

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

МЕТРОЛОГИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

**Практикум
по проведению лабораторных работ на лабораторно-
исследовательском стенде ИПДРТ4,
Часть 2**



**Санкт-Петербург
2020**

Метрология, технические измерения и автоматизация: практикум по проведению лабораторных работ на лабораторно-исследовательском стенде ИПДРТ4, Часть 2/ В.И. Рожков, Г.П. Буйлов; ВШТЭ СПбГУПТД. СПб. - 61 с.

В практикуме по проведению лабораторных работ по дисциплине «Метрология, стандартизация, технические измерения и автоматизация тепловых процессов» приведены теоретические основы применяемого в лабораторно-исследовательском стенде оборудования и контрольно-измерительных приборов. Представленное оборудование и средства измерения позволяют ознакомить студентов с основными контрольно-измерительными приборами, применяемыми в теплоэнергетике и освоить проведение расчетов метрологических погрешностей приборов, а также способам измерения расходов жидкостей и газов, используемых на объектах теплоэнергетики.

Практикум предназначен для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Рецензенты:

доцент кафедры информационно-измерительной техники и систем управления ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук А.В. Бахтин;

доцент кафедры техносферной безопасности СПбГАСУ доцент канд.воен. наук Георгиади В.В.

Подготовлено и рекомендовано к изданию кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Института энергетики и автоматизации Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 2 от 28.09.2020 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД (протокол № 2 от 29.10.2020 г.).

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2020

© Рожков В.И., Буйлов Г.П., 2020

Описание лабораторно-испытательного стенда «Измерительные приборы - датчики температуры, давления и расхода»

Лабораторно-испытательный стенд представляет собой пневмогидравлическую систему, позволяющую осуществлять измерение расхода, давления и температуры жидкости и воздуха различными приборами. Состоит из систем подачи воды и воздуха, системы подогрева воды, системы измерения расхода подаваемой воды и воздуха.

Внешний вид стенда представлен в Приложении 1.

Исследуемые в составе стенда устройства и приборы установлены таким образом, что имеется возможность сравнения показаний контрольно-измерительных приборов различного типа между собой при измерении одного и того же параметра. Гидравлическая схема стенда представлена на рис. 1.

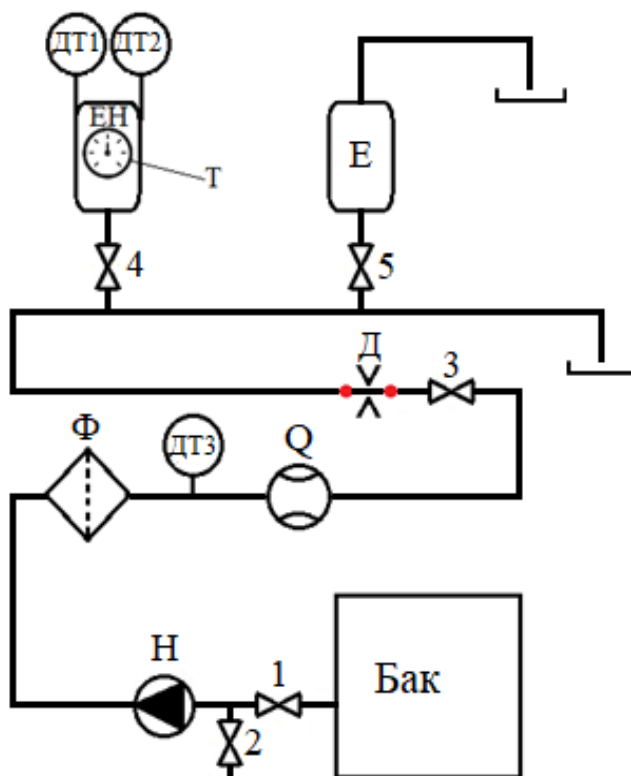


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда

Состав гидравлической схемы: 1-5 – вентили и краны; Н – насос; Q – счетчик воды; Ф – фильтр; ДТ1, ДТ2, ДТ3 – датчики температуры (ДТ1 и ДТ2 могут быть извлечены из емкости); Д – диафрагма; Е – емкость с датчиками; ЕН – емкость с нагревателем; Т – биметаллический термометр.

В качестве исследуемых контрольно-измерительных приборов используются манометры и датчики давления различного типа, расходомеры

В комплекте к стенду содержится набор тройников с быстро-разъемными соединениями для подключения приборов. На рис. 2 представлена пневматическая схема стенда.

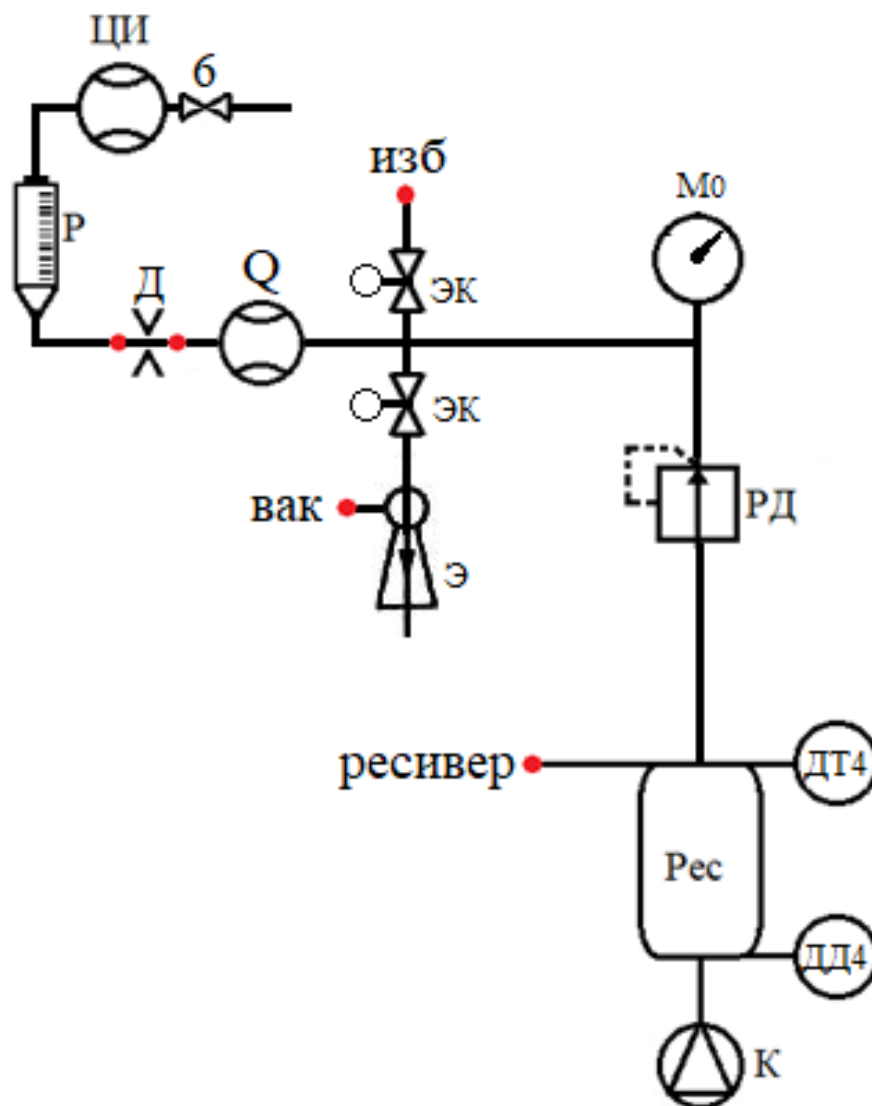


Рис. 2. Пневматическая схема стенда:

Состав пневматической схемы: К – компрессор; Рес – ресивер; ДТ4 – датчик температуры; ДД4 – датчик давления в ресивере; РД – регулятор давления; М₀ – манометр (находится в блоке «регулятор давления» на лицевой панели стенда); ЭК – электромагнитные клапаны; Э – эжектор; Q – счетчик газа; Д – диафрагма; Р – ротаметр; ЦИ – расходомер воздуха с цифровой индикацией; 6 – вентиль (находится рядом с табло показаний расходомера воздуха с цифровой индикацией); изб, ВАК – порты избыточного давления и разрежения соответственно (находятся в блоке «режим работы компрессора»); ресивер – порт подключения к ресиверу.

На схемах рис. 1,2 красными точками обозначены места подключения пневмо- и гидрошлангов.

К стенду с помощью кабеля и разъема USB-PC подключается ноутбук с управляющей программой. Запуск программы производится с помощью ярлыка на рабочем столе ноутбука. При запуске программы отображается мнемосхема, представленная на рис. 3.

Датчики температуры			
Т1 (ДТС-100М)		Т2 (ДТС-100М)	
20.0 °С	108.6 Ом	20.0 °С	108.6 Ом
Т3 (ДТС-100М)		Т4 (ДТС-100М)	
20.0 °С	108.6 Ом	20.0 °С	108.6 Ом
Датчики давления			
Д1 (ДА 0..900кПа 0.5%)		Д2 (ДИ 0..1000кПа 0.5%)	
100 кПа	5.78 мА	0 кПа	4.00 мА
Д3 (ДИ 0..100кПа 0.5%)		Д4 (ДА 0..900кПа 0.5%)	
0 кПа	4.00 мА	100 кПа	5.78 мА
Датчики расхода			
Датчик расхода воздуха		Датчик расхода воды	
0.0 л/мин	4.00 мА	0.0 л/мин	0.0 имп/с
Время наполнения		Графики	
0:0:0	Сброс		
Выход			

Рис. 3. Скрин-шот управляющей программы

Управляющая программа обладает возможностью построения графиков зависимости измеряемых величин от времени. Выбор датчиков, по показаниям которых будет построен график, осуществляется постановкой «галочки» напротив нужных датчиков в управляющей программе (см. рис. 4).

ВНИМАНИЕ! Перед началом работы проверить готовность стенда к работе:

- Проверить заполнение бака водой.
- Подключить стенд к сети и включить «Вводной автомат».
- Подключить ноутбук к стенду с помощью кабеля и разъема USB-PC на лицевой панели стенда.
- Запустить управляющую программу с помощью ярлыка на рабочем столе ноутбука.

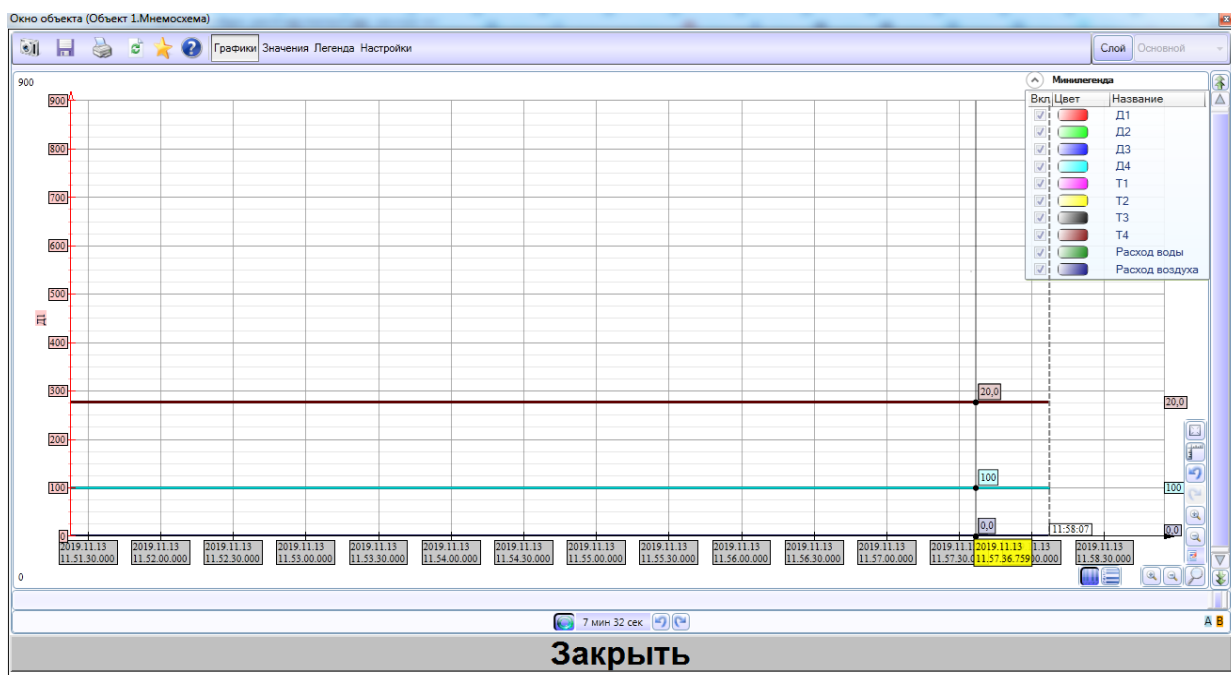


Рис. 4. Скрин-шот управляющей программы «Построение графиков», где Д1-Д4 – датчики давления ДД1-ДД4 соответственно; Т1-Т4 – датчики температуры ДТ1-ДТ4 соответственно.

Приборы для измерения температуры

Виды и конструкции термopеобразователей сопротивления

Немного теории: Устройство биметаллического термометра показано на рис. 5.

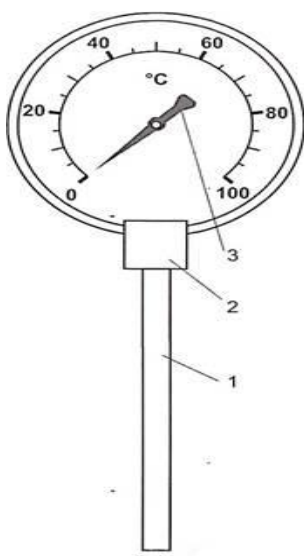


Рис. 5. Устройство биметаллического термометра

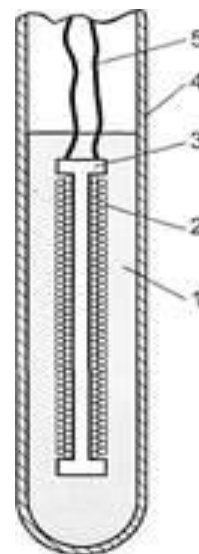
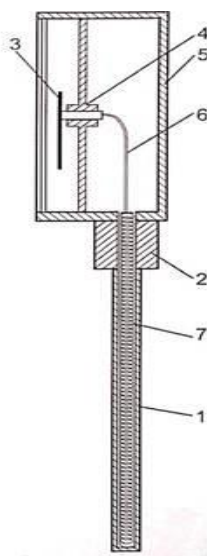


Рис. 6. Устройство термopеобразователя сопротивления

Биметаллический термометр состоит из защитной оболочки 1, фланца крепления 2, стрелки 3, шкалы с подшипником 4, корпуса 5, троса 6 для передачи вращения, биметаллической спирали 7. При изменении температуры биметаллическая спираль закручивается или раскручивается, нижний конец спирали прикреплен к оболочке 1, поэтому верхний конец спирали поворачивается на угол, пропорциональный изменению температуры. Через трос 6 угол поворота передается на стрелку 3, показывающую текущую температуру. Диапазон измеряемых температур от 0°С до 100°С.

Устройство термопреобразователя сопротивления (терморезистивного преобразователя) показано на рис. 6. Термопреобразователь сопротивления состоит из корпуса 4 с фланцем крепления, проводов 5, термосопротивления 2 и 3, теплопроводящего электроизолятора 1. Термосопротивление состоит из катушки 3 с намотанной на нее металлической проволокой 2. При изменении температуры корпуса 4, тепловой поток через электроизолятор 1 проходит к проволоке 2, ее температура меняется и, как следствие, меняется электрическое сопротивление. Электрическое сопротивление катушки пропорционально ее температуре. К термопреобразователю сопротивления присоединяется вторичный электронный прибор, измеряющий сопротивление преобразователя и переводящий его в значения температуры.

Зависимость сопротивления проволоки от температуры среды в рабочем диапазоне термопреобразователя выражается формулой (1):

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление при 0°С, R_t – сопротивление при t °С, α – температурный коэффициент сопротивления термочувствительного элемента.

В зависимости от того, из какого материала выполнен чувствительный элемент термопреобразователя сопротивления, приборы можно строго разделить на несколько групп. В данном стенде используются 2 вида: медные и платиновые термопреобразователи. Эти датчики маркируются следующим образом: медные имеют марку 50М и 100М, платиновые - 50П, 100П, Pt100, Pt500, Pt1000.

Наиболее чувствительные термометры марки Pt1000 и Pt100 изготавливают путем напыления тончайшего слоя платины на керамическую основу-подложку. Технологически это достигается напылением малого количества платины (около 1 мг) на чувствительный элемент, что позволяет изготавливать датчики температуры небольшого размера.

Электрофизические свойства платины при этом сохраняются: линейная зависимость сопротивления от температуры, устойчивость к высоким температурам, термостабильность. По этой причине наиболее часто применяются именно платиновые преобразователи сопротивления — с маркировкой Pt100 и Pt1000. Медные термопреобразователи с маркировкой 50М и 100М изготавливаются путем намотки тонкой медной проволоки, а платиновые 50П и 100П — платиновой проволоки на немагнитный стержень. В стенде используются термопреобразователи марки 100М с характеристиками $R_0=100 \text{ Ом}$, $\alpha=0,00426^\circ\text{C}^{-1}$. Номинальная статическая характеристика (НСХ) датчиков этого типа приведена в приложении 2.

Лабораторная работа № 1

Исследование работы приборов измерения температуры

Цель работы: Изучение конструкции и принципа работы приборов для измерения температуры, понятие класса точности прибора, сравнение показаний приборов различного типа.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется гидравлическая часть стенда. Для заполнения емкости для нагрева воды, в которую смонтированы два терморезистивных преобразователя и один термометр, включить насос и открыть краны 1, 3, 4. После наполнения емкости закрыть кран 4, выключить насос.
2. Дождаться установления стабильных показаний датчиков и биметаллического термометра. Занести показания датчиков T_1 , T_2 и термометра T_T в табл. 1.
3. Включить процесс нагрева. Нагреть жидкость в емкости на 3-5 °С
4. Занести показания датчиков и биметаллического термометра в табл. 1.
5. Повторить пункты 3, 4 до достижения температуры 55°С. Выключить нагреватель.
6. Слить воду из емкости, открыв кран 4.
7. Вычислить средние значения температур, абсолютную и относительную погрешность измерения для датчиков температуры и биметаллического термометра для каждой температуры. Результаты расчетов занести в табл. 1.
8. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе.
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов погрешностей приборов измерения
температуры различных типов

Номер измерения	$T_1,$ $^{\circ}\text{C}$	$T_2,$ $^{\circ}\text{C}$	$T_T,$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ср}},$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_1,$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_2,$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_T,$ $^{\circ}\text{C}$	$\delta T_1,$ %	$\delta T_2,$ %	$\delta T_T,$ %
1										
2										
...										

Динамические характеристики терморезистивного преобразователя (ручной режим измерений)

Немного теории: Терморезистивным преобразователем или терморезистором называется измерительный преобразователь, активное сопротивление которого изменяется при изменении температуры.

Рассмотрим ситуацию (рис. 8), когда терморезистивный преобразователь (1) погружают в среду (2), находящуюся в адиабатической оболочке (3).

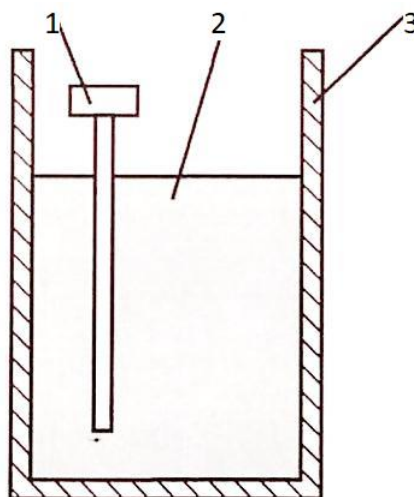


Рис. 8. Размещение преобразователя в водной (газовой) среде

Пусть преобразователь имеет теплоемкость C_1 и начальную температуру T_1 , среда имеет теплоемкость C_2 и начальную температуру T_2 , коэффициент теплопередачи (учитывающий теплопроводность и конвекцию) между преобразователем и средой равен λ , тогда уравнение теплообмена между преобразователем и средой выглядит следующим образом:

$$C_1 \frac{dT}{dt} = -\lambda (T - T_c) \quad (2)$$

$$C_2 \frac{dT_c}{dt} = -\lambda (T_c - T) \quad (3)$$

где t - время от начала погружения преобразователя в среду, T - текущая температура преобразователя, T_c - текущая температура среды.

Из формул (2) и (3) получаем (4):

$$\frac{dT_c}{dt} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{dT}{dt} . \quad (4)$$

Из формулы (4) можно заключить, что при $C_2 \gg C_1$, $T_c = \text{const} = T_2$, уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dT}{(T - T_2)} = -\frac{\lambda}{C_1} dt \quad (5)$$

После интегрирования с учетом, что при $t=0$ $T=T_1$, получаем:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)e^{-\frac{\lambda}{C_1}t} . \quad (6)$$

Обозначим $t_0 = C_1/\lambda$, тогда уравнение (6) приводится к следующему виду:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)e^{-\frac{t}{t_0}} . \quad (7)$$

Анализируя выражения (6) и (7) можно заметить, что температура преобразователя, а следовательно, и его показания, далеко не всегда равны измеряемой температуре среды. При этом, чем больше начальная разность температур и/или теплоемкость преобразователя, тем большее время нужно для достижения заданной точности измерения температуры; чем выше коэффициент теплопередачи, тем меньшее время нужно для достижения заданной точности измерения температуры.

Лабораторная работа № 2

Исследование динамических характеристик терморезистивного преобразователя (ручной режим измерений)

Цель работы: изучение зависимости показаний терморезистивного преобразователя от времени пребывания в среде, температура которой измеряется. Определение влияния среды на время установления показаний терморезистивного преобразователя.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется гидравлическая часть стенда. Вынуть один из терморезистивных преобразователей (датчик ДТ1) из емкости для нагревания.
2. Дождаться выравнивания его температуры и температуры воздуха в лаборатории, измерить температуру воздуха в лаборатории – $T_{Вк}$, занести показания температуры в таблицу 2.1.
3. Заполнить емкость нагрева рабочей жидкостью (водой), включив насос и открыв краны 1, 3, 4. После наполнения емкости закрыть кран 4 и выключить насос.
4. Включить процесс нагрева. Отключить процесс нагрева по достижении заданной преподавателем температуры и дождаться установления показаний второго терморезистивного преобразователя (датчик ДТ2).
5. Ввести датчик ДТ1 в емкость, включить секундомер.
6. По мере прогрева датчика ДТ1 заносить текущие значения температуры $T_{Жi}$ и времени $t_{Жi}$ в табл.2.2 (секундомер при этом не выключать), рекомендуемый шаг по времени 4-6 сек, первая точка соответствует времени по секундомеру $t=0$ сек. Процесс продолжать до выравнивания показаний датчика ДТ1 и датчика ДТ2 (разность температур не более 1°C).
7. Занести показания датчика ДТ2 в табл.2.2 как $T_{Жк}$.
8. Выключить секундомер, сбросить его показания.
9. Вынуть датчик ДТ1 из емкости, повесить на стенд так, чтобы с металлический стержень не касался частей стенда.
10. По мере остывания датчика ДТ1 заносить текущие значения температуры $T_{Вi}$ и времени $t_{Вi}$ в табл.2.1 (секундомер при этом не выключать), рекомендуемый шаг по времени 10-15 с.
11. Слить воду из емкости, открыв кран 4.
12. Вычислить значения функции $F_{Жi} = \ln\left(\frac{T_{Жi} - T_{Жк}}{T_{Ж1} - T_{Жк}}\right)$ и занести в табл. 2.2,

где $T_{ж1}$ — первая измеренная точка по температуре при прогреве датчика ДТ1 (после введения в емкость).

13. Нанести полученные точки на график в координатах $t - F_{ж}$, провести через полученные точки прямую, вычислить ее угловой коэффициент $k_{ж}$, занести в табл.2.2. Вычислить постоянную времени пары преобразователь – жидкость, занести в табл.2.2.

14. Вычислить значение функции $F_{в1} = \ln\left(\frac{T_{в1} - T_{вк}}{T_{в1} - T_{вк}}\right)$ и занести в таблицу, где $T_{в1}$ - первая измеренная точка по температуре при остывании датчика ДТ1 (после извлечения из емкости).

15. Нанести полученные точки на график в координатах $t - F_{в}$, провести через полученные точки прямую, вычислить ее угловой коэффициент $k_{в}$, занести в табл.2.1. Вычислить постоянную времени пары преобразователь – воздух $t_{0в} = -\frac{1}{k_{в}}$, занести в табл.2.1.

16. Сделать выводы о влиянии среды, температура которой измеряется, на время установления показаний преобразователя.

17. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 2.1

Результаты измерения параметров терморезистивного преобразователя
в воздушной среде

Номер измерения	$t_{в}, c$	$T_{в}, ^\circ C$	$F_{в}$
1			
2			
...			
n			
$t_{0в}, c$		$T_{вк}, ^\circ C$	

Таблица 2.2

Результаты измерения параметров терморезистивного преобразователя
в водной среде

Номер измерения	$t_{ж}, c$	$T_{ж}, ^\circ C$	$F_{ж}$
1			
2			
...			
n			
$t_{0ж}, c$		$T_{жк}, ^\circ C$	

Динамические характеристики терморезистивного преобразователя
(автоматический режим измерений)

Немного теории: Терморезистивным преобразователем, или терморезистором, называется измерительный преобразователь, активное сопротивление которого изменяется при изменении температуры.

Рассмотрим ситуацию (рис.8), когда терморезистивный преобразователь (1) погружают в среду (2), находящуюся в адиабатической оболочке (3).

Пусть преобразователь имеет теплоемкость C_1 и начальную температуру T_1 , среда имеет теплоемкость C_2 и начальную температуру T_2 , коэффициент теплопередачи (учитывающий теплопроводность и конвекцию) между преобразователем и средой равен λ , тогда уравнение теплообмена между преобразователем и средой выглядит следующим образом (8):

$$C_1 \frac{dT}{dt} = -\lambda(T - T_c); \quad (8)$$

$$C_2 \frac{dT_c}{dt} = -\lambda(T_c - T), \quad (9)$$

где t - время от начала погружения преобразователя в среду, T - текущая температура преобразователя, T_c - текущая температура среды.

Из формул (8) и (9) получаем (10):

$$\frac{dT_c}{dt} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{dT}{dt}. \quad (10)$$

Из формулы (10) можно заключить, что при $C_2 \gg C_1$, $T_c = \text{const} = T_2$, уравнение (8) можно записать в следующем виде:

$$\frac{dT}{(T - T_2)} = -\frac{\lambda}{C_1} dt \quad (11).$$

после интегрирования с учетом, что при $t=0$, $T=T_1$, получаем:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)e^{-\frac{\lambda}{C_1}t} \quad (12)$$

Обозначим $t_0 = C_1/\lambda$, тогда уравнение (12) приводится к следующему виду (13):

$$T = T_2 + (T_1 - T_2)e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (13)$$

Анализируя выражения (12) и (13), можно заметить, что температура преобразователя, а следовательно, и его показания, далеко не всегда равны измеряемой температуре среды. При этом, чем больше начальная разность

температур и/или теплоемкость преобразователя, тем большее время нужно для достижения заданной точности измерения температуры; чем выше коэффициент теплопередачи, тем меньшее время нужно для достижения заданной точности измерения температуры.

Для выполнения работы используется управляющая программа. График, отображающий количественные характеристики процесса, построенный с помощью управляющей программы, представлен на рис. 9.

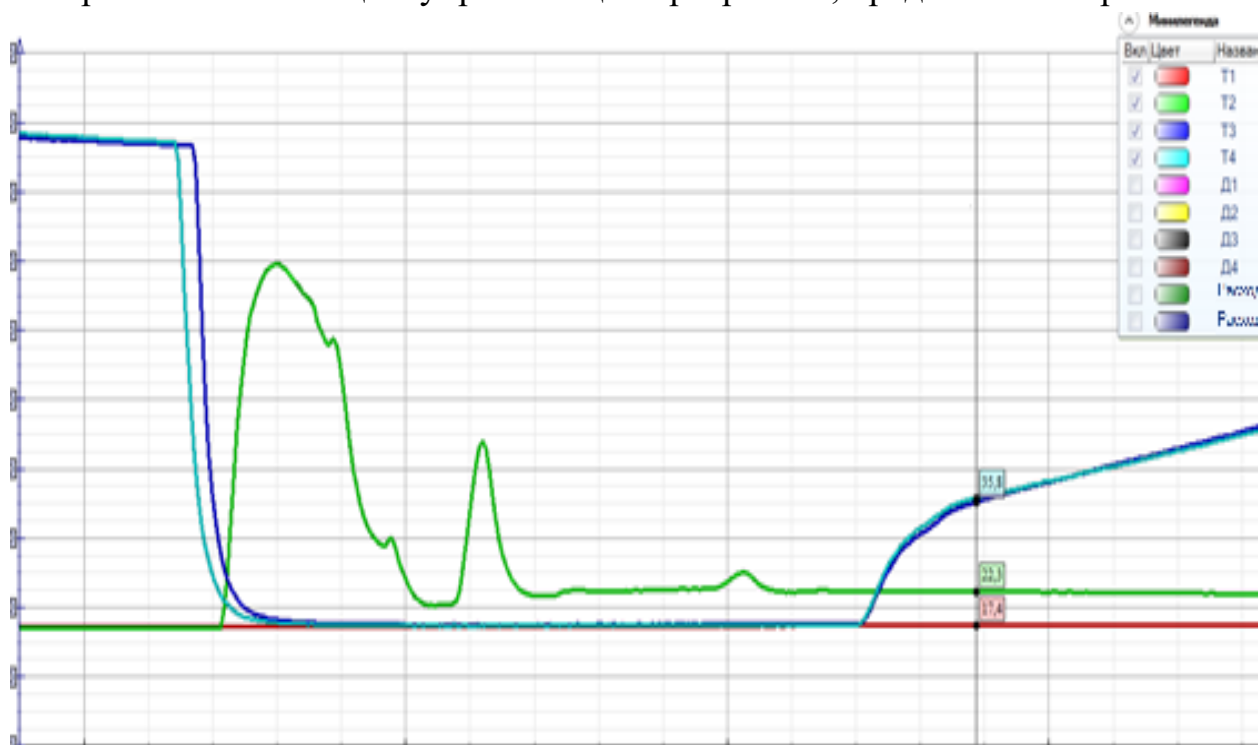


Рис. 9. Графики, построенные с помощью управляющей программы

Лабораторная работа № 3

Исследование динамических характеристик терморезистивного преобразователя (автоматический режим измерений)

Цель работы:

1. Изучение зависимости показаний терморезистивного преобразователя от времени пребывания в среде, температура которой измеряется.
2. Определение влияния среды на время установления показаний терморезистивного преобразователя.
3. Изучение процесса автоматизации сбора и обработки экспериментальных данных.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется гидравлическая часть стенда. Включить ноутбук, подключить ноутбук к стенду.

2. Вынуть один из терморезистивных преобразователей (датчик ДТ1) из емкости. В случае необходимости дождаться выравнивания его температуры и комнатной, измерить температуру воздуха в комнате — $T_{Вк}$, занести температуру в табл. 3.1.

3. Заполнить емкость нагрева рабочей жидкостью (водой), включив насос и открыв краны 1, 3, 4. После наполнения емкости закрыть кран 4 и выключить насос.

4. Включить процесс нагрева. Отключить процесс нагрева по достижении заданной преподавателем температуры и дождаться установления показаний второго терморезистивного преобразователя (датчик ДТ2).

5. Запустить управляющую программу на ноутбуке, нажать кнопку «графики», выбрать датчики температуры ДТ1 и ДТ2.

6. Ввести преобразователь ДТ1 в емкость.

7. Дождаться выравнивания показаний ДТ1 и ДТ2 (разница не более 1°C), отслеживать показания по графику, который создается управляющей программой.

8. Используя график ДТ1, занести в табл.3.2 значения температуры $T_{жi}$ и времени $t_{жi}$.

9. Вынуть ДТ1 из емкости, повесить на стенд так, чтобы металлический стержень не касался частей стенда.

10. Дождаться стабилизации показаний ДТ1 (отслеживать по графику), но не более 10 минут от начала измерения.

11. Используя график ДТ1, занести в табл.3.1 значения температуры $T_{вi}$ и времени $t_{вi}$.

12. Слить воду из емкости открыв кран 4.

13. Вычислить значения функции $F_{жi} = \ln \frac{T_{жi} - T_{жк}}{T_{ж1} - T_{жк}}$ и занести в таблицу, где $T_{ж1}$ – первая точка по температуре при прогреве датчика ДТ1 (после введения в емкость).

14. Нанести полученные точки на график в координатах $t - F_{ж}$, провести через полученные точки прямую, вычислить ее угловой коэффициент $k_{ж}$, занести в табл.3.2. Вычислить постоянную времени пары преобразователь – жидкость, занести в табл.3.2.

15. Вычислить значение функции $F_{Vi} = \ln \frac{T_{Vi} - T_{VK}}{T_{B1} - T_{VK}}$ и занести в таблицу, где T_{B1} - первая измеренная точка по температуре при остывании датчика ДТ1 (после извлечения из емкости).

16. Нанести полученные точки на график в координатах $t - F_V$, провести через полученные точки прямую, вычислить ее угловой коэффициент k_V , занести в табл. 3.1. Вычислить постоянную времени пары преобразователь – воздух, занести в табл.3.1.

17. Сделать выводы о влиянии среды, температура которой измеряется, на время установления показаний преобразователя.

18. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 3.1

Результаты измерения параметров терморезистивного преобразователя
в воздушной среде

номер измерения	t_B, c	$T_B, ^\circ C$	F_B
1			
2			
...			
n			
t_{0B}, c		$T_{BK}, ^\circ C$	

Таблица 3.2

Результаты измерения параметров терморезистивного преобразователя
в водной среде

Номер измерения	$t_{Ж}, c$	$T_{Ж}, ^\circ C$	$F_{Ж}$
1			
2			
...			
n			
$t_{0Ж}, c$		$T_{Жк}, ^\circ C$	

Приборы измерения давления

Стрелочные деформационные манометры

Немного теории: Конструкция деформационного манометра приведена на рис. 10. Под действием давления жидкости или газа, поступающего в загнутую трубку с запаянным концом, последняя стремится выпрямиться и деформируется на величину, пропорциональную давлению. Перемещение свободного конца трубки передается через тягу на шестерню,

вращающую шестерню, связанную со стрелкой, индицирующей показания манометра. Таким образом, угол поворота стрелки пропорционален давлению. Изменяя жесткость загнутой трубки, получают манометры на различные диапазоны измерения давления. Подбором соотношения шестерен регулируют коэффициент пропорциональности между углом поворота стрелки и перемещением запаянного конца трубки.

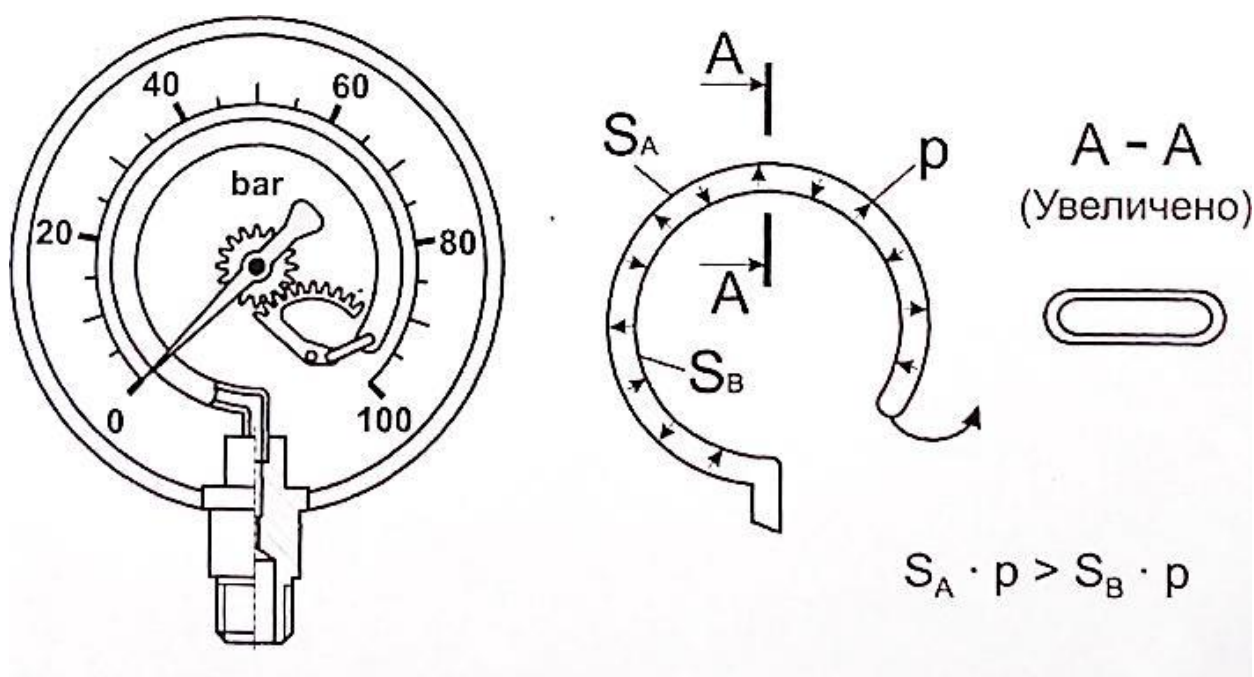


Рис. 10. Стрелочный деформационный манометр

Лабораторная работа № 4

Исследование работы стрелочного деформационного манометра

Цель работы: Проведение исследований по работе прибора для измерения давления – стрелочного деформационного манометра, его конструкции и принципа действия.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подключить с помощью шлангов и тройников манометры 1, 2 и 3 к порту избыточного давления на лицевой панели стенда.

2. Включить компрессор, включить переключатель режимов работы компрессора на избыточное давление.

3. С помощью регулятора давления установить величину давления 0,1 МПа. Занести показания манометров 1, 2 и 3 в табл.4.

4. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 МПа.
5. Занести показания манометров 1, 2 и 3 в табл. 4.
6. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,5 МПа.
7. Выключить компрессор. Принять показания манометра 1 за истинное значение давления. Вычислить абсолютную и относительную погрешность манометров 2 и 3.
8. Сравнить полученные результаты с классом точности измерителей. Сделать выводы.
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 4

Результаты исследования работы стрелочного деформационного манометра

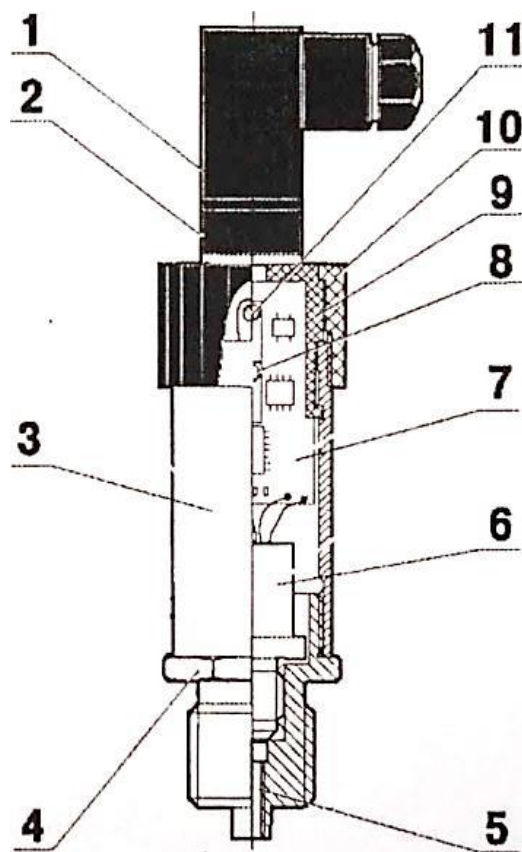
Номер измерения	$P_{\text{МН1}},$ кПа	$P_{\text{МН2}},$ кПа	$P_{\text{МН3}},$ кПа	$\Delta P_{\text{МН2}},$ кПа	$\Delta P_{\text{МН3}},$ кПа	$\delta P_{\text{МН2}},$ %	$\delta P_{\text{МН3}},$ %

Датчик давления деформационного мембранного типа

Немного теории: Конструкция деформационного датчика давления представлена на рис. 11. Преобразователь выполнен в цилиндрическом корпусе 3, в нижней части которого расположен штуцер 4, предназначенный для присоединения к линии измеряемого давления. В верхней части корпуса расположена «обойма» 9, которая крепится в корпусе с помощью специальных защелок, позволяющих ей вращаться вокруг своей оси (относительно корпуса 3). Для фиксации положения обоймы относительно корпуса служит крышка 10, которая навинчивается на наружную резьбу верхней части корпуса 3. На обойме установлена приборная часть 2 электрического соединителя типа DIN43650C. В кабельной части 1 соединителя производится подсоединение проводов внешних электрических цепей с помощью винтовых зажимов (клемм) без применения пайки. Во входном отверстии 5 приемной полости штуцера преобразователя предусмотрена резьба для установки гидравлического дросселя, предназначенного для предотвращения повреждения мембраны

чувствительного элемента преобразователя в случае возникновения гидроудара.

В штуцере преобразователя размещен чувствительный элемент 6. В качестве чувствительного элемента применен тензопреобразователь, на котором размещена тензочувствительная полупроводниковая схема из четырех тензорезисторов, соединенных в мост Уитсона.



Под действием давления измеряемой среды мембрана чувствительного элемента прогибается. Тензорезисторы, деформируясь, изменяют свое сопротивление. В результате происходит разбалансировка моста пропорционально измеряемому давлению. Разбалансированный сигнал в виде электрического сигнала преобразуется электронным блоком, расположенным в корпусе преобразователя, в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА.

В обойме 9 преобразователя имеется специальное окно для доступа к подстроечному резистору корректора нуля. Корректор нуля предназначен для подстройки выходного сигнала преобразователя при давлении, равном атмосферному.

Рис. 11.

Для подстройки выходного сигнала преобразователя при верхнем предельном значении измеряемого давления предназначен подстроечный резистор корректора диапазона 8. К преобразователю давления присоединяется вторичный электронный прибор, измеряющий сигнал с преобразователя и переводящий его в значения давления.

Лабораторная работа № 5

Исследование работы датчика давления деформационного мембранного типа

Цель работы: Проведение исследований по работе прибора для измерения давления – датчика давления деформационного мембранного типа.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подключить с помощью шлангов и тройника манометр 1 (М1) и датчик давления 1 (ДД1) к порту избыточного давления на лицевой панели стенда.
2. Включить компрессор, включить переключатель режимов работы компрессора на избыточное давление.
3. С помощью регулятора давления установить величину давления 0,1 МПа. Занести показания М1 и ДД1 в табл.5.
4. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 МПа.
5. Занести показания М1 и ДД1 в табл. 5.
6. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,5 МПа.
7. Выключить компрессор. Принять показания манометра 1 за истинное значение давления. Вычислить абсолютную и относительную погрешность датчика давления ДД1.
8. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе.
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 5

Результаты исследования работы датчика давления деформационного мембранного типа

Номер измерения	P_{M1} , кПа	$P_{ДД1}$, кПа	$\Delta P_{ДД1}$, кПа	$\delta P_{ДД1}$, %
1				
2				
3				
4				
5				

Датчик давления пьезорезистивного типа

Немного теории: Датчик давления пьезорезистивного типа в своей конструкции имеет чувствительный элемент, меняющий свое удельное электрическое сопротивление при деформации. Термин "тензорезистивный" употребляется, как правило, по отношению к сенсорам, в которых используются тонкопленочные тензопреобразователи, либо структуры КНС (кремний на сапфире), КНК (кремний на кремнии). В таких сенсорах упругим элементом является металлическая или керамическая мембрана, на которую наклеивается полупроводниковый тензопреобразователь. Пьезорезистивными обычно называют монокристаллические кремниевые сенсоры с

диффузионными пьезорезисторами, в которых упругим элементом служит сама кремниевая мембрана (рис. 12). Внутреннее устройство датчика давления пьезорезистивного типа представлено на рис. 13.

Типичный тензорезистивный сенсор давления на основе структуры КНС состоит из упругой металлической мембраны, к которой припаян тензопреобразователь, представляющий собой подложку из сапфира, на которой сформирован измерительный мост Уитстона из кремниевых тензорезисторов. Кроме тензомоста, на подложке сформирована схема температурной компенсации (на рисунке не показана).

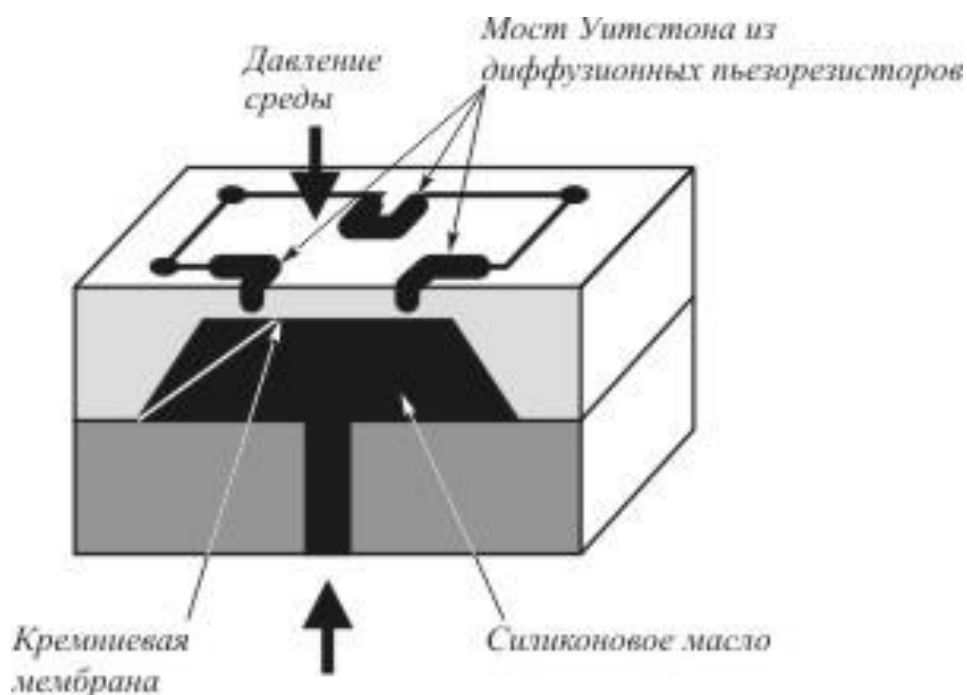


Рис. 12. Внешний вид датчика давления пьезорезистивного типа

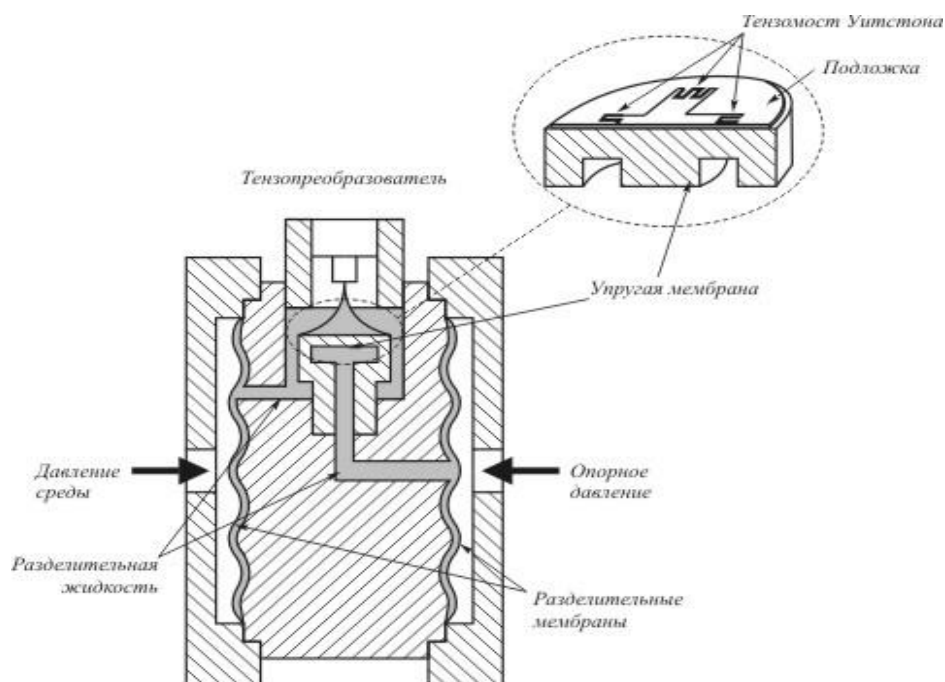


Рис. 13. Внутреннее устройство датчика давления пьезорезистивного типа

Основное отличие пьезорезистивного сенсора от тензорезистивного заключается в следующем: как и тензорезистивный, он содержит упругую мембрану, закрепленную на стеклянном основании, на которой имеется мост Уитстона, преобразующий деформацию мембраны в электрический сигнал, однако, в данном случае мембрана изготавливается из монокристаллического кремния, а вместо тензорезисторов используются сформированные методом диффузии пьезорезисторы. Поскольку жесткость кремниевой мембраны значительно ниже, чем металлической, разность значений давлений передается от наружных разделительных мембран через силиконовое масло непосредственно на сенсор без использования рычагов, тяг и т. п.

Достоинствами пьезорезистивных сенсоров являются:

- малый гистерезис;
- стойкость к вибрации;
- однородность упругой мембраны.

Недостатки в основном те же, что и у тензорезистивных, но выражены в меньшей степени:

- низкая чувствительность (2...5%);
- сильное влияние температуры (за счет изменения удельного сопротивления пьезорезисторов);
- существенное влияние статического давления;
- недостаточная стабильность (фактором дрейфа является загрязненность примесями);

- наличие нелинейности.

Структурная схема датчика (рис. 14) включает в себя:

- интегральный упругий чувствительный элемент (ЧЭ);
- микроконтроллер (МК);
- преобразователь «напряжение-ток» (ПНТ).



Рис. 14. Структурная схема датчика давления пьезорезистивного типа

Контролируемое давление воспринимается ЧЭ и преобразуется в пропорциональные электрические сигналы. Сигналы с выхода ЧЭ поступают в микроконтроллер (МК), где происходят вычисления и формирование выходного сигнала в виде ШИМ. Преобразователь ПНТ преобразует сигнал с МК до нормализованной величины (4 – 20) мА.

Лабораторная работа № 6

Исследование характеристик датчика давления пьезорезистивного типа

Цель работы: Исследование характеристик прибора для измерения давления— датчика давления пьезорезистивного типа.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подключить с помощью шлангов и тройника манометр 1 (М1) и датчик давления 2 (ДД2) к порту избыточного давления на лицевой панели стенда.

2. Включить компрессор, включить переключатель режимов работы компрессора на избыточное давление.

3. С помощью регулятора давления установить величину давления 0,1 Мпа. Занести показания М1 и ДД2 в табл.6.

4. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 Мпа.

5. Занести показания М1 и ДД2 в табл.6.

6. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,5 Мпа.

7. Выключить компрессор. Принять показания манометра 1 за истинное значение давления. Вычислить абсолютную и относительную погрешность датчика давления ДД2.

8. Проанализировать результаты, сделать выводы.

9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 6

Результаты исследования характеристик датчика давления
пьезорезистивного типа

Номер измерения	$P_{мн1}$, кПа	$P_{дд2}$, кПа	$\Delta P_{дд2}$, кПа	$\delta P_{дд2}$, %
1				
2				
3				
4				
5				

Способы измерения расхода воды

Объемный способ измерения расхода воды

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы.

Объемный способ измерения среднего расхода жидкости – мерная емкость. Пусть в момент времени t_1 в мерной емкости содержится объем жидкости V_1 , и в емкость равномерно поступает жидкость до времени t_2 . Объем жидкости в емкости в момент времени t_2 равен V_2 , тогда средний расход поступающей жидкости:

$$Q = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}.$$

Изменяя время $(t_2 - t_1)$ замера, можно получать средний расход с различной точностью. В емкости установлены два датчика уровня (верхний и нижний), время между срабатываниями которых измеряется электронным секундомером с электрическим управлением. На боковую поверхность мерной емкости наклеена шкала, отградуированная в единицах объема.

Экспериментальное изучение способов измерения расхода заключается в измерении расхода жидкости по мерной емкости в зависимости от времени измерения и объема, в определении объема жидкости между срабатываниями датчиков уровня.

Лабораторная работа № 7

Исследование объемного способа измерения расхода воды

Цель работы: Изучение объемного способа измерения расхода воды, определение влияния величины измеряемого объема и времени измерения на погрешность измерений. Определение объема жидкости между срабатывания-ми датчиков уровня.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Открыть краны 1, 3, 5.
2. Включить насос.
3. Дождаться наполнения емкости и остановки электронного секундомера (в окне управляющей программы). Записать показания в табл.7 в графу $\Delta t_{\text{авт}}$.
4. Выключить насос, дождаться слива емкости Е, сбросить показания секундомера.
5. Частично закрыть кран 5 для уменьшения подачи насоса.
6. Повторить пункты 2-5 для различных положений закрытия крана 5.
7. Выключить насос.
8. Вычислить расход $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t_{\text{авт}}}$; где $\Delta V = 1.5$ л – объем емкости между датчиками автоматического срабатывания секундомера.
9. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе.
10. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 7

Результаты исследования объемного способа измерения
расхода воды

Номер опыта	$\Delta t_{\text{авт}}$	Q

Способ измерения расхода воды по показаниям счетчика воды

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в

единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы. Принцип работы и конструкция лопастного (пластинчатого) ротационного счетчика количества воды показан на рис. 15.

Измеряемая жидкость движется в пространстве, ограниченном цилиндрическими поверхностями корпуса 6 и ротора 8. Внутри ротора расположен неподвижный кулачок 7, на который опираются четыре ролика 9 с закрепленными на них лопатками 1, 2, 4 и 5. Давление жидкости, поступающей через входной патрубок на лопасть 5, приводит ротор во вращение, которое передается на счетный указатель. Ролики катятся по кулачку, лопасти при этом поочередно занимают место снаружи и внутри ротора. Таким образом, за полный оборот ротора через счетчик проходит количество жидкости, равное разности объемов цилиндра и ротора. Перетеканию жидкости из входного отверстия в выходное препятствует вставка 3.

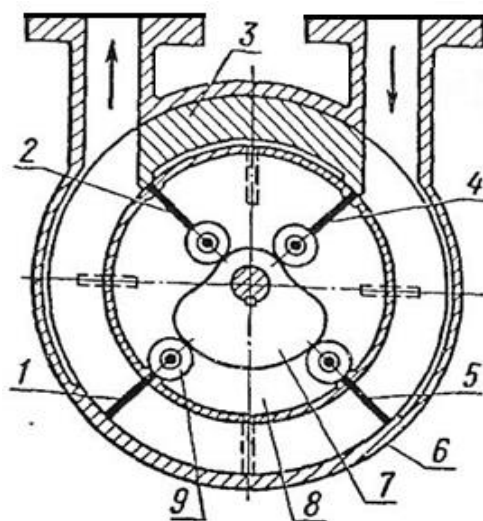


Рис. 15. Ротационный счетчик с пластинчатыми лопастями

При изготовлении ротационных счетчиков особо внимание обращают на легкость хода роторов и уменьшение неучитываемых утечек через счетчик. Легкость хода (качественный показатель малого трения в механизме, а следовательно, и малой потери давления на счетчике) обеспечивается установкой валов ротора на подшипники качения. Уменьшение же утечек достигается тщательной обработкой и взаимной подгонкой сопрягаемых поверхностей.

Погрешность показаний ротационных счетчиков обычно не превышает 1% в пределах 10-100 % номинального расхода.

Лабораторная работа № 8

Исследование способа измерения расхода воды по показаниям счетчика воды

Цель работы: Исследование способа измерения расхода воды по показаниям счетчика воды, сравнение с объемным способом измерения. Определение погрешностей измерения.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Открыть краны 1, 3, 5.
2. Включить насос.
3. Записать в табл. 8 значение расхода, определенное с помощью счетчика «датчик расхода воды» в окне управляющей программы), время Δt автоматической остановки секундомера при наполнении емкости Е. Выключить насос, дождаться слива воды из емкости Е, сбросить показания секундомера.
4. Частично закрыть кран 5.
5. Повторить пункты 2-4 для разных положений закрытия крана 5.
6. Вычислить значения расхода как $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ для ранее записанных результатов измерений (принять $\Delta V = 1,5 \text{ л}$). Сравнить значения расхода, полученные с помощью счетчика воды и мерной емкости Е.
7. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе.
8. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 8

Результаты исследования способа измерения расхода воды
по показаниям счетчика воды

Номер измерения	$Q_{\text{счетч}}$	Δt	Q

Способ измерения расхода воды по величине
падения давления на мерной диафрагме

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в

единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы.

Наиболее распространенным методом измерения расхода в трубах является метод его измерения по переменному перепаду давления на сужающем устройстве. Схема расходомера показана на рис. 16. В трубу вставляется устройство, сужающее поток, например, диафрагма — диск с отверстием. В месте сужения скорость потока возрастает, и его кинетическая энергия увеличивается. Это вызывает уменьшение потенциальной энергии, которая определяется статическим давлением. Давление в суженном потоке меньше, чем давление в потоке до сужения. Разность давлений возрастает с увеличением скорости среды и служит мерой расхода. Сужающее устройство является преобразователем потока (или его расхода) в разность давлений, которая измеряется дифференциальным манометром, градуированным в единицах расхода.

В качестве сужающего устройства обычно используют так называемые нормальные сужающие устройства: нормальные диафрагмы (рис. 16, а), нормальные сопла (рис. 16, б), трубы Вентури (рис. 16, в).

Достоинства расходомеров с сужающими устройствами заключаются в их универсальности. Этими расходомерами можно измерять расход любых однофазных, а в ряде случаев и двухфазных сред. Они пригодны для измерения расхода в трубах практически любого диаметра и при любом давлении. Расходомер состоит из сужающего устройства, соединительных трубок и серийно выпускаемого дифференциального манометра, конструкция которого не зависит от измеряемой среды и расхода.

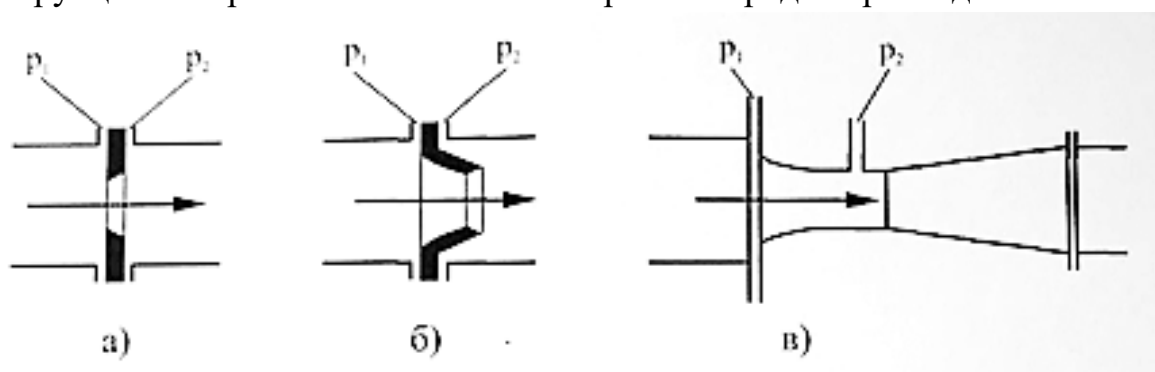


Рис. 16. Виды сужающих устройств

Сужающее устройство рассчитывается по стандартной методике. Исходными данными являются условия измерения и входные данные дифференциального манометра. Сужающие устройства изготавливаются потребителем после проведения необходимых расчетов.

Основными недостатками расходомеров с сужающими устройствами являются нелинейная функция преобразования, малое отношение $Q_{\max}/Q_{\min}$, обычно не превышающее 3, и затруднения при измерении пульсирующих и переменных расходов. Основная приведенная погрешность расходомеров этого типа не превышает 1-3 %.

В горизонтальной трубе (изменения уровня отсутствуют) с пренебрежимо малыми потерями на трение с несжимаемой жидкостью расход через диафрагму выражается формулой (14):

$$Q_d = C S_2 \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (14)$$

где C – коэффициент расхода, безразмерная величина, учитывающая соотношение диаметров трубы и отверстия в диафрагме, а также соотношение теоретического и действительного расхода через данную диафрагму;

S_2 – площадь сечения отверстия в диафрагме, м^2 ;

P_1 – давление жидкости до диафрагмы, Па;

P_2 – давление жидкости до диафрагмы, Па;

ρ – плотность жидкости.

Для течения жидкости постоянной плотности расход через диафрагму связан с перепадом давления на диафрагме ($P_1 - P_2$) следующим соотношением (15):

$$Q_d = K \sqrt{P_1 - P_2} \quad (15)$$

где K – коэффициент, определяемый для расхода данной жидкости через данную диафрагму.

Коэффициент K определяется на основе экспериментальной тарировки диафрагмы.

Лабораторная работа № 9

Исследование способа измерения расхода воды по величине падения давления на мерной диафрагме

Цель работы: Изучение измерительной диафрагмы как прибора для измерения расхода жидкости.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется гидравлическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Открыть краны 1, 3.

2. Подключить к точкам измерения давления на диафрагме Д датчики давления ДД1 и ДД2.

3. Включить насос. Занести в табл. 9 значения P_1 (по показаниям ДД1) и P_2 (по показаниям ДД2), значение расхода воды Q по показаниям управляющей программы. Вычислить коэффициент K , используя формулу (8). Выключить насос.

4. Повторить пункт 2 дважды и занести результаты в табл. 9.

5. Частично закрыть кран 3 и повторить пункты 2-3 для нового положения крана 3.

6. Выключить насос, вычислить $K_{ср}$, абсолютную и относительную ошибку вычисления K . Записать значение коэффициента K для данной диафрагмы.

7. Проанализировать результаты, сделать выводы.

8. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 9

Результаты исследования способа измерения расхода воды по величине падения давления на мерной диафрагме

Номер измерения	P_1	P_2	Q	K	ΔK	δK
$K_{ср}$						

Способ измерения расхода воздуха по величине падения давления на мерной диафрагме в газовой среде

Данный способ измерения расхода отличается от приведенного выше. Для адиабатического течения газа с постоянной начальной температурой расход через диафрагму связан с величинами давления перед диафрагмой P_1 и за ней P_2 следующим соотношением (16):

$$Q = K P_1 \sqrt{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (16)$$

где $\gamma=1,4$ показатель адиабаты.

Отсюда

$$K = \frac{Q}{P_1 \sqrt{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}} \quad (17)$$

Коэффициент К определяется на основе экспериментальной тарировки диафрагмы.

Лабораторная работа № 10

Исследование способа измерения расхода воздуха по величине падения давления на мерной диафрагме

Цель работы: Изучение способа измерения расхода воздуха по величине падения давления на мерной диафрагме.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Открыть вентиль 6.
2. Подключить к точкам измерения давления на диафрагме Д датчики давления ДД1 и ДД2.
3. Включить компрессор.
4. Занести в табл.10 значения P_1 (по показаниям ДД1) и P_2 (по показаниям ДД2), значение расхода воздуха Q по показаниям управляющей программы. Вычислить К по формуле (2).
5. Частично закрыть вентиль 6 и повторить пункт 3 для нового положения вентиля 6.
6. Выключить компрессор. Вычислить $K_{ср}$, абсолютную и относительную ошибку измерений.
7. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе.
8. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 10

Результаты исследования способа измерения расхода воздуха
по величине падения давления на мерной диафрагме

Номер измерения	P1	P2	Q	K	ΔK	δK
$K_{ср}$						

Способ измерения расхода газа по методу отсеченного объема

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы.

Метод измерения расхода по падению давления в емкости основан на газовых законах, а именно на уравнении Менделеева – Клапейрона:

$$PV=MRT,$$

где P – давление газа, V – объем, занимаемый газом, M – масса газа, R – газовая постоянная, T – температура газа.

Схема измерения приведена на рис. 17.

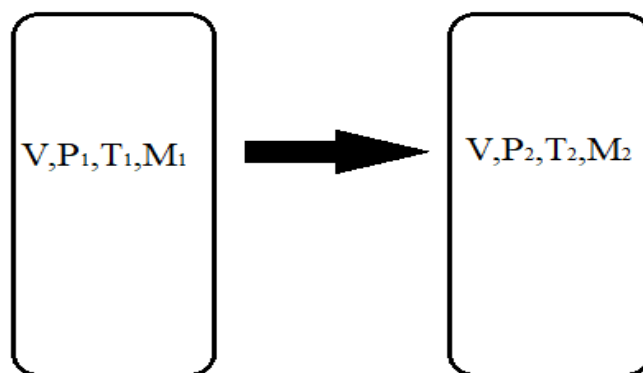


Рис. 17. Схема измерения расхода газа по емкости

Таким образом, измеряя давление и температуру для двух состояний газа в емкости через время t можно определить средний объемный расход газа из емкости, приведенный к нормальным условиям (18):

$$Q = \frac{V}{t} \left(\frac{P_1}{RT_1} - \frac{P_2}{RT_2} \right) * \frac{1}{\rho_{\text{н}}}, \quad (18)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – плотность газа при нормальных условиях: давлении ($p_{\text{н}} = 101325$ Па) и температуре $T_{\text{н}} = 293$ К).

С учетом, что $\rho_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{RT_{\text{н}}}$, получаем:

$$Q = \frac{V}{t} \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) * \frac{T_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} \quad (19)$$

Однако, при применении датчиков температуры с большой инерционностью и больших расходах, т.е. быстром падении давления в ресивере, достоверно измерить можно только конечное давление. В таком случае принимают какой-либо из законов расширения газа – адиабатический или изотермический.

Для адиабатического истечения из емкости применяют формулу (20):

$$Q_A = \frac{V_{P1}}{t_{T1}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma} \right) * \frac{T_{ну}}{P_{ну}}, \quad (20)$$

где γ - показатель адиабаты для воздуха (принять $\gamma=1.4$)

Для изотермического истечения применяют формулу:

$$Q_{и} = \frac{V_{P1}}{t_{T1}} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right) * \frac{T_{ну}}{P_{ну}} \quad (21)$$

Для проведения лабораторных работ в лабораторном стенде используется ресивер объемом 8 л.

Лабораторная работа № 11

Исследование способа измерения расхода газа по методу отсеченного объема

Цель работы: Исследование способа измерения расхода газа по методу замера падения давления в отсеченном объеме, определение погрешностей измерения.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Полностью открыть редукционный клапан (регулятор давления). Заккрыть вентиль 6.

2. Включить компрессор. Дождаться наполнения ресивера и автоматической остановки работы компрессора.

3. По датчику температуры 4(ДТ4 на рис. 2 описания стенда, Т4 в окне управляющей программы) определить температуру воздуха в ресивере T_P . По датчику давления 4(ДД4 на рис. 2 описания стенда, Д4 в окне управляющей программы) определить давление P_{P1} .

4. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P1} и температуру T_P .

5. Открыть вентиль 6, одновременно запустив секундомер.

6. Подождать пока давление в ресивере упадет не менее чем на 0,3 бар. Заккрыть вентиль 6, одновременно остановив секундомер.

7. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P2} , время по секундомеру t . Сбросить показания секундомера.

8. Перейти к следующему измерению в таблице. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P1} и температуру T_P .
9. Открыть вентиль 6, одновременно запустив секундомер.
10. Подождать пока давление в ресивере упадет не менее чем на 0,6 бар. Закрыть вентиль 6, одновременно остановив секундомер.
11. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P2} , время по секундомеру t . Сбросить показания секундомера.
12. Перейти к следующему измерению. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P1} и температуру T_P .
13. Открыть вентиль 6, одновременно запустив секундомер.
14. Подождать пока давление в ресивере упадет не менее чем на 1,0 бар. Закрыть вентиль 6, одновременно остановив секундомер.
15. Записать в табл. 11 давление в ресивере P_{P2} , время по секундомеру t . Сбросить показания секундомера.
16. Выключить компрессор.
17. По формулам (20) и (21) вычислить расход по ресиверу для адиабатического Q_A и изотермического $Q_{И}$ истечения.
18. Проанализировать результаты, сделать выводы.
19. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 11

Результаты исследования способа измерения расхода газа
по методу отсеченного объема

Номер измерения	P_{P1} , бар	T_P , К	P_{P2} , бар	t , с	Q_A , л/мин	$Q_{И}$, л/мин

Способ измерения расхода воздуха по показаниям
счетчика газа

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы.

Конструкция счётчика представляет классический состав аппарата подобного вида. В герметичном корпусе расположены следующие элементы:

- автоматический генератор струйного типа;
- электронный блок обработки сигнала;
- стандартный пьезоэлемент;
- литиевый источник питания.

Корпус закрывается крышкой с вмонтированным пломбировочным кольцом.

Характеристики и принцип действия счетчика газа

В этом устройстве применён так называемый косвенный метод измерения расхода газовой смеси. Он основан на функциональной зависимости частоты колебаний газового потока в струйном генераторе от объёма проходящего газа. Эта зависимость носит линейный характер.

Принцип работы струйного счетчика газа основан на колебании струи газа в специальном струйном генераторе. Струя газа попеременно перебрасывается из одного устойчивого положения в другое и создает при этом пульсации давления и звука с частотой пропорциональной скорости течения газа и соответственно объемного расхода. В электронном преобразователе происходит вычисление количества пропущенного газа.

Принципиальная схема преобразователя с осциллирующей струей показана на рис. 18.

Глубина проточной части преобразователей постоянна. Поток жидкости или газа проходит через сопло 1 и попадает в диффузор 3 прямоугольного сечения. Под влиянием случайных причин поток в каждый данный момент в большей степени прижимается к той или другой стенке диффузора (допустим, к нижней). Тогда благодаря эжектирующему действию струи в преобразователе релаксационного типа давление p_2 в нижней части обводной трубки 2 станет меньше давления p_1 в верхней ее части, и по трубке 2 возникнет движение, показанное стрелкой, которое перебросит струю к верхней стенке диффузора. После этого направление движения в обводной трубке изменится, и струя станет осциллировать. Частота осцилляции пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу. Поэтому, используя пьезоэлектрический эффект, производят преобразования этих колебаний в электрический сигнал. После его последующей обработки в электронном блоке значения выводятся на жидкокристаллический индикатор.

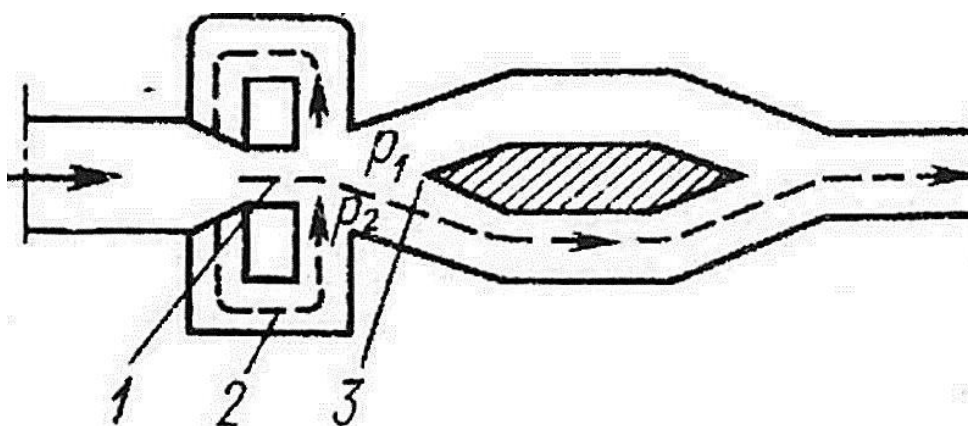


Рис. 18. Схема преобразователя с осциллирующей струей
1 – сопло; 2 – обводная трубка; 3 – тело обтекания

Лабораторная работа № 12

Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям счетчика газа

Цель работы: Изучение способа измерения расхода воздуха по показаниям счетчика газа.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда).
2. Включить компрессор.
3. Записать в табл.12 значение расхода, определенное с помощью счетчика («датчик расхода воздуха» в окне управляющей программы)
4. Частично закрыть вентиль 6.
5. Повторить пункты 3-4 для разных положений вентиль 6.
6. Проанализировать результаты, сделать выводы.
7. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 12

Результаты исследования измерения расхода воздуха
по показаниям счетчика газа

Номер измерения	$Q_{\text{счетч}}$

Способ измерения расхода воздуха по показаниям ротаметра, изучение устройства и принципа действия ротаметра

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы. Устройство ротаметра приведено на рис. 19.

В патрубках 1 и 8, соединенных друг с другом болтовыми стержнями 5, с помощью накидных гаек 6 и сальниковых уплотнений укреплена стеклянная коническая трубка 3, на которую непосредственно наносится шкала. Длина трубки обычно находится в пределах от 70 до 600 мм, а диаметр от 1,5 до 100 мм. Для ограничения хода поплавка 4 служат верхний 2 и нижний 7 упоры.

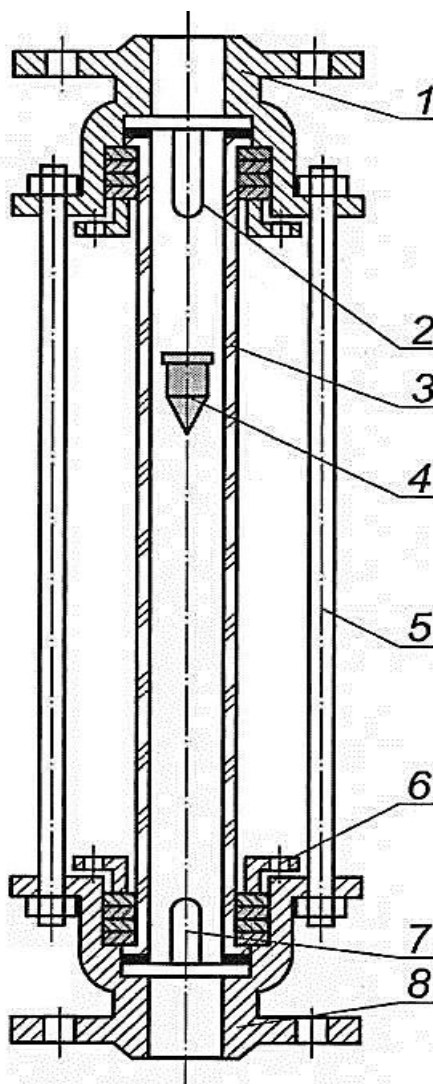


Рис. 19. Устройство ротаметра

Пределы применения обычных ротаметров со стеклянной трубкой по давлению 0,5-0,6 Мпа, по температуре 100—150°С.

Достоинства ротаметров: простота устройства и эксплуатации; наглядность показаний; надежность в работе; удобство применения для измерения малых расходов различных жидкостей и газов (в частности, агрессивных), а также неньютоновских сред; значительной диапазон измерения и достаточно равномерная шкала.

Недостатки: хрупкость и непригодность для измерения расхода веществ, имеющих высокие показатели давления; связанность прибора с местом измерения; только указывающий характер прибора (отсутствие записи и дистанционной передачи показаний); непригодность для измерения больших расходов.

Основные элементы ротаметра – коническая трубка и поплавок – образуют его проточную часть. Формы поплавка могут быть весьма разнообразны (рис. 20).

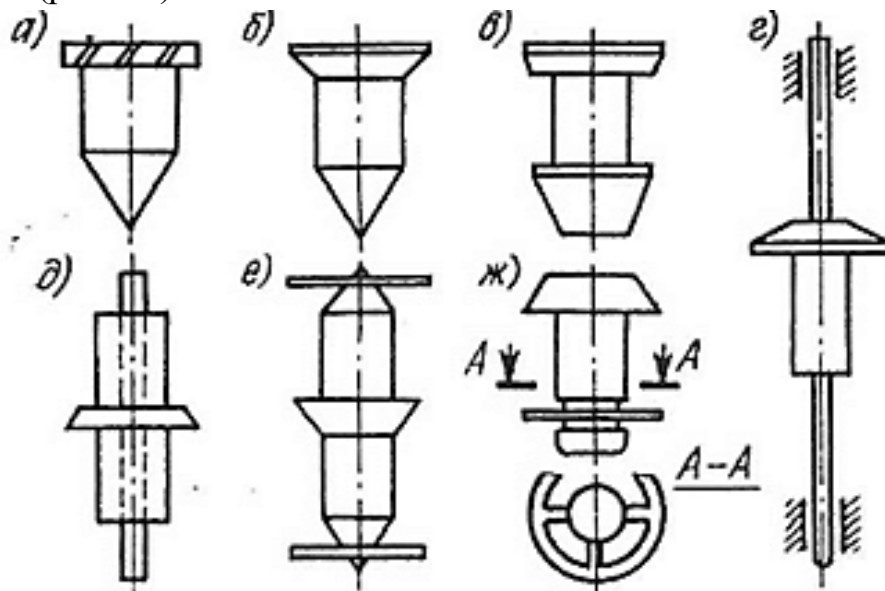


Рис. 20. Формы поплавков

Классическая его форма показана на рис. 20 (а). Поплавок имеет конусную нижнюю часть (иногда с несколько скругленным носом), цилиндрическую среднюю часть и дисковый верх. Существенный недостаток рассмотренной формы поплавка – сильная зависимость градуировочной характеристики от вязкости измеряемого вещества. Для снижения этой зависимости полезно уменьшать высоту верхней дисковой части поплавка и диаметр цилиндрической его части с тем, чтобы он был не более 0,6-0,7 от диаметра верхнего диска (рис. 20 (б)). В меньшей степени влияние вязкости

сказывается при катушечной форме поплавка, показанной на рис. 20 (в), которая находит теперь основное применение. Еще сильнее влияние вязкости устраняется при дисковой и тарельчатой форме поплавков, когда основное трение потока происходит на очень небольшой боковой поверхности диска. Но вес таких поплавков очень мал, и необходимо или увеличивать длину цилиндрического тела поплавка в одну или обе стороны от диска, или же подвешивать на стержне дополнительный груз. Кроме того, такие поплавки неустойчивы, и во избежание перекоса и трения о стенку трубки их необходимо снабжать направляющими. Последние могут быть трех видов: направляющие, связанные с поплавком и перемещающиеся вместе с ним (рис. 20(г)); неподвижные центральные штоки, проходящие через осевые отверстия поплавков (рис. 20(д)); направляющие кольца (два или одно), укрепляемые обычно в верхней или нижней части поплавков (рис. 20(е, ж)). Но для таких колец требуется применение конусных трубок с направляющими ребрами или гранями. Зато они имеют два дополнительных достоинства: обеспечение турбулентности потока, способствующего уменьшению влияния вязкости, и возможность измерения расхода непрозрачных жидкостей (благодаря малости зазора между направляющими ребрами и кольцами).

Поплавки изготавливаются из различных материалов: нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов, фторопласта-4 и различных пластмасс (в зависимости от диапазона измерения и агрессивности измеряемого вещества). При необходимости для снижения массы поплавок его делают пустотелым.

Второй основной элемент ротаметра – измерительная коническая трубка (с конусностью 0,001-0,01). Она изготавливается из химически устойчивого или термостойкого боросиликатного стекла. Чувствительность прибора возрастает с уменьшением угла конусности трубки.

Уравнение равновесия поплавка

В ротаметре (рис. 21) можно выделить три сечения: 1 - сечение, где начинает сказываться возмущающее действие поплавка на поток; 2 - узкое кольцевое сечение потока, где имеется максимальная скорость; 3 - сечение, в котором кончается возмущающее действие поплавка на поток.

На поплавок снизу действует разность статических давлений на носовую и кормовую поверхности поплавка, возникающая вследствие перехода части потенциальной энергии в скорость V_k в узком сечении; эта

разность равна $(p_1 - p_2) \cdot s$, где s – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка.

Сумма этих трех сил уравнивается весом G поплавка (22):

$$G = V g \rho_k \quad (22)$$

где V и ρ_k – объем и плотность материала поплавка (сплошного).

Из уравнения равновесия следует, что

$$(p_1 - p_2) = \frac{G}{s} \quad (23)$$

Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Расход является функцией площади потока и перепада давления $Q = f(S, \Delta p)$, где

$$S = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \quad (24)$$

Поскольку конусность трубки очень маленькая, можно считать, что расход Q пропорционален высоте подъема поплавка h (рис.21). В результате расчетов получим график зависимости расхода воздуха от высоты подъема поплавка (рис. 22).

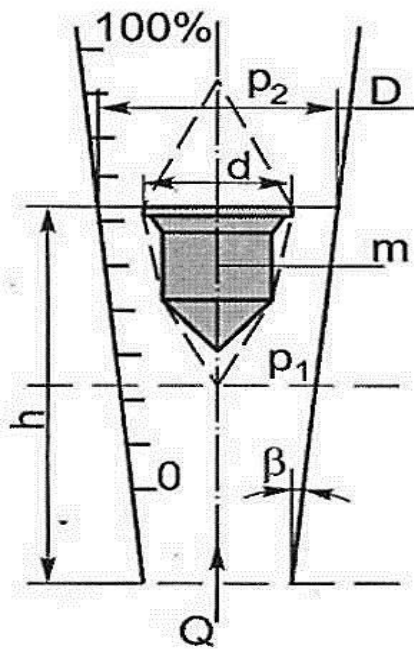


Рис. 21. Схема ротаметра

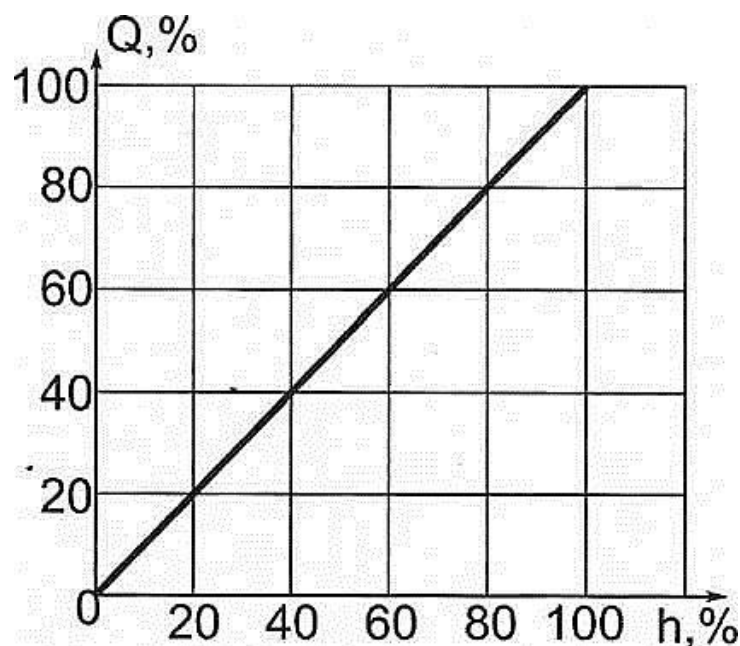


Рис. 22. Зависимость расхода жидкости (газа) от высоты подъема поплавка

Лабораторная работа № 13

Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям ротаметра

Цель работы:

1. Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям ротаметра,
2. Изучение устройства и принципа работы ротаметра.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда).
2. Включить компрессор.
3. Определить расход $Q_{\text{рот}}$ по показаниям ротаметра, определить расход Q по показаниям управляющей программы. Занести результаты в табл. 13.
4. Частично закрыть вентиль 6.
5. Повторить пункты 3-4 для разных положений вентиля 6.
6. Выключить компрессор.
7. Сравнить полученные значения расхода газа $Q_{\text{рот}}$ и Q .
8. Проанализировать результаты, сделать выводы.
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Результаты исследования способа измерения расхода воздуха
по показаниям ротаметра

номер измерения	$Q_{\text{рот}}$	Q

Способ измерения расхода воздуха по показаниям расходомера
с цифровой индикацией

Немного теории: Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход Q , когда количество вещества измеряется в объемных единицах, и массовый M , когда оно измеряется в единицах массы. Внешний вид расходомера (датчика расхода), используемого в стенде, представлен на рис. 23.

Принцип работы датчика расхода основан на применении технологии MEMS. MEMS-технология (Micro-Electro-Mechanical-System) позволяет формировать на поверхности кремниевой подложки микроэлектромеханические структуры различного функционального назначения. В стенку внутреннего канала прибора, по которому протекает поток воздуха, встроен микроскопический измерительный блок MEMS-расходомера (рис. 24). Он содержит нагреватель R_h и два датчика температуры.



Рис. 23. Внешний вид расходомера

Один из датчиков (Ru) расположен выше нагревателя по потоку, а второй (Rd) – ниже. Температура входящего воздуха измеряется датчиком Ra. При неподвижном воздухе температурное поле вокруг нагревателя симметрично, и датчики Ru и Rd показывают одинаковые значения температуры. Когда газ течет, температурное поле деформируется, и появляется разность температур между датчиками Ru и Rd. Разность температур зависит от скорости течения воздуха и позволяет определить и направление потока, и расход воздуха. Датчик Ra предназначен для компенсации влияния температуры воздуха.

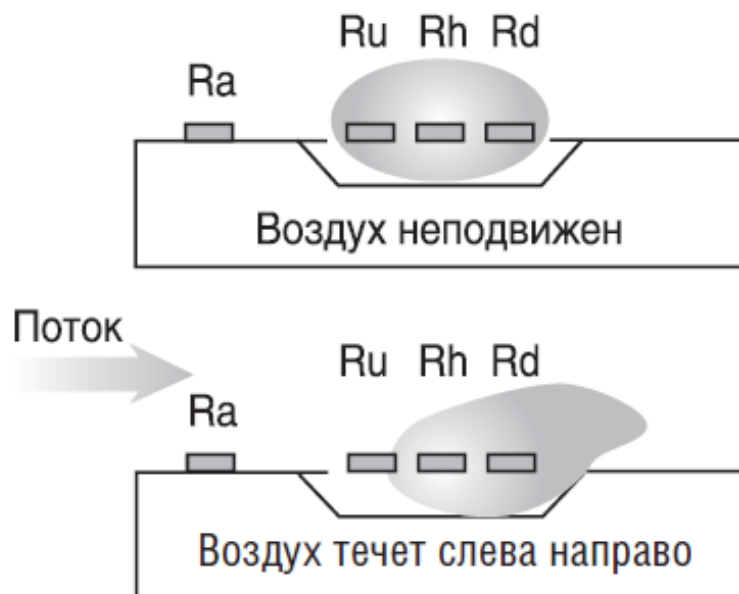


Рис. 24. Измерительный блок MEMS-расходомера

MEMS-расходомеры могут измерять как мгновенный, так и накопленный расход, снабжены аналоговыми и дискретными выходами. Данные датчики могут работать не только в среде воздуха, но и средах с азотом, аргоном и углекислым газом. Варианты исполнений предусматривают встроенный пневмодрессель, а также присоединительные отверстия, обращенные вниз, перпендикулярно оси потока. То есть MEMS-расходомер в таком исполнении не требует прямого протяженного отрезка трубопровода, а это существенно сокращает протяженность измерительного участка.

Лабораторная работа № 14
Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям
расходомера с цифровой индикацией

Цель работы: Изучение способа измерения расхода воздуха по показаниям расходомера с цифровой индикацией (ЦИ).

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда).
2. Включить компрессор.
3. Определить расход $Q_{ЦИ}$ по показаниям расходомера с ЦИ, $Q_{рот}$ по показаниям ротаметра, Q по показаниям управляющей программы. Занести результаты в табл. 14.
4. Частично закрыть вентиль 6.
5. Повторить пункты 3-4 для разных положений вентиля 6.
6. Выключить компрессор.
7. Сравнить полученные значения расхода газа $Q_{ЦИ}$, $Q_{рот}$ и Q .
8. Проанализировать результаты, сделать выводы.
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 14

Результаты исследования измерения расхода воздуха по показаниям расходомера с цифровой индикацией

Номер измерения	$Q_{рот}$	Q

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Изучение работы циркуляционного насоса

Немного теории: Насос – это гидравлическая машина, преобразующая механическую, вращательную энергию привода в энергию движения жидкости.

Работа насоса характеризуется количеством жидкости, которое подается насосом в единицу времени, обозначается буквой Q и измеряется в $м^3/час$, л/мин и др. Объем жидкости, перекаченной насосом, подключенном к гидравлической сети, определяется рабочей точкой на его характеристике и, кроме конструктивных особенностей, зависит от гидравлической характеристики сети.

Оптимальная подача насоса достигается при максимальном значении коэффициента полезного действия. Фактическую подачу насоса можно определить по напорно-расходной характеристике зная создаваемый напор.

Напор – это удельная механическая работа, передаваемая насосом перекачиваемой жидкости, обозначается буквой Н и измеряется в метрах водного столба (м).

Полезная мощность N_{Π} – это мощность, затрачиваемая на сообщение жидкости энергии (25).

$$N_{\Pi} = HM = Q\rho gH = QP \quad (25)$$

где Р – создаваемое насосом давление;

Напор, создаваемый насосом, представляет собой разность значений механической энергии единицы веса жидкости в сечении потока после насоса и перед ним. В поле сил тяжести напор насоса равен разности полного напора жидкости после насоса $(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{W_2^2}{2g})$ и перед ним $(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{W_1^2}{2g})$;

полный напор выражается в метрах столба перемещаемой жидкости (26):

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \quad (26)$$

где $Z_2 - Z_1$ – разность высот сечений всасывающего и нагнетательного патрубков насоса, м;

ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

W_1, W_2 – скорость жидкости на входе и выходе из насоса соответственно, м/с;

P_1, P_2 – давление жидкости на входе и выходе из насоса соответственно, Па.

При одинаковой высоте всасывающего и нагнетательного патрубков насоса с учетом выражения (2) создаваемое насосом давление Р выразится формулой (27):

$$P = (P_{\text{нагн}} - P_{\text{всас}}) + \frac{8\rho Q^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) \quad (27)$$

где $P_{\text{вс}}$, $P_{\text{нагн}}$ – давление во всасывающем и нагнетающем патрубке насоса соответственно;

d_1, d_2 – внутренние диаметры всасывающего и напорного патрубков;

ρ – плотность жидкости;

g – ускорение свободного падения.

При одинаковом диаметре всасывающего и нагнетательного патрубков площадь сечений S_1 и S_2 до и после насоса будет равна. Учитывая, что

$$Q = W_1 S_1 = W_2 S_2 \quad (28)$$

можно приравнять скорость на входе и выходе из насоса $W_1 = W_2$. Если при этом высота z всасывающего и нагнетательного патрубков одинакова, формула (26) упрощается и принимает вид:

$$H = \frac{P_{\text{нагн}} - P_{\text{всас}}}{\rho g} = \frac{P}{\rho g} \quad \text{и} \quad P = P_{\text{нагн}} - P_{\text{вс}} \quad (29)$$

Основной характеристикой насоса является его напорно-расходная характеристика. Эта характеристика может быть рассчитана с помощью теоретических зависимостей или измерена на специальном испытательном стенде. Характеристики насоса изменяются при изменении частоты вращения приводящего вала, соответственно для каждой частоты вращения существует свое семейство характеристик насоса.

Существуют два основных типа насосов - динамические (лопастные) и объемные.

Динамический насос – это гидравлическая машина, в которой жидкость перемещается под силовым воздействием в камере, постоянно сообщаемой с входом и выходом насоса. Перекачивание жидкости в динамических насосах осуществляется, как правило за счет сил инерции (в лопастных) или трения (в насосах трения). Циркуляционный насос, используемый в стенде - динамический.

Объемный насос – это гидравлическая машина, в которой передача энергии жидкости осуществляется за счет изменения объема рабочей камеры. Рабочая камера объемного насоса – герметична и попеременно сообщается с линиями нагнетания и всасывания – входом и выходом насоса.

В паспортах насосов, как правило, приводятся напорные характеристики для соответствующей частоты вращения вала насоса. На рис. 25 приведена напорно-расходная характеристика динамического насоса.

Как видно по графику характеристики, чем большее сопротивление динамический насос вынужден преодолевать, тем меньшую подачу он может обеспечить. Максимальный напор насос создает при нулевом расходе.

Напорная характеристика объемного насоса (рис.26) имеет принципиально иной вид, чем для центробежного.

Давление, которое развивает объемный насос, зависит от гидравлической сети, в которую он включен. Если начать прикрывать задвижку на напорной магистрали, давление на выходе из насоса будет увеличиваться, однако двигатель насоса этого «не почувствует», он будет продолжать вращать кривошип с той же скоростью, и поршень будет вытеснять тот же объем жидкости. Теоретическая подача $Q_T = q \times n$ не зависит

от давления на выходе p_n (вертикальная прямая 1, рис. 26). В действительности с ростом давления p_n увеличиваются перетоки из полости нагнетания в полость всасывания, вследствие этого уменьшается объемный К.П.Д. и подача насоса (прямая 2).

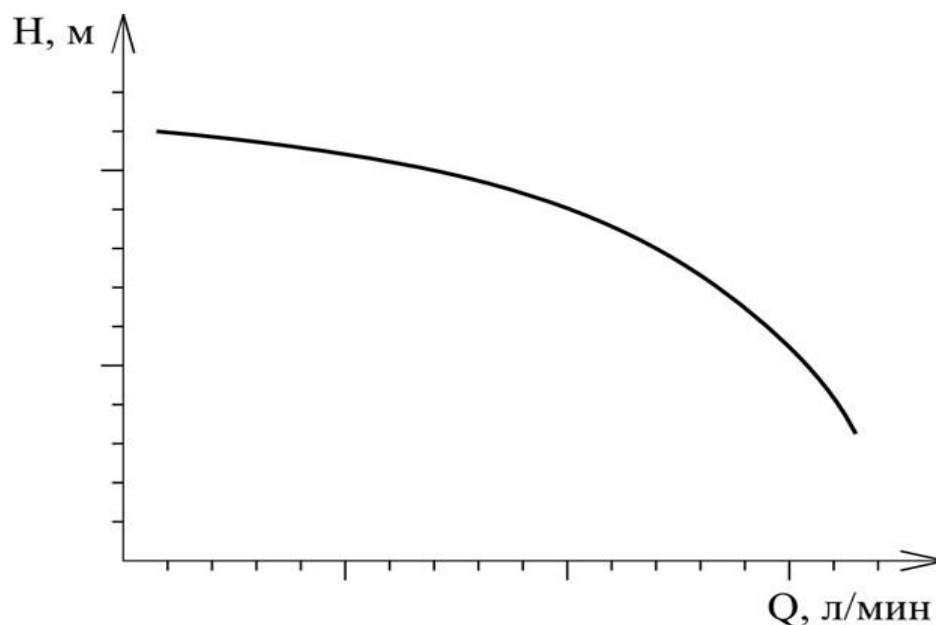


Рис. 25. Напорно-расходная характеристика насоса

Вследствие того, что объёмный насос «не чувствует» высокого давления, может произойти авария (разрыв стенки трубопровода, нарушение герметичности и др).

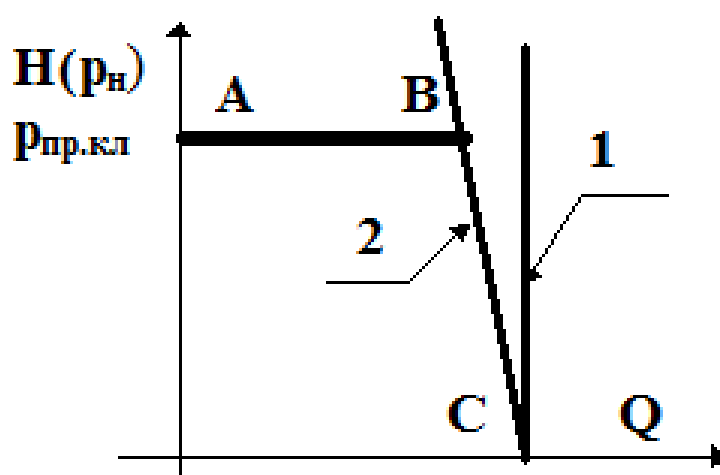


Рис. 26. Напорная характеристика объемного насоса

Где 1 – теоретическая напорная характеристика; 2 – практическая, ABC – характеристика насоса с предохранительным клапаном, $p_{\text{пр.кл.}}$ – давление настройки предохранительного клапана 3, Н – напор насоса, p_n – манометрическое давление на выходе из насоса

В стенде для выполнения лабораторных работ используется поршневой компрессор. Принцип работы поршневого компрессора основан на поочередном наборе и вытеснении газа поршнем из замкнутой полости через клапаны всасывания и нагнетания соответственно. В связи с наличием в конструкциях зазоров всегда существуют утечки, величины которых связаны с давлением на выходе компрессора. Кроме того, предельное давление, создаваемое компрессором, определяется вредным объемом, остающимся над поршнем при максимальной сжатии газа. Таким образом, расход газа, создаваемый компрессором, зависит от давления нагнетания.

Лабораторная работа № 15

Исследование работы компрессора и снятие характеристик его работы

Цель работы: Изучение приборов для измерения создания давления и расхода газа, построение характеристики компрессора.

При выполнении лабораторной работы используется способ измерения расхода газа по методу отсеченного объема (см. лабораторную работу № 11).

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда).

2. Включить компрессор. Запустить секундомер. С помощью датчика температуры 4 (ДТ4 - на рис. 2 описания стенда, Т4- в окне управляющей программы) определить температуру воздуха в ресивере T_1 . По показаниям датчика давления 4 (ДД4 - на рис. 2 описания стенда, Д4 - в окне управляющей программы) определить давление P_1 .

3. Подождать пока давление в ресивере возрастет не менее чем на 0,3 бар.

4. Записать в табл. 15 давление в ресивере P_2 , время по секундомеру t , прошедшее между замерах давления P_1 и P_2 . Записать в таблицу значение $P=(P_1+P_2)/2$.

5. Перейти к следующему измерению. Записать в табл. 15 давление в ресивере P_1 и температуру T_1 .

6. Подождать пока давление в ресивере возрастет не менее чем на 0,3 бар.

7. Записать в таблицу 16.1 давление в ресивере P_2 , время по секундомеру t , прошедшее между замерами давления P_1 и P_2 . Записать в таблицу значение $P=(P_1+P_2)/2$.

8. Повторять пункты 5-7 до наполнения ресивера и отключения компрессора.

9. По формуле (20) для адиабатического процесса вычислить расход воздуха

где γ - показатель адиабаты для воздуха (принять $\gamma=1.4$); давление $P_{\text{НУ}}=101325$ Па; $T_{\text{НУ}}=293$ К; $V=8$ л.

10. Построить график зависимости расхода воздуха от давления $f=Q(P)$. Проанализировать результаты, сделать выводы.

11. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 15

Результаты исследований работы компрессора и снятие характеристик его работы

Номер измерения	P_1 , бар	T_1 , К	P_2 , бар	t , с	Q , л/мин	P

Изучение устройства и работы редукционного клапана

Немного теории: Для регулирования давления воздуха, подводимого из пневмосистемы к какому-либо механизму, применяются специальные устройства, называемые редукционными клапанами. Это вызвано тем, что для уменьшения потерь транспортировать сжатый воздух по магистралям нужно при высоком давлении, тогда как для работы пневматических систем конечных потребителей сжатого воздуха, как правило, не требуется высокое давление. Редукционный клапан (рис.27) состоит из собственно узла регулирования потока и узла настройки. Узел регулировки потока состоит из клапана 1, который устанавливают на седло 2 в полностью закрытом состоянии. В исходном состоянии клапан открыт. Толкатель клапана верхней сферической поверхностью упирается в седло заделки 3 мембраны 4. В данной заделке выполнено отверстие, соединяющее седло толкателя с верхней полостью клапана, которая, в свою очередь, соединена с атмосферой.

На заделку 3 мембраны опирается пружина 5, предварительное поджатие которой можно регулировать с помощью механизма настройки путем вращения регулировочного винта 6.

Давление сжатого воздуха из выходной линии А через отверстие 7 действует на мембрану, стремясь ее поднять и сжать пружину 5. Чем выше давление воздуха, тем выше поднимается мембрана и регулировочный клапан 1. Зазор, через который проходит сжатый воздух от линии Р к линии А, уменьшается и его сопротивление возрастает. Это должно привести к уменьшению давления в линии А. При работе клапана имеется определенное равновесное положение регулирующего клапана, соответствующего настроенному значению выходного давления. Для исключения влияния давления сжатого воздуха на верхнюю поверхность клапана 1 в толкателе выполнен канал 7. Через данный канал происходит уравнивание клапана. Пружина 8 служит для подъема клапана вслед за подъемом мембраны.

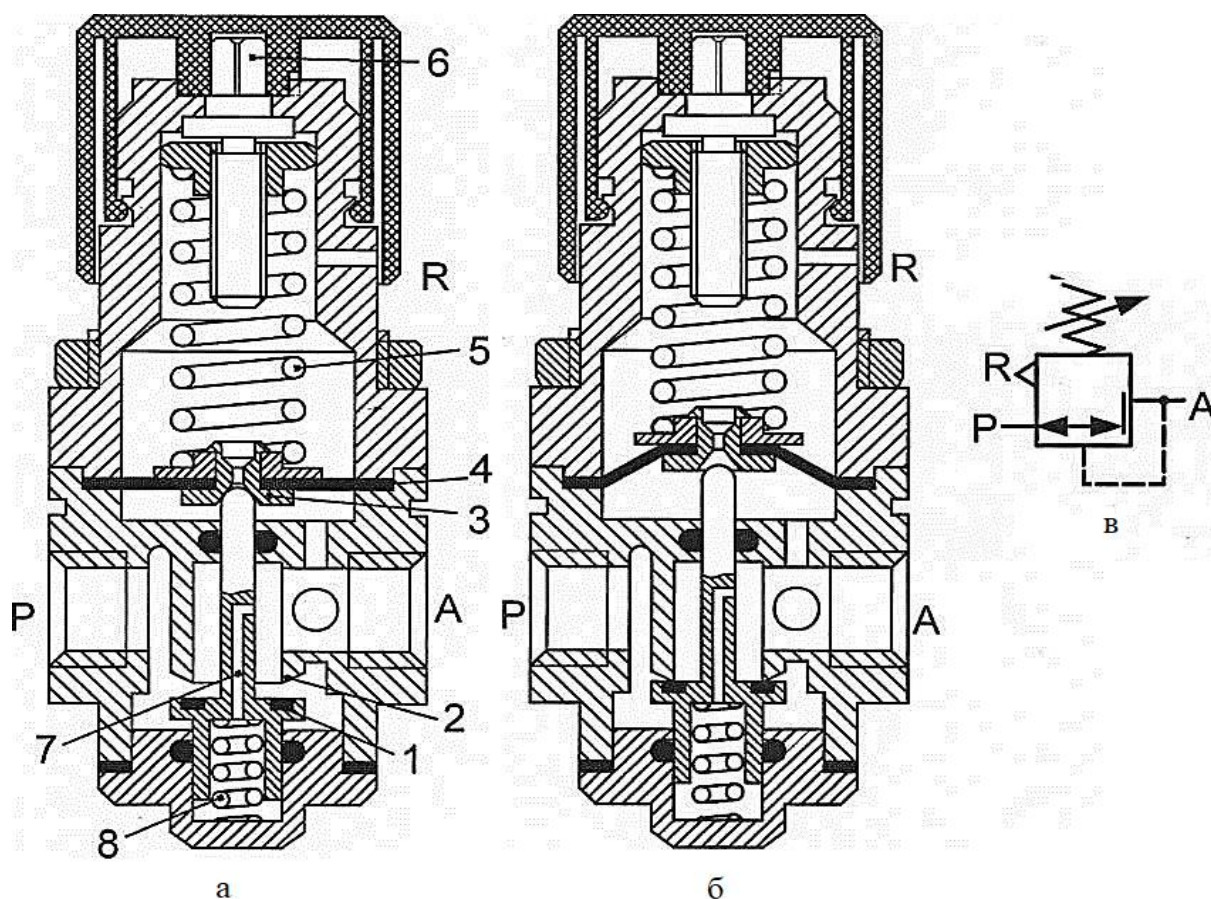


Рис. 27. Конструктивная схема редукционного клапана

На рис. 27 показано состояние клапан: а) открыт, б) клапан закрыт, в) условное обозначение клапана на схемах. Конструктивные элементы редукционного клапана: 1 – регулирующий клапан; 2 – седло клапана; 3 – заделка мембраны; 4 – мембрана; 5, 8 – пружины; 6 – регулировочный винт; 7 – канал; А – выходная линия клапана; Р – линия питания; R – выхлопная линия.

Если по какой-либо причине давление в выходной линии поднимается выше значения, соответствующего давлению настройки, мембрана поднимается вверх, клапан 1 садится на седло, и за счет дальнейшего подъема мембраны открывается канал в заделке, через который выходная линия А соединяется с атмосферой и происходит сброс сжатого воздуха в атмосферу.

В момент начала работы пневматической системы, как только начнется потребление сжатого воздуха, давление p_2 снизится и усилие пружины станет больше, чем величина силы, которая зависит от величины давления p_2 и воздействует на диафрагму - в результате клапан открывается.

Если в процессе работы пневмосистемы потребление сжатого воздуха сокращается, давление p_2 незначительно увеличится, благодаря чему возрастет сила, действующая на диафрагму и противодействующая усилию пружины. Диафрагма и клапан начнут подниматься до тех пор, пока усилие пружины и сила давления воздуха не будут снова уравновешены. Расход воздуха, проходящего через клапан, будет снижаться до тех пор, пока он не придет в соответствие с интенсивностью потребления сжатого воздуха и не установится необходимое выходное давление. При отсутствии потребления сжатого воздуха регулировочный клапан находится в состоянии, близком к закрытому.

К основным параметрам редукционных клапанов относятся: условный проход D_u , характеризующий размер проходного сечения; номинальные значения расхода Q и давления p_1 на входе в клапан, диапазон изменения давления p_2 , а также точность поддержания заданной величины давления p_2 в рабочем диапазоне изменения расхода.

Статические характеристики редукционного клапана определяют зависимости давления на выходе из клапана от давления на входе и от расхода газа через него. Целью данной работы является экспериментальное получение расходной характеристики редукционного клапана $p_2=f(Q)$.

Лабораторная работа № 16

Исследование работы редукционного клапана

Цель работы:

1. Изучить конструкцию и принцип работы предохранительного клапана.
2. Выполнить лабораторную работу и построить расходные характеристики предохранительного клапана.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Для выполнения работы используется пневматическая часть стенда. Подготовить стенд к работе (см. описание стенда). Полностью закрыть редукционный клапан.
2. Включить компрессор, дождаться заполнения ресивера.
3. Редукционным клапаном поднять давление до 90 кПа по манометру M_0 (рис. 2 описания стенда).
4. Частично открыть вентиль 6 (рис. 2 описания стенда) до появления расхода воздуха расходомеру с ЦИ около 5 л/ мин.
5. Занести показания манометра M_0 и расхода по расходомеру в табл. 16.
6. Открыть вентиль 6 для увеличения величины расхода воздуха на 2-3 л/мин.
7. Занести показания манометра M_0 и расхода по расходомеру в табл. 16.
8. Повторить пункты 6,7 до полного открытия вентиля 6.
9. Закрыть редукционный клапан (установить выходное давление на 0).
Закрыть вентиль 6.
10. Редукционным клапаном установить давление 50 кПа по манометру M_0 .
11. Повторить пункты 4-9.
12. По данным табл.16 построить зависимости давления на выходе редукционного клапана от расхода воздуха для двух различных давлений настройки. Проанализировать результаты, сделать выводы.
13. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 16

Результаты исследования работы редукционного клапана

номер измерения	Давление настройки $p=90$ кПа		Давление настройки $p=50$ кПа	
	Q	P_{M0}	Q	P_{M0}

Общие требования к оформлению отчета

1. На титульном листе должны быть указаны: наименование университета, кафедры, название работы, фамилия студента, преподавателя и номер группы, год (Приложение 4).

2. Текстовая часть отчета выполняется на одной стороне белой бумаги формата А4 машинописным способом через 1,15 межстрочных интервала. Допускается выполнение отчетов рукописным способом, аккуратным разборчивым почерком.

3. В состав отчета должны входить следующие материалы: титульный лист, краткое содержание лабораторной работы с представлением схемы, применяемых формул расчета, таблицы результатов измерений, графики, выводы по лабораторной работе.

Вопросы для закрепления тем:

Тема 1

1. Какие типы термосопротивлений Вы знаете?
2. Каковы различия термопреобразователей, имеющих маркировку М и П?
3. Определите назначение коэффициента α
4. Что такое динамические характеристики терморезисторного преобразователя?

Тема 2

1. Какие типы датчиков давления вы знаете?
2. Что такое избыточное давление?
3. С помощью каких устройств создают вакуум?
4. Что такое относительная погрешность измерения?

Тема 3

1. Дайте определение: что такое расход жидкости?
2. Какие способы измерения расхода жидкости вы знаете?
3. Каковы отличия способов измерения расхода жидкости от измерения расхода газа?
4. Что представляет из себя способ измерения расхода воды по величине падения давления на мерной диафрагме?
5. Что такое уравнение равновесия поплавка? К какому типу расходомеров оно относится?

Тема 4

1. Каково устройство редукционного клапана?
2. Каков принцип работы редукционного клапана?
3. От чего зависят объемные характеристики работы циркуляционного насоса?

4. Чем отличается работа циркуляционного насоса от работы поршневого?
5. От чего зависит величина напора насоса?

Библиографический список

Калиниченко А. В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике : учебно-практическое пособие / А. В. Калиниченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников. - Москва: Инфра-Инженерия, 2020., 580 с.

Приложение 1

Внешний вид стенда (верх)



Продолжение Приложения 1
Внешний вид стенда (низ)



Приложение 2
Номинальная статическая характеристика для медных
термопреобразователей сопротивления и чувствительных
элементов $R_0=100\text{Ом}$, $\alpha= 0,00426\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

$t, ^{\circ}\text{C}$	Сопротивление ТС при температуре t , Ом									
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-50	78,7									
-40	82,96	82,534	82,108	81,682	81,256	80,83	80,404	79,978	79,552	79,126
-30	87,22	86,794	86,368	85,942	85,516	85,09	84,664	84,238	83,812	83,386
-20	91,48	91,054	90,628	90,202	89,776	89,35	88,924	88,498	88,072	87,646
-10	95,74	95,314	94,888	94,462	94,036	93,61	93,184	92,758	92,332	91,906
0	100	99,574	99,148	98,722	98,296	97,87	97,444	97,018	96,592	96,166

Продолжение Приложения 2

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	100,426	100,852	101,278	101,704	102,13	102,556	102,982	103,408	103,834
10	104,26	104,686	105,112	105,538	105,964	106,39	106,816	107,242	107,668	108,094
20	108,52	108,946	109,372	109,798	110,224	110,65	111,076	111,502	111,928	112,354
30	112,78	113,206	113,632	114,058	114,484	114,91	115,336	115,762	116,188	116,614
40	117,04	117,466	117,892	118,318	118,744	119,17	119,596	120,022	120,448	120,874
50	121,3	121,726	122,152	122,578	123,004	123,43	123,856	124,282	124,708	125,134
60	125,56	125,986	126,412	126,838	127,264	127,69	128,116	128,542	128,968	129,394
70	129,82	130,246	130,672	131,098	131,524	131,95	132,376	132,802	133,228	133,654
80	134,08	134,506	134,932	135,358	135,784	136,21	136,636	137,062	137,488	137,914
90	138,34	138,766	139,192	139,618	140,044	140,47	140,896	141,322	141,748	142,174
100	142,6	143,026	143,452	143,878	144,304	144,73	145,156	145,582	146,008	146,434
110	146,86	147,286	147,712	148,138	148,564	148,99	149,416	149,842	150,268	150,694
120	151,12	151,546	151,972	152,398	152,824	153,25	153,676	154,102	154,528	154,954
130	155,38	155,806	156,232	156,658	157,084	157,51	157,936	158,362	158,788	159,214
140	159,64	160,066	160,492	160,918	161,344	161,77	162,196	162,622	163,048	163,474
150	163,9	164,326	164,752	165,178	165,604	166,03	166,456	166,882	167,308	167,734
160	168,16	168,586	169,012	169,438	169,864	170,29	170,716	171,142	171,568	171,994
170	172,42	172,846	173,272	173,698	174,124	174,55	174,976	175,402	175,828	176,254
180	176,68	177,106	177,532	177,958	178,384	178,81	179,236	179,662	180,088	180,514
190	180,94	181,366	181,792	182,218	182,644	183,07	183,496	183,922	184,348	184,774
200	185,2									

Перечень формул для расчета основных погрешностей измерения температуры контрольно-измерительными приборами

Абсолютную погрешность Δ термометров рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta = |t_{\text{изм}} - t_{\text{обр}}| \quad (1)$$

где $t_{\text{изм}}$ – значение температуры на шкале термометра; $t_{\text{обр}}$ – показание образцового датчика (принимается за действительное значение).

Относительную погрешность δ рассчитывается по формуле (2):

$$\delta = \frac{\Delta}{t_{\text{обр}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Приведенную погрешность γ рассчитывается по формуле (3):

$$\gamma = \frac{\Delta}{t_{\text{max}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где t_{max} – максимальное значение температуры, измеряемое на шкале термометра или диапазон измерений шкалы.

Форма титульного листа отчета по выполнению лабораторной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра автоматизации технологических процессов
и производств

Отчет по выполнению лабораторной работы №__
Тема: «.....»

Выполнил (а): студент (ка) гр. № ____ / ____ /

Проверил: преподаватель ____ / ____ /

Санкт-Петербург
202__

Содержание

Описание лабораторно-испытательного стенда «Измерительные приборы - датчики температуры, давления и расхода»	3
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	6
Виды и конструкции термопреобразователей сопротивления.....	6
Лабораторная работа № 1. Изучение работы приборов измерения температуры.....	8
Динамические характеристики терморезистивного преобразователя (ручной режим измерений).....	9
Лабораторная работа № 2. Исследование динамических характеристик терморезистивного преобразователя (ручной режим измерений).....	11
Динамические характеристики терморезистивного преобразователя (автоматический режим измерений).....	13
Лабораторная работа № 3. Исследование динамических характеристик терморезистивного преобразователя (автоматический режим измерений)...	14
ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	16
Стрелочные деформационные манометры.....	16
Лабораторная работа № 4. Исследование работы стрелочного деформационного манометра.....	17
Датчик давления деформационного мембранного типа.....	18
Лабораторная работа № 5. Исследование работы датчик давления деформационного мембранного типа.....	19
Датчик давления пьезорезистивного типа.....	20
Лабораторная работа № 6. Исследование характеристик датчика давления пьезорезистивного типа.....	23
СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ	24
Объемный способ измерения расхода воды.....	24
Лабораторная работа № 7. Исследование объемного способа измерения расхода воды.....	25
Способ измерения расхода воды по показаниям счетчика воды.....	25
Лабораторная работа № 8. Исследование способа измерения расхода воды по показаниям счетчика воды.....	27
Способ измерения расхода воды по величине падения давления на мерной диафрагме.....	27
Лабораторная работа № 9. Исследование способа измерения расхода воды по величине падения давления на мерной диафрагме.....	29
Способ измерения расхода воздуха по величине падения давления на мерной диафрагме в газовой среде.....	30
Лабораторная работа № 10. Исследование способа измерения расхода воздуха по величине падения давления на мерной диафрагме.....	31
Способ измерения расхода газа по методу отсеченного объема.....	32
Лабораторная работа № 11. Исследование способа измерения расхода газа по методу отсеченного объема.....	33
Способ измерения расхода воздуха по показаниям счетчика газа.....	34

Характеристики и принцип действия счетчика газа.....	35
Лабораторная работа № 12. Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям счетчика газа.....	36
Способ измерения расхода воздуха по показаниям ротаметра, изучение конструкции и принципа действия ротаметра.....	37
Уравнение равновесия поплавка.....	39
Лабораторная работа № 13. Исследование способа измерения расхода воздуха по показаниям ротаметра, изучение принципа действия ротаметра.....	41
Способ измерения расхода воздуха по показаниям расходомера с цифровой индикацией.....	42
Лабораторная работа № 14. Исследование способ измерения расхода воздуха по показаниям расходомера с цифровой индикацией.....	43
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ....	44
Изучение работы циркуляционного насоса.....	44
Лабораторная работа № 15. Исследование работы компрессора и снятие его характеристик.....	48
Изучение устройства и работы редукционного клапана.....	49
Лабораторная работа № 16. Исследование работы редукционного клапана.....	51
Общие требования к оформлению отчета.....	52
Вопросы для закрепления темы.....	53
Библиографический список.....	54
Приложения:	
1. Внешний вид стенда.....	54
2. Номинальная статическая характеристика для медных термопреобразователей сопротивления и чувствительных элементов	55
3. Перечень формул для расчета основных погрешностей измерения температуры контрольно-измерительными приборами.....	57
4. Форма титульного листа отчета по выполнению лабораторных работ.....	58
Содержание.....	59

Учебное издание

Владимир Иванович Рожков
Герман Павлович Буйлов

Метрология, технические измерения и автоматизация
Практикум по проведению
лабораторных работ на лабораторно-исследовательском стенде
ИПДРТ4, часть 2

Редактор и корректор В.А.Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2020 г., поз.92

Подп. к публикации 20.11.2020 Электронное издание. Печ.л. 3,75 Уч.-изд.л. 3,75. Изд.№ 91

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, СПб.,
198095, ул. Ивана Черных, д. 4.