V_n$ .
2. Скорость движения штока при рабочем ходе  $w_p$  (рабочий ход соответствует выходу штока из цилиндра).
3. Давление нагнетания насоса при рабочем ходе  $p_{нр}$ .
4. Давление нагнетания насоса при холостом ходе  $p_{нх}$  (при холостом ходе  $P=0$ ).
5. КПД гидропривода при рабочем ходе  $\eta_p$ , приняв КПД насоса  $\eta_{нр} = 0,75$ .



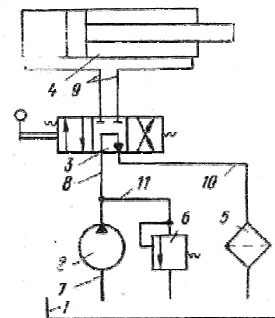
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

$P$ , кН	12,5	30,0	50,0	12,5	30,0	50,0	12,5	30,0	50,0	50,0
$P_{тр}$ , кН	1,25	3,0	5,0	1,25	3,0	5,0	1,25	3,0	5,0	5,0
$i$ , 1/с	0,075	0,075	0,031	0,105	0,105	0,96	0,15	0,15	0,14	0,2
$V_z^*$ , $V_\phi^*$ л/с	0,585	0,585	0,3	1,17	1,17	0,585	1,17	1,17	1,17	1,17
$\Delta p_z^*$ , МПа	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$\Delta p_\phi^*$ , МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ответы: $V_{нв}$ л/с	0,416	0,416	0,17	0,58	0,58	0,53	0,83	0,83	0,776	1,11
$p_{нр}$ , МПа	2,85	6,67	11,06	2,83	6,62	11,2	2,92	6,74	11,1	11,2
$p_{нх}$ , МПа	0,628	1,09	1,65	0,586	0,967	2,04	0,797	1,26	1,74	2,1
$\eta_p$	0,656	0,67	0,67	0,66	0,68	0,67	0,64	0,66	0,67	0,665

27. На рисунке приведена принципиальная схема нерегулируемого объемного гидропривода возвратно-поступательного движения. Известны следующие величины: диаметр силового гидроцилиндра  $D_{ц} = 80$  мм; диаметр штока  $D_{ш} = 40$  мм; рабочий ход штока  $S = 630$  мм; сила трения в уплотнениях поршня и штока  $P_{тр} = \dots$  кН; давление нагнетания насоса при рабочем ходе  $p_{нр} = \dots$  МПа; подача насоса  $V_n = \dots$  л/с; КПД насоса при рабочем ходе  $\eta_{н.р.} = 0,75$ ; потеря давления в золотнике при расходе  $V_z^* = \dots$  л/с составляет  $\Delta p_z^* = \dots$  МПа; потеря давления в фильтре при расходе  $V_\phi^* = \dots$  л/с составляет  $\Delta p_\phi^* = 0,1$  МПа.

Найти:

1. Скорость движения штока при рабочем ходе  $w_p$  и при холостом ходе  $w_x$  (рабочий ход соответствует выходу штока из цилиндра);
2. Число рабочих циклов, совершаемых гидроприводом в одну минуту,  $i_{мин}$ ;
3. Усилие штока при рабочем ходе  $P$ ;
4. КПД гидропривода при рабочем ходе  $\eta_p$ .



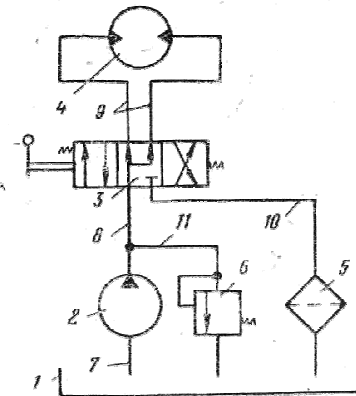
Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_n$ л/с	0,417	0,41	0,17	0,585	0,583	0,53	0,833	0,83	0,78	1,12
$p_{нр}$ , МПа	2,5	6,3	10,0	2,5	6,3	10,0	2,5	6,3	10,0	10,0
$P_{тр}$ , кН	1,25	3,0	5,0	1,25	3,0	5,0	1,25	3,0	5,0	5,0
$V_z^*$ , $V_\phi^*$ л/с	0,585	0,585	0,3	0,585	0,585	0,585	1,17	1,17	1,17	1,17
$\Delta p_z^*$ , МПа	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Ответы:										
$i_{мин}$ 1/мин	4,52	6,67	1,84	6,32	6,3	5,71	9,03	8,98	8,33	12,7
$P$ , кН	10,76	28,14	44,68	10,33	27,69	44,46	10,40	27,77	44,48	43,72
$\eta_p$	0,64	0,67	0,665	0,615	0,656	0,66	0,62	0,66	0,66	0,65

28. На рисунке приведена принципиальная схема нерегулируемого объемного гидропривода вращательного движения. Известны следующие величины: рабочий объем гидромотора  $q_m = \dots$  см<sup>3</sup>; КПД гидромотора  $\eta_m = 0,93$ ; механический КПД насоса  $\eta_{мех.м} = \dots$ ; частота вращения вала гидромотора  $n_m = \dots$  1/с; крутящий момент на валу гидромотора  $M_{кр} = \dots$  Н·м; потеря давления в золотнике при расходе  $V_z^* = \dots$  л/с

составляет  $\Delta p_z^* = \dots$  МПа; потеря давления в фильтре при расходе  $V_\phi^* = \dots$  л/с составляет  $\Delta p_\phi^* = 0,1$  МПа; общая длина трубопровода  $l = 10$  м; диаметр трубопровода  $d = \dots$  мм; сумма коэффициентов местных сопротивлений, имеющих в трубопроводе  $\sum \xi = 5$ ; температура рабочей жидкости  $t = 50^0$  С; в качестве рабочей жидкости в гидроприводе используется масло индустриальное 20 ( $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_{50} = 20$  сСт =  $0,2$  см<sup>2</sup>/с). КПД насоса  $\eta_n = 0,85$ .

Требуется определить:

1.  $\Delta p_m$  - перепад давления на гидромоторе,
2.  $Q_n$  - потребную подачу насоса,
3.  $p_n$  - давление нагнетания насоса,
4.  $\eta$  - КПД гидропривода.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q_m$ , см <sup>3</sup>	9	32	71	142	251	501	32	32	71	71
$\eta_{мех.м}$	0,98	0,98	0,98	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98	0,98
$n_m$ , 1/с,	18	15,75	10,45	7,65	4,32	2,17	5,05	23,2	15	7,1
$M_{кр}$ , Н·м	12	42	105	210	370	740	42	42	105	105
$V_z^*, V_\phi^*$ л/с	0,3	0,585	1,17	1,17	1,17	1,17	0,3	1,17	1,17	0,585
$\Delta p_z^*$ , МПа	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
$d$ , мм	6,6	12	15	18	18	18	6,6	15	18	12
Ответы:										
$V_n$ л/с	0,17	0,53	0,78	1,12	1,12	1,12	0,17	0,78	1,12	0,3
$p_n$ , МПа	9,55	9,05	10,0	10,38	10,34	10,36	9,42	8,94	10,18	10,1
$\eta$	0,71	0,74	0,75	0,74	0,74	0,74	0,71	0,74	0,74	0,74

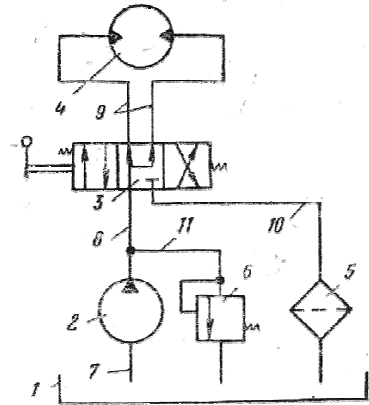
29. На рисунке приведена принципиальная схема нерегулируемого объемного гидропривода вращательного движения. Известны следующие величины: подача насоса  $V_n = \dots$  л/с; давление нагнетания насоса  $p_n = 10$  МПа; КПД насоса  $\eta_n = 0,85$ ; рабочий объем гидромотора  $q_m = \dots$  см<sup>3</sup>; механический КПД насоса  $\eta_{мех.м} = 0,97$ ; коэффициент

утечек в гидромоторе  $\sigma_m = \dots$  см<sup>3</sup>/МПа ( $\sigma_m = \frac{q_{ум}}{\Delta p_m}$ ,  $q_{ум}$  - расход утечек в гидромоторе,  $\Delta p_m$  -

перепад давления в гидромоторе); потеря давления в золотнике при расходе  $V_z^* = \dots$  л/с составляет  $\Delta p_z^* = \dots$  МПа; потеря давления в фильтре при расходе  $V_\phi^* = \dots$  л/с составляет  $\Delta p_\phi^* = 0,1$  МПа; общая длина трубопровода  $l = 8$  м; диаметр трубопровода  $d = \dots$  мм; сумма коэффициентов местных сопротивлений, имеющих в трубопроводе  $\sum \xi = 5$ ; температура рабочей жидкости  $t = 50^0$  С; в качестве рабочей жидкости в гидроприводе используется масло индустриальное 20 ( $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_{50} = 20$  сСт =  $0,2$  см<sup>2</sup>/с).

Требуется определить:

1.  $\Delta p_m$  - перепад давления на гидромоторе,
2.  $M_{кр}$  - крутящий момент на валу гидромотора,
3.  $n_m$  - частоту вращения вала гидромотора,
4.  $\eta$  - КПД гидропривода.



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_H$ , л/с	0,17	0,53	0,78	1,12	1,12	1,12	0,17	0,78	1,12	0,53
$q_{мв}$ , см <sup>3</sup>	9	32	71	142	251	501	32	32	71	71
$\sigma_m$ , см <sup>3</sup> /МПа	0,85	2,7	3,9	3,4	3,4	3,4	0,85	3,9	5,6	2,7
$V_z^*$ , $V_{\phi}^*$ л/с	0,3	0,585	1,17	1,17	1,17	1,17	0,3	1,17	1,17	0,585
$\Delta p_z^*$ , МПа	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
$d$ , мм	6,6	12	15	18	18	18	6,6	15	18	12
Ответы:										
$p_m$ , МПа	9,15	9,43	9,52	9,34	9,34	9,34	9,15	9,52	9,34	9,43
$n_m$ , 1/с	18	15,77	10,46	7,66	4,34	2,17	5,07	23,2	15	7,1
$\eta$	0,72	0,74	0,746	0,746	0,747	0,746	0,724	0,746	0,732	0,74

30. На рисунке приведена принципиальная схема нерегулируемого объемного гидропривода вращательного движения с дроссельным регулированием. Известны следующие величины: рабочий объем гидромотора  $q_m = \dots \text{см}^3$ ; механический КПД насоса

$\eta_{мех.м} = \dots$ ; коэффициент утечек в гидромоторе  $\sigma_m = \dots \text{см}^3/\text{МПа}$ , ( $\sigma_m = \frac{q_{ум}}{\Delta p_m}$ ,  $q_m$  - расход

утечек в гидромоторе,  $\Delta p_m$  - перепад давления в гидромоторе); крутящий момент на валу гидромотора  $M_{кр} = \dots \text{Н}\cdot\text{м}$ ; рабочий объем насоса  $q_n = \dots \text{см}^3$ ; коэффициент утечек в насосе

$\sigma_n = \dots \text{см}^3/\text{МПа}$  ( $\sigma_n = \frac{q_{ун}}{p_n}$ ,  $q_{ун}$  - расход утечек в насосе,  $p_n$  - давление нагнетания); КПД

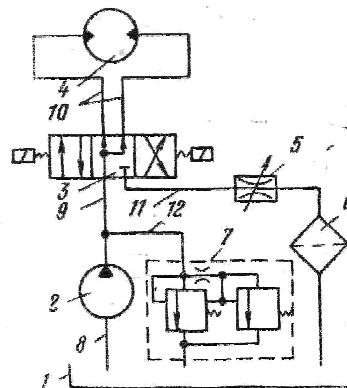
насоса  $\eta_n = 0,85$ ; частота вращения вала насоса  $n_n = \dots \text{1/с}$ ; коэффициенты потерь

давления в золотнике  $K_z = \dots \frac{\text{МПа}}{(\text{л/с})^2}$ , в дросселе  $K_{др} = \dots \frac{\text{МПа}}{(\text{л/с})^2}$ , в фильтре  $K_{\phi} = \dots \frac{\text{МПа}}{\text{л/с}}$ .

Переливной клапан отрегулирован на давление  $p_{н.к.} = 10 \text{ МПа}$ .

Требуется определить:

1. Расход в напорной магистрали  $V$ .
2. Частоту вращения вала гидромотора  $n_m$ .
3. Подачу насоса  $V_n$ .
4. Потребляемую гидроприводом мощность  $N$ .
5. КПД гидропривода  $\eta$ .



Исходные данные	Значения для вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q_m$ , см <sup>3</sup>	9	32	71	142	251	501	32	32	71	71
$\eta_{мех.м}$	0,98	0,98	0,98	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,98	0,98
$\sigma_m$ , см <sup>3</sup> /МПа	0,85	2,7	3,9	3,4	3,4	3,4	0,85	3,9	5,6	2,7
$M_{кр}$ , Н·м	1,2	4,2	9,45	18,9	33,3	66,6	4,2	4,2	9,45	9,45
$q_n$ , см <sup>3</sup>	10	32	46	67	98	98	10	46	67	32
$\sigma_n$ , см <sup>3</sup> /МПа	0,85	2,7	3,9	3,4	3,4	3,4	0,85	3,9	5,6	2,7
$n_m$ , 1/с	27,5	18,3	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	18,3	18,3	27,5
$K_z$	2,2	0,588	0,146	0,036	0,036	0,036	2,2	0,146	0,146	0,146
$K_{др}$	20,68	5,364	1,033	0,479	0,162	0,181	20,86	3,244	1,033	2,5
$K_{ф}$	1,1	0,588	0,146	0,036	0,036	0,036	1,1	0,146	0,146	0,146
Ответы:										
$V$ , л/с	0,22	0,45	1,0	1,5	2,3	2,2	0,23	0,65	1,0	0,7
$V_n$ , л/с	0,266	0,56	1,23	1,81	2,66	2,66	0,266	0,8	1,17	0,853
$\eta$	0,57	0,536	0,56	0,577	0,61	0,58	0,586	0,54	0,578	0,564

### Контроль знаний студентов

#### Тестовые материалы, используемые при контроле знаний студентов

Текущая успеваемость студентов контролируется промежуточной аттестацией в виде тестирования. Тесты промежуточной аттестации включают пройденный материал на лекциях и темы, включенные в лабораторные занятия.

#### Вариант 1

##### 1. Вопрос. Правильное определение науки «Гидравлика»: гидравлика - это...

Ответы:

- а) часть механики, изучающая законы равновесия и движения жидкостей (газов)
- б) раздел механики твердого тела, изучающий законы равновесия и движения жидкостей (газов)
- в) раздел физики сплошной среды, изучающий законы равновесия и движения идеальных и реальных жидкостей

- d) наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и способы приложения этих законов к решению задач инженерной практики

**2. Вопрос. Сжимаемостью жидкости называют свойство жидкости...**

Ответы:

- a) изменять свое состояние (переход из жидкого в газообразное состояние) с изменением объема при постоянном давлении
- b) изменять свой объем при изменении давления
- c) сохранять свой объем при изменении температуры
- d) оказывать сопротивление относительному сдвигу слоев при изменении объема

**3. Вопрос. Единицей измерения средней скорости является...**

Ответы:

- a)  $\text{с/м}^3$
- b)  $\text{м/с}$
- c)  $\text{с/см}^4$
- d)  $\text{м}^2/\text{с}$

**4. Вопрос. Эпюра скоростей жидкости по живому сечению в широком прямоугольном канале при ламинарном режиме движения имеет вид...**

Ответы:

- a) гиперболы
- b) прямоугольника
- c) прямой линии
- d) параболы (параболоида)

**5. Вопрос. Отношение максимальной скорости жидкости к средней скорости в круглой трубе при ламинарном режиме движения равно...**

Ответы:

- a) 1,5
- b) 1,0
- c) 1,2
- d) 2,0

**6. Вопрос. Два открытых бака соединены простым длинным трубопроводом постоянного диаметра 100 мм (расходная характеристика  $K = 53,9$  л/с). Если перепад уровней в баках составляет 2,5 м, а длина его 25 м, то расход жидкости в трубе равен... л/с**

Ответы:

- a) 17,05
- b) 34,1
- c) 26
- d) 2,6

**7. Вопрос. Существуют следующие режимы движения жидкости...**

Ответы:

- a) струйчатый и пузырьковый
- b) входной и выходной
- c) прямо и кривоструйный

d) ламинарный и турбулентный

**8. Вопрос. Кинематическая вязкость определяется следующей зависимостью...**

Ответы:

a)  $\mu = \frac{\nu}{\rho}$

b)  $\nu = \frac{10 \cdot \mu}{\alpha}$

c)  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

d)  $\mu = \frac{\nu}{0,0337 + 10,2}$

**9. Вопрос. Сущность гипотезы сплошности заключается в том, что жидкость рассматривается как...**

Ответы:

a) континуум, непрерывная сплошная среда

b) среда, имеющая разрывы и пустоты

c) сложная среда с растворенными газами, веществами, имеющая разрывы и пустоты

d) неподвижное твердое или жидкое тело, при определенной температуре и давлении

**10. Вопрос. Единицей измерения площади живого сечения является...**

Ответы:

a) см<sup>4</sup>

b) м<sup>3</sup>

c) м

d) м<sup>2</sup>

**11. Вопрос. Модельные жидкости в «Гидравлике» применяют для...**

Ответы:

a) упрощения строения жидкости

b) облегчения применения уравнений механики

c) усложнения теории механики жидкости

d) усложнения строения жидкости

**12. Вопрос. При установившемся движении скорость частицы жидкости зависит...**

Ответы:

a) только от времени

b) от времени и координат

c) только от координат

d) от ординаты X и времени

**13. Вопрос. Взаимосвязь между плотностью и удельным весом жидкости определяется формулой...**

Ответы:

a)  $\gamma = \frac{1}{2} \rho g$

b)  $\lambda = \rho g$

c)  $\gamma = \rho g$



d)  $\beta = \gamma / \rho$

**14. Вопрос.** Точка присоединения открытого пьезометра заглублена на 8 м под уровень воды, а избыточное давление над свободной поверхностью составляет 0,2 атм. Тогда высота подъема воды в открытом пьезометре равна ... м.

Ответы:

- a) 8
- b) 2
- c) 10
- d) 6

**15. Вопрос.** Исследование натурального состояния явления, выполняется с использованием методов имеющих иную физическую природу, однако описываемое теми же математическими зависимостями, которые описывают натурное явление, при... моделировании.

Ответы:

- a) натурном
- b) аналоговом
- c) математическом
- d) физическом

**16. Вопрос.** Вязкостью жидкости называют свойство жидкости...

Ответы:

- a) оказывать сопротивление относительному сдвигу слоев
- b) изменять плотность при изменении температуры
- c) изменять свой объем при изменении давления на 1 Па
- d) переходить из жидкого в газообразное состояние при изменении температуры

**17. Вопрос.** Две категории сил, которые могут действовать в жидкостях и газах, - это...

Ответы:

- a) инерции и трения
- b) массовые и поверхностные
- c) трения и тяжести
- d) давления и напряжения

**18. Вопрос.** Шероховатость стенок русла на потери напора по длине при ламинарном режиме движения...

Ответы:

- a) влияет, если она зависит от числа Рейнольдса
- b) не оказывает влияние
- c) влияет в случае, если она относительная
- d) влияет в случае, если она абсолютная

**19. Вопрос.** Трубы называются гидравлически гладкими, если...

Ответы:

- a) толщина вязкого подслоя больше абсолютной шероховатости
- b) толщина вязкого подслоя равна абсолютной шероховатости

- c) абсолютная шероховатость пренебрежительно мала
- d) толщина вязкого подслоя меньше абсолютной шероховатости

**20. Вопрос. Пьезометрический уклон при расчете простого длинного трубопровода представляет собой...**

Ответы:

- a) отношение потерь по длине к длине участка
- b) отношение потерь по длине к сумме местных потерь
- c) отношение местных потерь к длине участка
- d) сумму потерь по длине и местных потерь к длине участка

**21. Вопрос. Необходимый напор в начале магистрали (или высота водонапорной башни) при расчете сложного разветвленного незамкнутого трубопровода в случае горизонтальной местности определяется как...**

Ответы:

- a) сумма потерь на всех участках магистрали и необходимого свободного напора в конце магистрали
- b) сумма всех потерь на участках магистрали
- c) сумма всех местных потерь
- d) сумма всех потерь на участках магистрали и боковых ответвлений

**22. Вопрос. Коэффициент местных сопротивлений в большинстве случаев находится...**

Ответы:

- a) расчетными способами по эмпирическим формулам
- b) по справочникам, составленным на основе эмпирических исследований
- c) расчетным способом по теоретическим формулам
- d) путем математических выводов

**23. Вопрос. Коэффициент  $\alpha$  (коэффициент Кориолиса) равен отношению действительной \_\_\_\_\_ энергии массы жидкости, протекающей через живое сечение, к кинетической энергии, вычисленной в предположении, что во всех точках живого сечения местные скорости равны средней скорости.**

Ответы:

- a) сумме кинетической и потенциальной
- b) разнице кинетической и потенциальной
- c) потенциальной
- d) кинетической

**24. Вопрос. В открытом сосуде эпюра избыточного давления на вертикальную или наклонную стенку имеет вид...**

Ответы:

- a) прямоугольника
- b) прямоугольного треугольника
- c) квадрата
- d) трапеции

**25. Вопрос. Смоченный периметр для полукруглого живого сечения с радиусом 0,4 м равен... м**

Ответы:

- a) 1,256
- b) 2,512
- c) 0,628
- d) 0,314

**26. Вопрос.** Заполните пропуск. Благодаря \_\_\_\_\_, стало возможным получение дифференциальных уравнений равновесия и движения жидкости.

Ответы:

- a) гипотезе сплошности
- b) постоянству давления
- c) растворимости
- d) постоянству температуры

**27. Вопрос.** Сопротивление растяжению может возникать только в ...

Ответы:

- a) жидкостях под атмосферном давлении
- b) дегазированных жидкостях
- c) газах
- d) жидкостях давление в которых более атмосферного

**28. Вопрос.** Корректив кинетической энергии потока при ламинарном движении жидкости в трубе (коэффициент Кориолиса) равен...

Ответы:

- a) 1,5
- b) 1,33
- c) 2,0
- d) 1,0

**29. Вопрос.** Расходы жидкости на каждом участке при последовательном соединении трубопроводов...

Ответы:

- a) увеличиваются по длине участков
- b) уменьшаются по длине участков
- c) равны
- d) изменяются пропорционально диаметру трубы

**30. Вопрос.** Относительной шероховатостью называют отношение ...

Ответы:

- a) абсолютной шероховатости к радиусу трубы
- b) диаметра трубы к абсолютной шероховатости
- c) радиуса трубы к абсолютной шероховатости
- d) абсолютной шероховатости к диаметру трубы

**31. Вопрос.** Если  $l$  - линейный размер,  $V$  – скорость,  $\tau$ - время,  $\alpha$ - ускорение, то геометрическое подобие записывается формулой...

Ответы:

- a)  $\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{м}}} = M_V$

- b)  $\frac{\alpha_{II}}{\alpha_{I}} = M_{\alpha}$
- c)  $\frac{I_{II}}{I_{I}} = M_I$
- d)  $\frac{l_{II}}{l_{I}} = M_l$

**32. Вопрос. Уравнение Бернулли для установившегося движения невязкой жидкости при действии сил тяжести и сил давления имеет вид...**

Ответы:

- a)  $z + \frac{p}{2\rho g} + \frac{v^2}{g} = const$
- b)  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = const$
- c)  $z + \frac{p}{\rho g} - \frac{v^2}{2g} \neq 2H$
- d)  $z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \neq const$

Вариант 2

**1. Вопрос. Форма свободной поверхности во вращающемся сосуде зависит...**

Ответы:

- a) от частоты вращения и плотности жидкости
- b) только от частоты вращения
- c) от частоты вращения и вязкости
- d) только от вязкости

**2. Вопрос. Сечение с максимальным вакуумом в сифоне расположено...**

Ответы:

- a) в самой верхней части трубы
- b) непосредственно перед конечным сечением трубы
- c) непосредственно у начального сечения трубы
- d) посередине трубы

**3. Вопрос. Повышение горизонта жидкости в сосуде над выходным сечением трубы при расчете длинного простого трубопровода с последовательным соединением участков разного диаметра и истечением в атмосферу, определяется как сумма...**

Ответы:

- a) всех местных потерь и потерь по длине всех участков
- b) всех потерь каждого участка и скоростного напора на выходе из трубы
- c) местных потерь по длине всех участков
- d) потерь по длине каждого участка

**4. Вопрос. Коэффициент сопротивления при резком сужении потока, если диаметр круглой трубы уменьшается в три раза, а коэффициент отнесен к скоростному напору после сужения, равен...**

Ответы:

- a) 0,88
- b) 0,44
- c) 0,33
- d) 0,22

**5. Вопрос.** Уравнение Бернулли для потока реальной вязкой жидкости имеет вид...

Ответы:

- a)  $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = H$
- b)  $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = \text{const.}$
- c)  $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h$
- d)  $z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum h$

**6. Вопрос.** Если  $l$ - линейный размер,  $V$ - скорость,  $F$ - сила,  $W$ - объем, то динамическое подобие записывается формулой...

Ответы:

- a)  $\frac{W_k}{W_n} = M_W$
- b)  $\frac{F_k}{F_n} = M_F$
- c)  $\frac{t_k}{t_n} = M_t$
- d)  $\frac{V_k}{V_n} = M_V$

**7. Вопрос.** Дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости (уравнения Эйлера) имеют вид...

Ответы:

- $X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{du_x}{dt};$
- a)  $Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{du_y}{dt};$   
 $Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{du_z}{dt};$   
 $X + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{dV}{dt};$
- b)  $Y + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{dV}{dt};$   
 $Z + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{dV}{dt};$   
 $X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{du_x}{dt};$
- c)  $Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{du_y}{dt};$   
 $Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{du_z}{dt};$

$$X - \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{du_x}{dt};$$

$$d) Y - \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{du_y}{dt};$$

$$Z - \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{du_z}{dt}.$$

**8. Вопрос. Гидростатическим давлением в точке является...**

Ответы:

- a) предел отношения силы давления к площади, на которую оно действует, при стремлении площади к нулю
- b) среднее гидростатическое давление деленное на площадь, при стремлении площади к бесконечности
- c) частное от деления силы давления на площадь, при стремлении площади к бесконечности
- d) произведение среднего гидростатического давления на площадь, при стремлении площади к нулю

**9. Вопрос. Приблизительная сила избыточного гидростатического давления в закрытом сосуде на вертикальную прямоугольную стенку, заглубленную по верхнюю кромку равна ... кН. При условии, что высота стенки 2 м, а ширина 8 м. Поверхностное избыточное давление составляет 50кПа.**

Ответы:

- a) 900
- b) 160
- c) 960
- d) 1120

**10. Вопрос. Потенциальное движение является...**

Ответы:

- a) вихревым или безвихревым, в зависимости от давления
- b) вихревым или безвихревым, в зависимости от скорости
- c) всегда вихревым
- d) всегда безвихревым

**11. Вопрос. Потенциальный напор в покоящейся однородной жидкости величина постоянная...**

Ответы:

- a) только при открытом сосуде
- b) только для всех одинаково заглубленных точек
- c) для всех точек данного объема
- d) только при закрытом сосуде

**12. Вопрос. Коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме движения зависит от...**

Ответы:

- a) коэффициента шероховатости стенок и числа Рейнольдса
- b) числа Рейнольдса
- c) расхода жидкости
- d) коэффициента шероховатости стенок

**13. Вопрос. Простым называют трубопровод...**

Ответы:

- a) постоянного диаметра
- b) не имеющий местных потерь
- c) не имеющий поворотов
- d) с постоянным расходом и не имеющий боковых ответвлений

**14. Вопрос. При преобладающем влиянии сил тяжести потоки моделируются по критерию...**

Ответы:

- a) Эйлера
- b) Архимеда
- c) Рейнольдса
- d) Фруда

**15. Вопрос. Принятым обозначением объемного расхода является...**

Ответы:

- a) Q
- b) G
- c) S
- d) V

**16. Вопрос. Единицами измерения коэффициента динамической вязкости являются...**

Ответы:

- a) Па
- b) Па·с
- c) кг/м<sup>2</sup>
- d) Ст

**17. Вопрос. При расчете длинного трубопровода потери напора на каждом участке в случае параллельного соединения участков...**

Ответы:

- a) больше при большей длине участка
- b) больше при меньшем диаметре участка
- c) зависят от длины и диаметра участков
- d) равны

**18. Вопрос. Для прямоугольной стенки сила гидростатического давления может быть определена как площадь эпюры давления умноженная на ...**

Ответы:

- a) ускорение силы тяжести
- b) ширину стенки
- c) плотность жидкости
- d) скорость движения жидкости

**19. Вопрос. Точка присоединения открытого пьезометра заглублена на 4 м под уровень воды, а абсолютное давление над свободной поверхностью составляет 1,3 атм. Тогда высота подъема воды в открытом пьезометре равна ... м.**

Ответы:

- a) 3
- b) 7
- c) 17
- d) 4

**20. Вопрос. Поверхности равного давления в покоящейся жидкости, находящейся под действием только силы тяжести, располагаются...**

Ответы:

- a) всегда вертикально
- b) горизонтально только в открытом сосуде
- c) всегда горизонтально
- d) вертикально только в открытом сосуде

**21. Вопрос. Понятие средней скорости потока используется...**

Ответы:

- a) только при параллельноструйном движении
- b) при плавно изменяющемся и параллельноструйном движении
- c) при всех видах установившегося движения
- d) только при плавно изменяющемся движении

**22. Вопрос. Коэффициент местных потерь на входе потока в трубу из бассейна или бака равен ...**

Ответы:

- a) 5,0
- b) 1,0
- c) 0,5
- d) 2,0

**23. Вопрос. Пьезометрическая линия при равномерном заборе жидкости из трубопровода имеет вид...**

Ответы:

- a) прямой горизонтальной
- b) прямой падающей
- c) кривой, падающей выпуклостью вниз
- d) кривой, падающей выпуклостью вверх

**24. Вопрос. Модуль расхода (расходная характеристика) является функцией...**

Ответы:

- a) шероховатости и диаметра
- b) шероховатости и материала
- c) расхода и шероховатости
- d) расхода и диаметра

**25. Вопрос. Потери напора по длине при турбулентном режиме в области гладких русел пропорциональны средней скорости в степени...**

Ответы:

- a) 1,75
- b) 1,5
- c) 2,0



d) 1,0

**26. Вопрос. С увеличением длины трубы пьезометрический уклон...**

Ответы:

- a) увеличивается
- b) меняется в зависимости от величины потерь
- c) уменьшается
- d) не меняется

**27. Вопрос. Трубопровод можно считать коротким...**

Ответы:

- a) если местные потери составляют более 10% от потерь по длине
- b) при длине менее 10 м
- c) при длине менее 1000 м
- d) если местные потери составляют 3-5% от потерь по длине

**28. Вопрос. Метод электрогидродинамических аналогий предложен...**

Ответы:

- a) Н.Н. Павловским
- b) Н.Е. Жуковским
- c) Д. Бернулли
- d) М.В. Ломоносовым

**29. Вопрос. Единицами измерения удельного веса являются...**

Ответы:

- a) Н/м<sup>3</sup>
- b) кг/см<sup>3</sup>
- c) кН/м<sup>2</sup>
- d) Н/кг<sup>4</sup>

**30. Вопрос. Выполнение критерия Фруда соблюдается при условии...**

Ответы:

- a)  $Fr_n \neq Fr_m$
- b)  $Fr_n > Fr_m$
- c)  $Fr_n < Fr_m$
- d)  $Fr_n = Fr_m$

**31. Вопрос. На модели исследуется явление, имеющее такую же физическую природу, что и происходящее в природе при \_\_\_\_\_ моделировании.**

Ответы:

- a) аналоговом
- b) численном
- c) математическом
- d) физическом

**32. Вопрос. При движении вязкой жидкости в ней возникают ...**

Ответы:

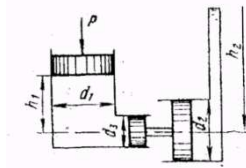
- a) разрывы и пустоты
- b) нормальные напряжения
- c) касательные напряжения

d) нормальные и касательные напряжения

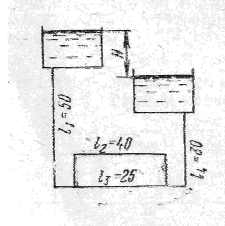
### Задания к аудиторной контрольной работе, используемые при контроле знаний студентов

#### Вариант 1

1. Какую силу  $P$  нужно приложить к поршню левого сосуда, наполненного водой, чтобы уравновесить давление воды на поршень правого сосуда? Исходные данные:  $d_1 = 300$  мм;  $d_2 = 400$  мм;  $d_3 = 200$  мм;  $h_1 = 0,5$  м;  $h_2 = 1,2$  м.

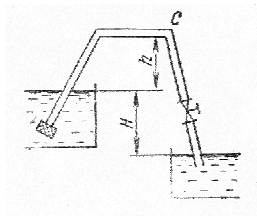


2. Определить при какой разности уровней воды в баках  $H$  по системе труб будет протекать расход воды  $V = 10$  л/с. Диаметры труб  $d_1 = 100$  мм,  $d_2 = 75$  мм,  $d_3 = 100$  мм,  $d_4 = 125$  мм. Длины труб указаны на схеме. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб (приложение).



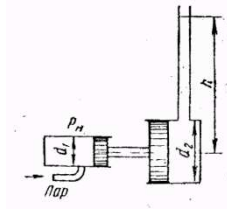
3. По сифонному трубопроводу длиной  $l = 20$  м и диаметром  $d = 100$  мм нужно обеспечить расход бензина  $V = 18,7$  л/с. Определить необходимую разность уровней в резервуарах  $H$  и вакуум  $p_{\text{вак}}$  в опасной точке сифона  $C$ , если длина участка трубопровода до этой точки  $l_1 = 10$  м, а ее возвышение над уровнем в верхнем резервуаре  $h = 4$  м. Трубопровод имеет приемный клапан с сеткой ( $\xi = 6$ ) и задвижку ( $\xi = 3$ ). Потери на поворотах не учитывать. Коэффициент сопротивления трения  $\lambda = 0,025$ . Объемный

вес бензина  $\rho_6 = 750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

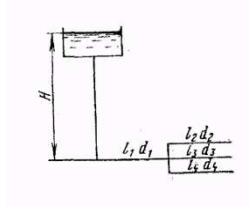


#### Вариант 2

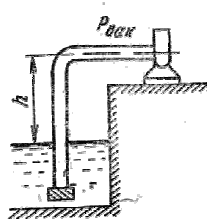
1. Определить высоту  $h$ , на которую может поднять воду, прямодействующий паровой насос при следующих данных: диаметры цилиндров  $d_1 = 100$  мм и  $d_2 = 200$  мм; манометрическое давление в паровом цилиндре  $p_m = 0,3$  МПа.



2. Определить общий расход воды  $Q$ , поступающий по системе труб под напором  $H = 2,27$  м. Диаметры труб  $d_1 = 150$  мм;  $d_2 = d_3 = d_4 = 125$  мм. Длины труб  $l_1 = 160$  м;  $l_2 = l_3 = l_4 = 80$  м. Воспользоваться значениями расходных характеристик для новых водопроводных труб (приложение).



3. Определить максимально допустимую высоту установки насоса  $h$  над уровнем воды в бассейне при следующих данных: производительность насоса  $V = 30$  л/с; допустимый вакуум во всасывающем патрубке  $p_{\text{вак}} = 60$  кПа; длина всасывающей трубы  $l = 10$  м; диаметр  $d = 200$  мм. Всасывающая труба снабжена приемным клапаном с сеткой ( $\zeta_{\text{кл}} = 6$ ) и имеет сварное колено ( $\zeta_{\text{кол}} = 1,2$ ). Коэффициент сопротивления трения определить по эквивалентной шероховатости  $\Delta = 0,2$  мм, предполагая наличие квадратичной зоны сопротивления.



## Критерии оценки знаний студентов

Оценка "**отлично**" выставляется студенту за:

- а) глубокое усвоение программного материала по всем разделам курса, изложение его на высоком научно-техническом уровне.
- б) ознакомление с дополнительной литературой и передовыми научно-техническими достижениями в области производства пищевой продукции;
- в) умение творчески подтвердить теоретические положения процессов и расчета аппаратов соответствующими примерами, умелое применение теоретических знаний при решении практических задач.

Оценка "**хорошо**" выставляется студенту за:

- а) полное усвоение программного материала в объеме обязательной литературы по курсу;
- б) владение терминологией и символикой изучаемой дисциплины при изложении материала;
- в) умение увязывать теоретические знания с решением практических задач;
- г) наличие не искажающих существа ответа погрешностей и пробелов при изложении материала.

Оценка "**удовлетворительно**" выставляется студенту за:

- а) знание основных теоретических и практических вопросов программного материала;
- б) допущение незначительных ошибок и неточностей, нарушение логической последовательности изложения материала, недостаточную аргументацию теоретических положений.

Оценка "**неудовлетворительно**" выставляется студенту за:

- а) существенные пробелы в знаниях основного программного материала.
- б) недостаточный объем знаний по дисциплине для дальнейшей учебы и профессиональной деятельности.

# Сборник описаний лабораторных работ

## Лабораторная работа № 1

4 часа

### Изучение поля скоростей потока в трубопроводе

**Цель работы:** исследование распределения локальных скоростей движения воздуха по сечению трубопровода.

**Задачи работы:**

- построение поля скоростей;
- определение средней скорости воздуха в трубопроводе;
- определение отношения  $w/w_{max}$  при различных режимах движения и сравнение полученных результатов со справочными данными;
- определение расхода воздуха.
- 

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из вентилятора с электродвигателем, всасывающего и нагнетательного трубопровода, лабораторного трансформатора. Контрольно-измерительные приборы – тахометр с тахогенератором, дифференциальный микроанометр с гидродинамической трубкой, барометр, влагомер и термометр. Управление электродвигателем включает в себя: магнитный пускатель, амперметр и вольтметр.

**Задание:** провести три серии опытов (изменяя число оборотов вентилятора не менее 3-х раз в сторону увеличения от 800 до 2500 об/мин), установив напорную трубку на заданных расстояниях от внутренней стенки трубопровода, снять показания с микроанометра, барометра, влагомера и термометра; рассчитать значения локальных скоростей воздуха; определить среднюю скорость потока методом графического интегрирования; построить эпюры скоростей; рассчитать критерий Рейнольдса для средней скорости потока; вычислить отношение средней скорости к максимальной при различных режимах; сравнить экспериментально полученные отношения  $w/w_{max}$  со значениями из графика зависимости отношения средней скорости потока к максимальной  $w/w_{max}$  от критерия Рейнольдса.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы представить в виде таблиц 1.1. «Измерительные величины» и 1.2. «Рассчитанные величины», привести графики зависимостей произведения  $w_r \cdot r$  от радиуса  $r$ , графики эпюр скоростей для трех режимов работы вентилятора, сделать выводы к работе и ответить на контрольные вопросы.

**Технология работы:** провести три серии опытов (изменяя число оборотов вентилятора не менее 3-х раз в сторону увеличения от 800 до 2500 об/мин), установив напорную трубку на заданных расстояниях от внутренней стенки трубопровода, снять показания с микроанометра, барометра, влагомера и термометра; провести технические расчеты.

**Контрольные вопросы:**

1. В чем отличие местной (локальной) скорости от средней скорости при течении газа или жидкости по трубопроводу?
2. Режимы движения потоков, критерий Рейнольдса.

3. Эпюры скоростей для ламинарного и турбулентного потоков.
4. Как рассчитывается средняя скорость потока газа в трубопроводе?
5. Соотношение средней и максимальной скоростей для ламинарного и турбулентного потоков.
6. Как устроена напорная трубка?
7. Как устроен и работает микроанометр?
8. Определение плотности воздуха с учетом его влажности.

## Описание лабораторной работы

### *Теоретическая часть*

При движении жидкости или газа по трубопроводу скорости различных слоев потока по сечению трубопровода не одинаковы из-за сил внутреннего трения и трения о стенку. Скорость в какой-либо точке поперечного сечения потока называется местной (локальной) скоростью. Для сформировавшегося (установившегося) потока местная скорость движения наибольшая в центре потока (на оси трубопровода), а у стенок трубопровода равна нулю.

В ряде случаев нет необходимости учитывать различие скоростей по сечению потока, поэтому пользуются понятием средней скорости. Средней скоростью потока называют скорость, с которой должны были бы двигаться все частицы жидкости через живое сечение потока, чтобы сохранялся расход соответствующий данному распределению скоростей в сечении. Объемный расход жидкости  $V$ , м<sup>3</sup>/с, проходящий через сечение трубопровода  $F$ , м<sup>2</sup>, при средней скорости  $w$ , м/с, будет равен

$$V = Fw = \pi R^2 w, \quad (1.1)$$

где  $R$  – радиус трубопровода, м.

Распределение местных скоростей по сечению трубопровода зависит от движения жидкости или газа. Режим их движения определяют по значению критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (1.2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па · с.

Различают ламинарный и турбулентный режим движения жидкости. При течении жидкости в прямых трубах устойчивый ламинарный режим имеет место, когда  $Re \leq 2320$ ; развитый турбулентный режим наблюдается при  $Re \geq 10^4$ ; переходной области соответствуют значения критерия  $2320 \leq Re \leq 10^4$ .

При ламинарном режиме движения все частицы движутся по параллельным друг другу траекториям, не перемешиваясь между собой.

При турбулентном режиме частицы совершают беспорядочные неустановившиеся движения по сложной траектории, что приводит к интенсивному перемешиванию слоев жидкости.

Наглядное представление о скорости в различных точках живого сечения потока может быть получено при рассмотрении поля скоростей.

Поле скоростей называется система векторов, каждый из которых характеризует собой по значению результирующую скорость в данной точке вдоль оси трубопровода. Эпюры скоростей для ламинарного и турбулентного потоков различны, рис. 1.1.

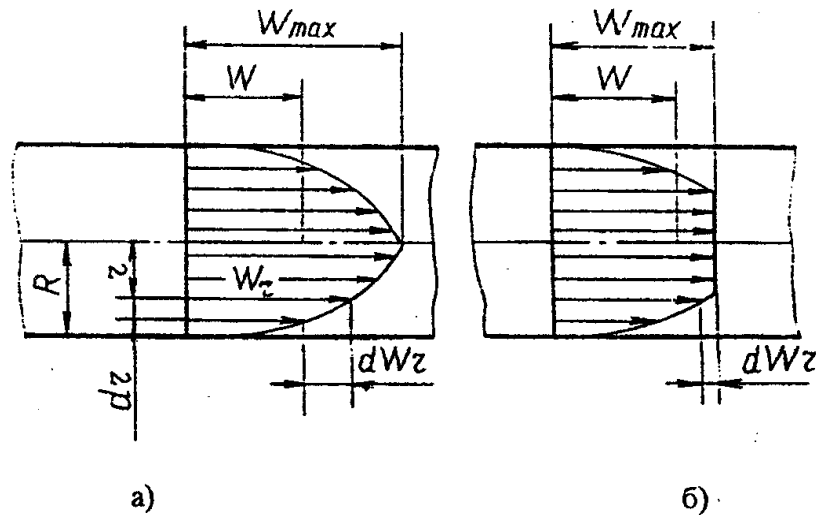


Рис. 1.1. Поле скоростей при движении потока жидкости в круглой трубе:  
а) ламинарный режим; б) турбулентный режим

Объемный расход  $dV$  в живом сечении потока, рис. 1.2, радиусом  $r$  и толщиной  $dr$  можно представить формулой

$$dV = w_r 2\pi r dr, \quad (1.3)$$

где  $w_r$  – местная (локальная) скорость потока, м/с;  $r$  – расстояние от центра трубопровода, м.

Тогда объемный расход через полное сечение трубопровода определяется интегрированием выражения (1.3) в пределах от 0 до  $R$ .

$$V = 2\pi \int_0^R w_r r dr, \quad (1.4)$$

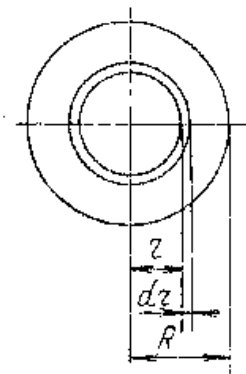


Рис. 1.2. Поперечное сечение потока

Приравнивая правые части уравнений (1.1) и (1.4) и учитывая, что площадь поперечного сечения трубопровода  $F = \pi R^2$ , получаем формулу для определения средней скорости потока

$$w = \frac{2}{R^2} \int_0^R w_r r dr, \quad (1.5)$$

Значение интеграла  $\int_0^R w_r r dr$  определяют графическим интегрированием.

Для этого сечение потока трубопровода условно делится на ряд равновеликих кольцевых площадок I, II, III, рис. 1.3. Каждая кольцевая площадка, в свою очередь, делится окружностью (проведенной штрих-пунктирной линией) на две равные по площади части. Точки 1, 2, 3, отмеченные на этих штрих-пунктирных окружностях, являются срединными точками выделенных кольцевых площадок I, II, III.

Если произвести замеры локальных скоростей в точках 1, 2, 3, то получатся средние скорости потока для каждой кольцевой площадки. Так как все кольцевые площадки по условию равновелики, то средняя арифметическая величина из замеренных в точках 1, 2, 3 скоростей и будет являться средней скоростью данного потока.

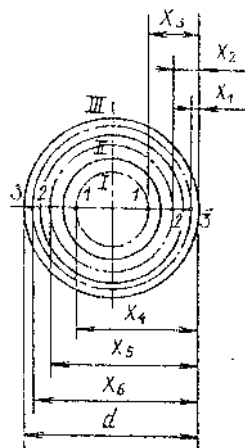


Рис. 1.3. Деление поперечного сечения трубопровода на ряд равновеликих кольцевых площадок

Расстояние  $x$  от стенок трубопровода до средних точек каждой кольцевой площадки, т. е. до точек замера скоростей 1, 2, 3, определяется по следующей формуле:



$$x = \frac{d}{2} \left( 1 \pm \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right), \quad (1.6)$$

где  $d$  – диаметр трубопровода;  $n$  – номера окружностей, делящих пополам кольцевые площадки (считая от центра трубопровода);  $N$  – число кольцевых площадок.

В данной лабораторной установке для диаметра трубопровода  $d = 98$  мм число кольцевых площадок  $N$  можно принять равными 3, рис. 1.3. Тогда  $n = 1 \dots 3$ . Знак плюс в формуле (1.6) берется при определении значений  $x$  правее оси трубопровода ( $x_1, x_2, x_3$ ), знак минус – для  $x$ , лежащих левее оси трубопровода ( $x_4, x_5, x_6$ ).

Стандартная напорная трубка системы НИИОГАЗ для измерения  $\Delta P_{ск}$  имеет диаметр  $d = 6$  мм; следовательно, когда такая трубка находится в крайнем правом или крайнем левом положении, расстояние от оси напорной трубки  $AB$  до стенки трубопровода равно  $6:2 = 3$  мм, рис. 1.4.

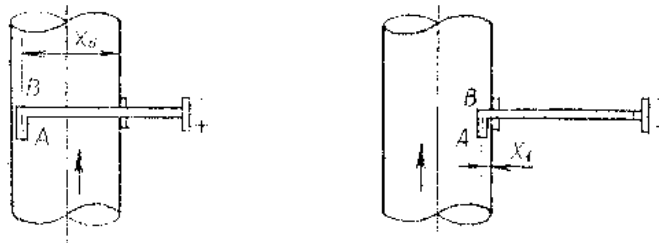


Рис. 1.4. Положение напорных трубок в крайних точках замера

Чем больше число кольцевых площадок, тем точнее будет значение средней скорости потока.

Крайние же точки замеров по формуле (1.6) должны находиться от правой внутренней стенки трубопровода на расстоянии:

$$x_1 = \frac{98}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} \right) = 4,3 \text{ мм},$$

$$x_6 = \frac{98}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} \right) = 93,7 \text{ мм}.$$

Следовательно, можно с небольшой погрешностью принять, что точкам замеров  $x_1$  и  $x_6$  будут соответствовать крайние – правое и левое – положения напорной трубки в трубопроводе. Для остальных точек замера (от  $x_2$  до  $x_5$ ) положения напорной трубки вычисляется по формуле (1.6). При проведении измерений положение напорной трубки указывается стрелкой (укрепленной на верхней части трубки) по неподвижной горизонтальной шкале, имеющей градуировку от 0 до 98 мм (соответственно диаметру трубопровода).

После проведенных замеров местных скоростей в установленных площадках строят график, рис. 1.5, в координатах  $w_r \cdot r = f(r)$ . Площадь, ограниченная полученной кривой с учетом масштаба построения, дает значение интеграла.

Нетрудно доказать, что для ламинарного потока средняя скорость равна половине максимальной, т. е.  $w = 0,5w_{max}$ .

Для развитого турбулентного потока отношение средней скорости к максимальной зависит от значения критерия Рейнольдса, рис. 1.6. Так, например, при  $Re = 10^8$  средняя скорость составит  $w = 0,9w_{max}$ .

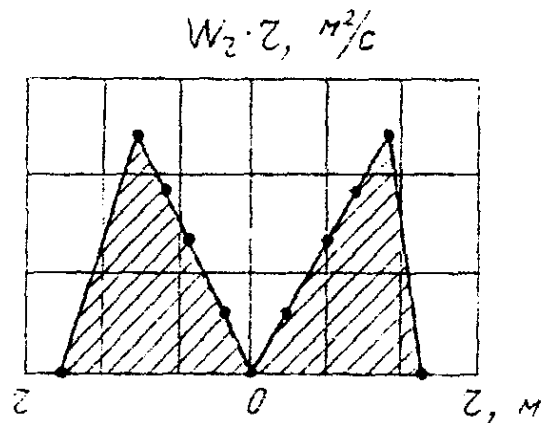


Рис. 1.5. Зависимость произведения  $w_r \cdot r$  от радиуса  $r$

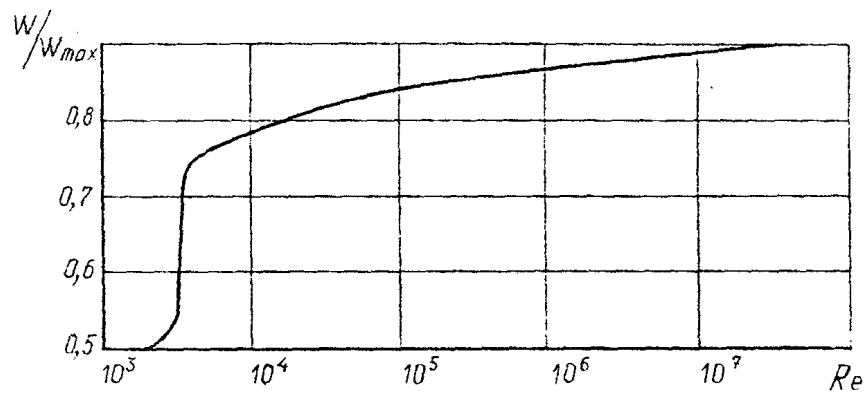


Рис. 1.6. Зависимость отношения средней скорости потока к максимальной  $w/w_{max}$  от критерия Рейнольдса ( $Re$ )

Для замера скоростей потока используется напорная трубка системы НИИОГАЗ. Напорная трубка состоит из двух трубок – внутренней и наружной, рис. 1.7. Внутренняя трубка, открытая с торца навстречу потоку, воспринимает общее давление, равное сумме статического и скоростного (динамического) давлений. Наружная трубка, имеющая круговую прорезь (или отверстия) на боковой поверхности, воспринимает только статическое давление. Напорная трубка всегда устанавливается вдоль оси трубопровода, открытым концом навстречу потоку.

По разности общего и статического давлений можно определить скоростное (динамическое) давление, обычно обозначаемое через  $\Delta P_{ск}$ .

Выведенные наружу (за пределы трубопровода) концы внутренней и наружной трубок имеют следующие отличительные знаки: для статического давления – знак минус «-», для общего давления – знак плюс «+». Для измерения разности давлений концы трубок присоединяются к дифференциальному манометру, показывающему величину скоростного давления  $\Delta P_{ск}$ .

Из формулы

$$\Delta P_{ск} = \frac{\rho_{вл.г} w_r^2}{2} \quad (1.7)$$

находится значение местной скорости

$$w_r = \sqrt{\frac{2\Delta P_{ск}}{\rho_{вл.г}}} \quad (1.8)$$

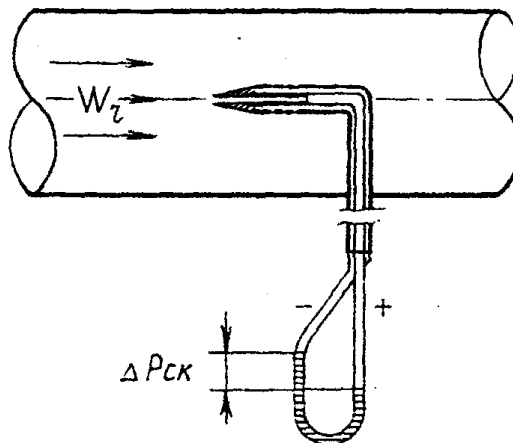


Рис. 1.7. Схема измерения скоростного давления с помощью напорной трубки НИИОГАЗ и дифференциального манометра

Экспериментальное изучение закона распределения скоростей в поперечном сечении потока производится на специальной лабораторной установке.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка, рис. 1.8, состоит из вентилятора 1 с электродвигателем переменного тока 2, частота вращения которого регулируется с помощью лабораторного трансформатора 3. Число оборотов вала вентилятора снимают с цифрового табло тахометра 4, соединенного с тахогенератором 5. К вентилятору присоединены всасывающий трубопровод 6 с сеткой 7 (для устранения попадания посторонних предметов в вентилятор) и нагнетательный трубопровод 8. Диаметры

трубопроводов 98 мм. На нагнетательном трубопроводе 8 установлена напорная (гидродинамическая) трубка 9, которая может перемещаться по сечению потока в диаметральной направлении и соединена с дифференциальным микроманометром 10. Место расположения оси напорной трубки в нагнетательном трубопроводе устанавливается по измерительному устройству 11. В схему лабораторной установки входят следующие приборы: барометр 12, влагомер 13 и термометр 14. Управление электродвигателем включает в себя: магнитный пускатель 15, амперметр 16 и вольтметр 17.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для выполнения данной работы включают вентилятор 1 и задают наименьшую частоту вращения (порядка 800 об/мин) по шкале тахометра 4. Затем устанавливают напорную трубку 9 на заданном расстоянии  $x_1$  от внутренней стенки трубопровода по измерительному устройству 11 и снимают показания с микроманометра 10, барометра 12, влагомера 13 и термометра 14. Для остальных точек (от  $x_2$  до  $x_6$ ) устанавливают новые положения напорной трубки по измерительному устройству и в той же последовательности производят замеры и снимают показания приборов. Данные замеров повторяют и заносят в таблицу 1.1.

После проведения всей серии опытов (изменяя число оборотов вентилятора не менее 3-х раз в сторону увеличения от 800 до 2500 об/мин) подсчитывают значения локальных (местных) скоростей воздуха в шести точках поперечного сечения потока.

Затем производят дополнительный замер скоростного давления в центре трубопровода для получения величины максимальной скорости  $w_{max}$  на оси потока (при тех же числах оборотов) и после определения средней скорости потока находят отношение ее к максимальной (осевой), т. е.  $A = w/w_{max}$ .

Величина  $A$  полученного отношения средней скорости к осевой может служить ориентировочной характеристикой режима течения потока. При  $A = 0,5$  – поток ламинарный, при  $A > 0,5$  – поток турбулентный.

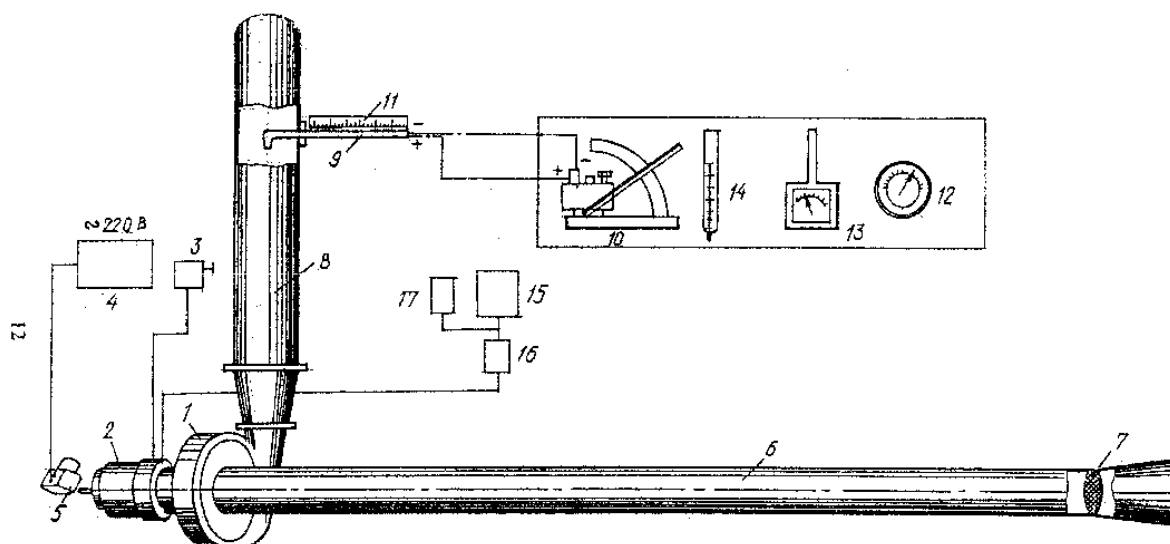


Рис. 1.8. Схема установки:

1 – вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – лабораторный трансформатор (ЛАТР); 4 – тахометр; 5 – тахогенератор; 6, 8 – трубопроводы; 7 – сетка; 9 – напорная трубка; 10 –

микроманометр; 11 – измерительное устройство; 12 – барометр; 13 – влагомер; 14 – термометр; 15 – магнитный пускатель; 16 – амперметр; 17 – вольтметр

## ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Определяют точки замера скоростных давлений по выражению (1.6) и заносят в отчетную таблицу 1.1.

2. По скоростному давлению  $\Delta P_{ск}$  определяют значение местной скорости в различных точках поперечного сечения из формулы (1.8) и при различных режимах.

При этом скоростное давление  $\Delta P_{ск}$ , Па, определяется из выражения

$$\Delta P_{ск} = l g K \rho_{сп}, \quad (1.9)$$

где  $l$  – отсчет по шкале микроманометра, м сп. ст.;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $K$  – постоянная прибора, при которой производились замеры;  $\rho_{сп}$  – плотность спирта ( $\rho_{сп} = 800 \text{ кг/м}^3$ ),

и заносится в таблицу 1.2.

В формулу (1.8) входит плотность влажного воздуха  $\rho_{вл.в}$ , кг/м<sup>3</sup>.

Плотность влажного воздуха рассчитывают по показаниям термометра и влагомера:

$$\rho_{вл.в} = \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{T} (B - 0,378 \varphi P_{нас}), \quad (1.10)$$

где  $T$  – температура воздуха, К;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, в долях;  $B$  – барометрическое давление, Па;  $P_{нас}$  – давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха в условиях эксперимента (по таблице), Па.

3. Вычисляют произведение  $w_r \cdot r$ . Данные расчетов заносят в таблицу 1.2. Строят зависимость  $w_r \cdot r = f(r)$  (см. рис. 1.5), из которой находят значение  $\int_0^R w_r r dr$ .

4. Среднюю скорость воздуха рассчитывают по формуле (1.5). По данным таблицы 1.2 строят эпюру скоростей (см. рис. 1.1), на которую наносят среднюю скорость.

5. Рассчитывают критерий Рейнольдса по формуле (1.2), в которую входят плотность влажного воздуха  $\rho_{вл.в}$ , кг/м<sup>3</sup>, и динамическая вязкость влажного воздуха  $\mu_{вл.в}$ , Па·с.

6. Вычисляют отношение средней скорости к максимальной при различных режимах, т. е. при различных критериях Рейнольдса. Сравнивают экспериментально полученные отношения  $W/W_{max}$  со значениями из графика (см. рис. 1.6).

7. По формуле (1.1) рассчитывают расход воздуха.

Таблица 1.1

## ИЗМЕРЕННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

№ п/п	Точки замера, $x_i$ , мм	Отсчет по шкале микроанометра, $l$ , мм сп. ст.			Параметры влажного воздуха					Параметры водяного пара, $P_{нас}$ , Па
		1 режим ( $n =$ об/мин)	2 режим ( $n =$ об/мин)	3 режим ( $n =$ об/мин)	$T$ , К	$\varphi$ , доля	$B$ , Па	$\mu_{вл.в} \cdot 10^6$ , Па·с	$\rho_{вл.в}$ , кг/м <sup>3</sup>	
1.	$x_1$									
2.	$x_2$									
3.	$x_3$									
4.	$x_4$									
5.	$x_5$									
6.	$x_6$									
7.	$x_{ось}$									

Таблица 1.2

## РАССЧИТАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

№ п/п	Расстояние от оси трубопровода, $r$ , мм	$\Delta P_{ск}$ , Па			Местная скорость, $w_r$ , м/с			Произведение $w_r \cdot r$ , $m^2/c$			Режимы движения		
		1 режим ( $n =$ об/мин)	2 режим ( $n =$ об/мин)	3 режим ( $n =$ об/мин)	1 режим ( $n =$ об/мин)	2 режим ( $n =$ об/мин)	3 режим ( $n =$ об/мин)	1 режим ( $n =$ об/мин)	2 режим ( $n =$ об/мин)	3 режим ( $n =$ об/мин)	$Re_1$	$Re_2$	$Re_3$
1.													
2.													
3.													
4.													
5.													
6.													
7.													

## Лабораторная работа № 2 6 часов

### Определение гидравлических сопротивлений элементов напорного трубопровода

**Цель работы:** исследование гидравлических сопротивлений элементов напорного трубопровода.

**Задачи работы:**

- опытное определение коэффициента трения  $\lambda$  в трубопроводе при различных скоростях движения жидкости;
- установление величины коэффициентов местных сопротивлений  $\xi_{м.с.}$ ;
- ориентировочная оценка эквивалентной шероховатости трубопровода  $\Delta_{эк}$ ;
- определение полного перепада давления в системе  $\Delta P$ ;
- расчет мощности двигателя  $N$ .

**Обеспечивающие средства:** лабораторный стенд, состоящий из напорного бака с центробежным насосом; пяти объектов исследования – участок внезапного расширения, внезапного сужения, запорного вентиля и муфтового закругления и прямой участок трубы; муфтовое закругление; сменные шайбы; гидродинамические трубки. Контрольно-измерительные приборы – пять дифференциальных манометров; дифференциальный микроманометр; термометры, вольтметр, амперметр.

**Задание:** на каждом из участков трубопровода, где установлены местные сопротивления и на линии с прямым участком проводят замеры показаний манометров, изменяя расход потока воды; рассчитывают коэффициенты сопротивления трения  $\lambda$  в трубопроводе при различных скоростях движения жидкости; устанавливают величины коэффициентов местных сопротивлений  $\xi_{м.с.}$ ; оценивают эквивалентную шероховатость трубопровода  $\Delta_{эк}$ ; определяют полный перепад давления в системе  $\Delta P$ ; рассчитывают мощность двигателя  $N$ .

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы представить в виде таблиц 2.1. «Экспериментальные и расчетные данные», привести график зависимости коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа  $Re$  ( $\lambda - \lg Re$ ); построить график зависимости  $\xi_{м.с.} - \lg Re$ .

**Технология работы:** на каждом из участков трубопровода, где установлены местные сопротивления и на линии с прямым участком проводят замеры показаний манометров, изменяя расход потока воды; рассчитывают коэффициенты сопротивления трения  $\lambda$ ; устанавливают величины коэффициентов местных сопротивлений  $\xi_{м.с.}$ ; оценивают эквивалентную шероховатость трубопровода  $\Delta_{эк}$ ; определяют полный перепад давления в системе  $\Delta P$ ; рассчитывают мощность двигателя  $N$ .

**Контрольные вопросы:**

1. На преодоление каких потерь затрачивается энергия при движении жидкости по трубопроводу?
2. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?



3. Что такое средняя скорость потока?
4. Как влияет шероховатость на потери энергии?
5. Как экспериментально определить коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления?
6. Как проявляются на изменение величины коэффициента трения условия протекания жидкости при различных режимах движения?
7. Как определить шероховатость трубы?
8. Почему сужение, расширение, вентиль, муфтовое закругление оказывают различные сопротивления?
9. Как в работе измеряют расход воды, текущей по трубопроводу?
10. Физический смысл критериев Эйлера и Рейнольдса?
11. Как определить полный перепад давления (напор) в системе?

### Описание лабораторной работы

#### *Теоретическая часть*

Одним из важнейших вопросов гидромеханики является определение потерь энергии при движении жидкости. При движении жидкости по трубопроводам возникают потери энергии, которые зависят от длины трубопроводов (пропорциональные длине канала), и потери энергии в местных сопротивлениях – запорная арматура, повороты, расширения и сужения трубопроводов – вызываемые изменениями скорости потока либо по величине, либо по направлению. Потери энергии потока как на преодоление сопротивлений по длине трубопроводов, так и на преодоление местных сопротивлений, в конечном счете, обусловлены вязкостью жидкости, а, следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую.

Важность определения потери напора  $h_n$  (или потери давления  $\Delta P$ ) связана с необходимостью расчета затрат энергии, требуемых для компенсации этих потерь и перемещения жидкостей, например, с помощью насосов, компрессоров, воздуходувок и т. д.

Потерянный напор является суммой двух слагаемых:

$$h_n = h_{Tp} + h_{mc}, \quad (2.1)$$

где  $h_{Tp}$  и  $h_{mc}$  – потери напора вследствие трения и местных сопротивлений, соответственно, м ст. ж.

Для вычисления потерь напора обычно пользуются частными эмпирическими формулами

$$h_{Tp} = \lambda \frac{lw^2}{d2g} \quad (2.2)$$

и

$$h_{мс} = \zeta \frac{w^2}{2g}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;  $l$  – длина трубы, м;  $d$  – диаметр трубы, м;  $w$  – средняя скорость движения потока, м/с.

Средняя скорость, входящая в формулы (2.2) и (2.3), – это такая, одинаковая для всех точек сечения, скорость, при которой за единицу времени через данное сечение проходит тот же расход жидкости, что и при действительном распределении скоростей по сечению потока. Среднюю скорость определяют по уравнению расхода

$$w = V/S, \quad (2.4)$$

где  $V$  – объемный расход, т. е. объем жидкости, проходящий через живое сечение потока за единицу времени, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – живое сечение потока, в случае течения по трубе равное площади поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Из формул (2.2) и (2.3) следует, что потери энергии на трение и местные сопротивления пропорциональны скоростному или динамическому напору ( $w^2/2g$ ), который является мерой кинетической энергии потока, отнесенной к единице объема жидкости. В действительности эта зависимость значительно сложнее, так как коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления не являются постоянными величинами, а существенно зависят от скорости течения жидкости, ее плотности и вязкости, а также диаметра и шероховатости трубы, по которой движется поток.

Значительно более полно можно описать напорное движение потока, если исходить из общих положений гидродинамики.

Установившееся движение потока определяется уравнением

$$Eu = A Re^m \Gamma_1^n \Gamma_2^q, \quad (2.5)$$

которое представляет собой критериальную форму уравнения Навье–Стокса для установившегося движения жидкости при напорном течении по прямому трубопроводу. В этом уравнении:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2} \text{ – критерий Эйлера, являющийся мерой отношения сил}$$

давления и сил инерции;

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \text{ – критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения}$$

сил инерции и сил вязкости;

$\Gamma_1 = \frac{l}{d}$  – симплекс геометрического подобия по длине;

$\Gamma_2 = \frac{\Delta_{\text{ЭК}}}{d}$  – симплекс геометрического подобия по шероховатости;

$\Delta_{\text{ЭК}}$  – эквивалентная шероховатость, м;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$A, m, n, q$  – коэффициенты, зависящие от режима движения потока, т. е. такая условная постоянная по длине трубы шероховатость, образованная выступами одинаковой высоты  $\Delta_{\text{ЭК}}$ , при которой потери энергии потока на трение будут теми же самыми, что и при данной реальной шероховатости с выступами различной величины.

Прохождение потока через местные сопротивления может быть охарактеризовано аналогичными критериальными уравнениями, однако выражение симплексов геометрического подобия для этих случаев пока не установлено и константы уравнения не определены.

Влияние характеристик, входящих в уравнение (2.5), на величину трения проявляются по-разному при различных режимах потока в трубе. В одном диапазоне изменения чисел Рейнольдса, характеризующих режим движения, на величину  $\lambda$  влияет в большей степени скорость, в другом диапазоне преобладающее внимание оказывают геометрические характеристики – диаметр и шероховатость трубы (высота выступов шероховатости  $\Delta$ ).

В связи с этим различают четыре области сопротивления, в которых изменение  $\lambda$  имеет свою закономерность.

*Первая область* – область ламинарного потока, ограниченная значениями  $Re < 2320$ , в которой  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса ( $Re$ ) и не зависит от величины  $\Delta$ , определяется по формуле Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.6)$$

При этом значении  $\lambda$  потери напора по длине трубы пропорциональны скорости в первой степени. Все остальные области сопротивления находятся в зоне турбулентного режима с различной степенью турбулентности.

*Вторая область* – гидравлически гладкие трубы. Поток в трубе при этом турбулентный, но у стенок трубы сохраняется слой жидкости, в пределах которого движение остается ламинарным. Трубы считаются гидравлически гладкими, если толщина ламинарного слоя  $\delta$  больше высоты  $\Delta$  выступов шероховатости. В этом случае ламинарный слой покрывает неровности стенок трубы, и последние не оказывают тормозящего влияния на основное турбулентное ядро потока.

Границу зоны гидравлически гладких труб можно определить из зависимости

$$Re \leq 27 \left( \frac{d}{\Delta} \right)^{1,14}. \quad (2.7)$$

Для гидравлически гладких труб, т. е. при условии  $\delta > \Delta$ , коэффициент  $\lambda$  может быть определен по формуле

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (2.8)$$

которая применима при значениях чисел Рейнольдса  $Re \leq 10^5$ .

*Третья область* – переходная от области гидравлически гладких труб к квадратичной области. В этой области толщина ламинарного слоя  $\delta$  равна или меньше выступов шероховатости  $\Delta$ , которые в этом случае выступают как препятствия у стенок, увеличивая турбулентность, а, следовательно, и сопротивление в потоке.

Для определения  $\lambda$  в переходной области сопротивления применима формула

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \frac{\Delta}{3,7d} + \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} \right]. \quad (2.9)$$

Потери напора по длине трубы в переходной области сопротивления пропорциональны скорости в степени от 1,75 до 2,0.

*Четвертая область* – гидравлически шероховатых труб или квадратичного сопротивления (автомодельная область). Основное влияние на сопротивление потоку оказывает шероховатость стенок трубы. Чем больше выступы шероховатости  $\Delta$ , тем большую турбулентность они вызывают, тем больше будут затраты энергии в потоке на преодоление сопротивлений. В квадратичной области сопротивления коэффициент  $\lambda$  не зависит от скорости, а становится функцией только относительной шероховатости  $\varepsilon$ , выражаемой отношением абсолютной шероховатости  $\Delta$  к диаметру  $d$  трубы

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d}. \quad (2.10)$$

Для автомодельной области в уравнении (2.9) можно пренебречь вторым слагаемым в квадратных скобках, и оно принимает вид

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7}{\varepsilon}. \quad (2.11)$$

Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  при установившемся напорном движении жидкости, в общем случае, зависит от формы местного сопротивления, относительной шероховатости стенок  $\Delta/d$ , распределения скоростей в граничных сечениях потока перед местным сопротивлением и после него, и значения числа  $Re$ .

Ввиду большой сложности структуры потока в местных сопротивлениях значения  $\zeta$ , как правило, могут быть определены только опытным путем.

Основные виды местных потерь напора можно условно разделить на следующие группы:

а) потери, связанные с изменением сечения потока, или, что то же, его средней скорости. Сюда относятся случаи внезапного расширения, сужения, а также постепенного расширения и сужения потока;

б) потери, вызванные изменением направления потока. К такого рода сопротивлениям относятся: колена, угольники, отводы, используемые на трубопроводах;

в) потери, вызванные с протеканием жидкости через арматуру различного типа (вентили, краны, обратные клапаны, сетки, отборы и т. д.).

Рассмотрим некоторые случаи местных сопротивлений

### Внезапное расширение потока

При внезапном расширении поперечного сечения трубы возникают так называемые потери на «удар», рис. 2.1.

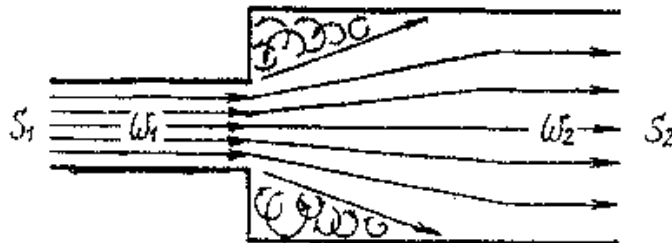


Рис. 2.1. Схема потока при внезапном расширении

Коэффициент сопротивления «удара» в случае равномерного распределения

скоростей по сечению трубы перед ее расширением и турбулентного течения ( $Re > 3500$ ) зависит только от отношения площадей узкого и широкого сечения  $S_1 / S_2$ , и вычисляется по формуле

$$\zeta_{в.р.} = \frac{h_{в.р.}}{w_1^2 / 2g}, \quad (2.12)$$

где  $\zeta_{в.р.}$  – коэффициент сопротивления при внезапном расширении;  $h_{в.р.}$  – потери напора при внезапном расширении, м;  $w_1, w_2$  – средние скорости потока соответственно в узкой и широкой части трубы, м/с;  $S_1, S_2$  – площади сечения соответственно в узкой и широкой части трубы, м<sup>2</sup>.

При числе Рейнольдса в пределах  $10 < Re < 3500$  (ламинарный и переходный режим течения) коэффициент сопротивления «удара» зависит не только от отношения площадей  $S_1 / S_2$ , но и от числа  $Re$ , а при  $Re < 10$  – только от этого числа.

#### Внезапное сжатие потока

Во входных участках, в которых осуществляется внезапное сужение, т. е. внезапный переход от большого сечения с площадью  $S_1$ , рис. 2.2, потери энергии главным образом зависят от степени сжатия струи.

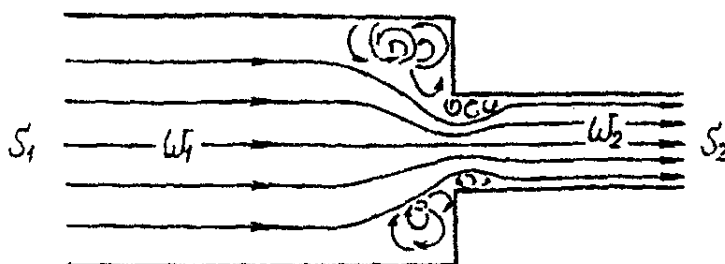


Рис. 2.2. Схема потока при внезапном сужении

При больших числах Рейнольдса ( $Re > 10^4$ ) коэффициент сопротивления зависит от отношения площадей  $S_1 / S_2$ . Этот коэффициент вычисляется по формуле

$$\zeta_{в.с.} = \frac{h_{в.с.}}{w_2^2 / 2g} \quad (2.13)$$

где  $\zeta_{в.с.}$  – коэффициент сопротивления участка при внезапном сужении;  $h_{в.с.}$  – потеря напора при внезапном сужении, м;  $w_1, w_2$  – средние скорости потока соответственно в широкой и узкой части трубы, м/с;  $S_1, S_2$  – площади сечения соответственно в широкой и узкой части трубы, м<sup>2</sup>.

При числах Рейнольдса в пределах  $10 < Re < 10^4$  коэффициент сопротивления выхода с внезапным сужением зависит не только от отношения площадей  $S_1 / S_2$ , но и от числа Рейнольдса, а в пределах  $Re < 10$  – только от этого числа.

Изменение направления потока (муфтовое закругление)

Особенностью потока на повороте, рис. 2.3, являются вторичные течения, возникающие в поперечном сечении, рис. 2.4, и накладывающиеся на основной поток.

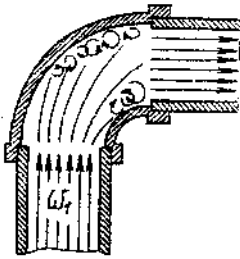


Рис. 2.3. Муфтовое закругление  
в потоке при закруглении

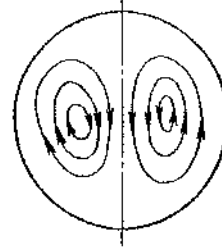


Рис. 2.4. Вторичное движение

В случае соединения стальных отводов на резьбе и в месте стыка прямого участка с изогнутой частью образуется уступ, приводящий к резкому изменению поперечного сечения в этом месте, что является источником дополнительного сопротивления. Для колен и отводов величину коэффициента сопротивления можно практически считать постоянной при всех значениях числа Рейнольдса ( $Re > 2 \cdot 10^5$ ) и вычислять по формуле

$$\zeta_{м.з.} = \frac{h_{м.з.}}{w_1^2 / 2g}, \quad (2.14)$$

где  $\zeta_{м.з.}$  – коэффициент сопротивления на муфтовом закруглении;  $h_{м.з.}$  – потеря напора на муфтовом закруглении, м;  $w_1$  – средняя скорость потока во входном сечении изогнутого трубопровода, м/с.

При меньших значениях числа  $Re$  его влияние на сопротивление начинает сказываться в тем большей степени, чем меньше  $Re$ . Зависимость эта сложная и в силу малой изученности не поддается пока точному определению.

#### Движение потока через ventиль

Величина коэффициента сопротивления запорных (дроссельных или регулирующих) устройств зависит от их конструкции и конфигурации, внутренних каналов, определяющих прямолинейность потока, постоянства сечения и т. д. Сопротивление каждого типа запорного устройства в значительной степени зависит от положения закрывающего органа. Кроме того, на коэффициент сопротивления сказывается шероховатость отливки корпуса, которая тем больше, чем меньше размер ventиля. Коэффициент сопротивления ventилей существенно зависит от числа Рейнольдса. При этом в области малых значений  $Re$  по мере его возрастания происходит заметное уменьшение  $\zeta_в$ , которое достигает минимума при  $Re = 5 \cdot 10^4$ . Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса сопровождается замедленным ростом коэффициента  $\zeta_в$ , а при очень больших коэффициентах сопротивления становится постоянным и независимым от этого числа.

На рис. 2.5 приведена схематическая картина потока в запорном устройстве типа ventиль.

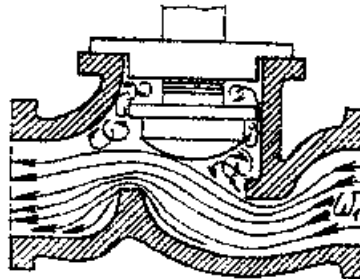


Рис. 2.5. Схема потока жидкости в ventиле

В этом случае коэффициент сопротивления можно определить из формулы

$$\zeta_в = \frac{h_в}{(w_1^2 / 2g)}, \quad (2.15)$$

где  $\zeta_в$  – коэффициент сопротивления ventиля;  $h_в$  – потеря напора при прохождении через ventиль, м;  $w_1$  – средняя скорость потока в трубопроводе перед запорным устройством, м/с.



## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Вода из напорного бака *1* центробежным насосом *2* подается через систему различных гидравлических сопротивлений и поступает обратно в бак, рис. 2.6. Бак установлен выше насоса и соединен всасывающим трубопроводом *3* с насосом и снабжен указателем уровня *27*.

На установке имеется пять объектов исследования. Жидкость центробежным насосом *2* по нагнетательному трубопроводу *4* подается в трубопровод – участок, где можно исследовать сопротивление внезапного расширения *5*, внезапного сужения *6*, запорного вентиля *7* и муфтового закругления *8*. Затем поток изменяет направление и поступает в прямой участок трубы *9*, где можно изучить зависимость коэффициента трения от режима движения. После чего поток по сливному трубопроводу *13* возвращается в напорный бак. Условные проходы трубопроводов с объектами исследования указаны непосредственно на месте.

Изменение скорости движения воды на рабочих участках трубопровода достигается соответствующей регулировкой расхода вентилем *10* на нагнетательном патрубке насоса.

Расход жидкости в системе измеряют с помощью диафрагмы *14*, установленной на нагнетательном трубопроводе. Диафрагма соединена с дифференциальным мембранным манометром ДМ-3583-15, который работает в комплекте с вторичным прибором дифтрансформаторной системы типа КСД2-16.

Потери давления (напора) при прохождении потока через расширение, сужение, запорную арматуру, поворот и участок с сопротивлением по длине трубопровода измеряются манометрами *17–23*. Температуру воды контролируют термометром *28*. Воздух из системы трубопроводов стравливается при помощи спускного крана *12*.

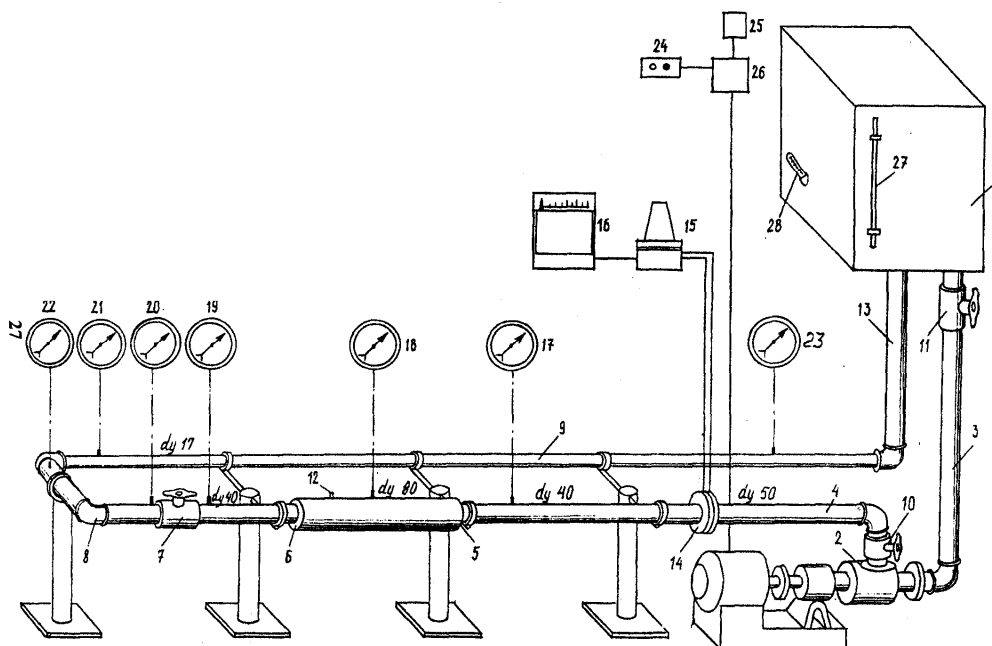


Рис. 2.6. Схема установки:

1 - напорный бак; 2 - центробежный насос; 3 - всасывающий трубопровод; 4 - нагнетательный трубопровод; 5 - внезапное расширение; 6 - внезапное сужение; 7 - запорный вентиль; 8 - муфтовое закругление; 9 - прямой участок; 10, 11 - вентили; 12 - спусковой кран; 13 - сливной, трубопровод; 14 - диафрагма; 15 - дифференциальный манометр; 16 - показывающий прибор; 17-23 - пружинные манометры; 24 - кнопка пуска; 25 - автоматический выключатель; 26 - магнитный пускатель; 27 - указатель уровня; 28 - термометр

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед пуском установки проверяют заполнение напорного бака 1 с помощью указателя уровня 27. Количество воды в напорном баке должно быть не менее половины его объема; при меньшем количестве необходимо добавить воду. После этого открывают вентиль 11 и кнопкой пуска 24 приводят в действие центробежный насос 2 при закрытом вентиле 10. Вентиль 11 во избежание разрушения насоса от кавитации должен быть полностью открыт во время работы насоса. По показаниям вторичного прибора КСД2 16, соединенного с дифференциальным манометром 15, подключенного к диафрагме 14 устанавливают первоначально наименьший из требуемых расходов при помощи вентиле 10. Поток направляют через заданные объекты исследования, и потери давления (напора) на соответствующих участках замеряют по показаниям манометров 17 – 23. Затем увеличивают расход, доводя его до следующего заданного значения, и снова проводят отсчеты показаний манометров. Таким образом, на каждом из участков трубопровода, где установлены местные сопротивления, и на линии с прямым участком трубы в среднем производят 5 – 7 замеров. Последний замер производят непосредственно при полностью открытом

вентиле 10. Все показания манометров заносятся в таблицу 2.1.

## ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Среднюю скорость потока в трубопроводе при заданных расходах воды находят по уравнению (2.4).

Коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  рассчитывают, пользуясь формулой (2.2), а коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta_{м.с.}$  – по формуле (2.3) с учетом формул (2.12...2.15).

Перед вычислением значений критерия Рейнольдса рекомендуется привести общее выражение

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (2.16)$$

к виду

$$Re = A \frac{V}{\mu}, \quad (2.17)$$

где  $V$  – расход, м<sup>3</sup>/с;  $\mu$  – вязкость, Па·с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>,

и найти значение постоянного коэффициента  $A$ .

Для оценки полученных результатов необходимо сопоставить найденные опытным путем значения коэффициентов  $\lambda$  со справочными данными. Эти величины можно найти по вычисленным значениям числа Рейнольдса, пользуясь соответствующими графиками, рис. 2.7.

Чтобы установить шероховатость трубопровода по экспериментально найденным величинам коэффициентов трения  $\lambda$ , следует опытные значения  $\lambda$  в квадратичной области сопротивления подставить в формулу (2.11), откуда вычислить соответствующие значения  $\Delta_{эк}/d$  и  $\Delta_{эк}$ .

Полученные в результате исследования значения коэффициентов местного сопротивления  $\zeta_{м.с.}$  нанести на графики (обычно в полулогарифмических координатах  $\zeta_{м.с.} - \lg Re$ ) и по графику установить границы квадратичной зоны для данного местного сопротивления, в которой  $\zeta_{м.с.} = \text{const}$ .

Необходимо построить зависимость коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от числа  $Re$  (также в полулогарифмических координатах  $\lambda - \lg Re$ ).

Определение полного перепада в системе необходимо вычислить для одного из расходов с учетом всех местных сопротивлений и сопротивления по длине

$$\Delta P = \lambda \left( \frac{l}{d} \right) \left( \frac{\rho w^2}{2} \right) + \sum \zeta_i \left( \frac{\rho w_i^2}{2} \right), \quad (2.18)$$

где  $w$  – скорость воды на прямом участке, м/с;  $w_i$  – скорость воды на участке установки  $i$ -го местного сопротивления, м/с;  $\sum \zeta_i$  – сумма всех местных сопротивлений (вход и выход жидкости из бака, повороты, диафрагма, вентиль, сужения и расширения).

Мощность двигателя насосной установки ( $N$ , кВт) рассчитать по формуле

$$N = \frac{\Delta P V}{\eta 10^3}, \quad (2.19)$$

где  $\eta = 0,9$  – коэффициент полезного действия насоса.

Расчетные параметры заносятся в таблицу.

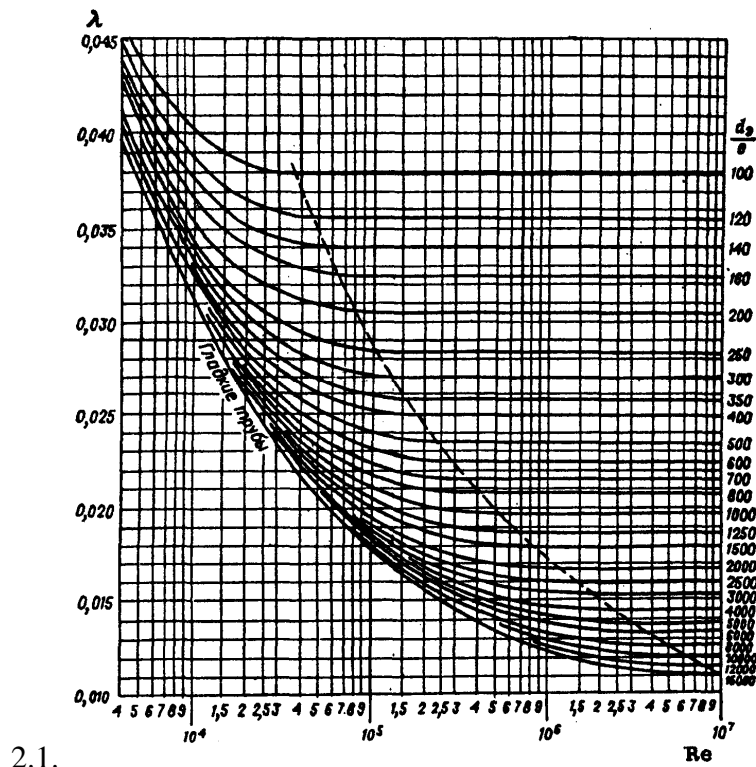


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента трения  $\lambda$  от критерия  $Re$  и степени шероховатости  $d / \Delta_{эж}$

Таблица 2.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

№ п/п	Наименование величины	Обозначение и размерность	Опыты					
			1	2	3	4	5	6
1.	Расходы воды	$V, \text{ м}^3/\text{с}$						
2.	Средняя скорость потока в трубах при диаметре: $d_y = 17 \text{ мм}$ $d_y = 40 \text{ мм}$ $d_y = 50 \text{ мм}$ $d_y = 80 \text{ мм}$	$w_{17}, \text{ м/с}$ $w_{40}, \text{ м/с}$ $w_{50}, \text{ м/с}$ $w_{80}, \text{ м/с}$						
3.	Средняя температура воды	$t, \text{ }^\circ\text{C}$						
4.	Вязкость воды	$\mu, \text{ Па} \cdot \text{ с}$						
5.	Число Рейнольдса	<b>Re</b>						
6.	Показания манометров	$R_{и17}, \text{ кгс/см}^2$ $R_{и18} \text{ — / —}$ $R_{и19} \text{ — / —}$ $R_{и20} \text{ — / —}$ $R_{и21} \text{ — / —}$ $R_{и22} \text{ — / —}$ $R_{и23} \text{ — / —}$						
7.	Потери напора при внезапном расширении	$h_{в.р.}, \text{ м}$						
8.	Потери напора при внезапном сужении	$h_{в.с.}, \text{ м}$						
9.	Потери напора на вентиле	$h_{в.}, \text{ м}$						
10.	Потери напора на муфтовом закруглении	$h_{м.з.}, \text{ м}$						
11.	Потери напора на прямом участке	$h_{Тр.}, \text{ м}$						
12.	Эквивалентная шероховатость	$\Delta_{эк}, \text{ мм}$						
13.	Полный перепад давления в системе	$\Delta P, \text{ Па}$						
14.	Мощность двигателя	$N, \text{ кВт}$						

### Лабораторная работа № 3 4 часа

#### Определение энергетических характеристик центробежного вентилятора. Работа центробежного вентилятора на сеть

**Цель работы:** практическое ознакомление с вентиляционной установкой; построение экспериментальных характеристик вентилятора и сети; определение параметров рабочей точки.

**Задачи работы:**

- умение определять энергетические характеристики центробежного вентилятора ( $N$ ,  $\eta$ ,  $\Delta P$ );
- приобретение навыков построения характеристик сети ( $V - \Delta P_c$ ) и графика работы вентилятора на сеть ( $V - \Delta P$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ).

**Обеспечивающие средства:** стенд экспериментальной установки включает – центробежный вентилятор; ЛАТР для изменения частоты вращения вентилятора; всасывающую и нагнетательную трубы, присоединенные к вентилятору; сменные шайбы для изменения площади выходного сечения нагнетательной трубы.

Контрольно-измерительные приборы – тахометр, для определения частоты вращения; дифференциальные манометр и микроманометр; термометр; амперметр; вольтметр.

**Задание:** получить экспериментальные характеристики центробежного вентилятора ( $V - \Delta P$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ), проводя первую серию опытов при постоянном числе оборотов  $n$ , производительность изменяют сменными шайбами; определить характеристики сети ( $V - \Delta P_c$ ), проводя вторую серию опытов при постоянной шайбе, расход воздуха меняют, изменяя число оборотов вентилятора; построить характеристики сети ( $V - \Delta P_c$ ) и график работы вентилятора на сеть ( $V - \Delta P$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ); определить параметры рабочих точек и параметры экономичной работы вентилятора.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы представить в виде таблицы 3.1. «Характеристики вентилятора при постоянном числе оборотов ( $n = \underline{\hspace{1cm}}$  об/мин)»; таблицы 3.2. «Характеристики сети при постоянном сечении шайбы»; графика работы центробежного вентилятора на сеть и выводов.

**Технология работы:** получить экспериментальные характеристики центробежного вентилятора ( $V - \Delta P$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ), при постоянном числе оборотов  $n$ , изменяя производительность сменными шайбами; установить характеристики сети ( $V - \Delta P_c$ ), при постоянной шайбе, изменяя число оборотов вентилятора.

**Контрольные вопросы:**

1. Как устроен и работает центробежный вентилятор.
2. Как устроена и работает гидродинамическая трубка?
3. Почему при определении характеристики вентилятора можно изменять расход воздуха сменной шайбой, а при определении характеристики сети нельзя?
4. Какой физический смысл имеют характеристика сети и рабочая точка?
5. В чем отличие дифференциального микроманометра от обычного

дифманометра?

6. Для чего служит тахометр?
7. Для чего проверяют значения критерия Рейнольдса при наименьшем расходе воздуха?

### Описание лабораторной работы

#### Теоретическая часть

Вентиляторами называют машины, предназначенные для перемещения газов при атмосферном давлении или близким к нему. Перемещаемый газ подвергается в вентиляторе незначительному сжатию – разность давлений газа после вентилятора и до него не превышает  $10^4$  Па, но обычно бывает и меньше. По устройству вентиляторы разделяют на центробежные и осевые. Центробежные вентиляторы создают большую разность давления, чем осевые.

Центробежный вентилятор, рис. 3.1, состоит из спирального корпуса 1, в котором размещено рабочее колесо 2 с изогнутыми лопатками 3. Газ поступает по оси вентилятора через всасывающий патрубок 4 в межлопаточные каналы, вращается вместе с колесом и под действием центробежной силы выбрасывается в улиткообразный корпус. В постоянно расширяющемся патрубке 4 динамический напор преобразуется в статический, под действием которого газ поступает в нагнетательный трубопровод.

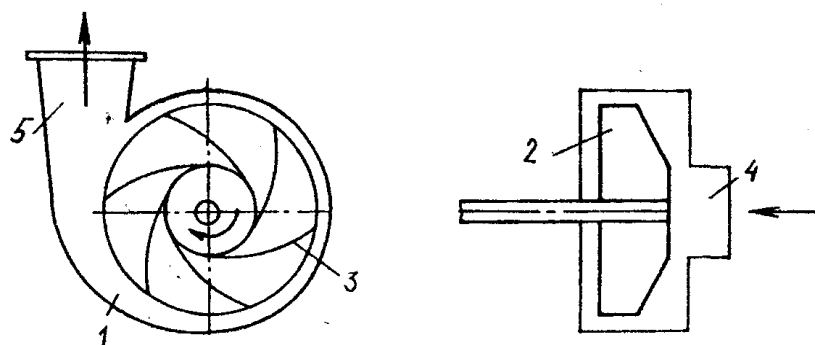


Рис. 3.1. Схема центробежного вентилятора:  
1 – корпус, 2 – рабочее колесо, 3 – лопатки, 4 – всасывающий патрубок,  
5 – нагнетательный патрубок

При постоянной частоте вращения работа центробежного вентилятора характеризуется следующими показателями: объемным расходом перемещаемого газа,  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; создаваемым им (газом) перепадом давления  $\Delta P$ , Па; затрачиваемой мощностью  $N$ , Вт; коэффициентом полезного действия  $\eta$ , представляющим собой отношение мощности  $V \cdot \Delta P$ , требуемой теоретически для сжатия газа, к мощности  $N$ , затрачиваемой в действительности

$$\eta = \frac{V\Delta P}{N}. \quad (3.1)$$

У центробежных вентиляторов  $V$ ,  $\Delta P$  и  $N$  связаны между собой, и изменения одной из этих величин вызывает изменения остальных. Графические зависимости  $\Delta P = f_1(V)$ ,  $N = f_2(V)$ ,  $\eta = f_3(V)$  называют энергетическими характеристиками вентилятора.

На основании теоретических расчетов эти характеристики с достаточной точностью построить нельзя. Поэтому на практике применяют характеристики вентиляторов, полученные опытным путем. Типичные характеристики центробежного вентилятора при постоянной частоте вращения ( $n = \text{const}$ ) показаны на рис. 3.2. При другой частоте вращения характеристики вентиляторов будут другими.

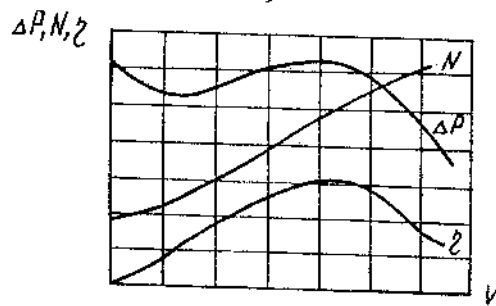


Рис. 3.2. Энергетические характеристики центробежного вентилятора

Связь между указанными величинами при различной частоте вращения колеса вентилятора  $n_1$  и  $n_2$  вытекает из анализа теоретических закономерностей и выражается следующим отношением:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}; \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3. \quad (3.2)$$

Характеристики вентиляторов служат для исследования их работы в различных условиях и для подбора вентиляторов при проектировании вентиляционных установок.

Первая часть лабораторной работы заключается в экспериментальном определении энергетических характеристик центробежного вентилятора при  $n = \text{const}$  путем изменения выходного сечения нагнетательного трубопровода. Расход перемещаемого вентилятором воздуха измеряют соответствующими контрольно-измерительными приборами и определяют все величины, необходимые для вычисления



$V, \Delta P, N$ .

Схема измерения разности давлений, создаваемой центробежным вентилятором, приведена на рис 3.3.

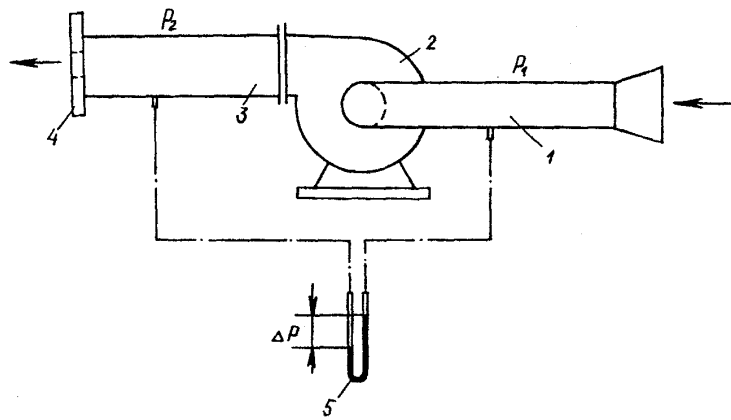


Рис. 3.3. Схема измерения разности давлений, создаваемой вентилятором:  
 1 – всасывающий трубопровод; 2 – центробежный вентилятор; 3 – нагнетательный трубопровод; 4 – сменные шайбы; 5 – дифманометр

Разность давлений, создаваемая вентилятором:

$$\Delta P = P_2 - P_1, \quad (3.3)$$

здесь  $P_1$  и  $P_2$  – статические давления воздуха перед вентилятором и после него в местах присоединения трубок дифманометра, см. рис. 3.3.

Вторую часть работы составляет построение характеристики сети и графика работы вентилятора на сеть.

Сетью называется трубопровод или канал, на которую работает вентилятор. В данной установке сеть состоит из всасывающего и нагнетательного трубопроводов.

Если по трубопроводу постоянного поперечного сечения проходит газ (воздух), то давление его на выходе всегда будет меньше, чем на входе. Объясняется это тем, что газу приходится преодолевать гидравлическое сопротивление трубопровода, на что затрачивается часть энергии (давления) газа. Гидравлическое сопротивление трубопровода складывается из сопротивления трения, сопротивления на поворотах, в сменных шайбах, сетке и др. Следовательно, гидравлическое сопротивление трубопровода (сети) зависит от его геометрических параметров, а также от расхода проходящего по нему газа. Для случая, когда проходящий по трубопроводу газ – воздух, из сети выходящий в атмосферу, эта зависимость выражается уравнением параболы:

$$\Delta P_c = k V^2, \quad (3.4)$$

где  $\Delta P_c$  – гидравлическое сопротивление (потери давления в сети), Па;  $k$  – коэффициент, характеризующий геометрические параметры сети (постоянный для данной сети),  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^5$ ;  $V$  – расход воздуха, проходящего через сеть,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

График уравнения (3.4) называют характеристикой сети.

На рис. 3.4 представлены характеристики двух сетей, отличающихся геометрически. Применительно к нашей установке сеть  $\Delta P_{c2}$  геометрически отличается от сети  $\Delta P_{c1}$  тем, что в сети  $\Delta P_{c1}$  нагнетательный трубопровод открыт больше, поэтому при одинаковом расходе воздуха гидравлическое сопротивление сети  $\Delta P_{c2}$  меньше.

Для построения характеристики сети расход воздуха уже нельзя изменить сменными шайбами, так как при этом сеть геометрически изменяется, и приходится делать это другим путем – изменением числа оборотов вентилятора.

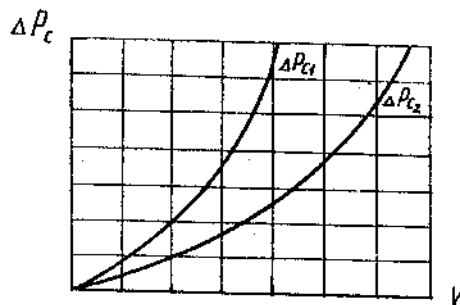


Рис. 3.4. Характеристики сетей

Из рис. 3.3 видно, что полное гидравлическое сопротивление сети  $\Delta P_c$ , складывающееся из сопротивлений всасывающего и нагнетательного трубопровода, равно

$$\Delta P_c = (P_0 - P_1) + (P_2 - P_0) = P_2 - P_1, \quad (3.5)$$

здесь  $P_0$  – атмосферное давление.

Сопоставляя уравнения (3.3) и (3.5), видим, что

$$\Delta P = P_c, \quad (3.6)$$

т. е. вентилятор всегда создает такую разность давления, которая равняется гидравлическому сопротивлению.

Точка пересечения линий  $V - \Delta P$  и  $V - \Delta P_c$  на этом графике, в которой  $\Delta P = \Delta P_c$ , называется рабочей точкой. Положение рабочей точки определяет все величины, характеризующие работу вентилятора на сеть:  $V$ ,  $\Delta P$ ,  $N$ ,  $\eta$ . Из рис. 3.5 видно, что в зависимости от характеристики сети параметры работы вентилятора при этом же числе оборотов могут существенно отличаться (см. рабочие точки  $A$  и  $B$ ). Положение рабочей точки позволяет судить об экономичности использования вентилятора при данном режиме работы на сеть. Наиболее экономичная работа вентилятора будет в том случае, когда рабочая точка соответствует максимальному значению коэффициента полезного действия установки. Допускается работа вентилятора при  $\eta = \beta \eta_{max}$ . Коэффициент  $\beta$  не рекомендуется применять меньше 0,9.

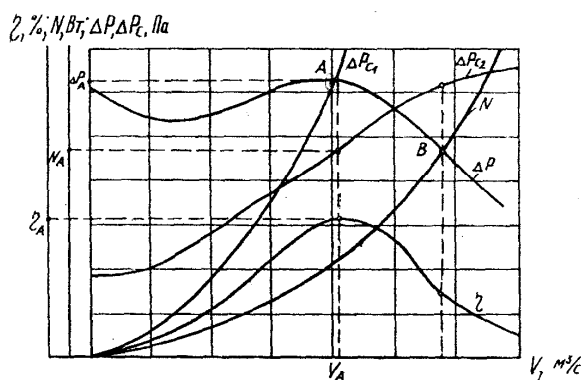


Рис. 3.5. График работы центробежного вентилятора на сеть

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 3.6 изображена схема установки, состоящей из центробежного вентилятора 1 с электродвигателем 2, частота вращения которого изменяется с помощью ЛАТРа 3. Для определения частоты вращения рабочего колеса вентилятора служит тахометр 4, соединенный с тахогенератором 5.

К вентилятору присоединены трубы: всасывающая 6 и нагнетательная 7 с внутренним диаметром  $d_{вн} = 98$  мм. На входном участке всасывающей трубы имеется плавный раструб, за которым установлена сетка 8 для предотвращения всасывания в трубопровод посторонних предметов.

В выходном отверстии нагнетательной трубы установлены сменные шайбы 9, позволяющие изменять площадь выходного сечения (в результате чего изменяется сопротивление нагнетательного трубопровода).

Из всех составляющих гидравлических сопротивлений сети наибольшее значение имеют сопротивления сменных шайб и сетки.

Установка снабжена следующими контрольно-измерительными приборами: гидродинамические трубки 10 и 11, установленные на всасывающем и нагнетательном

трубопроводах и соединенные с дифференциальным манометром 12 и дифференциальным микроманометром 13. Термометр 14 измеряет температуру воздуха. Пульт управления состоит из автоматического выключателя 15, амперметра 16, вольтметра 17, служащих для определения силы тока и напряжения, потребляемых электродвигателем вентилятора.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

После ознакомления со схемой лабораторной установки приступают к проведению экспериментальной части.

Для получения экспериментальных характеристик центробежного вентилятора  $V - \Delta P$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$  проводят первую серию опытов (3 – 6) при постоянном числе оборотов  $n$ , которое задается преподавателем. Производительность вентилятора при этих опытах изменяют сменными шайбами, постепенно меняя площадь сечения трубопровода от закрытого до полностью открытого (5...7 опытов).

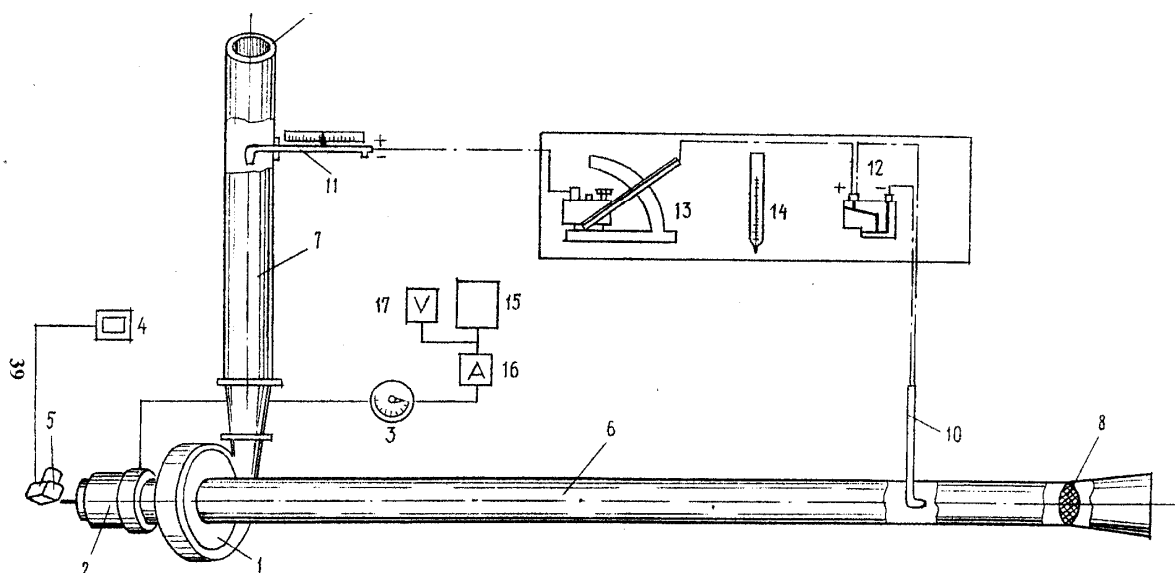


Рис. 3.6. Схема установки:

1 – центробежный вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – лабораторный трансформатор; 4 – тахометр; 5 – тахогенератор; 6, 7 – трубопроводы; 8 – сетка; 9 – сменные шайбы; 10, 11 – гидродинамические трубки; 12 – дифференциальный манометр; 13 – дифференциальный микроманометр; 14 – термометр; 15 – автоматический выключатель; 16 – амперметр; 17 – вольтметр

Гидродинамические трубки 10 и 11 должны быть расположены строго по оси трубопровода.

Для получения характеристики сети  $V - \Delta P_c$  проводят вторую серию опытов (3 –

б) при постоянной шайбе, т. е. геометрическую характеристику сети оставляют постоянной, а расход воздуха меняют путем изменения числа оборотов вентилятора.

Необходимые для построения энергетических характеристик вентилятора и сети значения величин  $V$ ,  $\Delta P$ ,  $N$ ,  $\eta$  определяют путем соответствующей обработки показаний контрольно-измерительных приборов, полученных во время испытания.

Показания приборов: дифманометров  $12$ ,  $13$ , амперметра  $16$  и вольтметра  $17$  снимают одновременно по команде «отсчет». Снимать показания следует после того, как сменная шайба заменена и с помощью ЛАТРа  $3$  установлено заданное число оборотов тахометра  $4$  (1-я серия опытов), или после того, как установлено новое число оборотов (2-я серия опытов). Остановку вентилятора после окончания работы производят в обратном порядке. Результаты замеров заносятся в таблицы 3.1 и 3.2.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Разность давлений  $\Delta P = P_2 - P_1$ , создаваемую вентилятором, определяют непосредственно замером по дифманометру  $13$ . Это значение характеризует повышение общего давления, сообщаемого вентилятором потоку воздуха.

Как видно из рис. 3.6, дифманометр  $13$  присоединен к гидродинамической трубке так, что он показывает разность между общим (статическим + динамическим)\* давлением в нагнетательном трубопроводе и общим давлением во всасывающем трубопроводе.

Истинное значение  $\Delta P$ , Па, определяется из выражения

$$\Delta P = l g k \rho_{cn}, \quad (3.7)$$

где  $l$  – отсчет по шкале микроманометра, м сп. ст.;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $k$  – постоянная прибора, при которой производились замеры;  $\rho_{cn}$  – плотность спирта ( $\rho_{cn} = 800$  кг/м<sup>3</sup>).

2. Мощность  $N$ , потребляемую вентиляторной установкой, рассчитывают по формуле

$$N = IU, \quad (3.8)$$

где  $U$  – напряжение переменного тока, В;  $I$  – сила тока, А.

3. Производительность вентилятора  $V$  рассчитывают по уравнению расхода для потока воздуха в трубопроводе

$$V = w f, \quad (3.9)$$

здесь  $w$  – средняя скорость потока в трубопроводе, м/с;  $f = 0,785 d_{\text{вн}}^2$  – площадь

---

\* Устройство и схема измерения статического и общего давления рассмотрены в лабораторной работе по изучению поля скоростей потока в трубопроводе.

поперечного сечения всасывающего трубопровода, м<sup>2</sup>.

Среднюю скорость воздуха  $w$  находят следующим образом. Дифференциальный манометр 12, рис. 3.6, присоединенный к гидродинамической трубке 10, которая установлена по оси всасывающего трубопровода, показывает в паскалях скоростное (динамическое) давление  $\Delta P_{ск}$  – кинетическую энергию единицы объема воздуха в центре этого трубопровода

$$\Delta P_{ск} = \frac{\rho w_{\max}^2}{2}, \quad (3.10)$$

где  $w_{\max}$  – скорость элементарной струйки воздуха, проходящей в центре трубопровода – осевая или максимальная скорость, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

При развитом турбулентном режиме течения в трубопроводе значения критерия Рейнольдса  $Re \geq 10^5$ , отношение средней скорости к максимальной можно принять равным

$$\frac{w}{w_{\max}} = 0,9. \quad (3.11)$$

Из уравнений (3.9), (3.10) и (3.11) получаем

$$V = 0,785 \cdot 0,9 d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P_{ск}}{\rho}} = \frac{d^2}{\sqrt{\rho}} \sqrt{\Delta P_{ск}} = C \sqrt{\Delta P_{ск}}. \quad (3.12)$$

4. Коэффициент полезного действия вентиляторной установки вычисляют по формуле (3.1).

С целью проверки режима течения воздуха в трубопроводе вычисляют значение критерия Рейнольдса для того опыта, в котором расход воздуха наименьший:

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (3.13)$$

где  $w$  – средняя скорость воздуха в трубопроводе, м/с;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость воздуха, Па · с.



## ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ СЕЧЕНИИ ШАЙБЫ

№ п/п	$n$ , об/мин	$\Delta P_{\text{ск}}$ , Па	$\Delta P$		$V \cdot 10^3$ , $\text{м}^3/\text{с}$
			мм сл. ст.	Па	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					
12.					



## Лабораторная работа № 4 4 часа

### Определение характеристик центробежного насоса. Работа центробежного насоса на сеть

**Цель работы:** практическое ознакомление с насосной установкой; определение по экспериментальным данным зависимостей  $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - H_c$  и параметров рабочей точки.

**Задачи работы:**

- умение определять энергетические характеристики насоса ( $H$ ,  $N$ ,  $\eta$ );
- приобретение навыков построения характеристик сети ( $V - H_c$ ) и графика работы насоса на сеть ( $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - \Delta P$ ).

**Обеспечивающие средства:** стенд насосной установки включает – центробежный насос; ЛАТР для изменения частоты вращения насоса; расходный бак; всасывающий и нагнетательный трубопроводы; задвижка для регулирования расхода воды. Контрольно-измерительные приборы – стробоскопический тахометр, для определения частоты вращения насоса; дифференциальные манометр; ртутный дифференциальный манометр; амперметр переменного тока; вольтметр переменного напряжения.

**Задание:**

1. Получить экспериментальные характеристики центробежного насоса ( $V - N$ ,  $V - \eta$ ,  $V - H$ ), проводя первую серию опытов при постоянном числе оборотов насоса  $n$ , но при разных расходах воды;
2. Определить характеристики сети ( $V - H_c$ ), проводя вторую серию опытов при постоянном открытии задвижки, но при разных числах оборотов насоса;
3. Построить две характеристики сети ( $V - H_c$ ) и график работы насоса ( $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ );
4. Определить параметры рабочих точек и параметры экономичной работы насосной установки.

**Требования к отчету:** итоги лабораторной работы представить в виде таблицы 4.1. «Характеристика насоса при постоянном числе оборотов»; таблицы 4.2. «Характеристики сети при постоянном открытии задвижки»; совмещенного графика характеристики насоса и сети.

**Технология работы:** получить экспериментальные характеристики центробежного насоса ( $V - H$ ,  $V - N$ ,  $V - \eta$ ), при постоянном числе оборотов  $n$ , изменяя расход постепенным открытием задвижки на нагнетательном трубопроводе; установить характеристики сети ( $V - H_c$ ), при постоянном открытии задвижки, изменяя число оборотов насоса.

**Контрольные вопросы:**

1. Как устроен центробежный насос?
2. Какое назначение имеет спиральный улиткообразный канал?
3. Какие зависимости называются энергетическими характеристиками насоса?
4. Что представляют собой законы пропорциональности?
5. Из чего складывается напор  $H_c$ , теряемый в сети?
6. Какой физический смысл имеет рабочая точка?

7. Какой физический смысл имеет характеристика сети?

### Описание лабораторной работы

#### Теоретическая часть

Во всех отраслях народного хозяйства, в том числе и в химических производствах, для транспортирования капельных жидкостей по трубопроводам используют гидравлические машины, которые сообщают потоку скорость необходимую для преодоления сопротивлений на пути перемещения. Такие гидравлические машины получили название насосов. По принципу действия, независимо от свойств перемещаемой жидкости насосы делятся на: лопастные, объемные и струйные. В группу лопастных насосов входит и центробежный насос.

Одноступенчатый центробежный насос имеет улиткообразный корпус 1, внутри которого находится рабочее колесо 2, рис. 4.1. Рабочее колесо центробежного насоса состоит из двух дисков, соединенных изогнутыми лопатками 3. Жидкость, находящаяся между ними, приводится во вращение вместе с рабочим колесом. При этом каждая частица перемещается по сложной траектории. Во-первых, центробежная сила, отбрасываемая жидкость, заставляет ее двигаться радиально, вдоль лопаток от оси колеса к периферии. Во-вторых, увлекаемая лопатками вращающегося колеса жидкость, помимо радиальной скорости, приобретает еще и окружную скорость, одинаковую со скоростью колеса. Так как окружная скорость на периферии колеса больше, чем у входа в лопатки, то абсолютная (равнодействующая) скорость жидкости на выходе из колеса больше, чем на входе. Таким образом жидкость, проходящая через рабочее колесо центробежного насоса приобретает добавочное количество энергии.

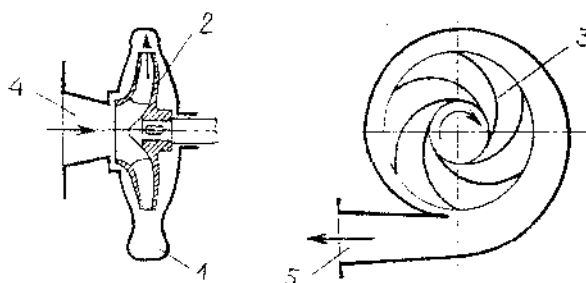


Рис. 4.1. Схема центробежного насоса:

1 – корпус; 2 – рабочее колесо; 3 – лопатка; 4 – всасывающий патрубок;  
5 – нагнетательный патрубок

Жидкость, стремительно выбрасываемая с периферии рабочего колеса, поступает в улиткообразный направляющий аппарат, который кольцом охватывает рабочее колесо. Увеличивающееся к выходному патрубку поперечное сечение направляющего аппарата приводит к плавному снижению большой скорости, полученной жидкостью на выходе с лопаток рабочего колеса, до нормальной скорости в трубопроводе. При этом часть кинетической энергии жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления, что сопровождается увеличением напора (давления) жидкости.

Для правильной эксплуатации центробежных насосов и их подбора необходимо знать, как изменяются основные параметры насосов в различных условиях их работы.

Величины, характеризующие работу центробежного насоса при данном числе оборотов, обычно представляют в виде графических зависимостей напора  $H$ , мощности  $N$  и к.п.д.  $\eta$  от производительности  $V$ , рис. 4.2.

Зависимости  $V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$  называются энергетическими характеристиками насоса. Основой считают  $V - H$  характеристику, так как расход мощности  $N$  и к.п.д.  $\eta$  являются следствием работы по созданию подачи  $V$  и напора  $H$ , которые, соответственно, и являются целью применения насоса.

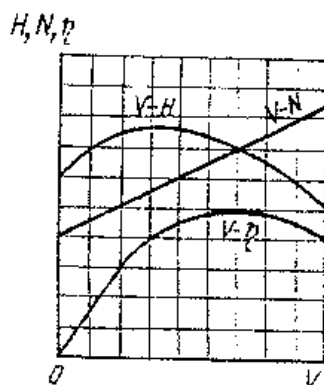


Рис. 4.2. Энергетические характеристики центробежного насоса

При изменении в небольших пределах числа оборотов центробежного насоса (приблизительно в 1,5–2 раза) его подача  $V$ , напор  $H$  и потребляемая мощность  $N$  изменяются в следующих соотношениях, называемых законами пропорциональности:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3. \quad (4.1)$$

Как следует из рис. 4.2, с увеличением подачи  $V$  мощность  $N$ , потребляемая насосом, непрерывно возрастает. При закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе ( $V = 0$ ) насос потребляет минимальную мощность (на преодоление трения в подшипниках и сальнике и на перемещение жидкости рабочим колесом в корпусе насоса). Поэтому, чтобы не перегружать электродвигатель, необходимо пускать центробежный насос при закрытой задвижке.

Выбор насоса и установление числа его оборотов зависят от условий работы насоса на сеть — трубопровод. Эти условия определяются так называемой характеристикой сети ( $V - H_c$ ), т. е. зависимостью между расходом  $V$  и напором сети  $H_c$ , необходимым для преодоления всех сопротивлений данного трубопровода.

В случае несжимаемой жидкости

$$H_c = \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right) \frac{w^2}{2g} + H_{\text{под}} + H_{\text{дон}}. \quad (4.2)$$

Подставляя в это выражение значение скорости из уравнения расхода

$$w = \frac{V}{S}, \quad (4.3)$$

получаем

$$H_c = \frac{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}{2gS^2} V^2 + H_{под} + H_{дон} = \kappa V^2 + b, \quad (4.4)$$

где

$$\kappa = \frac{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}{2gS^2} - \text{величина, близкая к постоянному значению для данного}$$

трубопровода (сети).

Полученное уравнение

$$H_c = \kappa V^2 + b \quad (4.5)$$

в координатах  $H_c - V$  представляет собой параболу, рис. 4.3, вершина которой расположена на оси ординат, на высоте  $b = H_{под} + H_{дон}$  от начала координат ( $H_{под}$  – геометрическая высота подъема жидкости;  $H_{дон}$  – разность напоров в пространствах нагнетания и всасывания).

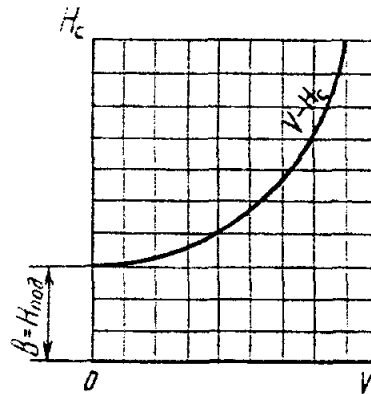


Рис. 4.3. Характеристика трубопровода (сети)

Характеристика насоса и характеристики сети представлены на общем графике, рис. 4.4.

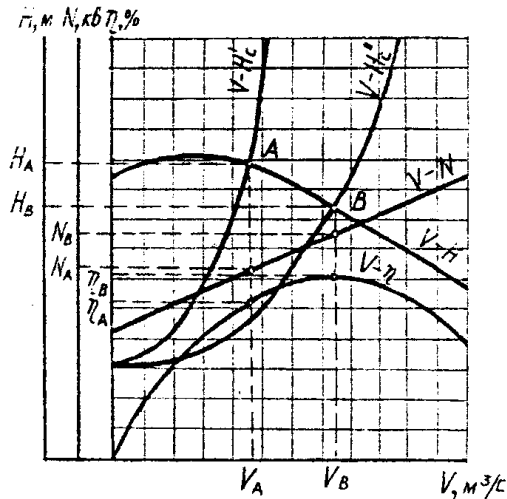


Рис. 4.4. Совмещенные характеристики насоса и сети

Пересечение характеристик насоса  $V - H$  и сети  $V - H_c$  определяет так называемую «рабочую точку». Эта точка показывает условия совместной работы системы «насос – трубопровод (сеть)», когда  $H = H_c$ . В этой точке все гидравлические сопротивления трубопровода преодолеваются напором, создаваемым насосом. Вертикальная прямая, проведенная через рабочую точку, пересекает характеристики насоса  $V - N$ ,  $V - \eta$  и ось абсцисс в точках, определяющих показатели работы насоса в данных условиях.

Например, для рабочей точки  $A$  (рис. 4.4) параметры работы насоса следующие: расход  $V_A$ , напор  $H_A$ , потребляемая мощность  $N_A$ , к.п.д.  $\eta_A$ .

Положение рабочей точки позволяет судить о степени использования возможностей насоса в данных условиях. Если, например, рабочая точка  $B$ , то, следовательно, насос работает на другую сеть с другой характеристикой.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 4.5 изображена схема насосной установки. Центробежный насос  $1$  установлен на одном валу с электродвигателем переменного тока  $2$ , что позволяет проводить испытания насоса при разных числах оборотов, изменения которых осуществляется с помощью ЛАТРа  $3$ . Включение насоса производится кнопками пуска (остановки) электродвигателя  $4$ . Числа оборотов измеряют с помощью датчика тахометра  $5$ , соединенного со стробоскопическим тахометром  $6$ . Мощность, потребляемая насосом, определяется по показаниям амперметра переменного тока  $7$  и вольтметром переменного напряжения  $8$ .

Вода засасывается насосом из расходного бака  $9$  с помощью всасывающего трубопровода  $10$ , где установлены приемный обратный клапан  $11$ , препятствующий стоку воды при заливе насоса, и вакуумметр  $13$ . Залив насоса производят через заливной кран  $15$ . На нагнетательном трубопроводе  $12$  установлены манометр  $14$  и задвижка  $16$  для регулирования расхода воды. Вода из нагнетательного трубопровода возвращается в расходный бак, откуда вновь засасывается насосом. Уровень воды в баке контролируется с помощью водомерной трубки  $17$ . Расход воды измеряют ртутным дифференциальным манометром  $19$ , присоединенным к диафрагме  $18$ , установленной на нагнетательном трубопроводе. Вентиль  $20$  служит для опорожнения бака. На лицевой панели щита управления смонтирован автоматический выключатель

21 электрического питания с магнитным пускателем 22 и кнопками пуска (остановки) электродвигателя насоса.

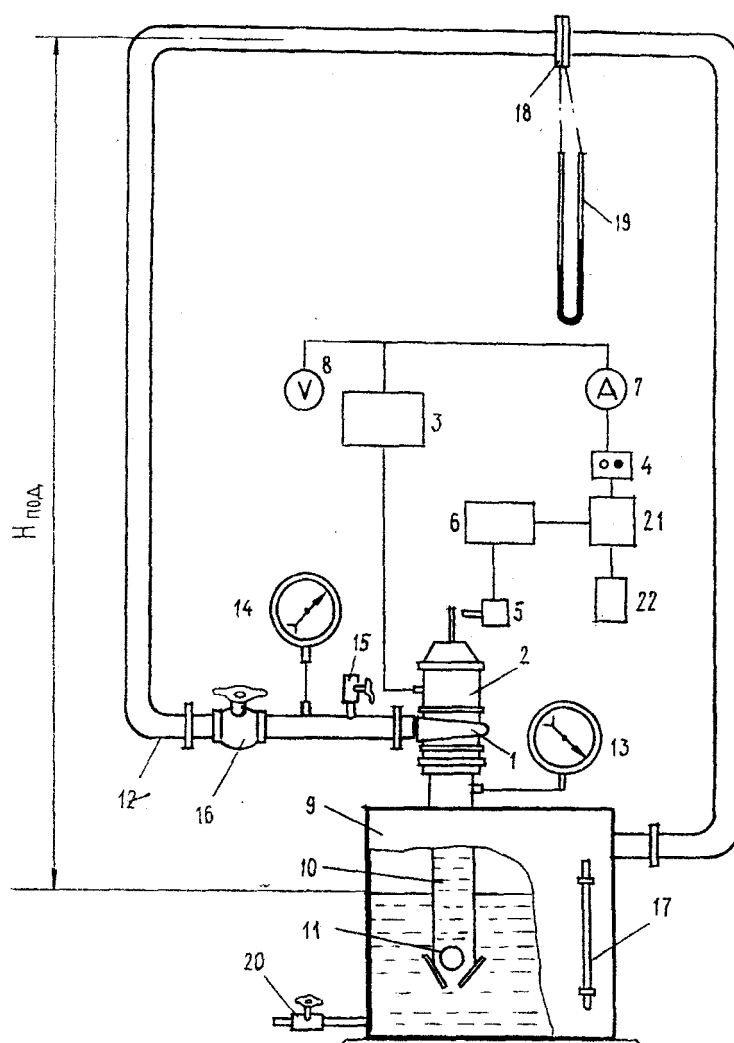


Рис. 4.5. Схема насосной установки:

1 – центробежный насос; 2 – электродвигатель; 3 – ЛАТР; 4 – кнопки пуска (остановки) электродвигателя; 5 – датчик тахометра; 6 – стробоскопический тахометр; 7 – амперметр; 8 – вольтметр; 9 – расходный бак; 10 – всасывающий трубопровод; 11 – обратный клапан; 12 – нагнетательный трубопровод; 13 – вакуумметр; 14 – манометр; 15 – заливной кран; 16 – задвижка; 17 – водомерная трубка; 18 – диафрагма; 19 – дифференциальный манометр; 20 – вентиль; 21 – автоматический выключатель; 22 – магнитный пускатель

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Испытания насосной установки проводят в два этапа. В первую очередь определяют величины, необходимые для построения характеристик насоса:

$V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$ ; во вторую – величины, необходимые для построения характеристики сети  $V - H_c$ .

На первом этапе испытания проводят при постоянном числе оборотов насоса (число оборотов задается преподавателем), но при разных расходах воды (подачах насоса). Изменение подачи производят постепенным открытием задвижки 16 на нагнетательном трубопроводе 12. Первый опыт проводят при полностью закрытой задвижке, последующие – при постепенном ее открытии. Последний опыт на этом этапе проводят при полностью открытой задвижке. Число оборотов насоса снимают с цифрового табло стробоскопического тахометра 6, это можно увидеть на рис. 4.6. При этом стробоскопический тахометр устанавливают на работу в режиме «датчик» путем нажатия соответствующей кнопки, все остальные кнопки управления тахометра должны быть отжаты.

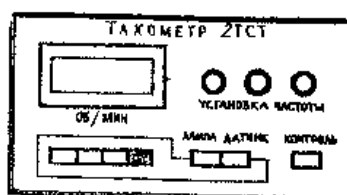


Рис. 4.6. Лицевая панель строботахометра

При этом датчик-осветитель (фотоэлектрический первичный преобразователь) 5 ориентируют на белую контрастную метку, нанесенную на вращающуюся трубку, соединенную с валом электродвигателя и отстоящего на расстоянии не более 10 мм. После чего нажатием кнопки соответствующего поддиапазона фиксируют показания цифрового табло. Изменения регулирования задвижки на нагнетательном трубопроводе необходимо контролировать с помощью строботахометра на заданное число оборотов. При каждом обороте задвижки в сторону открытия число оборотов насоса будет уменьшаться, поэтому после поворота задвижки необходимо с помощью ЛАТРа 3 восстановить заданное число оборотов насоса, а затем одновременно произвести замеры: подачи насоса, разряжения во всасывающей трубе, давления в нагнетательной трубе, напряжения и силы тока.

На втором этапе работы испытания проводят при постоянном (заданном) открытии задвижки, но при разных числах оборотов насоса (не менее 5–7). Для каждого числа оборотов производят замеры: подачи насоса; разряжения во всасывающей трубе и давления в нагнетательной трубе. Затем изменяют положение задвижки (по заданию преподавателя) и проводят вторую серию опытов при тех же 5–7 числах, что и в первой серии.

Выше указывалось, что вершина параболы (характеристики  $V - H_c$ ) располагается по оси ординат на расстоянии  $b$  от начала координат:

$$b = H_{\text{под}} + H_{\text{дон}}.$$

Так как в данной установке дополнительного напора  $H_{доп}$  нет, то  $b = H_{нод}$ .

По результатам, полученным во втором этапе работы, строят две характеристики  $V - H_c$  и совместно с характеристиками насоса, полученными в первом этапе ( $V - H$ ,  $V - N$  и  $V - \eta$ ), наносят их на общий график, рис. 4.4, на пересечении кривых  $V - H_c$  и  $V - H$  получают рабочие точки А и В, по которым определяют параметры работы насосной установки.

Полный напор насоса  $H$ , выражаемый в метрах столба подаваемой жидкости, определяют следующим образом:

$$H = P_M + P_B + h + \frac{w_{наг}^2 - w_{вс}^2}{2}, \quad (4.6)$$

где  $P_M$  и  $P_B$  – показания манометра и вакуумметра, м. вод. ст;  $h$  – расстояние между местами присоединения манометра и вакуумметра, м;  $w_{наг}$  и  $w_{вс}$  – скорость в нагнетательном и во всасывающем трубопроводах соответственно, м/с.

Так как в данной установке всасывающий и нагнетательный трубопроводы имеют одинаковый диаметр, то  $w_{наг} = w_{вс}$ .

Таким образом,

$$H = P_M + P_B + h. \quad (4.7)$$

#### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Производительность насоса определяют по тарировочному графику в зависимости от показаний дифференциального манометра.

Мощность, потребляемая насосной установкой, Вт, определяется выражением

$$N = UI, \quad (4.8)$$

где  $U$  – напряжение, В;  $I$  – сила тока, А.

Коэффициент полезного действия насосной установки  $\eta$  определяют по формуле

$$\eta = \frac{V\rho gH}{N}, \quad (4.9)$$

где  $V$  – производительность (подача) насоса, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – полный напор, создаваемый насосом, м вод.ст.

Все величины, измеренные в процессе испытания и полученные расчетом, записываются в отчетные таблицы 4.1 и 4.2.

Работа заканчивается построением графика, рис. 4.4, и определением параметров рабочих точек А и В.







