



Министерство образования и науки Украины  
Севастопольский национальный технический  
университет

**Методические указания**  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Приборы контроля давления и  
температуры» для студентов направления  
специальности 7.090901 "Приборостроение"  
дневной и заочной формы обучения.

Севастополь  
2008

УДК 67.5.09

Метод. указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Приборы контроля давления и температуры» / Разраб. докт. техн. наук, проф. В.Я. Копп, канд. техн. наук, доц. Л.А. Глеч, ст. преп. О.И. Негреску, инженер В.В. Поливцев. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – 52с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении лабораторных работ.

В качестве лабораторных стендов представлены узлы и блоки измерительных преобразователей фирмы «FESTO». Приведены электрические схемы обработки сигналов измерительной информации. Представлены методики построения статических характеристик приборов контроля давления и температуры. Приведены основные теоретические зависимости для расчета пружинных и жидкостных приборов для измерения давления.

Методические указания предназначены для студентов технических вузов приборостроительных специальностей дневной и заочной форм обучения.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Автоматизированные приборные системы» 2 июня 2008 г., протокол №9.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: В.П. Поливцев, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств».

## Содержание

<b>Лабораторная работа №1 "Исследование, расчет и проектирование пружинных манометров"</b> .....	<b>4</b>
<b>Лабораторная работа №2 " Исследование работы и измерение избыточного давления пьезоэлектрического преобразователя "</b> .....	<b>24</b>
<b>Лабораторная работа №3 " Расчет параметров и измерение жидкостными приборами давления "</b> .....	<b>34</b>
<b>Лабораторная работа №4 " Особенности конструкции, расчета и измерения колокольными приборами "</b> .....	<b>44</b>
<b>Библиографический список</b> .....	<b>51</b>

# Лабораторная работа №1

## Исследование, расчет и проектирование пружинных манометров.

### 1. Цель работы

- изучение особенностей конструкции пружинных манометров;
- приобретение навыков сборки пневматических схем;
- приобретение навыков измерения с помощью пружинного манометра;
- приобретение навыков расчета трубчатых пружин приборов давления;
- приобретения навыков проектирования трубчатых пружин по проведенным расчетам;
- приобретения навыка расчета характеристик мембран;
- приобретения навыков проектирования мембран;
- приобретение навыков расчета относительной величины температурной погрешности пружинных приборов давления;

### 2. Теоретический раздел

#### 2.1. Общие сведения

Принцип действия всех пружинных приборов основан на изменении величины деформации, которая находится в известной устойчивой зависимости от величины измеряемого давления.

Классифицируют пружинные приборы в зависимости от вида пружин, преобразующих давление на следующие группы:

- приборы с трубчатой манометрической пружиной (Рисунок 1.1 а, б);
- мембранные приборы (Рисунок 1.1 в, г, д);
- сильфонные приборы (Рисунок 1.1 е);
- приборы с преобразованием измеряемого давления в усилие, действующее на пружину того или иного вида, например, пружинно поршневые (Рисунок 1.1 ж);
- пружинно-мембранные (Рисунок 1.1 к);
- пружинно-сильфонные (Рисунок 1.1 л);
- пружинно-колокольные (Рисунок 1.1 м); [3].

#### 2.2. Погрешности пружинных приборов

Точность пружинных приборов зависит от не совершенности упругих свойств пружин и влияние температуры на материал пружин. К погрешностям связанным с не совершенностью упругих свойств пружин относятся:

- остаточная деформация;
- упругое последствие;
- упругий гистерезис;

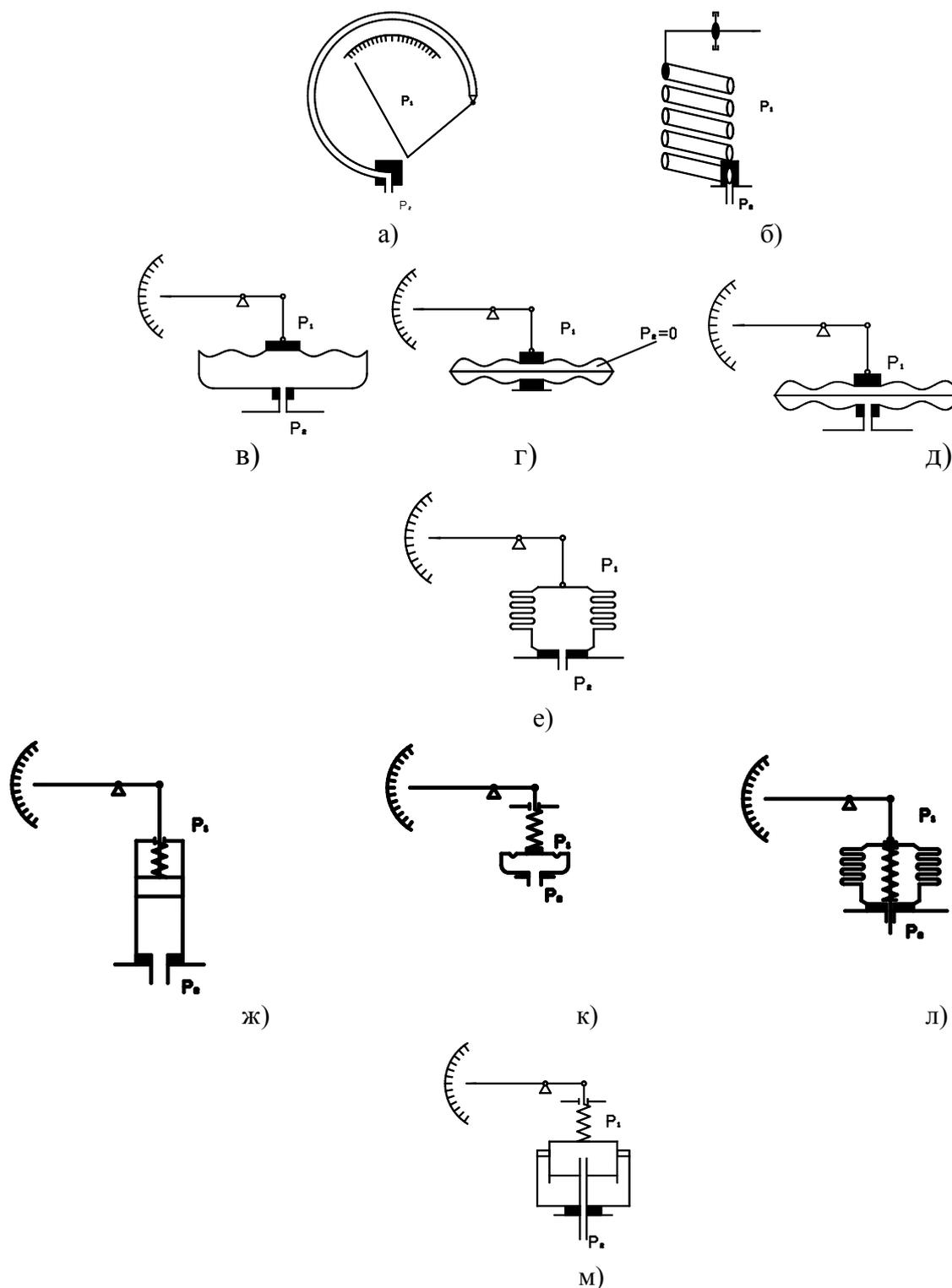


Рисунок – 1.1 Схемы пружинных механизмов для измерения давления.

а-одновитковый трубчатый манометр; б-многовитковый трубчатый манометр; в - мембранный манометр; г-манометром с анероидной мембранной головкой; д - манометр с манометрической мембранной коробкой; е - сифонный манометр; ж - пружинно-поршневой манометр; к – пружинно-мембранный манометр; л – пружинно-сифонный манометр; м – пружинно-колокольный манометр;

2.2.1. Остаточная деформация появляется если напряжение материала пружины превышает предел упругости. В этом случае после снятия нагрузки пружина не примет своей первоначальной формы, а показания будут отличаться от нуля на величину остаточной деформации.

Во избежание этой погрешности определяют коэффициент запаса **K** и следующего отношения

$$K = \frac{P_n}{P_{\max}},$$

где  $P_n$  - предел пропорциональности пружины;

$P_{\max}$  - наибольшее измеряемое давление, разряжение или перепад давления.

Обычно коэффициент **K** находится в пределах от 1,5 до 2,5. Для полного исключения остаточной деформации манометра надо, чтобы наибольшее измеряемое давление не превышало 0,65..0,75 верхнего предела измерения по шкале.

2.2.2. Упругое последствие проявляется при быстром изменении нагрузки. Например, если измеряемое давление быстро упадет до нулевой отметки, а показание прибора будет отличаться на некоторую величину  $\delta P_y$  и только через некоторое время установиться на ноль.

Оценку проводят коэффициентом **K'** в процентном отношении к измеряемому давлению **P**.

$$K' = \frac{\delta P_y}{P} \cdot 100\%.$$

2.2.3. Упругий гистерезис проявляется в неоднозначности деформации упругого элемента при нарастании и уменьшении нагрузки. Т.е. при одинаковом давлении показания прибора при нарастании нагрузки будут несколько меньше чем при ее убывании.

Суммарная погрешность, связанная с упругими свойствами чувствительных элементов не должна превышать 1%.

2.2.4. Температурная погрешность, обусловленная изменением модуля упругости материала в зависимости от температуры определяется формулой

$$E_t = E[1 + \lambda(t - t_0)], \quad (1.1)$$

где  $E_t$  - модуль упругости при температуре  $t$ ;

$E$  – модуль упругости при  $t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$\lambda$  - температурный коэффициент модуля упругости.

Относительное изменение модуля упругости  $\frac{\delta E}{E}$

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{E_t - E}{E} = \lambda(t - t_0). \quad (1.2)$$

Погрешность показания прибора вызванная изменением модуля упругости пружины

$$\delta p = -p\lambda(t - t_0), \quad (1.3)$$

где  $p$  - измеряемое давление.

Относительная величина температурной погрешности будет равна

$$\frac{\delta p}{p} = -\lambda(t - t_0). \quad (1.4)$$

Температурные коэффициенты модуля упругости приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Температурные коэффициенты модуля упругости  $\lambda$  и значения модуля упругости  $E$ .

№	Наименование и марка материала	Температурный коэффициент модуля упругости $\lambda$	Модуль упругости материала $E$
1	Латунь Л 68	$-4.8 \cdot 10^{-4}$	10000
2	Нейзильбер НМЦ 65-20	$-4 \cdot 10^{-4}$	12500
3	Фосфористая бронза Бр.ОФ 6.5-0.4	$4.8 \cdot 10^{-4}$	10500
4	Бериллиевая бронза Бр.Б2	$-3.1 \cdot 10^{-4}$	12100
5	Углеродистая сталь	$-4 \cdot 10^{-4}$	21000
6	Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т	$-3.5 \cdot 10^{-4}$	20000
7	Элинвар ЭН25	$\pm 0.1 \cdot 10^{-4}$	21200

Исходя из формулы (1.4) и значений коэффициента  $\lambda$  из таблицы 1,1 для большинства материалов и сплавов  $\lambda < 0$ , поэтому при повышении температуры показания прибора будут завышенными, а при понижении – заниженными.

Температурная погрешность может возникать в результате температурного расширения упругого элемента и деталей передаточного механизма. При правильном выборе материала эта погрешность не значительна [3].

### 2.3. Особенности конструкции и расчета пружинных приборов давления.

#### 2.3.1. Приборы с трубчатыми пружинами.

Принцип действия приборов с трубчатой пружиной имеющей не круглое поперечное сечение основан на свойстве этой пружины изменять свою кривизну при изменении избыточного давления или разряжения внутри трубки. Причем, при жестком закреплении одного конца трубки изменение кривизны сопровождается перемещением свободного конца по траектории близкой к прямой. Это перемещение по средствам передаточного механизма можно преобразовать в поворот стрелки или в перемещение первичного преобразователя. Для расчета трубчатых пружин дающих достаточную точность в инженерной практике используют следующие формулы полученные В.И. Федосьевым.

Перемещение свободного конца тонкостенной трубчатой пружины  $\omega$  эллиптического или плоскоовального сечения будет равно (см. рис. 1.2)

$$\omega = p \cdot 10^{-2} \frac{1 - \mu^2}{E} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{r^3 \cdot 10^{-1}}{b \cdot h} \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2} \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + (1 - \cos \gamma)^2},$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона материала трубки (для латуни и стали  $\mu = 0,3$ );

$E$  - модуль упругости материала трубки (таблица 1.1);

$a$  и  $b$  - полуоси поперечного сечения трубки;

$r$  - радиус кривизны трубки;

$h$  - толщина стенки трубки ( $h/b = 0.6 - 0.7$ );

$\gamma$  - центральный угол трубки ( $\gamma = 270^\circ$ );

$\chi$  - параметр трубки ( $\chi = \frac{rh}{a^2}$ );

$\alpha$  и  $\beta$  - безразмерные коэффициенты, величина которых зависит от формы поперечного сечения трубки и от отношения  $a/b$  (табл. 1.2).

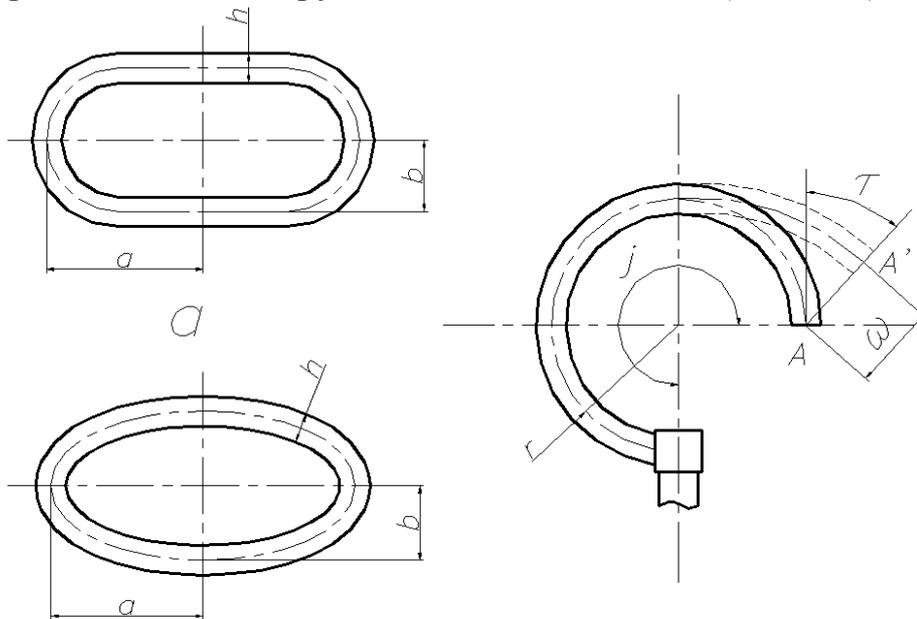


Рисунок 1.2 – Схема трубчатой пружины

а) - эллиптическое поперечное сечение пружины; б) – плоскоовальное поперечное сечение пружины;

Таблица 1.2 – Значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $S_2$ ,  $\xi$  и  $n$  для тонкостенных трубок эллиптического и плоскоовального сечения в зависимости от отношения полуосей  $a/b$

Сечение	Эллиптическое (овальное)			Плоско-овальное			
	$a/b$	3	4	5	1,5	3	5
$\alpha$		0,49	0,45	0,43	0,59	0,48	0,41
$\beta$		0,04	0,04	0,04	0,11	0,12	0,12
$S_2$		5	4	3			
		0,05	0,05	0,04	0,08	0,07	0,06
		6	1	8	5	4	5
$\xi$		0,5	0,04	0,44	0,71	0,59	0,52
			6				
$n$		0,12	0,11	0,11	0,15	0,13	0,11
							5

Угол  $\tau$ , определяющий направление перемещение конца трубки (рис. 1.2)

$$\tau = \operatorname{arctg} \frac{1 - \cos \gamma}{\gamma - \sin \gamma} \quad (1.6)$$

Составляющая тягового усилия, развиваемого на конце трубки при ее раскручивании под действием давления:

Тангенциальная составляющая

$$P_t = p \cdot 10^{-2} \cdot a \cdot b \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{48 \cdot S_2}{\xi + \chi^2} \cdot \frac{\gamma - \sin \gamma}{3\gamma - 4 \sin \gamma + \sin \gamma \cdot \cos \gamma} \quad (1.7)$$

Радиальная составляющая

$$P_r = p \cdot 10^{-2} \cdot a \cdot b \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{48 \cdot S_2}{\xi + \chi^2} \cdot \frac{\gamma - \sin \gamma}{\gamma - \sin \gamma \cdot \cos \gamma} \quad (1.8)$$

где  $S_2$  и  $\xi$  - коэффициенты, зависят от формы поперечного сечения трубки и от соотношения  $a/b$  (табл. 1.2).

Изменение объема полости трубки в результате деформации трубки

$$\Delta v = \frac{12abn\gamma w}{\alpha \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + (1 + \cos \gamma)^2}} \quad (1.9)$$

где  $n$  – коэффициент (табл. 1.2).

В технических измерениях наибольшее распространение получили манометры, представленные на рисунке 1.3

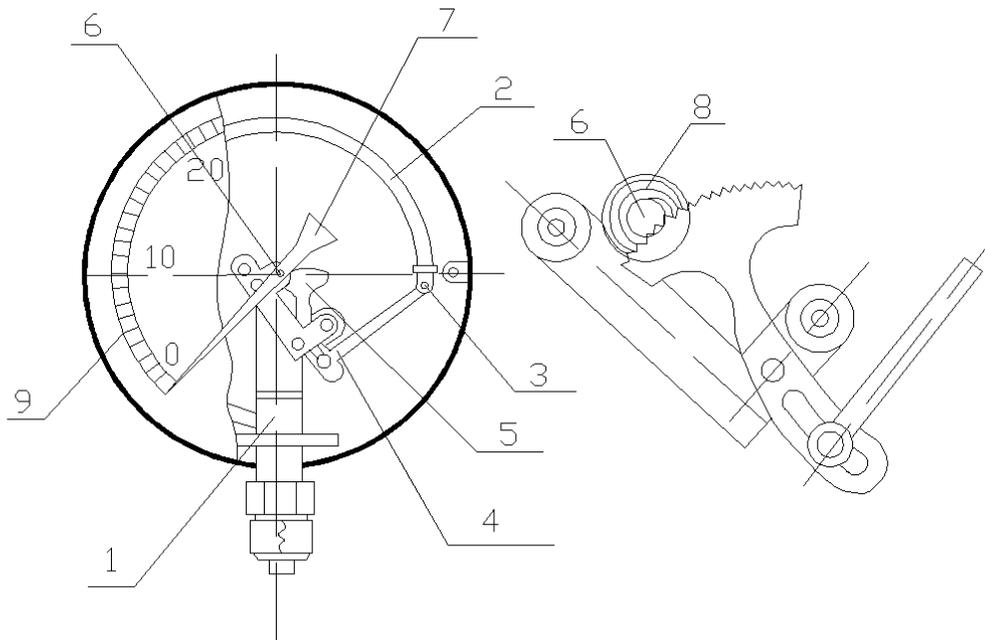


Рисунок 1.3 – Пружинный манометр с рычажно-зубчатой передачей

На литое основание 1, составляющем одно целое со штуцером, впаяна трубчатая пружина 2, полость которой сообщается с каналом штуцера. Наконечник 3 шарнирно соединен с тягой 4, передающий движение сектору 5. Поворот сектора 5 передается через зубчатую передачу на триб 6, на оси которого закреплена стрелка 7. Для выборки больших зазоров в зубьях служит волосок 8. Показания снимаются по круговой шкале 9. Передаточное отношение зубчатой передачи 8,...,12, угол поворота  $30^{\circ}$  ,... $40^{\circ}$  .

### 2.3.2. Мембранные приборы

Приборы с чувствительными элементами в виде гофрированных мембран или мембранных коробок применяются для измерения небольших избыточных давлений и разрежений, а так же перепадов давления.

Характеристику мембраны без жёсткого центра с гофрировкой периодического профиля можно рассчитать по формуле Л.Е.Андреевой

$$p = \frac{Eh^4}{R^4} \left[ a \left( \frac{w}{h} \right) + b \left( \frac{w}{h} \right)^3 \right], \text{ кг/мм}^2,$$

где  $p$  – разность абсолютных давлений с двух сторон мембраны, кг/мм<sup>2</sup>;

$E$  – модуль упругости материала мембраны (табл. 1.1);

$R$  – радиус мембраны, мм;

$w$  – прогиб мембраны в центре, мм; ( $w=2$  мм);

$a$  и  $b$  – коэффициенты зависящие от формы профиля гофрировки, относительной глубины гофрировки и от величины коэффициента Пуассона материала мембраны (определяется по графикам рис. 1.4 и 1.5).

На рисунке 1.4 приведен график коэффициентов  $a$  и  $b$  в зависимости от вида гофрировки и относительной глубины гофрировки  $H/h$ , на рис. 1.5 - зависимость коэффициента  $b$  от  $a$ .

Тяговое усилие мембраны определяется по формуле

$$P = p \cdot F_{\text{э}} \quad (1.11)$$

где  $F_{\text{э}}$  - эффективная площадь мембраны.

$$F_{\text{э}} = \frac{1}{3} \pi (R^2 + R \cdot r + r^2) \quad , \quad (1.12)$$

где  $r$  - радиус жёсткого центра ( $r \approx R/3$ ), мм.

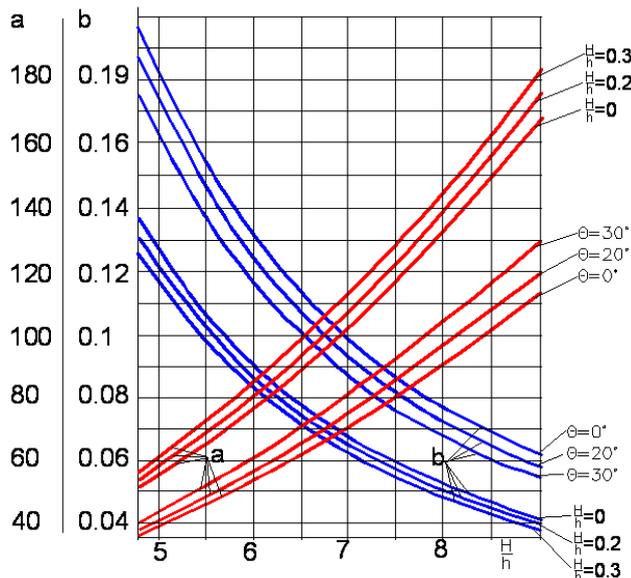


Рисунок 1.4 – График зависимости коэффициентов  $a$  и  $b$  от вида гофрировки, относительной глубины гофрировки  $H/h$

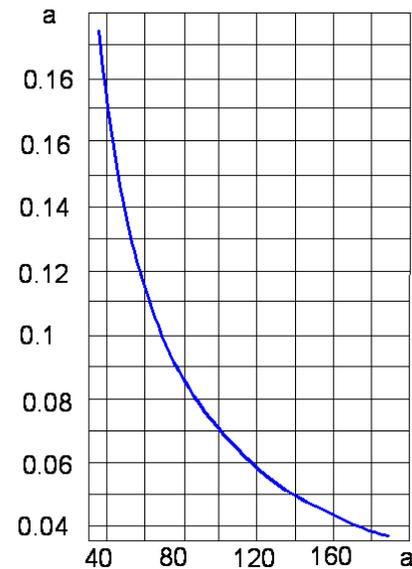


Рисунок 1.5 – График зависимости коэффициента  $b$  от  $a$

### 3. Описание лабораторной установки.

Для обеспечения измерения и контроля в лабораторной работе используется оборудование фирмы “FESTO”.

Общий вид лабораторного стенда представлен на рисунке 1.6. Он состоит из рамы 1 для крепления электрических блоков, универсальной плиты 2 для установки пневматических и электропневматических элементов и закрепленных на этой плите блока подготовки воздуха 3 и раздаточного элемента 4.

Блоки подготовки воздуха (рисунок 1.7) упрощают подачу очищенного и обогащенного маслом воздуха потребителю, в непосредственной близости к которому они устанавливаются. Блок подготовки воздуха состоит из редукционного клапана 1, манометра 2, вентиля 3 и фильтра 4

Раздаточный элемент (рисунок 1.8) предназначен для одновременной подачи сжатого воздуха от входа 1 к восьми выходам 2.

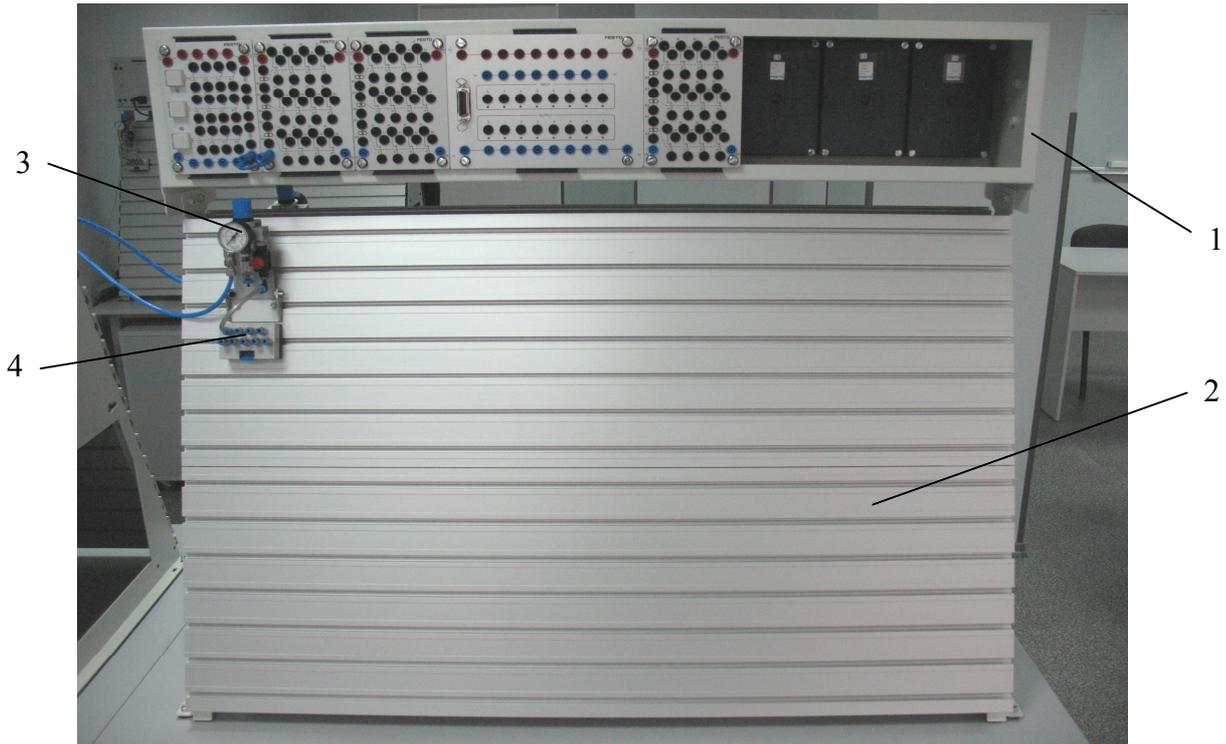


Рисунок 1.6 – Общий вид лабораторного стенда

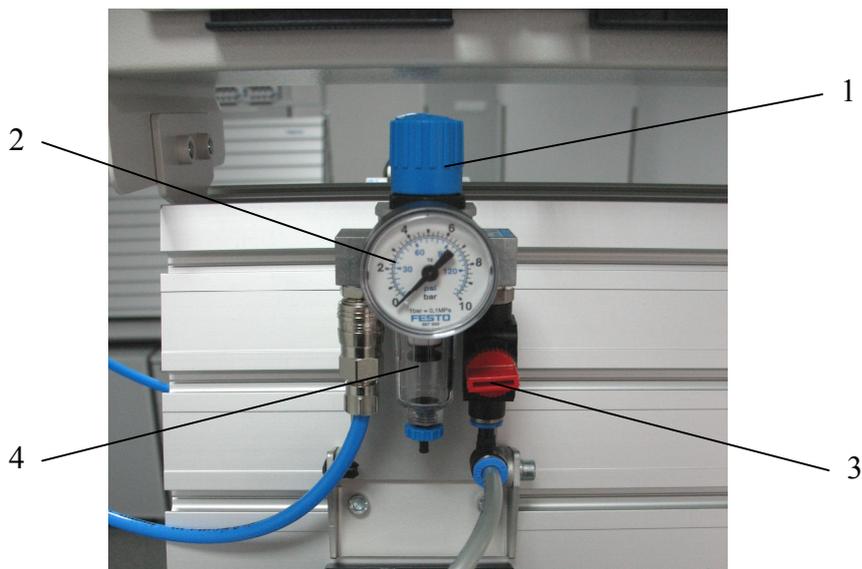


Рисунок 1.7 – Блок подготовки воздуха

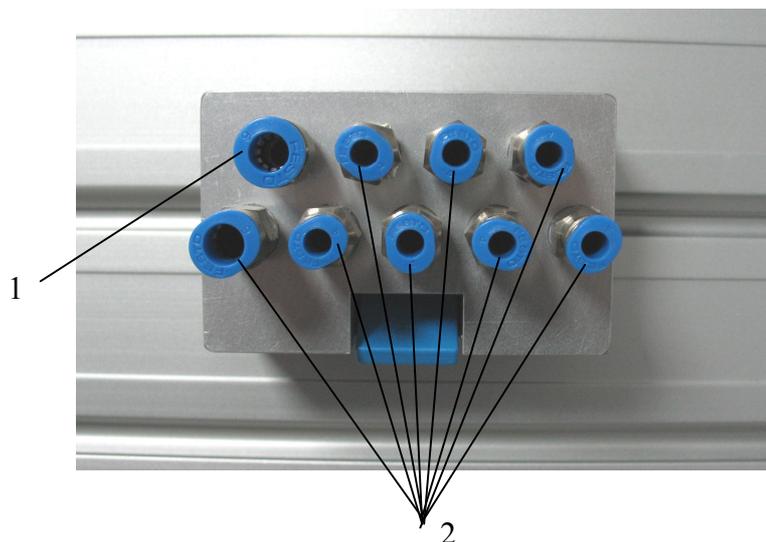


Рисунок 1.8 – Раздаточный элемент

Целью представленных схем является измерение давления пружинными манометрами (рисунок 1.9) для расчета усилия пневмоцилиндра во время выдвижения и втягивания штока.



Рисунок 1.9 – Пружинный манометр

#### 4. Порядок выполнения теоретических расчётов.

4.1. Рассчитать относительную величину температурной погрешности

$$\frac{\delta p}{p} \text{ пружинных приборов давления}$$

Исходные данные для расчета выбрать из таблицы 1.3 по последней и предпоследней цифрам зачётной книжки.

Таблица 1.3 – Исходные данные для расчета относительной величины температурной погрешности.

№		Последняя цифра зачётной книжки										Наименование и марка материала
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
		t°										
Предпоследняя цифра зачётной книжки	1	-50	-40	-30	-20	-10 №1	10	20	30	40	50	Латунь Л68
	2	-50	-40	-30	-20	-10 №2	10	20	30	40	50	Нейзильбер МНЦ 65-20
	3	-50	-40	-30	-20	-10 №3	10	20	30	40	50	Фосфористая бронза БрОФ 6,5-0,4
	4	-50	-40	-30	-20	-10 №4	10	20	30	40	50	Бериллиевая бронза БрБ2
	5	-50	-40	-30	-20	-10 №5	10	20	30	40	50	Углеродистая сталь
	6	-50	-40	-30	-20	-10 №6	10	20	30	40	50	Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т
	7	-50	-40	-30	-20	-10 №7	10	20	30	40	50	Элинвар ЭН28
	8	-70	-60	-55	-45	-35 №1	-25	-15	15	25	35	Латунь Л68
	9	-55	-45	-35	-25	-15 №2	15	25	35	45	55	Элинвар ЭН 98
	0	-35	-25	-15	5	15 №3	25	35	45	55	65	Углеродистая сталь

Рассчитать  $\frac{\delta p}{p}$  используя формулы 1.1; 1.2; 1.4 и справочные данные таблицы 1.1.

4.2. Рассчитать и спроектировать трубчатую пружину по исходным данным в таблице 1.4.

Таблица 1.4. – Исходные данные для расчета и проектирования трубчатой пружины.

№		Последняя цифра зачётной книжки										$\alpha$ , град	b, мм	$\frac{a}{b}$	$\frac{h}{b}$	r, мм	Мар-ка матер.	Поперечн. сечение
		P, кг/см <sup>2</sup>																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0							
Предпоследняя цифра зачётной книжки	1	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	18	25	180	5,5	1,5	0,6	45	Латунь	Плоско-овальное
	2	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	190	6	3	0,65	50	Сталь	Плоско-овальное
	3	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	195	6,2	5	0,7	55	Латунь	Овальное
	4	60	65	70	75	80	85	90	95	98	100	200	6,5	3	0,6	60	Сталь	Плоско-овальное
	5	100	105	110	115	120	125	130	135	140	150	210	6,8	4	0,62	65	Латунь	Овальное
	6	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	220	7	5	0,64	70	Сталь	Плоско-овальное
	7	2,5	4	6	10	12	16	18	20	22	25	230	7,2	1,5	0,7	75	Латунь	Овальное
	8	8	10	12	15	20	22	25	30	35	40	240	7,5	3	0,6	80	Сталь	Плоско-овальное
	9	300	310	320	330	340	350	360	370	380	400	250	8	5	0,67	85	Латунь	Овальное
	0	450	500	510	520	530	540	550	560	580	600	260	9,5	4	0,66	90	Сталь	Овальное

- 4.2.1. Рассчитать перемещение свободного конца пружины  $\omega$  по формуле (1.5) и угол, определяющий направление перемещения  $\tau$  по формуле (1.6)
- 4.2.2. Сделать эскиз трубчатой пружины исходя из данных таблицы 1.4 и значений  $\omega$  и  $\tau$  рассчитанных в п. 4.2.1
- 4.2.3. Рассчитать составляющую тягового усилия свободного конца трубки по формулам (1.7) и (1.8) и изменение объема  $\Delta V$  в результате деформации трубки по формуле (1.9)

Примечание: Перевод угловой меры  $\alpha^\circ$  в радианную  $\gamma$  переводить по формуле  $\gamma = 1.74 \cdot \alpha^\circ 10^2$ .

- 4.3. Рассчитать и спроектировать гибкую мембрану по исходным данным в таблице 1.5

Таблица 1.5 – Исходные данные для расчета и проектирования гибкой мембраны.

Предпоследняя цифра зачётной книжки	Последняя цифра зачётной книжки										$\frac{H}{h}$	$\frac{h}{l}$	Вид гофра	Марка мат-ла	
	R, мм/ № материала														
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9					0
	h, мм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4				
1	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	5	0,3	Синусоидальн.	Л68	
2	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	5,5	Q=30°	Пильчатый	НМЦ 65-20	
3	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	6	0,2	Синусоидальн.	Бр.ОФ 6,5-0,4	
4	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	6,5	Q=20°	Пильчатый	БрБ2	
5	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	7	0	Синусоидальн.	Углеродистая сталь	
6	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	7,5	Q=0°	Пильчатый	1Х18Н9Т	
7	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	8	0,3	Синусоидальн.	2Н25	
8	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8,5	Q=30°	Пильчатый	НМЦ 65-20	
9	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	8,2	0,2	Синусоидальн.	Бр.ОФ 6,5-0,4	
0	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	9	Q=20°	Пильчатый	БрБ2	

Примечание: Принимаем величину прогиба жесткого центра мембраны равной 2 мм. Радиус жесткого центра  $r \approx R/3$ , мм.

- 4.3.1. Рассчитать характеристики мембраны по формулам (1.10);(1.11);(1.12)
- 4.3.2. Сделать эскиз мембраны исходя из данных таблицы 1.5 и расчетных характеристик.

## 5. Порядок выполнения экспериментальных исследований

Согласно варианту задания из набора пневмоэлементов по схеме собрать лабораторный стенд на универсальной плите 2 (рисунок 1.6) и под-

ключить его через раздаточный элемент (рисунок 1.8) к блоку подготовки сжатого воздуха (рисунок 1.7). Блок подготовки сжатого воздуха и раздаточный элемент установлен на универсальной доске стационарно.

### 5.1. Вариант 1. Заданная схема представлена на рисунке 1.10.

5.1.1. Для проверки работоспособности собранной схемы необходимо на блоке подготовки воздуха открыть вентиль 3 (рисунок 1.7) и подать сжатый воздух на лабораторный стенд. Нажать на кнопку 1S1 и убедиться, что шток цилиндра 1А выдвигается, а при ее отпускании не возвращается в исходное положение.

5.1.2. Нажать на кнопку 1S2 и убедиться, что шток цилиндра 1А втягивается, а при ее отпускании остается в исходном положении.

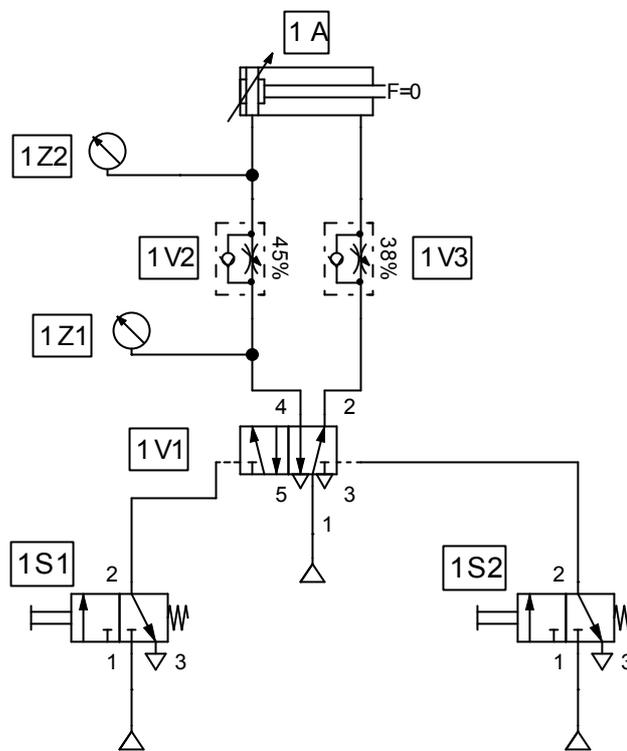


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема управления цилиндром двухстороннего действия с дроссельным регулированием скорости на выходе

5.1.3. Установить на редукционном клапане 1 (рисунок 1.7) давление 3.0 бара. Дроссель 1V2 открыть полностью, а дроссель 1V3 закрыть полностью. Затем дроссель 1V3 открыть на один оборот; нажать кнопку 1S1; измерить давления  $P_1$  (манометр 1Z 1) на входе дросселя и  $P_2$  (манометр 1Z 2) после дросселя во время движения штока цилиндра 1А. Данные записать в таблицу 1.6. Кнопку 1S1 отпустить.

5.1.4. Нажать кнопку 1S2, вернув тем самым шток цилиндра 1А в исходное состояние. Повторить измерения 3 раза.

5.1.5. Повернуть рукоятку дросселя 1V3 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот; нажать кнопку 1S1, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при выдвигании цилиндра 1A, данные записать в таблицу 1.6.

Таблица 1.6 – Протокол исследований

Пол. Дросс.	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)
	1		2		3		среднее знач.	
1 обор.								
2 обор.								
3 обор.								
4 обор.								
5 обор.								
6 обор.								

- 5.1.6. Дроссель 1V3 открыть полностью, а дроссель 1V2 закрыть полностью. Нажать кнопку 1S1. Затем дроссель 1V2 открыть на один оборот, нажать кнопку 1S2, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при втягивании штока цилиндра 1A, данные записать в таблицу аналогичную таблице 1.6. Измерения повторить 3 раза.
- 5.1.7. Нажать кнопку 1S1 вернуть шток цилиндра в состояние выдвинуто. Повернуть рукоятку дросселя 1V2 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот, нажать кнопку 1S2, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при втягивании штока цилиндра 1A.
- 5.1.8. Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.

## 5.2. Вариант 2. Заданная схема представлена на рисунке 1.11.

- 5.2.1. Для проверки работоспособности собранной схемы необходимо на блоке подготовки воздуха открыть вентиль 3 (рисунок 1.7) и подать сжатый воздух на лабораторный стенд. Нажать одновременно на кнопки 1S1 и 1S2 и убедиться, что шток цилиндра 1A выдвигается, а при отпуске возвращается в исходное положение.

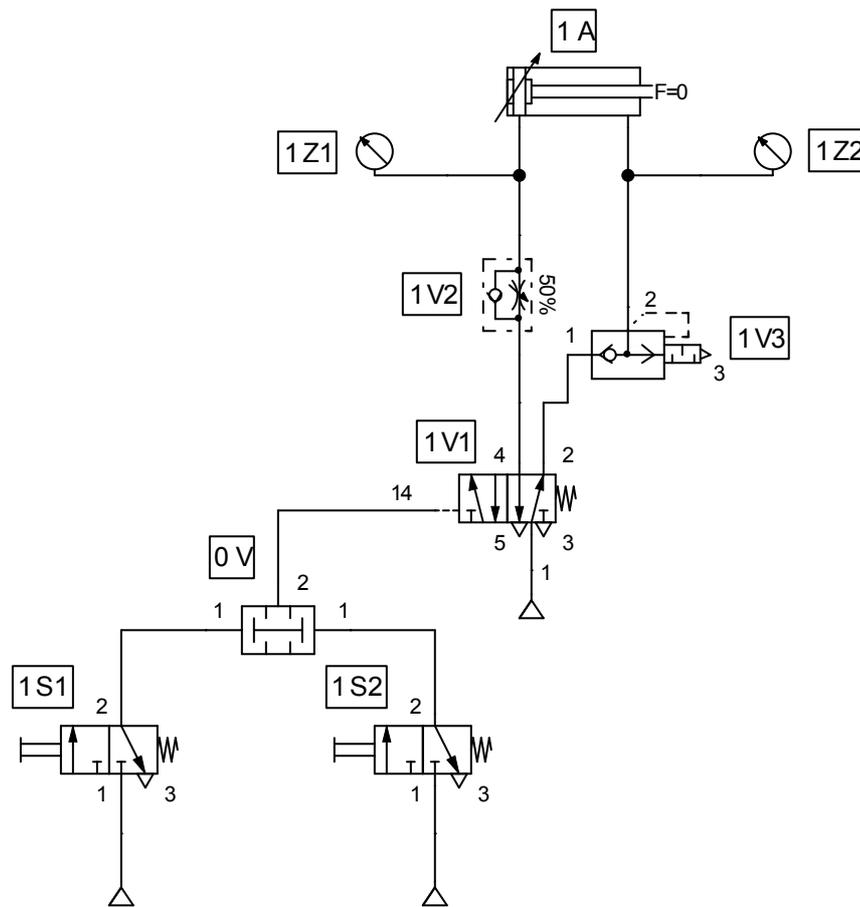


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема управления цилиндром с применением клапана быстрого сброса воздуха

- 5.2.2. Установить на редукционном клапане 1 (рисунок 1.7) давление 4.0 бара. Дроссель 1V2 закрыть полностью; затем открыть этот дроссель 1V2 на один оборот. Нажать кнопки 1S1 и 1S2, измерить давления  $P_1$  (манометр 1Z1) на входе цилиндра 1A и  $P_2$  (манометр 1Z2) на выходе цилиндра 1A во время его выдвижения. Данные записать в таблицу 1.7. Кнопки 1S1 и 1S2 отпустить и замерить давления  $P_1$  и  $P_2$  во время втягивания цилиндра 1A. Измерения снять 3 раза.
- 5.2.3. Повернуть рукоятку дросселя 1V2 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот, нажать кнопки 1S1 и 1S2, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при выдвижении и втягивании штока цилиндра 1A, данные записать в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Протокол исследований

Пол. Дросс.	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)
	1		2		3		среднее знач.	
1 обор. выдвиж.								
1 обор. втяг.								
2 обор. выдвиж.								
2 обор. втяг.								
3 обор. выдвиж.								
3 обор. втяг.								
4 обор. выдвиж.								
4 обор. втяг.								
5 обор. выдвиж.								
5 обор. втяг.								
6 обор. выдвиж.								
6 обор. втяг.								

5.2.4. Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.

### 5.3. Вариант 3. Заданная схема представлена на рисунке 1.12.

5.3.1. Перекоммутировать пневмораспределитель 1V (нажать кнопку 1S1) на подачу воздуха в нагрузочное сопло 1R. Включив подачу воздуха в сопло 1R, установить при помощи редукционного клапана 1 на блоке подготовки воздуха (рисунок 1.7) первоначальное давление  $P_1$  в напорной магистрали равное 0,5 бар, которое покажет манометр 1Z1.

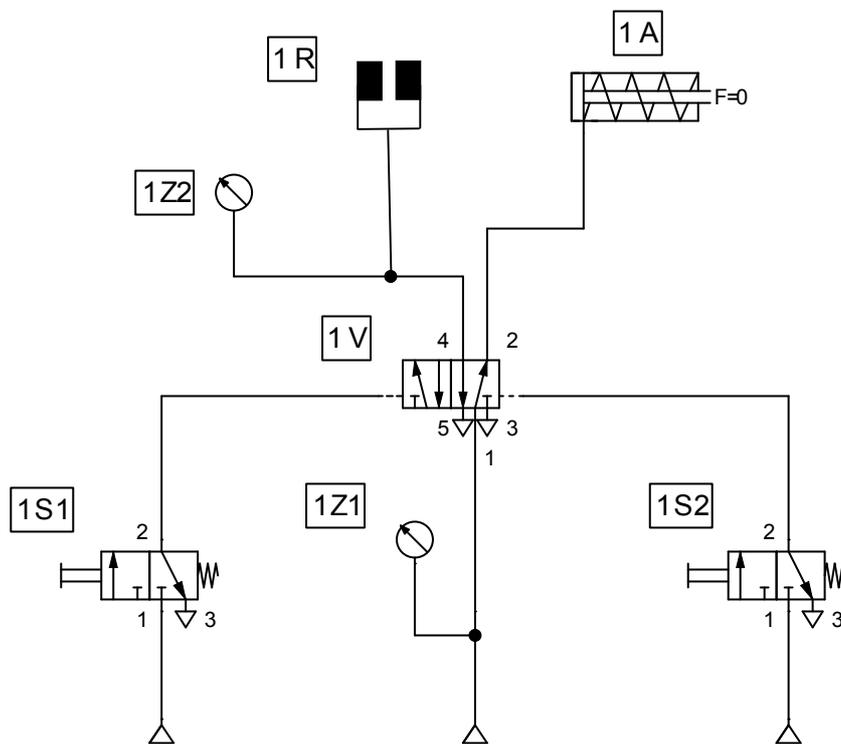


Рисунок 1.12 – Схема определения потерь на распределителе с использованием нагрузочного сопла

- 5.3.2. Зарегистрировать статическое давление  $P_2$  в напорной магистрали, показываемое манометром 1Z2. Данные измерений занести в таблицу 1.8
- 5.3.3. Изменяя давление  $P_1$  в магистрали при помощи редукционного клапана на блоке подготовки воздуха через каждые 0,5 бар, показываемого манометром 1Z1, регистрировать давление  $P_2$ , показываемое манометром 1Z2, до давления равного 6 бар по манометру 1Z1. Данные занести в таблицу 1.8.
- 5.3.4. Определить разницу давлений  $P_1$  и  $P_2$ . Результаты занести в таблицу 1.8.

Таблица 1.8 – Протокол исследований

$P_1$ , бар	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$P_2$ , бар												
$\Delta P$ , бар												

#### 5.4. Вариант 4. Заданная схема представлена на рисунке 1.13.

5.4.1. Для проверки работоспособности собранной схемы необходимо на блоке подготовки воздуха открыть вентиль 3 (рисунок 1.7) и подать сжатый воздух на лабораторный стенд. Нажать на кнопку 1S1 или 1S2 и убедиться, что шток цилиндра 1А выдвигается, а при ее отпускании возвращается в исходное положение.

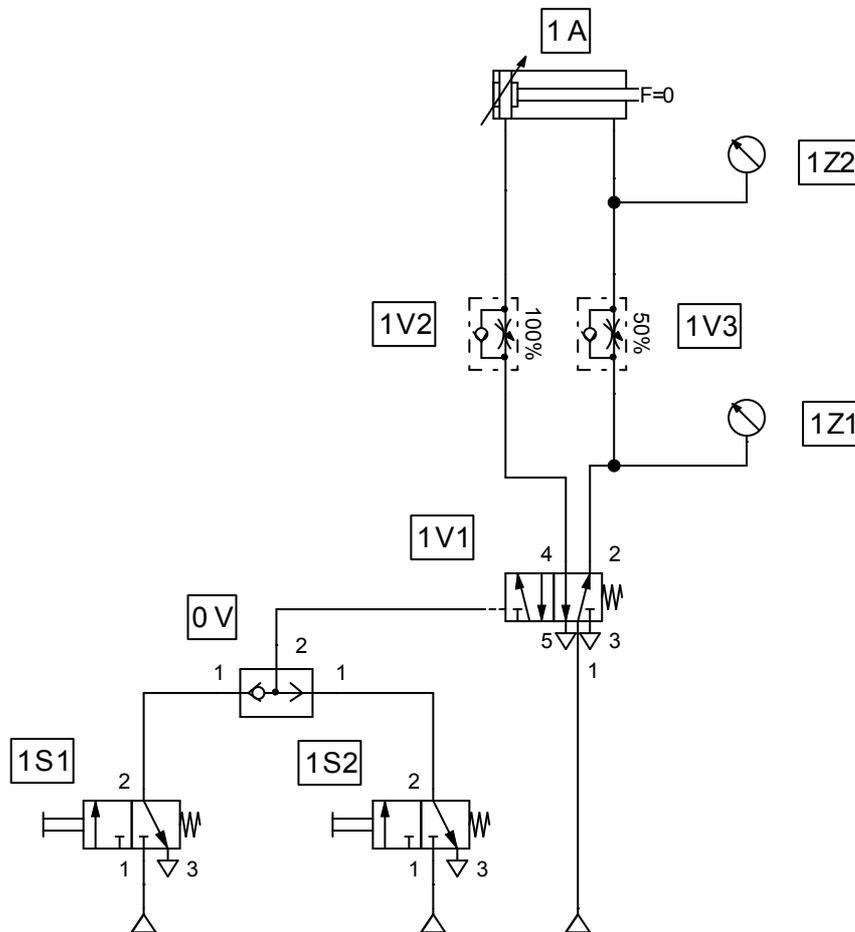


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема управления цилиндром с применением логического элемента «ИЛИ»

5.4.2. Установить на редукционном клапане 1 (рисунок 1.7) давление 4.0 бара. Дроссель 1V3 открыть полностью, а дроссель 1V2 закрыть полностью. Далее дроссель 1V2 открыть на один оборот; нажать кнопку 1S1 или 1S2, затем отпустить и измерить давления  $P_1$  (манометр 1Z 1) на входе дросселя и  $P_2$  (манометр 1Z 2) после дросселя во время втягивания штока цилиндра 1А. Данные записать в таблицу 1.9. Измерения повторить 3 раза.

5.4.3. Повернуть рукоятку дросселя 1V2 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот; нажать кнопку 1S1 или 1S2, затем отпустить, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при втягивании цилиндра 1А. Данные записать в таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Протокол исследований

Пол. Дросс.	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)
	1		2		3		среднее знач.	
1 обор.								
2 обор.								
3 обор.								
4 обор.								
5 обор.								
6 обор.								

- 5.4.4. Дроссель 1V2 открыть полностью, а дроссель 1V3 закрыть полностью. Далее дроссель 1V3 открыть на один оборот; нажать кнопку 1S1 или 1S2, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  во время выдвижения штока цилиндра 1А. Данные записать в таблицу аналогичную таблице 1.9. Измерения повторить 3 раза.
- 5.4.5. Повернуть рукоятку дросселя 1V3 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот; нажать кнопку 1S1 или 1S2, измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при выдвижении штока цилиндра 1А.
- 5.4.6. Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.

## 6. Содержание отчёта.

Отчёт по данной лабораторной работе должен включать:

1. Цель работы;
2. Расчёт сильфонного манометра;
3. Расчёт трубчатого манометра;
4. Эскиз манометра;
5. Расчёт мембраны;
6. Эскиз мембраны;
7. Схема лабораторной установки;
8. Таблица результатов эксперимента;
9. Выводы.

## **7. Контрольные вопросы:**

1. Принцип действия пружинных приборов;
2. Классификация пружинных приборов;
3. Погрешности пружинных приборов;
4. Принцип действия приборов с трубчатой пружиной;
5. Тяговое усилие приборов с трубчатой пружиной и его составляющие;
6. Зависимость между изменением объёма и перемещением свободного конца пружины;
7. Особенности конструкции пружинного манометра с рычажно-зубчатой передачей;
8. Особенности конструкции мембран;
9. Характеристики мембран.

## Лабораторная работа №2

### Исследование работы и измерение избыточного давления пьезоэлектрического преобразователя

#### 1. Цель работы:

Целью настоящей работы является:

- изучение принципа действия пьезоэлектрического преобразователя;
- изучение конструкции пьезоэлектрических преобразователей;
- приобретение навыков сборки пневматических схем со встроенным пьезоэлектрическим преобразователем;
- приобретение навыков измерения избыточного давления.

#### 2. Теоретический раздел

##### 2.1. Принцип работы пьезоэлектрического манометра

В основу работы пьезоэлектрического манометра положен пьезоэлектрический эффект, который заключается в появлении электрических зарядов на поверхности кристаллического диэлектрика при сжатии или растяжении кристалла. Причем, при изменении нагрузки величина заряда изменяется, при снятии нагрузки заряд исчезает.

Одним из широко применяемых диэлектриков, обладающих пьезоэлектрическим эффектом является кварц. Кварц имеет высокую механическую прочность, изоляционные качества и независимость пьезоэлектрических свойств от температуры в диапазоне до 475 °С.

Наряду с кварцем в пьезоэлектрических приборах применяют титан баярит после предварительной поляризации высоким напряжением, сегнетову соль, которая обладает высокой пьезоэлектрической чувствительностью, но также и низкой механической прочностью, гигроскопичностью и невысоким удельным электрическим сопротивлением.

Кристалл кварца (рис 2.1) имеет три главные оси симметрии: Z; X; Y.

Продольная ось Z-Z называется оптической осью, поперечная ось X-X, проходящая через ребра шестигранной призмы кристалла, называется электрической, а ось Y-Y, перпендикулярная к боковым граням кристалла является нейтральной или механической осью [2].

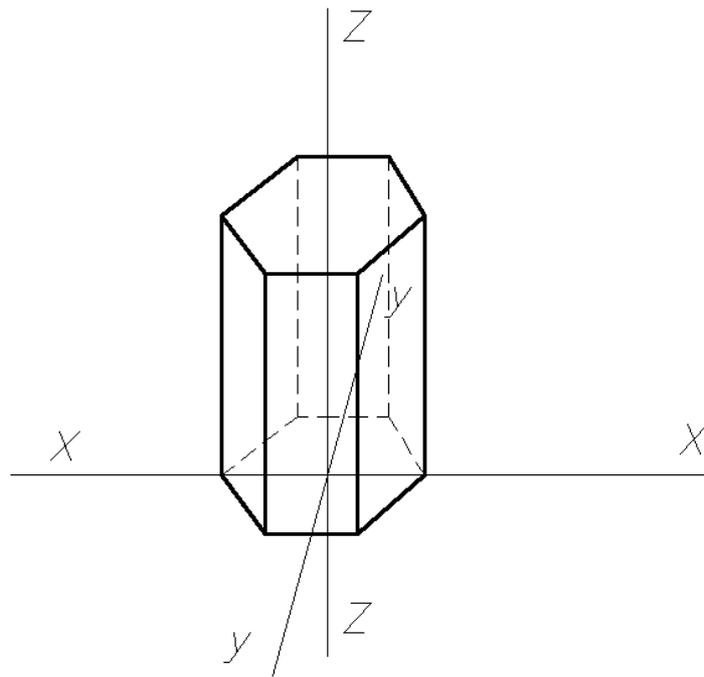


Рисунок 2.1 – Главные оси кристалла кварца

Если вырезать из кристалла прямоугольную пластину (рис.2.2), таким образом, что ее грани будут перпендикулярны главным осям кристалла, то при действии растягивающих или сжимающих сил по осям X-X и Y-Y на гранях перпендикулярных оси X-X возникает электрический заряд.

При действии сил вдоль Z-Z заряды не возникают, т.е. пьезоэлектрического эффекта не наблюдается.

Величина заряда границ перпендикулярных электрической оси, может быть определена по следующим формулам в зависимости от направления действия сил

$$G_g = k F_x \quad (2.1)$$

$$G_g = -k F_y b/a \quad (2.2)$$

где,  $G_g$  - заряд на гранях, перпендикулярных электрической оси X-X, причем на одной грани возникает заряд «+», а другой «-».

$F_x$  - сжимающие усилие вдоль оси X-X;

$F_y$  - сжимающие усилие вдоль оси Y-Y;

$k$  - пьезоэлектрическая постоянная.

Для кварца  $k = 2,1 \cdot 10^{-11}$  к/кГ;

Для титанита бария  $k = 1,2 \cdot 10^{-9}$  к/кГ;

Для сегнетовой соли  $k = 3 \cdot 10^{-9}$  к/кГ;

$a$  – размер пластины вдоль оси X-X;

$b$  – размер пластины вдоль оси Y-Y.

Знак «-» в формуле (2.2) показывает, что знак заряда будет противоположен знаку заряда при сжатии по формуле (2.1).

При растяжении величина заряда определяется по формулам (2.1) и (2.2), но с противоположными знаками.

Чаще всего в манометрах пластина подвергается сжатию вдоль оси X-X.

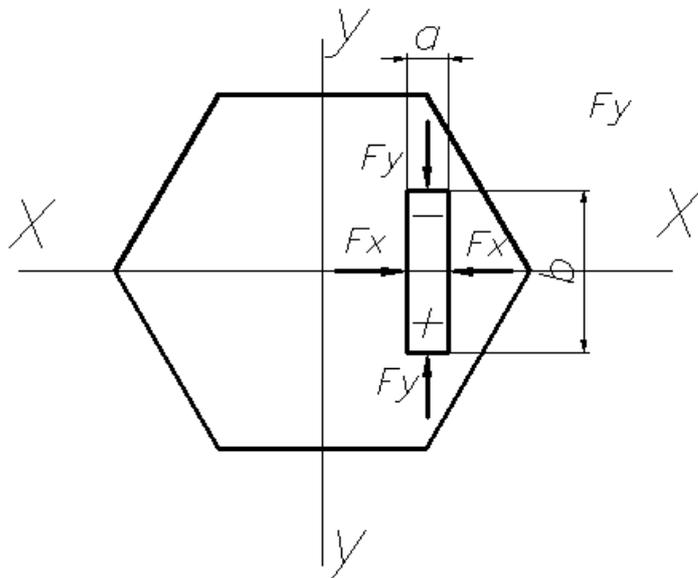


Рисунок 2.2 – Пьезоэлектрический эффект

## 2.2. Принципиальная схема пьезоэлектрического манометра.

Металлическая мембрана 1 (см. рис. 2.3) под действием давления  $p$  создает сжимающее усилие  $F$  на кварцевые пластины 2. Между пластинами 2 установлен плоский электрод 3. Пластины 2 расположены в корпусе 4 таким образом, что грань кварцевой пластины с «+» зарядом прилегает к мембране 1 и корпусу 4. Поэтому положительный заряд уходит в землю, а отрицательный аккумулируется на электроре 2 и поступает в измерительный прибор 5.

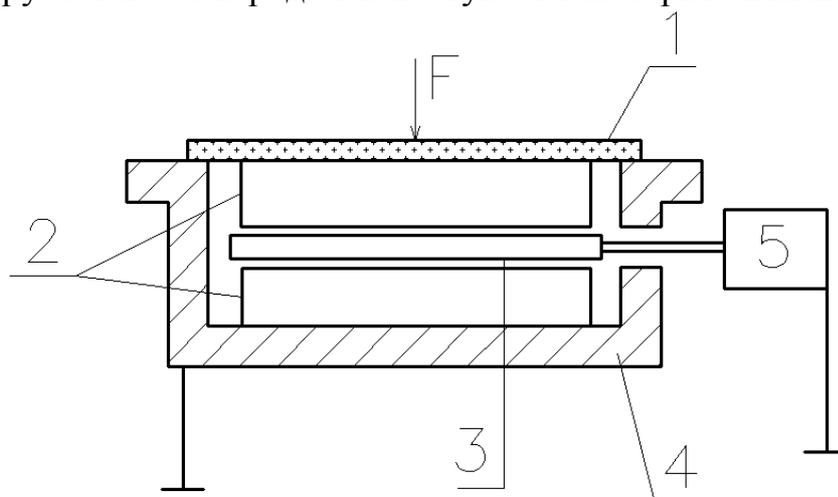


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема пьезоэлектрического манометра

Величина сжимающего усилия  $F$  определяется по формуле

$$F = p F_{\text{Э}}, \quad (2.3)$$

где,  $F_3$  – эффективная площадь мембраны.

Разность потенциалов  $U$  между электродом и землей определяется по формуле

$$U = g_3 / c,$$

где,  $g_3$  – заряд на электроде;

$c$  – суммарная емкость электрода, соединительного провода и зарядонесущей части измерительного прибора относительно земли.

Таким образом, измеряемое давление преобразовывается в разность потенциалов [2].

### 2.3. Принципиальная схема пьезоэлектрического манометра системы “FESTO”.

Пьезорезистивный чувствительный элемент состоит из силиконового основания с интегрированным диффузионным резистором. Задняя часть чувствительного элемента представляет собой тонкую мембрану. Резисторы расположены на поверхности мембраны и соединены в форме измерительного моста. Когда будет происходить механическая деформация мембраны (вызываемая избыточным давлением), радиальное расстояние между резисторами увеличится, при этом нарушится равновесие в мостовой измерительной схеме. При каждом измерении будет измеряться разность давлений между двумя поверхностями мембраны чувствительного элемента [1].

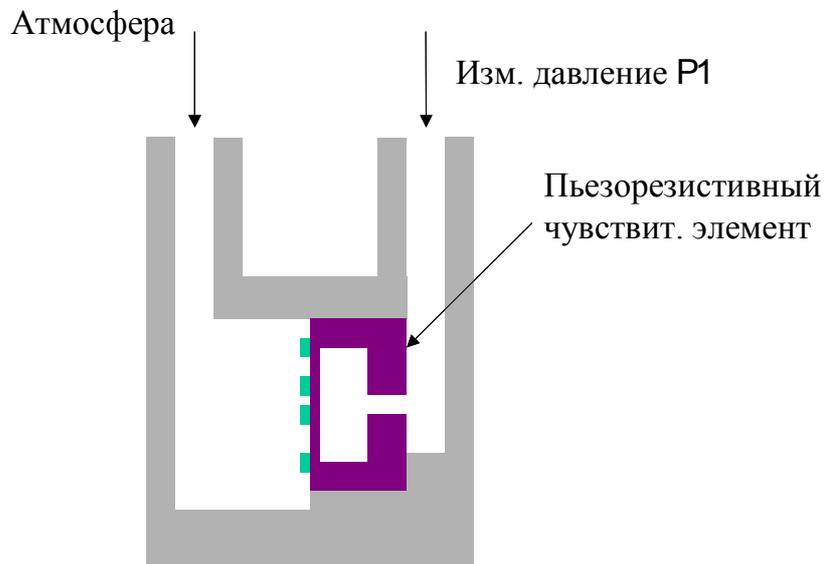


Рисунок 2.4 – Пьезоэлектрический чувствительный элемент

### 3. Описание установки

Все электрические блоки подключаются к источнику питания (постоянный ток 4,5А, 24В). На рисунке 2.5 показано подключение пьезоэлектрического датчика давления 2 к блоку питания 1.

Блок кнопок состоит из трех кнопок 1, верхняя из которых с фиксацией, двух шин питания 2 (с обозначениями +24V и 0V), трех лампочек 3 и групп контактов 4 (рисунок 2.6). Каждая кнопка при нажатии замыкает два нормально разомкнутых контакта (с обозначениями 13-14 и 23-24) и размыкает два нормально замкнутых контакта (с обозначениями 31-32 и 41-42).

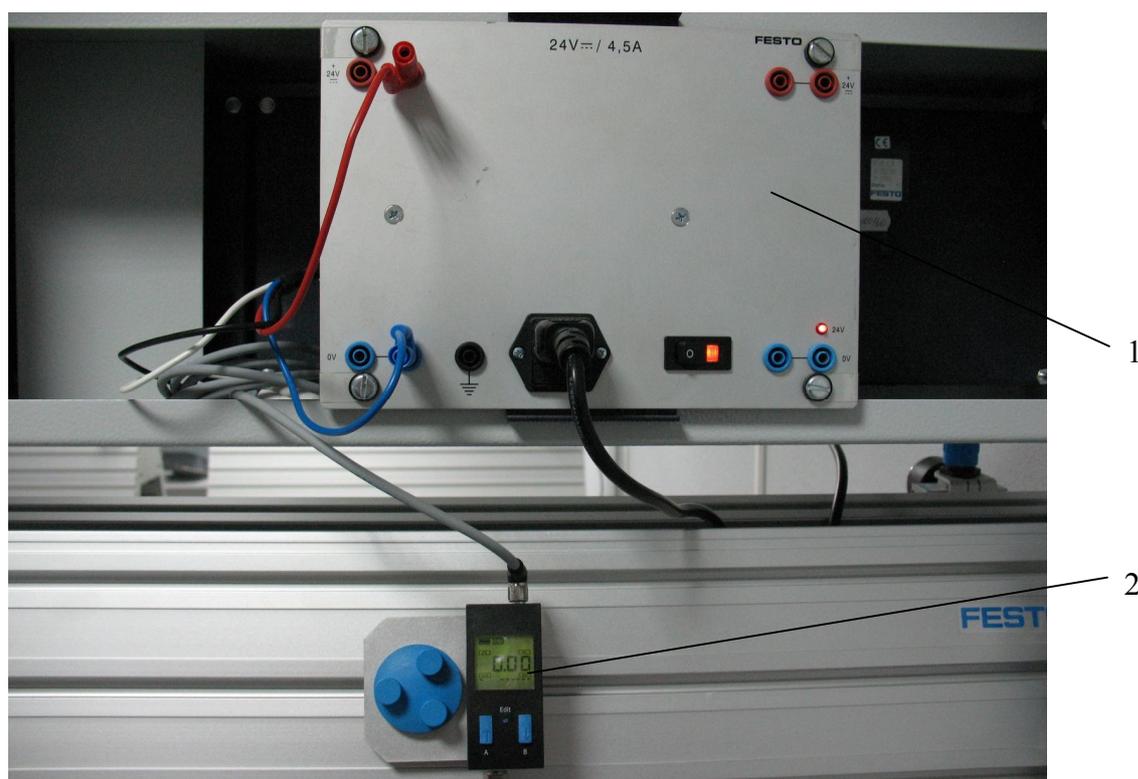


Рисунок 2.5 – Подключение пьезоэлектрического датчика давления

Блок реле состоит из трех реле 1 (с обозначениями A1-A2), гнезд питания 2 (с обозначениями +24V и 0V) и групп контактов 3 (рисунок 2.7). При включении любого из реле в электрическую цепь и подаче питания 24В происходит замыкание четырех нормально разомкнутых контактов (с обозначениями 11-14, 21-24, 31-34 и 41-44) и размыкание четырех нормально замкнутых контактов (с обозначениями 11-12, 21-22, 31-32 и 41-42) соответствующих этому реле.

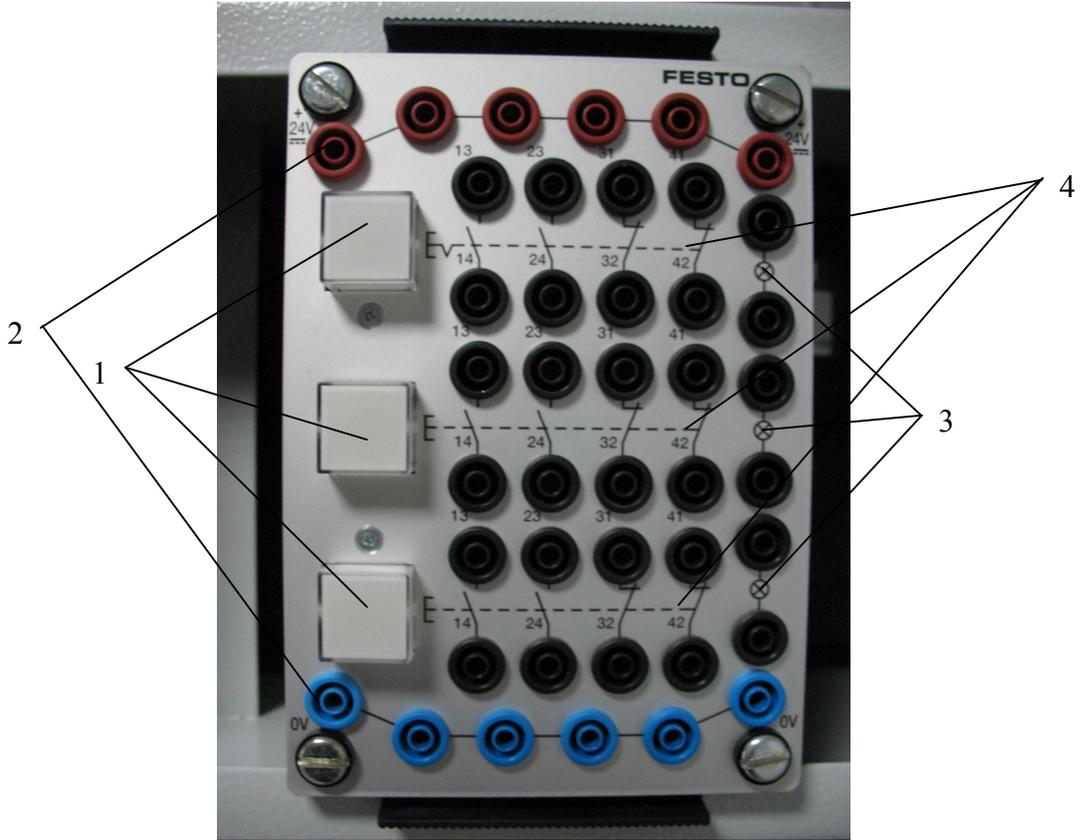


Рисунок 2.6 – Блок кнопок

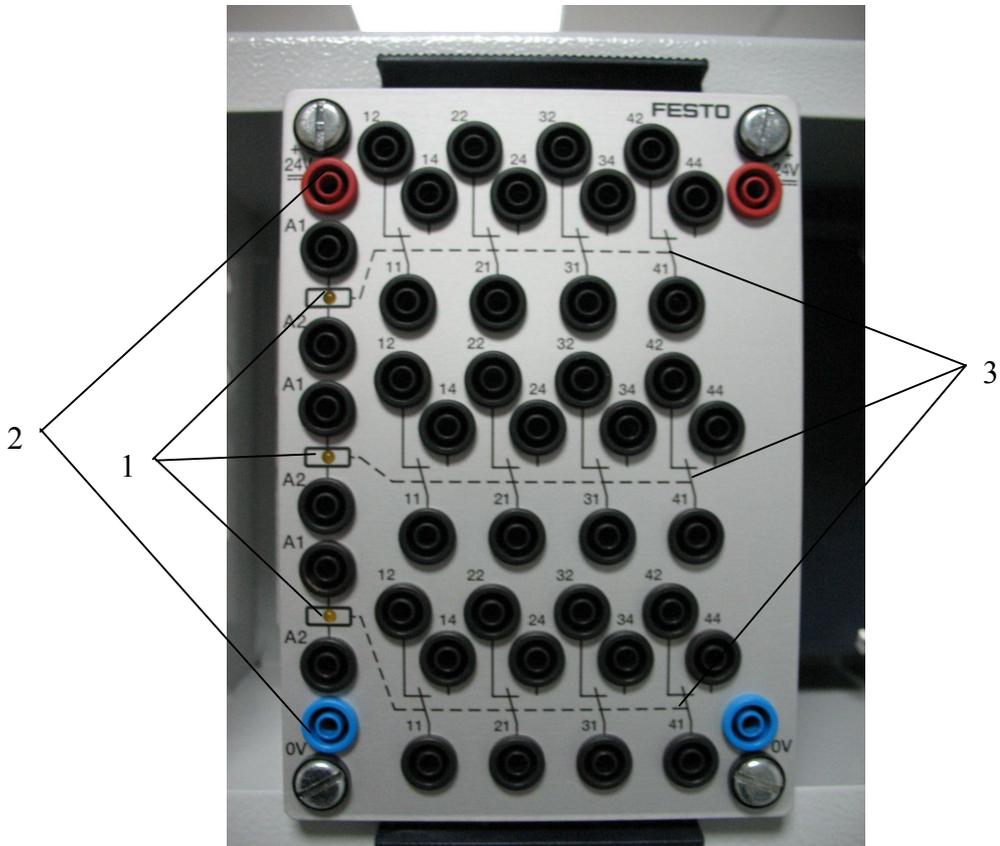


Рисунок 2.7 – Блок реле

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Согласно варианту задания из набора пневмоэлементов по схеме (рисунок 2.8 а, б, в или г) собрать лабораторный стенд на универсальной плите 2 (рисунок 1.6) и подключить его через раздаточный элемент (рисунок 1.8) к блоку подготовки сжатого воздуха (рисунок 1.7). Блок подготовки сжатого воздуха и раздаточный элемент установлен на универсальной доске стационарно. Затем собрать электрическую цепь.

4.2. Для проверки работоспособности собранной схемы необходимо на блоке подготовки воздуха открыть вентиль 3 (рисунок 1.7) и подать сжатый воздух на лабораторный стенд. Переключить распределитель 1S1. Нажать на кнопку S1 (и на кнопку S2, если необходимо) и убедиться, что шток цилиндра 1А выдвигается.

4.3. Установить на редукционном клапане 1 (рисунок 1.7) давление 3.0 бара. Дроссель 1V2 открыть полностью, а дроссель 1V3 закрыть полностью. Затем дроссель 1V3 открыть на один оборот; нажать кнопку S1, измерить давления  $P_1$  (датчик 1Z1) на входе дросселя и  $P_2$  (датчик 1Z2) после дросселя во время выдвижения цилиндра 1А. Данные записать в таблицу 2.1. Измерить повторить 3 раза.

4.4. Вернуть шток цилиндра 1А в исходное состояние. Повернуть рукоятку дросселя 1V3 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот; нажать кнопку S1, измерить давления при выдвижении цилиндра 1А. Данные записать в таблицу 2.1.

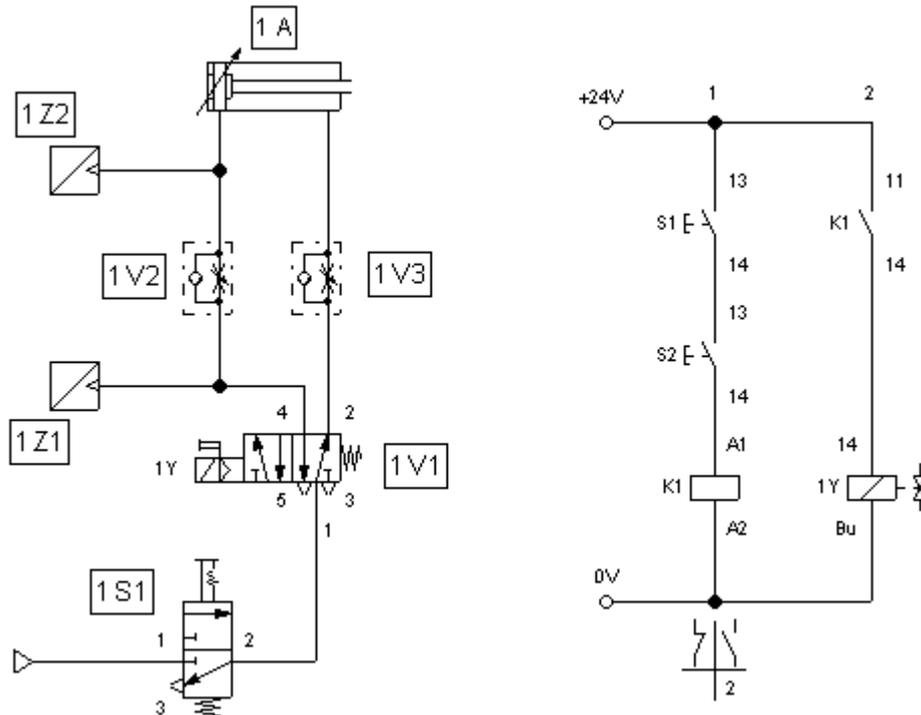
Таблица 2.1 – Протокол исследований

Пол. Дросс.	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)	$P_1$ (бар)	$P_2$ (бар)
	1		2		3		среднее знач.	
1 обор.								
2 обор.								
3 обор.								
4 обор.								
5 обор.								
6 обор.								

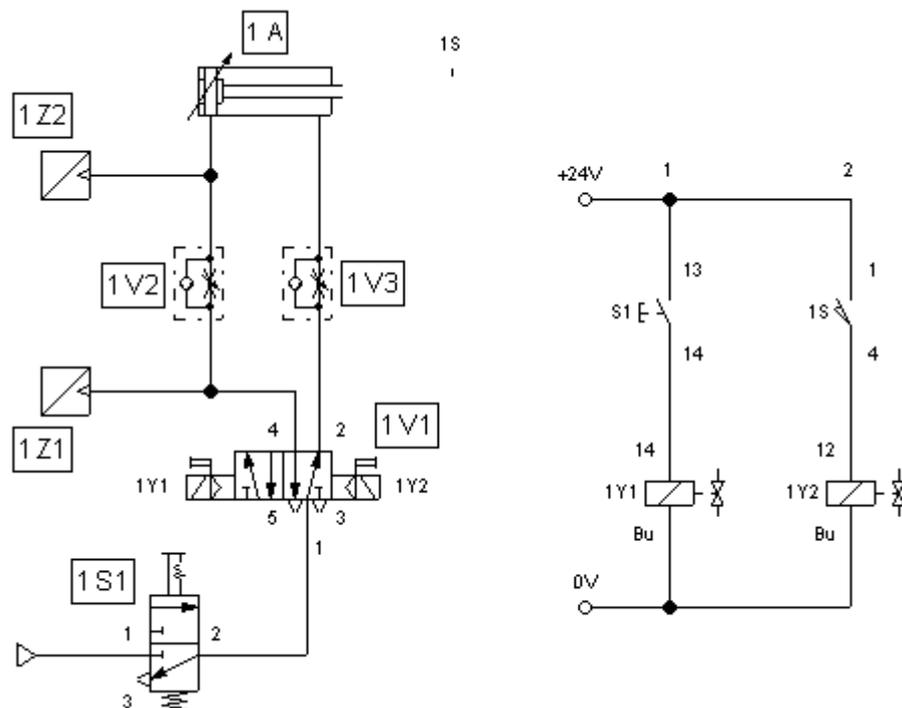
4.5. Дроссель 1V3 открыть полностью, а дроссель 1V2 закрыть полностью. Затем дроссель 1V2 открыть на один оборот. Измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при втягивании штока цилиндра 1А. Данные записать в таблицу аналогичную таблице 2.1. Измерения повторить 3 раза.

4.6. Нажать кнопку S1 вернуть шток цилиндра 1А в состояние выдвинуто. Повернуть рукоятку дросселя 1V2 еще на один (2, 3, 4, 5, 6) оборот; измерить давления  $P_1$  и  $P_2$  при втягивании штока цилиндра 1А. Данные записать в таблицу аналогичную таблице 2.1.

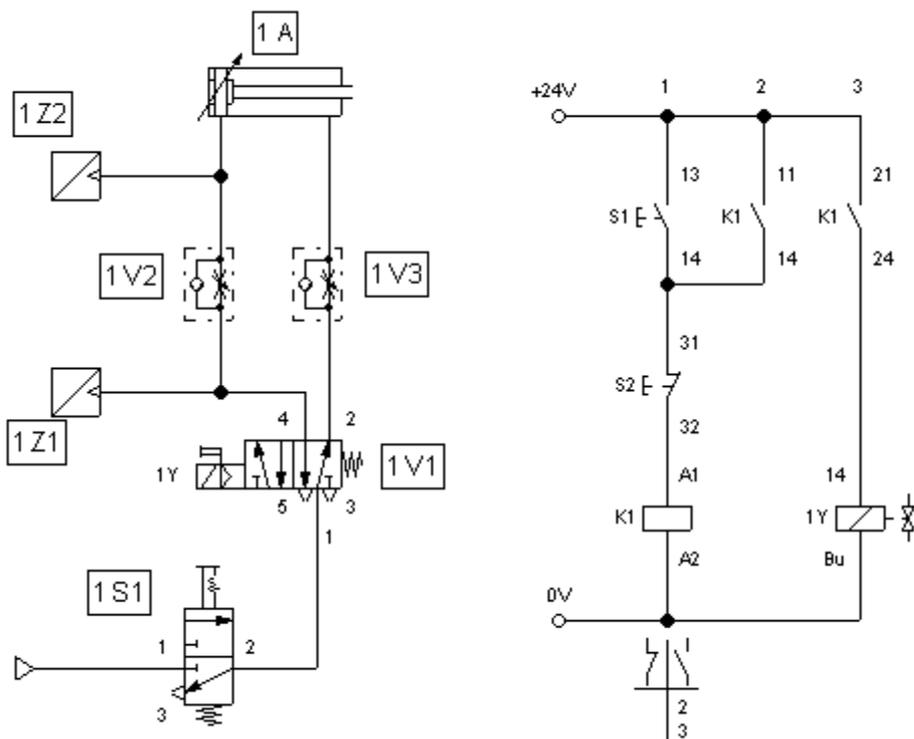
4.7. Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.



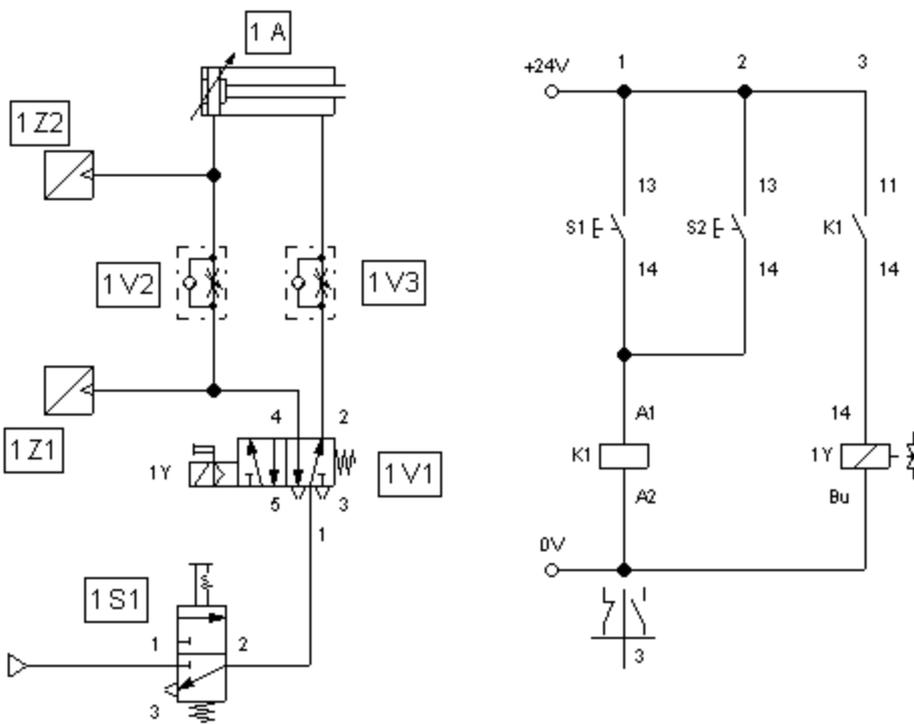
a)



б)



B)



Г)

Рисунок 2.8 – Электропневматические схемы

## **5. Содержание отчета**

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Схема лабораторной установки
4. Таблица экспериментальных данных
5. Выводы

## **6. Контрольные вопросы**

1. Что называют давлением
2. Какие существуют единицы давления
3. Как измеряется абсолютное давление
4. Как измеряется избыточное давление
5. Как измеряется давление разрежения
6. Назовите элементы пневматической схемы
7. Принцип действия датчика давления

## Лабораторная работа №3

### Расчет параметров и измерение жидкостными приборами давления

#### 1. Цель работы

Целью лабораторной работы является:

- изучение принципа действия различных типов жидкостных приборов;
- приобретение навыков расчета различных типов жидкостных приборов давления;
- приобретение навыков конструирования основных емкостей жидкостных приборов;
- приобретение навыков измерения жидкостным прибором давления.

#### 2. Теоретический раздел

Жидкостные приборы основаны на использовании гидростатического давления, просты по конструктивным решениям и при измерениях. Они широко применяются в качестве образцовых приборов для градуировки и поверки пружинных и других приборов

Для заполнения используют различные затворные жидкости в зависимости от пределов измерений и от измеряемой среды. Наибольшее применение в качестве затворной жидкости имеют – ртуть, техническое масло, для малых измерений – вода и этиловый спирт.

##### 2.1. Основные погрешности измерений жидкостными приборами.

2.1.1. Погрешность отсчета связанная с положением мениска жидкости. При интервале деления шкалы 1мм, величина этой погрешности не менее 0.25,...,0.5 мм. Применение зеркальных шкал уменьшает ошибку от параллакса.

2.1.2. Погрешность отсчета связанная с явлением капиллярности. Эта погрешность минимизируется выбором оптимального внутреннего диаметра стеклянных трубок. В интервале от 5мм до 8 мм.

2.1.3. Температурная погрешность, связанная с изменением температуры. Эта погрешность возникает за счет теплового расширения затворной жидкости и смещения длинны шкалы.

Температурная погрешность  $\Delta h_t$  выражается формулой

$$\Delta h_t = h_t - h = h_t \left( 1 - \frac{1 + \alpha(t^\circ - 20^\circ)}{1 + \beta(t^\circ - t_o^\circ)} \right), \quad (3.1)$$

где  $h_t$  - высота столба жидкости при температуре  $t^\circ$ ;

$h$  - высота столба жидкости при температуре  $t_o^\circ$ . Величина  $t_o^\circ$  зависит от состава затворной жидкости:

- для ртути -  $t_o^\circ = 0^\circ C$ ;
- для воды -  $t_o^\circ = +4^\circ C$ ;
- для этилового спирта -  $t_o^\circ = +2^\circ C$ ;

- $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала шкалы. Значения приведены в таблице 3.1
- $\beta$  - коэффициент объемного расширения затворной жидкости. Значения приведены в таблице 3.1 .

Таблица 3.1 – Значение коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в зависимости от материала шкалы и состава затворной жидкости.

Затворная жидкость	$\beta, \frac{1}{град}$	Материал шкалы	$\alpha, \frac{1}{град}$
Ртуть	$1,8 \cdot 10^{-4}$	Латунь	$19 \cdot 10^{-4}$
Вода	$2 \cdot 10^{-4}$	Никель	$16,3 \cdot 10^{-4}$
Этиловый спирт	$11 \cdot 10^{-4}$	Стекло	$8 \cdot 10^{-4}$
Масло техническое	$1,09 \cdot 10^{-4}$	Сталь	$11 \cdot 10^{-4}$
-	-	Фарфор	$4 \cdot 10^{-4}$

2.1.4. Погрешность от измерения ускорения свободного падения  $\Delta h_g$ . Эта погрешность определяется по формуле

$$\Delta h_g = h_g - h = h_g \left( 1 - \frac{g_1}{g} \right), \quad (3.2)$$

где  $h_g$  - высота столба затворной жидкости при ускорении свободного падения  $g_1$ ;

$h$  - высота столба, соответствующая измеряемому давлению при  $g=9.80665 \text{ м/с}^2$ .

## 2.2. Особенности конструкции жидкостных приборов давления

2.2.1. Стекланный трубный U-образный манометр является простейшим жидкостным прибором для измерения избыточного давления. Он состоит из стеклянной трубки, изогнутой в виде буквы “U” прикрепленной к доске, на которой расположена шкала с отметкой «0» посередине. Интервал деления 1мм. Трубка заполняется затворной жидкостью до нулевой отметки. Для измерения давления одно из полей с помощью резинового шланга соединяется с измеряемым объемом, а другое сообщается с атмосферой. Под действием избыточного давления, уровень жидкости в этом колене понижается, а в другом повышается. В случае если измерение производится в мм. рт. ст. то избыточное давление  $P$  будет равно

$$P = \gamma \cdot h ,$$

где  $h$  – разность уровней или сумма отсчетов ( $h_1 + h_2$ ) в см.

$\gamma$  – удельный вес затворной жидкости  $\text{кг/см}^3$ .

Эти приборы имеют ряд недостатков:

- хрупкость стеклянной трубки;
- неудобство отсчета;
- большие габариты и значительный вес.

2.2.2. Чашечный манометр представляет собой разновидность U-образного трубчатого манометра, у которого одна из труб заменена сосудом большего диаметра – чашей (рис. 3.1).

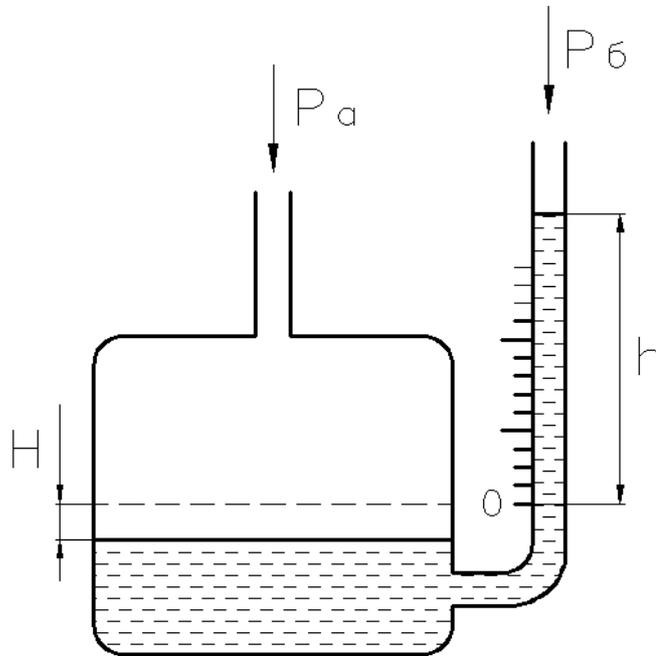


Рисунок 3.1 – Чашечный дифманометр

Измеряемое давление действует на жидкость в широком диапазоне, а открытый конец трубки соединен с атмосферой. Под действием избыточного давления  $P$  уровень жидкости в сосуде понижается на величину  $H$ , мм, а в трубке повышается на высоту  $h$ , мм. Избыточное давление определяется

$$P = (H + h).$$

Исходя из равенства объемов столба жидкости в трубке площадью  $f$ , мм, и уровня  $H$ , мм, опустившейся затворной жидкости в чаше, площадь которой  $F$ , справедливо следующее равенство

$$F \cdot H = f \cdot h;$$

$$\frac{h}{H} = \frac{F}{f}, \quad \text{отсюда}$$

$$h = H \frac{F}{f}. \quad (3.3)$$

Формула (3.3) позволяет проградуировать шкалу любого расчетного чашечного манометра.

Для упрощения градуировки шкалы трубки соотношение площадей выбирают таким образом, чтобы значениям  $H$ , положения уровня затворной жидкости в чаше, можно было пренебречь без внесения существенной погрешности. Этому условию удовлетворяет следующее неравенство

$$\frac{f}{F} \leq \frac{1}{400},$$

тогда

$$F \geq 400f \quad (3.4)$$

Избыточное давление  $P$  определяется по формуле

$$P = h \cdot \gamma,$$

где  $h$  – высота подъема жидкости в трубке;

$\gamma$  – удельный вес затворной жидкости.

Если измерения происходят в мм. рт. ст. или мм. вод. ст., то избыточное давления можно определить по равенству:

$$P = h.$$

Т.к. для снятия показаний требуется только 1 отсчет, то погрешность измерений значительно уменьшается.

### 2.2.3. Поплавковые дифманометры.

Поплавковые приборы служат для измерения перепада давления, то есть в качестве дифманометров. Конструктивно поплавок дифманометры подобны чашечным манометрам, той же разницей, что для измерения разности давления  $\Delta P$  фиксируется перемещение жидкости не в трубке, а в чаше. На поверхности затворной жидкости в чаше плавает поплавок, который перемещается вместе с изменением уровня жидкости. Перемещение поплавка с помощью передаточного устройства преобразуется в перемещение отсчетного устройства. Рабочей жидкостью служит ртуть или вазелиновое масло (Рисунок 3.2)

Сосуд, в который подается большее давление называется плюсовым, а второй минусовым. В большинстве конструкций поплавок дифманометров чаша является плюсовым сосудом. Перемещение уровня жидкости в плюсовом сосуде пропорционально измеряемому перепаду давления

$$h_1 = \frac{\Delta P \cdot 133322}{(\gamma - \gamma_1) \left(1 + \frac{F_1}{F_2}\right)}, \text{ (мм) }, \quad (3.5)$$

где  $\Delta P = P_1 - P_2$  - разность давлений, мм. рт. ст.;

$\gamma$  - удельный вес жидкости в сосудах, (для ртути  $\gamma = 132750,8$ ), кг/м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>;

$\gamma_1$  - удельный вес среды, находящейся над жидкостью (для воздуха  $\gamma_1 = 12.74$ ), кг/м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>;

$F_1, F_2$  - площади поперечного сечения плюсового и минусового сосудов, мм<sup>2</sup>.

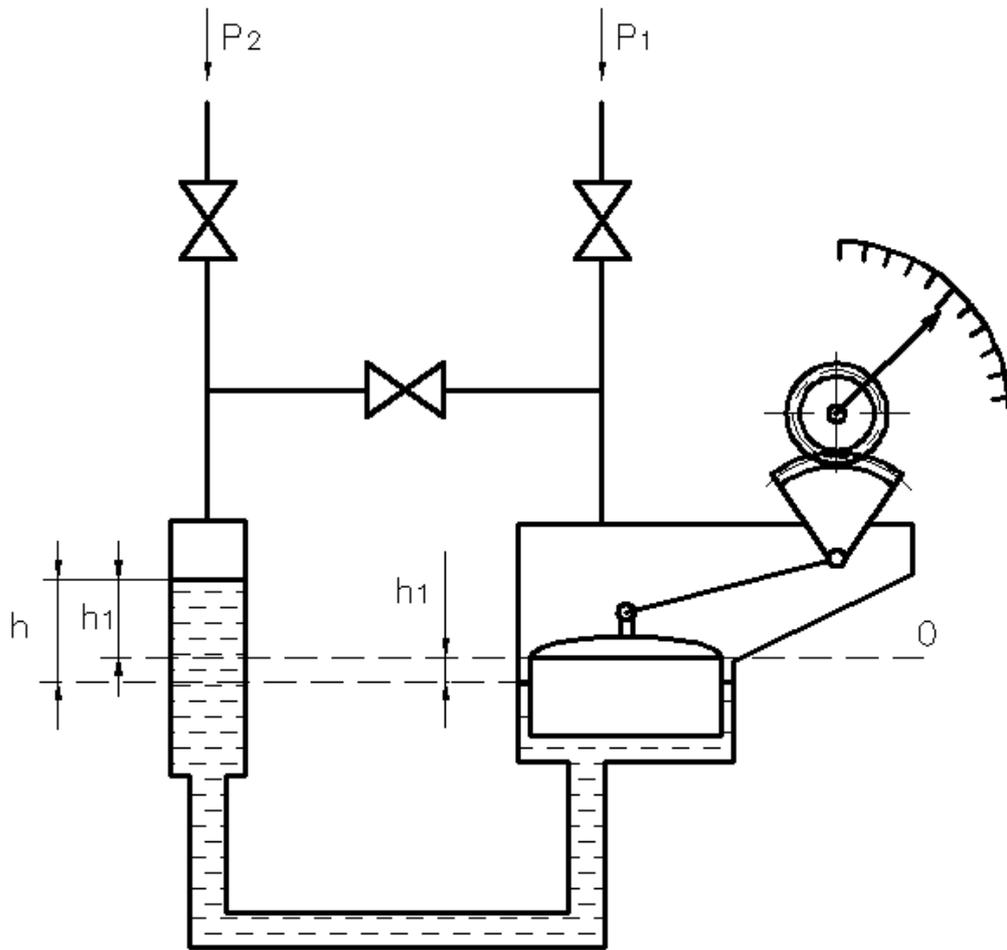


Рисунок 3.2 – Схема поплавкового дифманометра

При отсутствии трения в передаточном механизме прибора перемещение  $H$  поплавка равно перемещению  $h_1$  уровня жидкости в плюсовом сосуде. Из-за наличия трения в передаточном механизме перемещение поплавка  $P$  будет отличаться от перемещения уровня жидкости на величину

$$\delta_n = H - h_1 = \pm \frac{T}{F_n \cdot 10^{-6} (\gamma - \gamma_1)} \left( 1 - \frac{F_n}{F_1 + F_2} \right), \text{ мм}, \quad (3.6)$$

где  $T$  - приведенная к поплавку сила трения в передаточном механизме прибора ( $T=0,5H$ );

$F_n$  - площадь поперечного сечения поплавка,  $\text{мм}^2$ .

Знак «+» соответствует подъему поплавка при уменьшении измеряемого перепада, знак «-» соответствует опусканию поплавка при возрастании перепада давления.

Т.о., перемещение поплавка

$$H = h_1 \pm \delta_H. \quad (3.7)$$

Поплавковым дифманометрам присуща температурная погрешность. Например прибор с ртутным заполнением при повышении температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  дает погрешность на 0,3%

Недостатками этих приборов является:

- токсичность затворной жидкости;

- значительные размеры и вес;
- необходимость неподвижной установки в вертикальном положении [3].

### 3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 3.3) состоит из стандартных пневматических элементов фирмы “FESTO”. От компрессора 1 сжатый воздух подается на блок подготовки воздуха 2, где происходит его фильтрация. Там же с помощью редукционного клапана регулируется давление воздуха, подаваемого в систему. Клапан 3 включает подачу воздуха в ресивер 4 или стравливает его в атмосферу. Из ресивера 4 воздух попадает в U-образный манометр 6 при открытии клапана 5, где и производятся измерения.

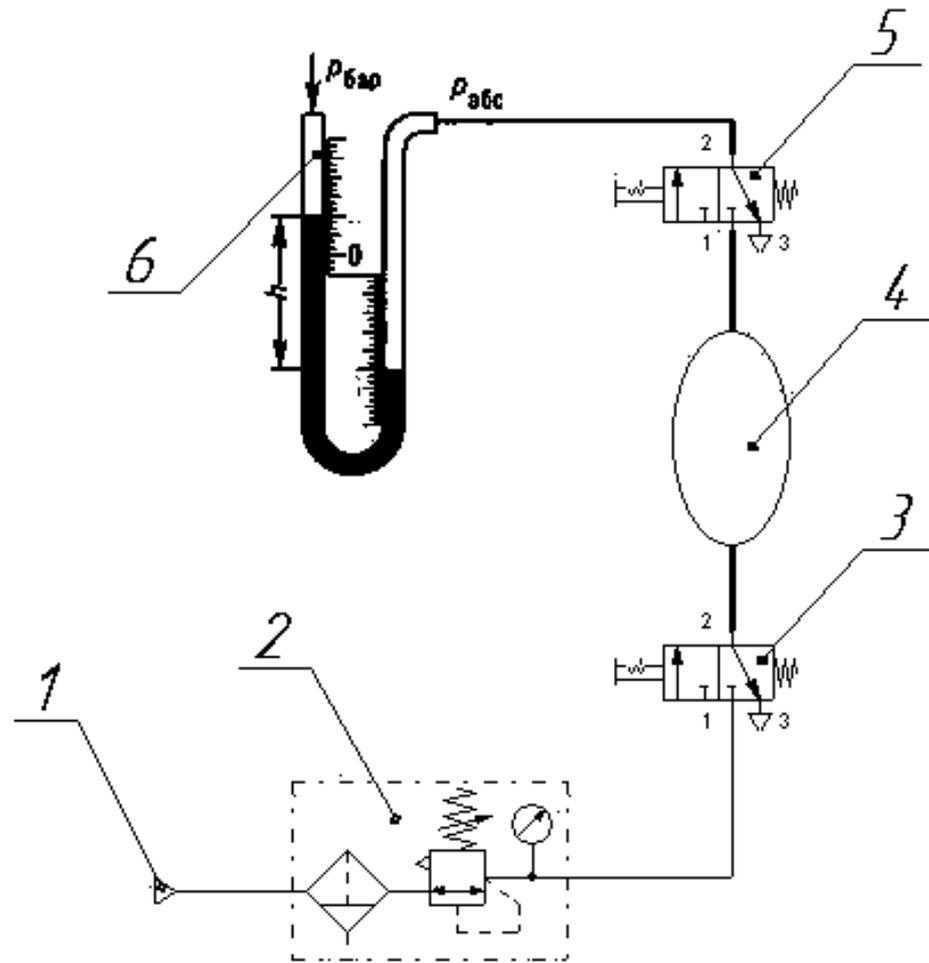


Рисунок 3.3 – Схема лабораторной установки

#### 4. Порядок проведения лабораторных исследований

4.1. Из набора пневмоэлементов по схеме рисунка 3.3 собрать лабораторный стенд на универсальной плите 2 (рисунок 1.5) и подключить его через раздаточный элемент (рисунок 1.7) к блоку подготовки сжатого воздуха (рисунок 1.6). Блок подготовки сжатого воздуха и раздаточный элемент установлен на универсальной доске стационарно.

4.2. На блоке подготовки воздуха 2 (рисунок 1.6) установить некоторое давление. Затем переключить распределитель 3, тем самым, подав сжатый воздух в ресивер 4. Далее открыть клапан 5 и замерить давление U-образным манометром 6. Данные записать в таблицу 3.2

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента.

№ Измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
Измеренное давление								

Закрывать клапан 5 и установить на блоке подготовки воздуха 2 изменить давление. Затем открыть клапан 5 и замерить давление U-образным манометром 6. Провести действия 8 раз. Данные записать в таблицу 3.2.

Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.

#### 5. Порядок выполнения теоретических расчетов

5.1. Рассчитать температурную погрешность

Расчет погрешности проводить по формуле (3.1) используя таблицу 3.1.

Исходные данные для расчета выбирать по последней и предпоследней цифре зачетной книжки, из таблицы 3.4.

5.2. Рассчитать погрешность от изменения ускорения свободного падения  $g$ . Расчеты проводить по формуле (3.2) используя справочный материал в таблице 3.1 Данные для расчета выбирать по таблице 3.4.

5.3. Рассчитать градуировку шкалы чашечного манометра по 10 точкам с интервалом 10 мм. Расчет проводить по формулам (3.3), (3.4), приняв первоначальное значение  $H=0$  Исходные данные выбрать по таблице 3.5

Таблица 3.3 – Исходные данные для расчета температурной погрешности

Предпоследняя цифра зачетки	Последняя цифра зачетки										
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	t°С	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	Затворная жидкость/материал шкалы/h <sub>г</sub> , мм										
	Ртуть/латунь										
2	Ртуть/никель										
	Вода/латунь										
3	Ртуть/стекло										
	Вода/никель										
4	Вода/стекло										
	Этиловый спирт/латунь										
5	Этиловый спирт/никель										
	Этиловый спирт/стекло										
6	Ртуть/фарфор										
7											
8											
9											
0											

Таблица 3.4 – Исходные данные для расчета погрешности от изменения ускорения свободного падения

Предпоследняя цифра зачетной книжки	Последняя цифра зачетной книжки										
	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	h <sub>г</sub> , мм/φ°										
1	100	100	120	130	140	150	160	170	180	190	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
2	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	
	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
3	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
4	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490	
	130	140	150	160	170	180	10	20	30	40	
5	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
6	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	
	150	160	170	180	10	20	30	40	50	60	
7	700	710	720	730	740	750	760	770	780	790	
	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
8	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	
	170	180	10	20	30	40	50	60	70	80	
9	900	910	920	930	940	950	960	970	980	990	
	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
0	1000	1010	1020	1030	1040	1050	1060	1070	1080	1090	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

Таблица 3.5 – Данные для расчета шкалы чашечного манометра

		Последняя цифра зачетной книжки									
		H, мм / диаметра трубки, мм									
Предпоследняя цифра зачетной книжки	№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		5	5,5	6	6,5	1	15,5	6,5	7	7,15	8
	2	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	3	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
		5,1	5,2	6,1	6,2	7,1	7,2	8,1	8,2	9,1	9,2
	4	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11
		5	6	7	8	5	6	7	8	5	6
	5	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
		5	6,5	5,8	6	6,5	6,8	7	7,5	7,8	8
	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
5		6	7	8	8	7	6	5	6	7	
7	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	
8	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
	5	6	7	8	5	6	7	8	9	10	
9	10	10,5	10,8	11	11,2	11,4	11,6	11,8	12	12,2	
	5,2	6,4	7,8	8,2	9,3	7,4	8,6	5,3	4,9	4,7	
0	15	20	16	18	17	19	12	14	11	9	
	5,3	5,4	5,5	5,6	6,8	7,8	6,2	7,2	6,6	5,6	

5.4. Сделать эскиз схемы чашечного манометра на основании приведенного расчета по пункту 4.3

5.5. Рассчитать перемещение уровня жидкости и поплавка в плюсовом сосуде. Расчет выполнить по формулам (3.5), (3.6), (3.7) Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Данные для расчета поплавкового дифманометра

		Последняя цифра зачетки									
		№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предпоследняя цифра зачетки	$\Delta P; D_1/D_2/D_n$										
	1	10	12	15	20	25	27	30	32	35	40
	3/3/2,5										
	2	16	17	22	28	34	38	42	47	56	63
	4/2/3										
	3	29	36	46	48	50	55	60	75	85	100
	9/3/8										
	4	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
	10/10/9										
	5	165	170	180	190	200	210	220	230	240	250
	24/12/22										
	6	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
	42/14/40										
	7	100	200	300	410	500	600	610	620	625	630
	15/15/14										
	8	100	200	300	460	520	640	700	800	900	1000
	34/17/33										
	9	120	222	328	420	580	602	720	820	920	100
	60/20/58										
	0	158	250	350	450	550	650	750	850	950	1000
30/30/28											

5.6. Сделать эскиз схемы поплавкового дифманометра в соответствии с проведенными расчетами по п. 4.5. и таблицы 3.6.

## **6. Содержание отчета**

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Схема лабораторной установки
4. Таблица экспериментальных данных
5. Эскиз схемы поплавкового дифманометра
6. Расчет температурной погрешности
7. Расчет погрешности от изменения ускорения свободного падения  $g$ .
8. Расчет градуировки шкалы чашечного манометра по 10 точкам с интервалом 10 мм.
9. Выводы

## **7. Контрольные вопросы**

1. Принцип действия U-образных манометров
2. Погрешность U-образных приборов
3. Принцип действия поплавкового манометра
4. Принцип действия чашечного манометра
5. Классификация приборов давления по измеряемой величине
6. Назвать элементы лабораторной установки

## **Лабораторная работа №4**

### **Особенности конструкции, расчета и измерения колокольными приборами.**

#### **1. Цель работы**

Целью данной лабораторной работы является:

- изучение особенностей конструкции колокольного дифманометра;
- приобретение навыков расчета статической характеристики колокольного дифманометра;
- приобретение навыков проектирования принципиальной схемы колокольного дифманометра по расчетным характеристикам;
- приобретение навыков измерения с помощью дифманометра;

#### **2. Теоретический раздел**

Приборы для измерения давления колокольного типа (рис.4.1) в основном применяются как дифманометры.

В закрытом сосуде 1, частично заполненном жидкостью, плавает колокол 2. При равенстве давлений под и над колоколом уровень жидкости также одинаков. В случае если под колокол через специальную вставку 3 в днище сосуда подается большее давление, а в пространстве над колоколом меньшее, то колокол под действием избыточного давления на его внутреннюю поверхность всплывает до тех пор, пока избыточное давление не уравновешивается увеличением веса колокола при всплытии [3].

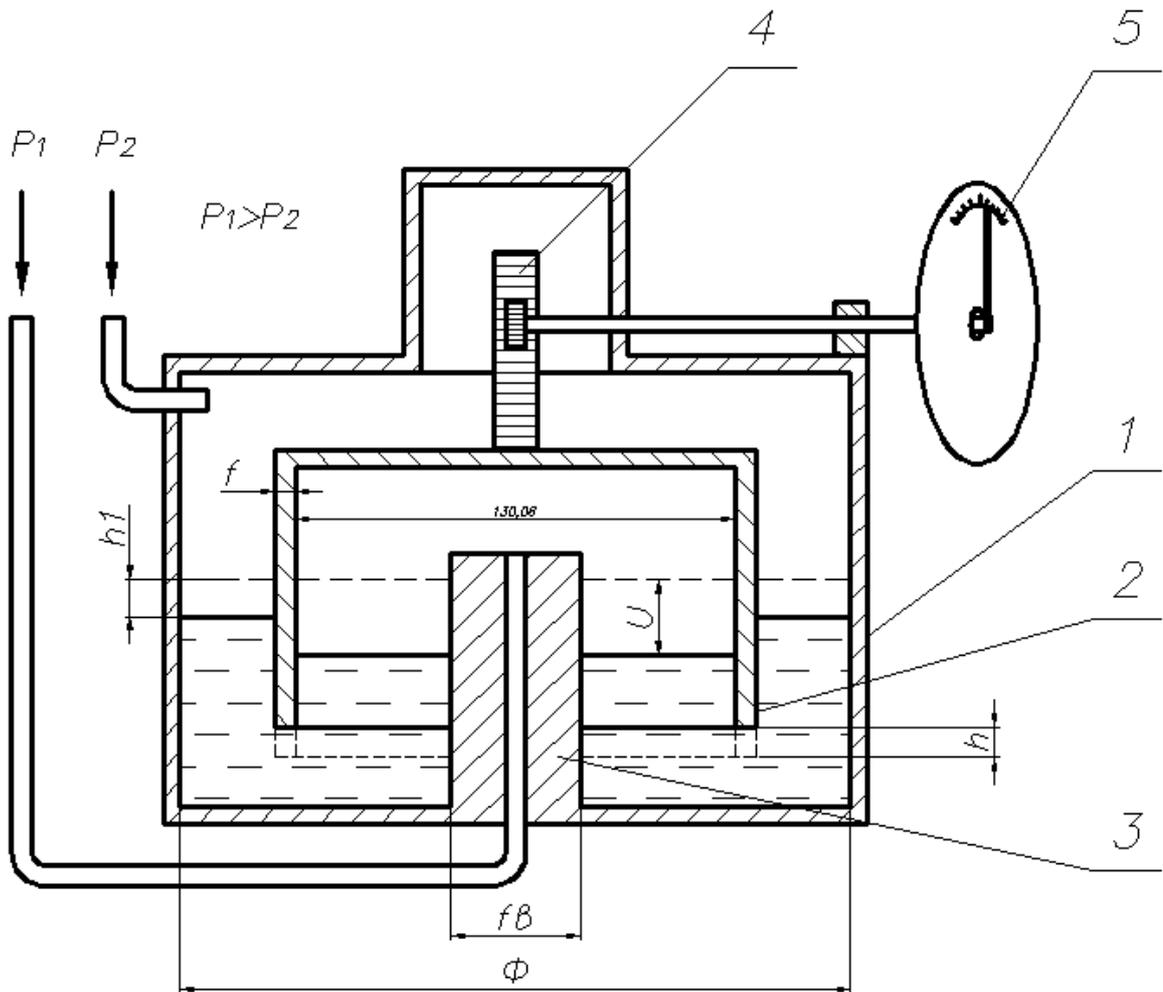


Рисунок 4.1 – Поплавковый дифманометр

Посредством передаточного механизма 4, состоящего из зубчатой рейки и колеса, перемещение колокола передается на показывающее устройство 5. Статистическая характеристика простейшего колокола имеет вид

$$H = \frac{\Delta P - 9806,6 \left( \frac{F}{f} - \frac{f_B}{\Phi - f_B} \right)}{\gamma - \gamma_1} \quad (4.1)$$

где  $H$  - перемещение колокола, мм;

$\gamma$  - удельный вес рабочей жидкости;  $\gamma_1$  - удельный вес среды над рабочей жидкостью;

$F$  - площадь поперечного сечения полости колокола,  $\text{мм}^2$ ;

$f$  - площадь поперечного сечения стенки колокола,  $\text{мм}^2$ ;

$\Phi$  - площадь поперечного сечения сосуда,  $\text{мм}^2$ ;

$f_B$  - площадь поперечного сечения вставки в днище сосуда,  $\text{мм}^2$ .

Чувствительность колокола

$$S = \frac{\frac{F}{f} - \frac{f_s}{\Phi - f_s}}{\gamma - \gamma_1} \quad (4.2)$$

Из (4.2) очевидно, что чувствительность прямо пропорциональна площади поперечного сечения колокола и обратно пропорциональна площади стенки и разности удельных весов жидкости и среды над ней. Она не зависит от веса колокола, следовательно, для увеличения чувствительности целесообразно применение тонкостенных колоколов большого диаметра. При этом можно соблюдать условие

$$\Phi \geq 1,05(F + f) \quad (4.3.)$$

Наличие вставки 3 в днище колокола уменьшает его чувствительность. Зависимость чувствительности колокола от площади вставки представлена на рис. 4.2., но наличие вставки позволяет уменьшить объем затворной жидкости, особенно это важно в случае применения ртути.

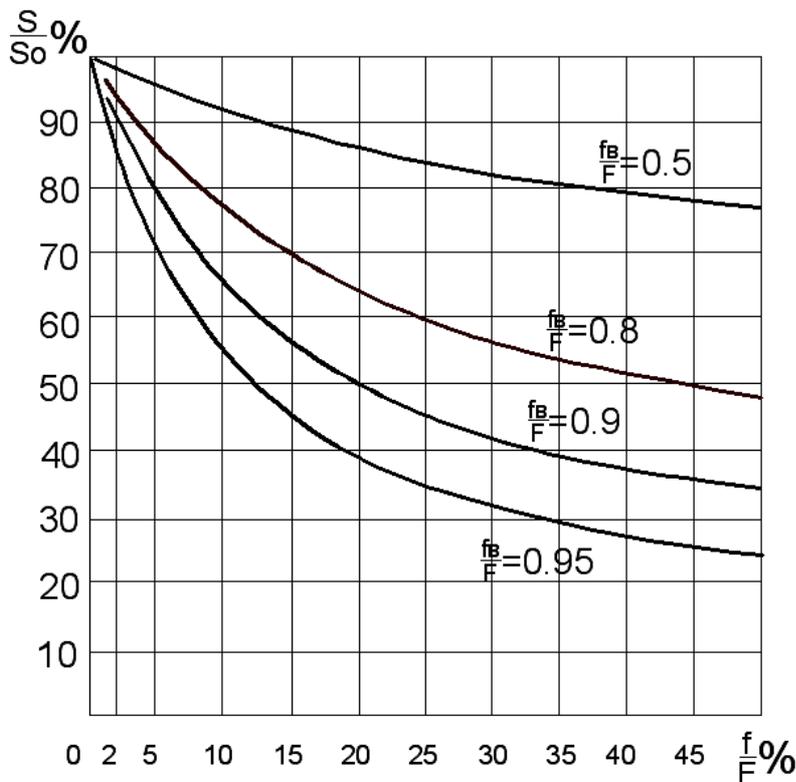


Рисунок 4.2. – График зависимости чувствительности колокола от площади вставки

При изменении перепада давлений  $\Delta P$  одновременно с перемещением колокола изменяется и уровни рабочей жидкости, как в сосуде  $h_1$ , так и под колоколом,  $h_2$ . Разность уровней  $h = h_1 - h_2$  пропорциональна перепаду давления и разности удельных весов рабочей жидкости и среды над рабочей жидкостью

$$h = \frac{\Delta P}{j - j_1} \quad (4.3)$$

### 3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 4.3) состоит из стандартных пневматических элементов фирмы “FESTO”. От компрессора 1 сжатый воздух подается на блоки подготовки воздуха 2 и 10, где происходит его фильтрация. Редукционным клапаном блока подготовки воздуха 10 выставляется большее давление, чем на блоке подготовки воздуха 2. Клапан 3 включает подачу воздуха в ресивер 4 или стравливает его в атмосферу, а клапан 9 - в ресивер 8. Из ресиверов 4 и 8 воздух попадает в колокольный дифманометр 6 при открытии клапана 5 и 7, где и производятся измерения.

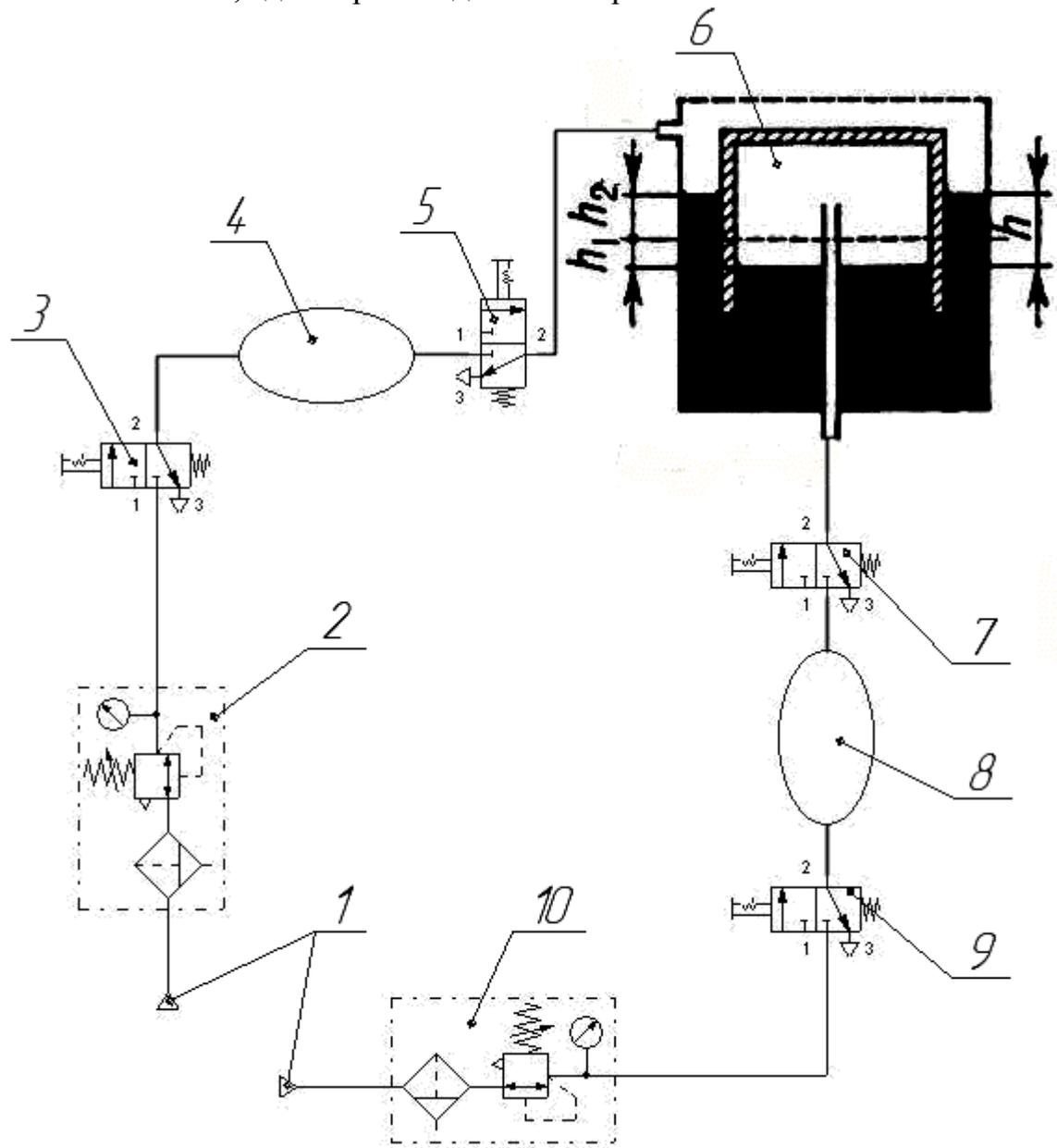


Рисунок 4.3– Схема лабораторной установки

### 4. Порядок проведения лабораторных исследований

4.1. Из набора пневмоэлементов по схеме рисунка 4.3 собрать лабораторный стенд на универсальной плите 2 (рисунок 1.5) и подключить его через раздаточный элемент (рисунок 1.7) к блоку подготовки сжатого воздуха

(рисунок 1.6). Блок подготовки сжатого воздуха и раздаточный элемент установлен на универсальной доске стационарно.

4.2. На блоке подготовки воздуха 2 (рисунок 1.6) и на блоке подготовки воздуха 10 установить некоторое давление. Затем переключить распределители 3 и 9, тем самым, подав сжатый воздух в ресиверы 4 и 8. Далее открыть клапана 5 и 7; измерить разность давлений колокольным дифманометром 6. Данные записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента

№ Измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
Измеренное давление								

4.3. Закрыть клапана 5,7 и изменить на блоках подготовки воздуха 2 и 10 некоторые давления. Затем открыть клапана 5,7 и измерить разность давлений колокольным дифманометром 6. Прodelать действия 8 раз. Данные записать в таблицу 4.1.

4.4. Разобрать лабораторный стенд, а пневмоэлементы уложить на свои места по указателям.

## 5. Порядок выполнения теоретических расчетов.

5.1. Рассчитать статистическую характеристику колокола цилиндрической формы по исходным данным таблицы 4.2 и формуле(4.1).

5.2. Рассчитать чувствительность колокола по формуле(4.3) и выбрать оптимальные размеры прибора.

5.3. Сделать эскиз принципиальной схемы колокольного дифманометра по выбранным размерам.

Таблица 4.2. – Данные для расчета колокольного дифманометра

		Последняя цифра зачетки									
		$\Delta P$ мм вод.ст./D, мм									
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
	1	4 58	4,5 56	5 54	5,5 52	6 50	6,5 48	7 46	8 44	9 42	10 40
		$\frac{f_B}{F} = 0,5$ ; рабочая жидкость-вода; $\Delta P / F = 20\%$									
2	12 85	12,5 80	13 75	13,5 70	14 65	14,5 60	14,7 55	15 50	15,5 45	16 40	
		$\frac{f_B}{F} = 0,55$ ; рабочая жидкость-вода; $\Delta P / F = 25\%$									
3	16 78	17 76	18 74	19 72	20 70	21 68	22 66	23 64	24 62	25 60	
		$\frac{f_B}{F} = 0,76$ ; рабочая жидкость-вода; $\Delta P / F = 30\%$									
4	30 90	32 86	33 84	34 84	35 85	36 78	37 76	38 74	39 72	40 92	
		$\frac{f_B}{F} = 0,65$ ; рабочая жидкость-масло техническое; $\Delta P / F = 35\%$									
5	42 110	44 108	46 106	48 104	50 102	52 100	54 98	56 96	58 94	60 92	
		$\frac{f_B}{F} = 0,75$ ; рабочая жидкость-масло техническое; $\Delta P / F = 40\%$									
6	62 100	64 95	66 90	68 85	70 80	72 75	75 70	80 65	90 60	100 55	
		$\frac{f_B}{F} = 0,75$ ; рабочая жидкость-масло техническое; $\Delta P / F = 45\%$									
7	110 120	112 110	115 100	117 90	120 80	125 70	130 60	135 50	140 45	144 40	
		$\frac{f_B}{F} = 0,8$ ; рабочая жидкость-ртуть; $\Delta P / F = 45\%$									
8	150 150	155 145	160 140	160 135	170 130	180 125	200 120	220 115	240 110	250 105	
		$\frac{f_B}{F} = 0,85$ ; рабочая жидкость-ртуть; $\Delta P / F = 45\%$									
9	300 200	320 195	350 190	370 185	380 180	390 175	400 170	420 165	450 160	500 155	
		$\frac{f_B}{F} = 0,9$ ; рабочая жидкость-ртуть; $\Delta P / F = 45\%$									
0	550 300	600 280	700 280	800 270	900 260	1000 250	2000 240	3000 230	4000 220	5000 210	
		$\frac{f_B}{F} = 0,95$ ; рабочая жидкость-ртуть; $\Delta P / F = 45\%$									
C	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	

Предпоследняя цифра зачетки

## **6. Содержание отчета**

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Схема лабораторной установки
4. Таблица экспериментальных данных
5. Эскиз принципиальной схемы колокольного дифманометра
6. Расчет статической характеристики и чувствительности колокольного дифманометра
7. Выводы

## **7. Контрольные вопросы**

1. Что такое дифдавление
2. Принцип действия колокольного дифманометра
3. Классификация приборов давления по разновидностям конструкции
4. Погрешности колокольного дифманометра
5. Какие расчеты были выполнены

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кросер П. Учебный курс по технике управления: учебное пособие / П.Кросер, Ф.Эбель. – Киев: Изд-во ДП «Фесто», 2002. – 225с.: ил.
2. Пашков Е.В. Электропневмоавтоматика в производственных процессах: учебное пособие / Е.В. Пашков, Ю.А. Осинский, А.А. Четверкин; под ред. Е.В.Пашкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 496 с.: ил.
3. Теория и проектирование контрольных автоматов: учебное пособие / Л.Н. Воронцов, С.Ф. Корндорф, В.А. Трутень, А.В. Федотов. – М.: Высш. шк., 1980. – 560 с.: ил.

Заказ № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2008. Тираж \_\_\_\_\_ экз.  
Изд-во СевНТУ