

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)**

Методические указания по выполнению контрольной работы  
по дисциплине «Технические средства автоматизации»

Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических  
процессов и производств

Квалификация выпускника – бакалавр

Невинномысск 2021

Методические указания предназначены для выполнения контрольной работы по дисциплине «Технические средства автоматизации» для студентов направления подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств и соответствуют требованиям ФГОС ВО направления подготовки бакалавров.

Составитель: старший преподаватель кафедры ИСЭА Д.В. Самойленко

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	5
2. ВЫБОР СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ДИФМАНОМЕТРА И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	6
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕДОСТАЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЕТА ДАННЫХ	7
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ $P_n$	14
5. ВЫБОР УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА	15
6. ВЫБОР ТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ $m$	21
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20°C	22
8. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ РАСЧЕТА	23
9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА	24
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	41
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	60
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	62
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	63
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 9	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 10	67
ПРИЛОЖЕНИЕ 11	70

# ВЫБОР И РАСЧЕТ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА ПО МЕТОДУ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Измеряемая среда – природный газ следующего состава:

этан  $N_1 = 0,15$ ;

пропан  $N_2 = 0,30$ ;

метан  $N_3 = 0,55$ .

Максимальный измеряемый расход при нормальных условиях ( $P_{\text{НОМ}} = 1,0332 \text{ кгс/см}^2$ ,  $T_{\text{НОМ}} = 293,15 \text{ К}$ )

$$Q_{\text{НОМ. макс}} = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Минимальный измеряемый расход при нормальных условиях

$$Q_{\text{НОМ. мин}} = 2000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Температура газа перед сужающим устройством

$$t = 40^\circ\text{С}.$$

Избыточное давление газа перед сужающим устройством

$$P_{\text{и}} = 9 \text{ кгс/см}^2.$$

Барометрическое давление

$$P_{\text{б}} = 1,0332 \text{ кгс/см}^2.$$

Перед сужающим устройством расположен запорный вентиль на расстоянии

$$L = 5000 \text{ мм}.$$

Расчет ведется по правилам РД 50-213-80 [1] и методическим указаниям [2,5].

## 2. ВЫБОР СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ДИФМАНОМЕТРА И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

### 2.1 Выбор сужающего устройства

Сужающее устройство – диафрагма с угловым отбором перепада давления, тип ДК (диафрагма камерная), материал – сталь 1Х18Н9.

### 2.2 Выбор дифманометра

Дифманометр преобразующий мембранный, тип 13ДД11, класс точности –  $S_{\sqrt{\Delta P}} = 1,0$ .

Верхний предел измерения  $Q_{\text{ном. пр}} = 3200 \text{ м}^3/\text{ч}$  устанавливается по заданному максимальному объемному расходу  $Q_{\text{max}}$  так, чтобы ближайшее большее значение  $Q_{\text{ном. макс}}$ , взятое по ГОСТ 18140 – 84, было больше или равно значению  $Q_{\text{ном. макс}}$ .

**Примечание:** дифманометры имеют следующий стандартный ряд пределов измерений  $(1; 1,6; 2,5; 4; 6,3) \cdot 10^n$ , где  $n$  – любое целое число [4].

### 2.3 Манометр для измерения избыточного давления

Манометр – показывающий, тип МО-160, класс точности –  $S_{P_i} = 1,0$ .

Верхний предел измерения  $P_{\text{пр}} = 16 \text{ кгс}/\text{см}^2$  устанавливается по заданному избыточному давлению перед сужающим устройством  $P_i$  согласно ГОСТ 2405 – 80.

Верхний предел измеряемого давления определяется стандартным рядом  $(0,6; 1; 1,6; 2,5; 4) \cdot 10^n \text{ МПа}$ , где  $n = -1, 0, 1, 2, 3$ .

## 2.4 Барометр для измерения барометрического давления

Барометр для измерения барометрического давления имеет максимальную абсолютную погрешность  $\Delta P_6 = 1,3595 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2$ .

## 2.5 Прибор для измерения температуры газа перед сужающим устройством

Прибором для измерения температуры газа перед сужающим устройством является термометр показывающий с классом точности  $S_t = 0,2$ .

Верхний предел измерения –  $N_t = 100^\circ\text{C}$  устанавливается в зависимости от рабочей температуры согласно ГОСТ 5365 –83.

# 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕДОСТАЮЩИХ ДЛЯ РАСЧЕТА ДАННЫХ

## 3.1 Показатель адиабаты смеси газов определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n N_i \alpha_i, \quad (1)$$

где  $N_i$  – мольная концентрация  $i$ -го компонента;

$\alpha_i$  – показатель адиабаты  $i$ -го компонента, определяемый по приложению 1 [5]:

этан  $\alpha_1 = 1,18$ ;

пропан  $\alpha_2 = 1,12$ ;

метан  $\alpha_3 = 1,30$ .

$$\alpha_{\text{см}} = 0,15 \cdot 1,18 + 0,3 \cdot 1,12 + 0,55 \cdot 1,3 = 1,228.$$

3.2 Коэффициент сжимаемости смеси газов определяется по формуле:

$$K_{см} = \sum_{i=1}^n N_i K_i, \quad (2)$$

где  $K_i$  – коэффициент сжимаемости  $i$ -го компонента, определяемый по приложению 2 [5]:

этан  $K_1 = 0,90$ ;

пропан  $K_2 = 0,88$ ;

метан  $K_3 = 0,98$ .

$$K_{см} = 0,15 \cdot 0,90 + 0,3 \cdot 0,88 + 0,55 \cdot 0,98 = 0,938$$

3.3 Плотность смеси газов при нормальных условиях определяется по формуле:

$$\rho_{ном} = \sum_{i=1}^n N_i \rho_i, \quad (3)$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента, определяемая по приложению 3 [5]:

этан  $\rho_{N1} = 1,2600$  кг/м<sup>3</sup>;

пропан  $\rho_{N2} = 1,8659$  кг/м<sup>3</sup>;

метан  $\rho_{N3} = 0,6681$  кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_{ном} = N_1 \rho_{N1} + N_2 \rho_{N2} + N_3 \rho_{N3},$$

$$\rho_{ном} = 0,15 \cdot 1,26 + 0,3 \cdot 1,8659 + 0,55 \cdot 0,6681 = 1,1162 \text{ кг/м}^3.$$

3.4 Плотность смеси газов при рабочих условиях определяется по

формуле:

$$\rho_{\text{см}} = 283,73 \frac{P}{TK} \rho_{\text{НОМ}}, \quad (4)$$

где  $P$  – абсолютное давление, определяемое по формуле:

$$P = P_{\text{и}} + P_{\text{б}}; \quad (5)$$

$$P = 9 + 1,0332 = 10,0332 \text{ кгс/см}^2;$$

$T$  - абсолютная температура, определяемая по формуле:

$$T = 273,15 + t \quad (6)$$

$$T = 273,15 + 40 = 313,15 \text{ К},$$

$$\rho_{\text{см}} = 283,73 \cdot \frac{10,0332}{313,15 \cdot 0,938} \cdot 1,1162 = 10,8185 \text{ кг/м}^3.$$

**Примечание:** если известна плотность  $\rho_t'$  жидкости при некоторой температуре  $t'$ , отличной от рабочей температуры  $t$ , то плотность  $\rho$  при температуре  $t$  вычисляется по формуле:

$$\rho = \rho_t' [1 - \beta(t - t')],$$

где  $\beta$  - средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в интервале от  $t'$  до  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

3.5 Динамическая вязкость смеси газов при рабочей температуре и атмосферном давлении определяется по формуле:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \mu_i \sqrt{M_i}}{\sum_{i=1}^n N_i \sqrt{M_i}}, \quad (7)$$

где  $\mu_i$  – динамическая вязкость  $i$ -го компонента, определяемая по приложению 4 [5]:

этан  $\mu_1 = 1,02 \cdot 10^{-6}$  кгс·с/м<sup>2</sup>;

пропан  $\mu_2 = 0,90 \cdot 10^{-6}$  кгс·с/м<sup>2</sup>;

метан  $\mu_3 = 1,22 \cdot 10^{-6}$  кгс·с/м<sup>2</sup>;

$M_i$  – молярная масса  $i$ -го компонента, определяемая по приложению 3 [5]:

этан  $M_1 = 30,068$ ;

пропан  $M_2 = 44,094$ ;

метан  $M_3 = 16,042$ .

$$\mu_{см} = \frac{N_1 \mu_1 \sqrt{M_1} + N_2 \mu_2 \sqrt{M_2} + N_3 \mu_3 \sqrt{M_3}}{N_1 \sqrt{M_1} + N_2 \sqrt{M_2} + N_3 \sqrt{M_3}},$$

$$\begin{aligned} \mu_{см} &= \frac{0,15 \cdot 1,02 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{30,068} + 0,3 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{44,094}}{0,15 \cdot \sqrt{30,068} + 0,3 \cdot \sqrt{44,094} + 0,56 \cdot \sqrt{16,042}} + \\ &+ \frac{0,55 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{16,042}}{0,15 \cdot \sqrt{30,068} + 0,3 \cdot \sqrt{44,094} + 0,56 \cdot \sqrt{16,042}} = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2. \end{aligned}$$

3.6 Динамическая вязкость смеси газов при рабочих условиях определяется по формуле:

$$\mu = \mu_{см} c_{\mu}, \quad (8)$$

где  $c_\mu$  – поправочный множитель, определяемый по графику приложения 5 в зависимости от  $P_{пр}$  и  $T_{пр}$  [2];

$P_{пр}$  – приведенное давление, определяемое по формуле

$$P_{пр} = \frac{P}{P_{пк}}; \quad (9)$$

$P_{пк}$  – псевдокритическое давление, определяемое по формуле

$$P_{пк} = \sum_{i=1}^n N_i P_{Ki}, \quad (10)$$

где  $P_{Ki}$  – критическое давление  $i$ -го компонента, определяемое по приложению 6 [5]:

этан  $P_{K1} = 49,80$  кгс/см<sup>2</sup>;

пропан  $P_{K2} = 43,39$  кгс/см<sup>2</sup>;

метан  $P_{K3} = 47,32$  кгс/см<sup>2</sup>;

$$P_{пк} = N_1 P_{k1} + N_2 P_{k2} + N_3 P_{k3},$$

$$P_{пк} = 0,15 \cdot 49,8 + 0,3 \cdot 43,39 + 0,55 \cdot 47,32 = 46,513 \text{ кгс/см}^2;$$

$$P_{пр} = \frac{10,0332}{46,513} = 0,2157,$$

$T_{пр}$  – приведенная температура, определяемая по формуле:

$$T_{\text{пр}} = \frac{T}{T_{\text{пк}}}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{пк}}$  – псевдокритическая температура, определяемая по формуле:

$$T_{\text{пк}} = \sum_{i=1}^n N_i T_{\text{Ки}}; \quad (12)$$

$T_{\text{Ки}}$  – критическая температура  $i$ -го компонента, определяемая по приложению 6 [5]:

этан  $T_{\text{К1}} = 305,46 \text{ К}$ ;

пропан  $T_{\text{К2}} = 369,90 \text{ К}$ ;

метан  $T_{\text{К1}} = 190,66 \text{ К}$ .

$$T_{\text{пк}} = N_1 T_{\text{к1}} + N_2 T_{\text{к2}} + N_3 T_{\text{к3}},$$

$$T_{\text{пк}} = 0,15 \cdot 305,46 + 0,3 \cdot 369,9 + 0,55 \cdot 190,66 = 216,652 \text{ К}.$$

$$T_{\text{пр}} = \frac{313,15}{261,65} = 1,1968$$

При  $P_{\text{пр}} = 0,2157$  и  $T_{\text{пр}} = 1,1968$   $c_{\mu} = 1,08$ .

$$\mu = 1,06 \cdot 10^{-6} \cdot 1,08 = 1,145 \cdot 10^{-6} \text{ кгс} \cdot \text{с} / \text{м}^2.$$

**Примечание:** при  $P_{\text{пр}} \leq 0,6$   $c_{\mu} = 1$ , следовательно  $\mu = \mu_{\text{см}}$ . Значения динамической вязкости водяного пара и воды в зависимости от давления и температуры приведены в приложениях 7 и 8 [5] соот-

ветственно.

3.7 Внутренний диаметр трубопровода  $D_{20}$  при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  определяется из выражения:

$$D_{20} = \sqrt{\frac{4Q_{\text{н.пр}}\rho_{\text{ном}}}{\pi \cdot v \cdot \rho \cdot 3600}}, \quad (13)$$

где  $v = 10$  м/с – скорость потока, определяемая по приложению 9 [5]:

$$D_{20} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3200 \cdot 1,1162}{3,14 \cdot 10 \cdot 10,8185 \cdot 3600}} = 0,108 \text{ м.}$$

Согласно ГОСТ 8732 – 78 диаметр трубопровода принимается  $112^{\times}6$ .

Внутренний диаметр трубопровода при температуре  $20^{\circ}\text{C}$

$$D_{20} = 100 \text{ мм.}$$

3.8 Внутренний диаметр трубопровода при рабочих условиях определяется по формуле:

$$D = D_{20} [1 + \beta_t (t - 20)], \quad (14)$$

где  $\beta_t$  – поправочный множитель на тепловое расширение материала трубопровода.

Для стали ОХ17Т  $\beta_t = 1,05 \cdot 10^{-5}$ , (приложение 10 [5]), тогда

$$D = 100 \cdot [1 + 1,05 \cdot 10^{-5} (40 - 20)] = 100,02 \text{ мм.}$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

$$\Delta P_H$$

Вспомогательную величину  $C$  найдем по формуле:

$$C = \frac{Q_{\text{ном.пр}}}{0,2109 \cdot D^2} \sqrt{\frac{TK}{P} \rho_{\text{ном}}}, \quad (15)$$

$$C = \frac{3200}{0,2109 \cdot 10002^2} \cdot \sqrt{\frac{31315 \cdot 0,938}{10,0332}} \cdot 1,1162 = 8,6708$$

По вычисленному значению  $C$ , округленному до трех значащих цифр и принятому наивыгоднейшему значению  $m = 0,2$  по номограмме приложения 32 [1] находится номинальный перепад давления  $\Delta P_H$ .

Для этого от точки  $C=8,67$  по вертикали перемещаются вверх до пересечения с линией  $m = 0,2$ . Линия перепада давления, проходящая через точку пересечения и будет соответствовать искомому перепаду давления.

Если найденный перепад давления не совпадает со стандартным (ГОСТ 18140 – 84), то по линии  $C$  перемещаются до пересечения с линией стандартного перепада давления. Стандартные перепады на номограмме отмечены жирными линиями и имеют значения 10; 16; 25...2500 кгс/м<sup>2</sup>; 0,4; 0,63; 1,0...6,3 кгс/см<sup>2</sup>.

Для данного примера  $\Delta P_H = 0,63$  кгс/см<sup>2</sup>.

По найденному стандартному значению перепада давления и величине  $C$  находится приближенное значение  $m$ . Так при  $C =$

8,67 и  $\Delta P_H = 0,63 \text{ кгс/см}^2$   $m = 0,19$ .

**Примечание:** для жидкостей вспомогательная величина  $C$  определяется по формуле

$$C = \frac{Q_{\text{ном.пр}} \sqrt{\rho}}{0,01252 \cdot D^2}.$$

Если при данном  $C$  и  $m=0,2$  оказывается, что  $\Delta P_H$  должно быть больше  $6,3 \text{ кгс/см}^2$  или меньше  $10 \text{ кгс/м}^2$ , то в качестве искомого значения  $\Delta P_H$  принимают соответственно  $6,3 \text{ кгс/см}^2$  или  $10 \text{ кгс/м}^2$  и по этому значению  $\Delta P_H$  (с учетом данного  $C$ ) находят значение  $m$ .

## 5. ВЫБОР УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

### 5.1 Коэффициент расхода $\alpha$

При выборе уравнения для определения коэффициента расхода  $\alpha$  необходимо соблюдать условие  $Re_{\min} \leq Re \leq 10^8$ .

Значение  $Re_{\min}$  выбираем в зависимости от  $m$ :

для  $0,05 \leq m \leq 0,20$   $Re_{\min} = 5 \cdot 10^3$ ;

для  $0,20 \leq m \leq 0,59$   $Re_{\min} = 10^4$ ;

для  $0,59 \leq m \leq 0,64$   $Re_{\min} = 2 \cdot 10^4$ .

Число Рейнольдса  $Re$  для диаметра  $D$  определяется по формуле:

$$Re = 0,0361 \frac{Q_{\text{ном.пр}} \rho_{\text{ном}}}{D \cdot \mu}, \quad (16)$$

$$\text{Re} = 0,0361 \frac{3200 \cdot 1,1162}{100,02 \cdot 1,145 \cdot 10^{-6}} = 1,015 \cdot 10^6.$$

Так как  $5 \cdot 10^3 < 1,015 \cdot 10^6 < 10^8$ , то коэффициент расхода определяется по формуле:

$$\alpha_y = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[ 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 + 0,0029m^{1,25} \left( \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,75} \right]. \quad (17)$$

В формуле коэффициента расхода  $\alpha_y$  вводят поправки на притупление входной кромки диафрагмы  $k_{\Pi}$  и на шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $k_{\text{ш}}$ , если не выполняется условие  $k_{\text{ш}}^{\Gamma} \geq k_{\text{ш}0}$ , где  $k_{\text{ш}}^{\Gamma}$  – верхняя граница относительной шероховатости, которая для  $m > 0,13$  определяется по выражению

$$k_{\text{ш}}^{\Gamma} = 3,9 + 10^3 e^{(-14,2\sqrt{m})}, \quad (18)$$

$$k_{\text{ш}0}^{\Gamma} = 3,9 + 10^3 e^{-14,2\sqrt{0,19}} = 5,938;$$

$k_{\text{ш}0}$  – относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода, определяемая по формуле:

$$k_{\text{ш}0} = \frac{k}{D} \cdot 10^4, \quad (19)$$

где  $k$  – абсолютная шероховатость трубопровода, значение которой определяем по таблице 1. Имеем  $k = 0,1$  мм.

$$k_{\text{шо}} = \frac{0,1}{100,02} \cdot 10^4 = 9,998$$

Так как условие  $k_{\text{шо}}^r \geq k_{\text{шо}}$  не выполняется, то в формулу коэффициента расхода вводят поправки на притупление входной кромки диафрагмы  $k_{\text{п}}$  и на шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $k_{\text{ш}}$ .

Поправка на притупление входной кромки диафрагмы определяется по формуле:

$$k_{\text{п}} = a_{\text{п}} + b_{\text{п}} e^{-n(m-0,05)}, \quad (20)$$

$$\text{где } a_{\text{п}} = 1 + 0,01 e^{-55,2(c-0,05)^{1,3}}; \quad (21)$$

$$c = D \cdot 10^{-3}; \quad (22)$$

$$b_{\text{п}} = 0,002 + 0,2558c - 1,68c^2 + 2,867c^3; \quad (23)$$

$$n = 4,25 + 14294(c - 0,05)^{1,92}. \quad (24)$$

$$a_{\text{п}} = 1 + 0,01 e^{-55,2(0,1-0,05)^{1,3}} = 1,0036$$

$$c = 100,02 \cdot 10^{-3} = 0,1;$$

$$b_{\text{п}} = 0,002 + 0,2558 \cdot 0,1 - 1,68 \cdot 0,1^2 + 2,867 \cdot 0,1^3 = 0,0136;$$

$$n = 4,25 + 14294(0,1 - 0,05)^{1,92} = 4,7041.$$

$$k_{\text{п}} = 1,0036 + 0,0136 e^{-4,7041(0,19-0,05)} = 1,0106$$

**Примечание:** если входная кромка диафрагмы острая, то  $k_{\text{п}}=1$ .

Таблица 1 – Значения величин абсолютной шероховатости трубопровода для различных условий эксплуатации трубопроводов

Вид труб и материала	Состояние поверхности труб и условия эксплуатации	k, мм
Цельнотянутые трубы из латуни, меди, свинца	Технически гладкие	0,0015-0,010
	Находящиеся в эксплуатации без отложений на внутренней поверхности	0,03
Алюминевые	Технически гладкие	0,015-0,06
	Находящиеся в эксплуатации без отложений на внутренней поверхности	0,03
Цельнотянутые стальные трубы	Новые, не бывшие в эксплуатации	0,02-0,10
	Изготовленные волочением в холодном состоянии	0,03
	Очищенные после многих лет эксплуатации	до 0,04
	Битумизированные	до 0,04
	Изготовленные горячим волочением	0,05-0,10
	Паропроводы перегретого пара при наличии деаэрации и химической очистки	0,10
	Паропроводы насыщенного пара при наличии деаэрации и химической очистки	0,20
	Паропроводы, работающие периодически, и конденсатопроводы с открытой системой конденсата	0,50
	Конденсатопроводы, работающие периодически, и водяные теплопроводы при отсутствии деаэрации и химической очистки	1,00
	Трубопроводы водяных систем отопления	0,20
	Водяные и теплопроводы при наличии деаэрации и химической очистки	0,15
	Газопроводы после одного года эксплуатации	0,12
	Газопроводы после нескольких лет эксплуатации	0,12-0,22
	Газопроводы после нескольких лет эксплуатации в различных условиях (корродированные или с небольшими отложениями)	0,15-1,00
Воздухопроводы сжатого газа	0,80	
Водопроводные трубы, находившиеся в эксплуатации	1,20-1,50	
Умеренно корродированные трубы	0,40	
С небольшим отложением накипи	0,40	

Продолжение таблицы 1

Вид труб и материала	Состояние поверхности труб и условия эксплуатации	k, мм
Цельносварные стальные трубы	Новые или старые трубы в хорошем состоянии	0,04-0,10
	Новые трубы спирально сварные	0,10
	Трубы, бывшие в эксплуатации, битум частично растворен, корродированные	0,10
	Трубы с гальваническим покрытием	0,13
	Трубы, бывшие в эксплуатации, равномерная коррозия	0,15
	Магистральные газопроводы после многих лет эксплуатации	0,50
Цельносварные стальные трубы	Магистральные газопроводы после 20 лет эксплуатации	1,10
	Трубы, загрязненные в процессе эксплуатации на воде, но не корродированные	0,95-1,00
	Трубы со слабыми отложениями	1,50
	Значительно корродированные трубы	2,00
Оцинкованные стальные трубы	Новые трубы с чистой оцинковкой	0,07-0,10
	Трубы с обычной оцинковкой	0,10-0,15
Трубы оцинкованные из листовой стали	Новые трубы	0,15
	Трубы бывшие в эксплуатации	0,18
Чугунные трубы	Новые трубы	0,25-1,00
	Новые, битумизированные	0,10-0,15
	Асфальтированные трубы	0,12-0,30
	Трубы, бывшие в эксплуатации, корродированные	1,1-1,5
	Трубы с отложениями на внутренней поверхности	1,0-1,5
	Трубы, очищенные после многих лет эксплуатации	0,3-1,5
	Сильно корродированные трубы	до 3,0
Асбоцементные трубы	Новые трубы с изоляцией	0,03
	Новые трубы без изоляции	0,05-0,10
	Средние трубы	0,60
Стеклянные трубы	Чистое стекло	0,0015-0,0100

Поправка на шероховатость внутренней поверхности трубопровода  $k_{ш}$  определяется по формуле:

$$k_{ш} = a_{ш}m + b_{ш}, \quad (25)$$

где

$$a_{ш} = (c - 0,3)(-1,066c^2 + 0,36c - 0,13); \text{ при } c \leq 0,3 \quad (26)$$

$$b_{ш} = 1 + (c - 0,3)(-0,08c^2 + 0,024c - 0,0046). \quad (27)$$

При  $c > 0,3$   $a_{ш} = 0$ ,  $b_{ш} = 1$

$$a_{ш} = (0,1 - 0,3)(-1,066 \cdot 0,1^2 + 0,36 \cdot 0,1 - 0,13) = 0,0209,$$

$$b_{ш} = 1 + (0,1 - 0,3)(-0,08 \cdot 0,1^2 + 0,024 \cdot 0,1 - 0,046) = 1,0006;$$

$$k_{ш} = 0,0209 \cdot 0,19 + 1,0006 = 1,0046.$$

С учетом поправок  $k_{п}$  и  $k_{ш}$  коэффициент расхода определяется по формуле:

$$\alpha = \alpha_y k_{ш} k_{п} \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \left[ 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 + 0,0029m^{1,25} \left( \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,75} \right] k_{ш} k_{п} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 - 0,2155^2}} \left[ 0,5959 + 0,0312 \cdot 0,19^{1,05} - 0,184 \cdot 0,19^4 + 0,0029 \cdot 0,19^{1,25} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{10^6}{1,015 \cdot 10^6} \right)^{0,75} \right] \cdot 1,0106 \cdot 1,0046 = 0,6171.$$

5.2 Коэффициент расширения газа, учитывающий изменение его плотности при прохождении через сужающее устройство, определяется по формуле:

$$\xi = 1 - (0,41 + 0,35m^2) \frac{\Delta P_n}{P} \cdot \alpha^{-1}, \quad (29)$$

$$\xi = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot 0,19^2) \frac{0,63}{10,0332} \cdot 1,228^{-1} = 0,9784$$

## 6. ВЫБОР ТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ $m$

Так как величина  $m$  в значительной мере влияет на расчет диаметра сужающего устройства и расход вещества, то необходимо выполнение условия

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}, \quad (30)$$

где  $\delta_{\text{доп}}$  - допустимое отклонение

$$\delta_{\text{доп}} = 0,2\%;$$

$\delta$  - действительное отклонение.

Действительное отклонение определяется по формуле

$$\delta = \left( \frac{F_1}{C_1} - 1 \right) \cdot 100\% \quad , \quad (31)$$

$$\text{где } F_1 = m\alpha\xi; \quad (32)$$

$$F_1 = 0,19 \cdot 0,6171 \cdot 0,9784 = 0,1147;$$

$$C_1 = \frac{C}{10^2 \sqrt{\Delta P_n}}; \quad (33)$$

$$C_1 = \frac{8,6708}{10^2 \sqrt{0,63}} = 0,1082$$

$$\delta = \left( \frac{0,1147}{0,1092} - 1 \right) \cdot 100\% = 5,037\%,$$

Так как  $\delta > \delta_{\text{доп}}$ , то задаются новым значением  $m$ . При этом новое значение  $m$  берут меньше предыдущего, если  $F_1 > C_1$  и наоборот.

В данном примере  $0,1147 > 0,1092$ , поэтому принимают  $m=0,185$ .

Затем вновь повторяют расчет, начиная с пункта 5. Расчет проводится до выполнения условия  $\delta \leq \delta_{\text{доп}}$ .

Для данного примера это условие выполняется при  $m=0,1799$ , чему соответствуют новые значения коэффициентов:  $k_{\text{п}}=1,0108$ ;  $k_{\text{ш}}=1,0045$ ;  $\alpha=0,6213$ ;  $\xi=0,9784$ .

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20<sup>0</sup>С

Так как для стали 1Х18Н9  $\beta_t = 1,65 \cdot 10^{-5}$  (приложение 10 [5]), то поправочный множитель на тепловое расширение материала диафрагмы  $k_t$  по формуле равен

$$k_t = 1 + \beta_t (t - 20); \quad (34)$$

$$k_t = 1 + 1,65 \cdot 10^{-5} (40 - 20) = 1,0003$$

тогда диаметр отверстия сужающего устройства  $d_{20}$  при  $t = 20^0 \text{ C}$  определяется по формуле:

$$d_{20} = \frac{D}{k_t} \sqrt{m}; \quad (35)$$

$$d_{20} = \frac{100,02}{1,0003} \sqrt{0,1799} = 42,4 \text{ мм.}$$

## 8. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ РАСЧЕТА

Расчет считается правильно выполненным, если  $\delta \leq 0,2\%$ .

Расчетный расход  $Q$  определяем по формуле:

$$Q = 0,2109 \alpha k_t^2 d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta P_H \cdot P}{\rho_{\text{НОМ}} \text{ТК}}}; \quad (36)$$

$$Q = 0,2109 \cdot 0,6205 \cdot 0,9784 \cdot 1,0003^2 \cdot 42,41^2 \sqrt{\frac{0,63 \cdot 10^4 \cdot 10,0332}{1,1162 \cdot 313,15 \cdot 0,938}} =$$

$$= 3199 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

**Примечание:** для жидкостей

$$Q_0 = 0,01252 \alpha k_t^2 d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta P_H}{\rho}}.$$

Относительное отклонение  $\delta$  определяется по формуле:

$$\delta = \left( \frac{Q}{Q_{\text{ном.пр}}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (37)$$

$$\delta = \left( \frac{3199}{3200} - 1 \right) \cdot 100\% = 0,0177\%$$

Так как  $\delta < 0,2\%$ , то расчет выполнен верно.

## 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Средние квадратические погрешности измерения расхода вычисляют по формулам:

для сухих газов

$$\sigma_{Q_{\text{ном}}} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{k_{\text{Re}}}^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 + 0,25(\sigma_{\rho_{\text{ном}}}^2 + \sigma_{\text{P}}^2 + \sigma_{\text{T}}^2 + \sigma_{\text{K}}^2)}; \quad (38)$$

для жидкостей

$$\sigma_{Q_0} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{k_{\text{Re}}}^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 + 0,25\sigma_{\rho}^2}. \quad (39)$$

### 9.1 Средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода сужающих устройств

для диафрагм с угловым способом отбора  $\Delta P$  при определении  $\alpha_y$  по формуле (17)

$$\sigma_{\alpha} = \left[ 0,3^2 + \sigma_{\alpha d}^2 + \sigma_{\alpha D}^2 \right]^{0,5} \text{ для } 0,05 \leq m \leq 0,36; \quad (40)$$

$$\sigma_{\alpha} = \left[ (0,5m)^2 + \sigma_{\alpha d}^2 + \sigma_{\alpha D}^2 \right]^{0,5} \text{ для } 0,36 < m \leq 0,64; \quad (41)$$

для диафрагм с угловым способом отбора  $\Delta P$  при определении  $\alpha_y$  по формуле (28)

для  $0,05 \leq m \leq 0,36$

$$\sigma_\alpha = \left[ 0,3^2 + \sigma_{\alpha d}^2 + \sigma_{\alpha D}^2 + \sigma_{\text{кш}}^2 + \sigma_{\text{кп}}^2 \right]^{0,5}, \quad (42)$$

для  $0,36 < m \leq 0,64$

$$\sigma_\alpha = \left[ (0,5m)^2 + \sigma_{\alpha d}^2 + \sigma_{\alpha D}^2 + \sigma_{\text{кш}}^2 + \sigma_{\text{кп}}^2 \right]^{0,5}$$

где  $\sigma_{\text{кш}} = 1,67m + (0,081 - t)(66,3t^2 - 33,7t + 6,9)$ ;

$$\sigma_{\text{кп}} = -0,833m + 16,7t^2 - 7,5t + 1,17;$$

$$t = \frac{D}{10^3}.$$

При получении отрицательной величины  $\sigma_{\text{кш}}$ ,  $\sigma_{\text{кп}}$  или при  $D > 300$  мм следует принимать  $\sigma_{\text{кш}} = 0$  или  $\sigma_{\text{кп}} = 0$ .

Средняя квадратическая погрешность диаметра диафрагмы определяется по формуле:

$$\sigma_{\alpha d} = 2\sigma_d \left( 1 + \frac{m^2}{\alpha} \right), \quad (43)$$

где  $\sigma_d = 0,025$  при  $m \geq 0,4$ ;

$\sigma_d = 0,05$  при  $m < 0,4$ ,

$$\sigma_{\alpha d} = 2 \cdot 0,05 \left( 1 + \frac{0,1799^2}{0,6505} \right) = 0,1052\%$$

Средняя квадратическая погрешность диаметра трубопровода определяется по формуле:

$$\sigma_{\alpha D} = 2\sigma_D \frac{m^2}{\alpha}, \quad (44)$$

где  $\sigma_D = 0,15$ .

$$\sigma_{\alpha D} = 2 \cdot 0,15 \cdot \frac{0,1799^2}{0,6205} = 0,0156\%.$$

Средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода  $\sigma_\alpha$

$$\sigma_\alpha = \sqrt{0,3^2 + \sigma_{\alpha d}^2 + \sigma_{\alpha D}^2 + \sigma_{k_{III}}^2 + \sigma_{k_{II}}^2},$$

$$\sigma_\alpha = \sqrt{0,3^2 + 0,1052^2 + 0,0156^2 + 0,3801^2 + 0,4371^2} = 0,6609\%.$$

Средняя квадратическая погрешность на шероховатость внутренней поверхности трубопровода определяется по формуле:

$$\sigma_{k_{III}} = 1,67m + (0,081 - t)[66,3 \cdot t^2 - 33,7t + 6,9], \quad (45)$$

где  $t = D \cdot 10^{-3}$ ,

$$t = 100,02 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ мм.}$$

$$\sigma_{\text{кш}} = 1,67 \cdot 0,1799 + (0,081 - 0,1)(66,3 \cdot 0,1^2 - 33,7 \cdot 0,1 + 6,9) = 0,3801\%,$$

Средняя квадратическая погрешность на притупление входной кромки диафрагмы определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{кп}} = -0,833m + 16,7 \cdot t^2 - 7,5t + 1,17, \quad (46)$$

$$\sigma_{\text{кп}} = -0,833 \cdot 0,1799 + 16,7 \cdot 0,1^2 - 7,5 \cdot 0,1 + 1,17 = 0,4371\%.$$

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{0,3^2 + 0,1052^2 + 0,0156^2 + 0,3801^2 + 0,4371^2} = 0,6609\%.$$

9.2 Средняя квадратическая погрешность коэффициента расширения  $\xi$  определяется по формуле:

$$\sigma_{\xi} = \frac{1-\xi}{\xi} (\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\Delta P}^2 + \sigma_P^2)^{0,5} + \sigma_o, \quad (47)$$

$$\text{где } \sigma_{\alpha} = \left[ \sum_{i=1}^n (N_i \alpha_i / \alpha) (\sigma_{\alpha_i}^2 + \sigma_{N_i}^2) \right]^{0,5}; \quad (48)$$

$\sigma_{\alpha_i}$  – средняя квадратическая погрешность определения показателя адиабаты газа  $i$ -го компонента;

$$\sigma_{\alpha_i} = 0,5 \cdot \Delta \alpha_i / \alpha_i \quad (49)$$

где  $\Delta \varepsilon_i$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $\varepsilon_i$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении;

$$\text{этан } \sigma_{\varepsilon 1} = 0,5 \cdot \Delta \varepsilon_1 / \varepsilon_1;$$

$$\sigma_{\varepsilon 1} = 0,5 \frac{0,04}{1,18} = 0,0169\% ;$$

$$\text{пропан } \sigma_{\varepsilon 2} = 0,5 \cdot \Delta \varepsilon_2 / \varepsilon_2 = 0,5 \frac{0,01}{1,12} = 0,0045\% ;$$

$$\text{метан } \sigma_{\varepsilon 3} = 0,5 \cdot \Delta \varepsilon_3 / \varepsilon_3 = 0,5 \frac{0,15}{1,3} = 0,0577\% ;$$

$\sigma_{N_i}$  – средняя квадратическая погрешность молярной концентрации  $i$ -го компонента;

$$\sigma_{N_i} = 0,5 \frac{\Delta N_i}{N_i} ; \quad (50)$$

$$\text{этан } \sigma_{N_1} = 0,5 \frac{\Delta N_1}{N_1} ;$$

$$\sigma_{N_1} = 0,5 \frac{0,025}{0,15} = 0,0833\% ;$$

$$\text{пропан } \sigma_{N_2} = 0,5 \frac{\Delta N_2}{N_2} ;$$

$$\sigma_{N_2} = 0,5 \frac{0,15}{0,30} = 0,25\%$$

$$\text{метан } \sigma_{N_3} = 0,5 \frac{\Delta N_3}{N_3};$$

$$\sigma_{N_3} = 0,5 \frac{0,025}{0,55} = 0,0227\%$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{0,15 \cdot 1,18}{1,228}\right)^2 (0,0169^2 + 0,0833^2) + \left(\frac{0,3 \cdot 1,12}{1,228}\right)^2 (0,0045^2 + 0,25^2) + \left(\frac{0,55 \cdot 1,3}{1,228}\right)^2 (0,0577^2 + 0,0227^2)} = 0,0783\%;$$

Средняя квадратическая погрешность измерения перепада давления определяется по формуле:

$$\sigma_{\Delta P} = \left(\frac{Q_{\text{номпр}}}{Q_{\text{номмакс}}}\right)^2 \cdot S_{\Delta P}; \quad (51)$$

$$\sigma_{\Delta P} = \left(\frac{3200}{3000}\right)^2 \cdot 0,5 = 0,5689\%.$$

Средняя квадратическая погрешность измерения избыточного давления определяется по формуле:

$$\sigma_{P_{\text{и}}} = 0,5 \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{и}}} \cdot S_{P_{\text{и}}}; \quad (52)$$

$$\sigma_{P_{\text{и}}} = 0,5 \cdot \frac{16}{9} \cdot 1 = 0,8889\%$$

$$\text{Для } m \leq 0,56 \quad \sigma_o = 2 \frac{\Delta P_H}{P}, \quad (53)$$

$$\text{Для } 0,56 < m \leq 0,64 \quad \sigma_o = 4 \frac{\Delta P_H}{P}. \quad (54)$$

$$\sigma_o = 2 \cdot \frac{0,63}{10,0332} = 0,1256\%.$$

$$\sigma_\xi = \frac{1-0,9784}{0,9784} \sqrt{0,0783^2 + 0,5689^2 + 0,8889^2} + 0,1256 = 0,149\%.$$

9.3 Средняя квадратическая погрешность коэффициента коррекции расхода на число Рейнольдса  $\sigma_{K_{Re}}$  равна

$$\sigma_{K_{Re}} = (1 - K_{Re}) \cdot \sigma_\mu, \quad (55)$$

где  $K_{Re}$  – коэффициент коррекции на число Рейнольдса, определяемый по формуле:

$$K_{Re} = \frac{c + b \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{0,75}}{c + b}; \quad (56)$$

$$c = \left( 0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}; \quad (57)$$

$$b = 0,0029 m^{1,25} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}. \quad (58)$$

$$c = (0,5959 + 0,0312 \cdot 0,1799^{0,05} - 0,184 \cdot 0,1799^4) \cdot \frac{1}{\sqrt{1-0,1799^2}} = 0,6009,$$

$$b = 0,0029 \cdot 0,1799^{1,25} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-0,1799^2}} = 0,00034$$

$$K_{Re} = \frac{0,6009 + 0,0003 \left( \frac{10^6}{1,015 \cdot 10^6} \right)^{0,75}}{0,6009 + 0,0003} = 1.$$

Так как  $K_{Re}=1$ , то  $\sigma_{KRe} = 0$ .

#### 9.4 Средняя квадратическая погрешность дифманометра:

для показывающих дифманометров с классом точности по расходу  $\sigma_{\sqrt{\Delta P}}$

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}} = 0,5 \frac{Q_{пр}}{Q} S_{\sqrt{\Delta P}}, \quad (59)$$

где  $Q$  – значение расхода в рабочей точке шкалы дифманометра;

$S_{\sqrt{\Delta P}}$  - класс точности прибора;

для показывающих дифманометров с классом точности по

перепаду давления

$$\sigma_{\Delta P} = 0,5 \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\Delta P} S_{\Delta P}, \quad (60)$$

где  $S_{\Delta P}$  - класс точности прибора;

для регистрирующих дифманометров

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 = 0,25 \left( \frac{Q_{\text{пр}}}{Q} S_{\sqrt{\Delta P}} \right)^2 + 0,25 \delta_{\text{пк}}^2 + 0,0012 \Delta \tau_{\sqrt{\Delta P}}^2; \quad (61)$$

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 = 0,25 \left( \frac{Q_{\text{пр}}}{Q} S_{\sqrt{\Delta P}} \right)^2 + 0,25 \delta_{\text{пш}}^2 + 0,0012 \Delta \tau_{\sqrt{\Delta P}}^2; \quad (62)$$

$$\sigma_{\Delta P}^2 = 0,25 \left( \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\Delta P} S_{\Delta P} \right)^2 + 0,25 \delta_{\text{пк}}^2 + 0,0012 \Delta \tau_{\Delta P}^2, \quad (63)$$

где  $\delta_{\text{пк}}$  и  $\delta_{\text{пш}}$  – приведенные погрешности корневого и пропорционального планиметров соответственно;

$\Delta \tau_{\sqrt{\Delta P}}$  и  $\Delta \tau_{\Delta P}$  - абсолютные погрешности хода диаграммы дифманометров с классом точности по расходу и по перепаду давления соответственно.

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}} = 0,5 \frac{Q_{\text{номпр}}}{Q_{\text{max}}} S_{\sqrt{\Delta P}};$$

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}} = 0,5 \cdot \frac{3200}{300} \cdot 1 = 0,5333\%$$

9.5 Средняя квадратическая погрешность измерения плотности при нормальных условиях  $\sigma_{\rho_{\text{ном}}}$  равна

$$\sigma_{\rho_{\text{ном}}} = \frac{1}{\rho_{\text{ном}}} \left\{ \sum_{i=1}^n [(N_i \rho_{\text{ном}i})^2 (\sigma_{\rho_{\text{ном}i}}^2 + \sigma_{N_i}^2)] \right\}^{0,5}, \quad (64)$$

где  $\sigma_{\rho_{\text{ном}i}}$  – погрешность определения плотности  $i$ -го компонента, при нормальных условиях;

$\sigma_{N_i}$  – погрешность определения концентрации ( $N_i$ )  $i$ -го компонента (определена в п.9.2 данного расчета).

При определении  $\sigma_{\rho_{\text{ном}}}$  по табличным значениям

$$\sigma_{\rho_{\text{ном}i}} = 50 \frac{\Delta \rho_{\text{ном}i}}{\rho_{\text{ном}i}}, \quad (65)$$

где  $\Delta \rho_{\text{ном}i}$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $\rho_{\text{ном}}$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении  $\rho_{\text{ном}}$ .

$$\text{этан } \sigma_{\rho_{\text{НОМ1}}} = 50 \frac{\Delta\rho_{\text{НОМ1}}}{\rho_{\text{НОМ1}}};$$

$$\sigma_{\rho_{\text{НОМ1}}} = 50 \frac{0,0005}{1,2601} = 0,0198\%$$

$$\text{пропан } \sigma_{\rho_{\text{НОМ2}}} = 50 \frac{\Delta\rho_{\text{НОМ2}}}{\rho_{\text{НОМ2}}};$$

$$\sigma_{\rho_{\text{НОМ2}}} = 50 \frac{0,00045}{1,8659} = 0,0121\%$$

$$\text{метан } \sigma_{\rho_{\text{НОМ3}}} = 50 \frac{\Delta\rho_{\text{НОМ3}}}{\rho_{\text{НОМ3}}}.$$

$$\sigma_{\rho_{\text{НОМ3}}} = 50 \frac{0,00005}{0,6681} = 0,0037\%$$

$$\sigma_{\rho_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{1,1162} \sqrt{(0,15+1,26)^2 \cdot (0,0198^2 + 0,0833^2) + (0,3 \cdot 1,8659)^2 \cdot (0,0121^2 + 0,25^2) + (0,55 \cdot 0,6681)^2 \cdot (0,0037^2 + 0,0227^2)} = 0,238\%.$$

**Примечание:** средняя квадратическая погрешность определения плотности жидкости в рабочих условиях вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\rho} = 50 \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_{\text{НОМ}}}{\rho_{\text{НОМ}}}\right)^2 + \frac{(t-t_{\text{НОМ}})^2(\Delta\beta)^2 + \beta^2(\Delta t)^2}{[1-\beta(t-t_{\text{НОМ}})]^2}},$$

где  $\Delta\rho_{\text{НОМ}}$ ,  $\Delta\beta$  и  $\Delta t$  – максимальные абсолютные погрешности величин  $\rho_{\text{НОМ}}$ ,  $\beta$  и  $t$  соответственно.

9.6 Средняя квадратическая погрешность измерения абсолютного давления:

показывающими манометрами

$$\sigma_P = \sqrt{\sigma_{P_6}^2 + \left( \sigma_{P_{и}} \frac{P_{и}}{P} \right)^2}, \quad (66)$$

где  $\sigma_{P_6}$  – средняя квадратическая погрешность измерения барометрического давления

$$\sigma_{P_6} = 50 \frac{\Delta P_6}{P}, \quad (67)$$

где  $\Delta P_6$  – максимальная абсолютная погрешность измерения барометрического давления, кгс/см<sup>2</sup>;

$$\sigma_{P_6} = 50 \cdot \frac{1,3595 \cdot 10^{-3}}{10,0332} = 0,0068\%;$$

$\sigma_{P_{и}}$  – средняя квадратическая погрешность измерения избыточного давления

$$\sigma_{P_{и}} = 0,5 \frac{P_{пр}}{P_{и}} \cdot S_{P_{и}}, \quad (68)$$

где  $P_{пр}$  – значение верхнего предела шкалы измерений манометра;

$S_{P_{и}}$  – класс точности манометра.

$$\sigma_{P_{и}} = 0,5 \cdot \frac{16}{9} \cdot 1 = 0,8889\%.$$

Средняя квадратичная погрешность измерения абсолютного давления  $\sigma_P$  равна

$$\sigma_P = \sqrt{0,0068^2 + \left(0,8889 \frac{9}{10,0332}\right)^2} = 0,7974\%;$$

регистрирующими манометрами

$$\sigma_P^2 = 0,25 \left(\frac{100\Delta P_{\delta}}{P}\right)^2 + 0,25 \left(\frac{P_{пр}}{P_{и}} S_{P_{и}}\right)^2 + 0,25 \delta_{шт}^2 + 0,0012 \Delta \tau_{P_{и}}^2, \quad (69)$$

где  $\Delta \tau_{P_{и}}$  - абсолютная погрешность хода диаграммы манометра.

9.7 Средняя квадратическая погрешность измерения температуры газа  $\sigma_T$ :

показывающими термометрами

$$\sigma_T = 0,5 \frac{N_t}{T} \cdot S_t, \quad (70)$$

где  $N_t$  – диапазон шкалы измерений термометра;

$S_t$  – класс точности термометра.

$$\sigma_T = 0,5 \cdot \frac{37315}{31315} \cdot 0,2 = 0,1192\%.$$

регистрирующими термометрами

$$\sigma_T^2 = 0,25 \left( \frac{N_t}{273,15+t} S_t \right)^2 + 0,25 \delta_{\text{ин}}^2 + 0,0012 \Delta \tau_t^2, \quad (71)$$

где  $\Delta \tau_t$  - абсолютная погрешность хода диаграммы термометра.

9.8 Средняя квадратическая погрешность определения коэффициента сжимаемости смеси газов:

$$\sigma_K = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{N_i K_i}{K} \right)^2 (\sigma_{K_i}^2 + \sigma_{N_i}^2) \right] \right\}^{0,5}, \quad (72)$$

где  $\sigma_{K_i}$  – средняя квадратическая погрешность определения коэффициента сжимаемости  $i$ -го компонента;

$\sigma_{N_i}$  – средняя квадратическая погрешность определения молярной концентрации  $i$ -го компонента (определена в п.9.2);

$$\sigma_{K_i} = \frac{\Delta K_i}{K_i} \quad (73)$$

$\Delta K_i$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $K_i$ ,

равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении  $K_i$ .

$$\text{этан } \sigma_{K1} = 0,5 \frac{\Delta K_1}{K_1};$$

$$\sigma_{K1} = 0,5 \frac{0,03}{0,90} = 0,0278\%$$

$$\text{пропан } \sigma_{K2} = 0,5 \frac{\Delta K_2}{K_2};$$

$$\sigma_{K2} = 0,5 \frac{0,04}{0,88} = 0,0227\%$$

$$\text{метан } \sigma_{K3} = 0,5 \frac{\Delta K_3}{K_3};$$

$$\sigma_{K3} = 0,5 \frac{0,04}{0,98} = 0,0204\%$$

$$\sigma_K = \sqrt{\left(\frac{0,15 \cdot 0,9}{0,938}\right)^2 (0,0278^2 + 0,0833^2) + \left(\frac{0,3 \cdot 0,88}{0,938}\right)^2 (0,0227^2 + 0,25^2) + \left(\frac{0,55 \cdot 0,98}{0,938}\right)^2 (0,0204^2 + 0,0227^2)} = 0,0739\%,$$

9.9 Средняя квадратическая погрешность измерения расхода  $\sigma_Q$  равна

$$\begin{aligned}\sigma_Q &= \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 + 0,25(\sigma_{\rho_{ном}}^2 + \sigma_P^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2)} = \\ &= \sqrt{0,6609^2 + 0,149^2 + 0 + 0,5333^2 + 0,25 \cdot (0,238^2 + 0,7974^2 + 0,1192^2 + 0,0739^2)} \\ &= 0,9599\%.\end{aligned}$$

9.10 Погрешность от сокращения длины прямого участка трубопровода  $\sigma_{\alpha L}$  (Таблица 5 П.11 [5]) для  $L/D_{20}=5000/100=50$  при  $m=0,1799$   $\sigma_{\alpha L}=0$ .

9.11 Суммарная погрешность измерения расхода  $\sigma$  равна

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_{\alpha L}^2}, \tag{74} \\ \sigma &= \sqrt{0,9599^2 + 0} = 0,9599\% \approx 0,96\%.\end{aligned}$$

Таким образом, установка позволит измерять расход природного газа с погрешностью, не превышающей 0,96%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. РД 50 – 213 – 80. – М.: Изд.-во стандартов, 1982. – 315 с.
2. Методические материалы по применению “Правил РД 50 – 213 – 80.” – М.: Казань: ВНИИФТРИ, 1983. – 112 с.
3. Смирнов А.Д., Антипов К.М. Справочная книжка энергетика. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 440 с.
4. Мухин В.С., Саков И.А. Приборы контроля и средства автоматизации тепловых процессов: Учеб. пособие для СПТУ. – М.: Высш. шк., 1988 – 256 с.
5. Лубенцова Е.В. Методические указания к выбору и расчету установки для измерения расхода среды по методу переменного перепада давления по дисциплинам «Автоматизация промышленных установок и технологических процессов», «Системы управления химико-технологическими процессами» для студентов всех форм обучения специальностей 180400 - «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»; 250200 – «Химия и химическая технология неорганических веществ». В 2-х ч. Ч. II. Невинномысск: Изд-во НТИ Сев-КавГТУ, 2005.

Приложение 1  
(справочное)

Показатель адиабаты газов при атмосферном давлении

Газ	Значение $\kappa$ при $t$ °С , равной							
	0	100	200	300	400	500	600	700
Воздух	1,40	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34
Кислород	1,40	1,39	1,37	1,36	1,34	1,33	1,32	1,32
Азот	1,40	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34
Водород	1,41	1,40	1,40	1,40	1,39	1,39	1,39	1,38
Окись углерода	1,40	1,40	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,34
Углекислый газ	1,31	1,26	1,24	1,22	1,20	1,20	1,19	1,18
Сернистый газ	1,27	1,24	1,22	1,21	1,20	1,19	1,19	1,18
Сероводород	1,33	1,32	1,29	1,28	1,26	1,25	1,24	1,23
Метан	1,32	1,27	1,23	1,20	1,17	1,16	1,14	1,13
Ацетилен	1,25	1,21	1,19	1,17	1,16	1,16	1,15	1,14
Этилен (этен)	1,26	1,19	1,16	1,14	1,12	1,11	1,10	1,10
Этан	1,20	1,15	1,12	1,11	1,09	1,08	1,08	1,07
Пропилен(пропен)	1,16	1,13	1,10	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06
Пропан	1,16	1,10	1,08	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05
Бутан	1,10	1,08	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04
Пентан	1,08	1,06	1,05	1,04	1,04	1,04	1,03	1,03
Гексан	1,06	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03
Гептан	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02	0,02
Октан	1,05	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02
Хлор	1,36	---	---	1,30	---	---	---	---
Аммиак	1,31	1,28	1,25	1,23	---	---	---	---

## Приложение 2

(справочное)

Коэффициенты сжимаемости индивидуальных газов, графики зависимости коэффициентов сжимаемости газов от давления и температуры.

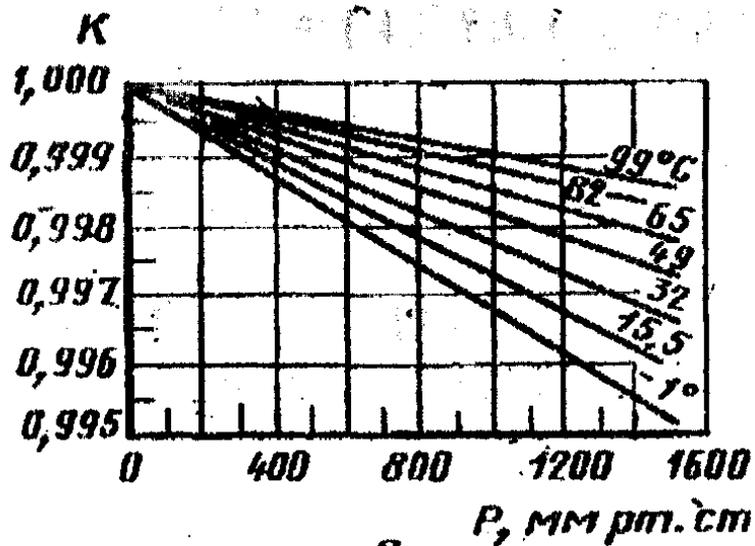


Рисунок 1 - Коэффициенты сжимаемости метана

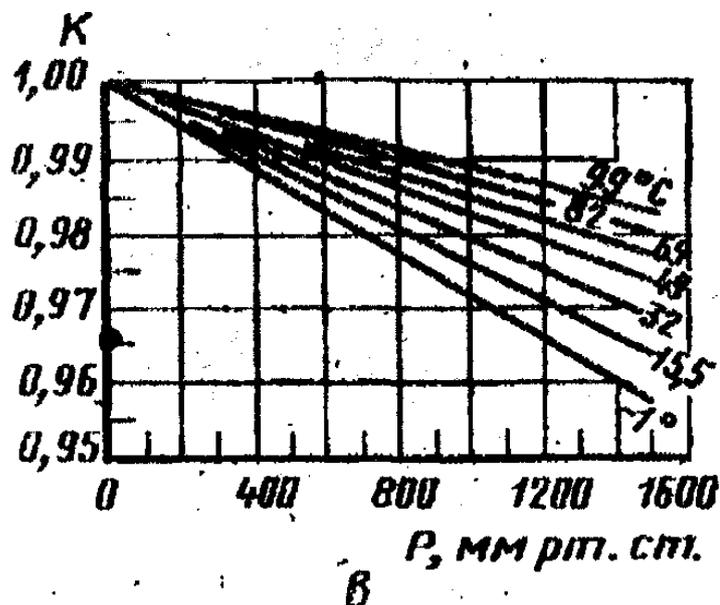


Рисунок 2 - Коэффициенты сжимаемости пропана

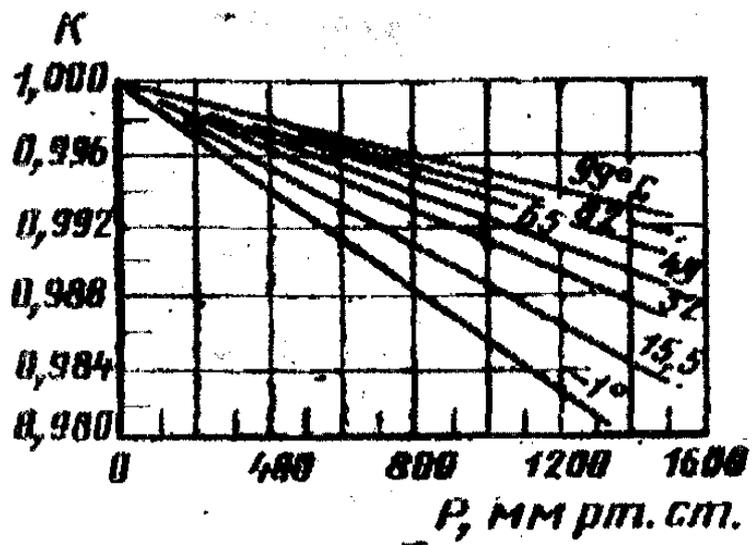


Рисунок 3 - Коэффициенты сжимаемости этана

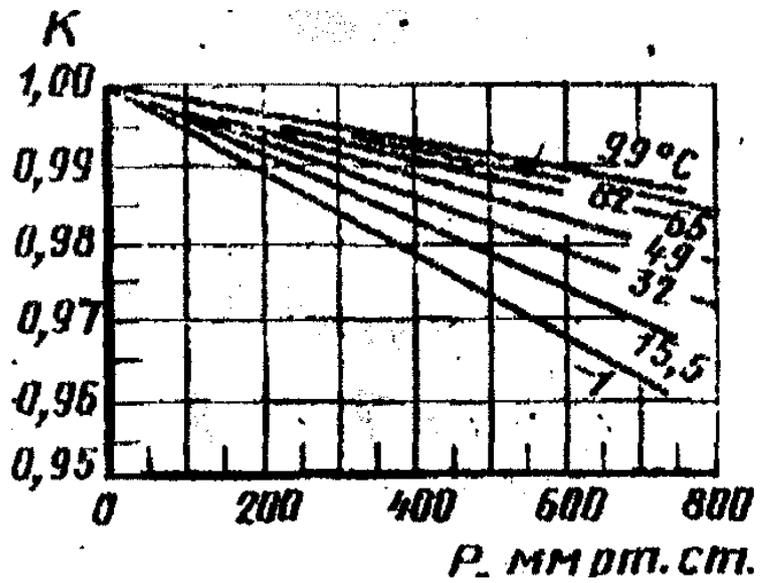


Рисунок 4 - Коэффициенты сжимаемости н-бутана

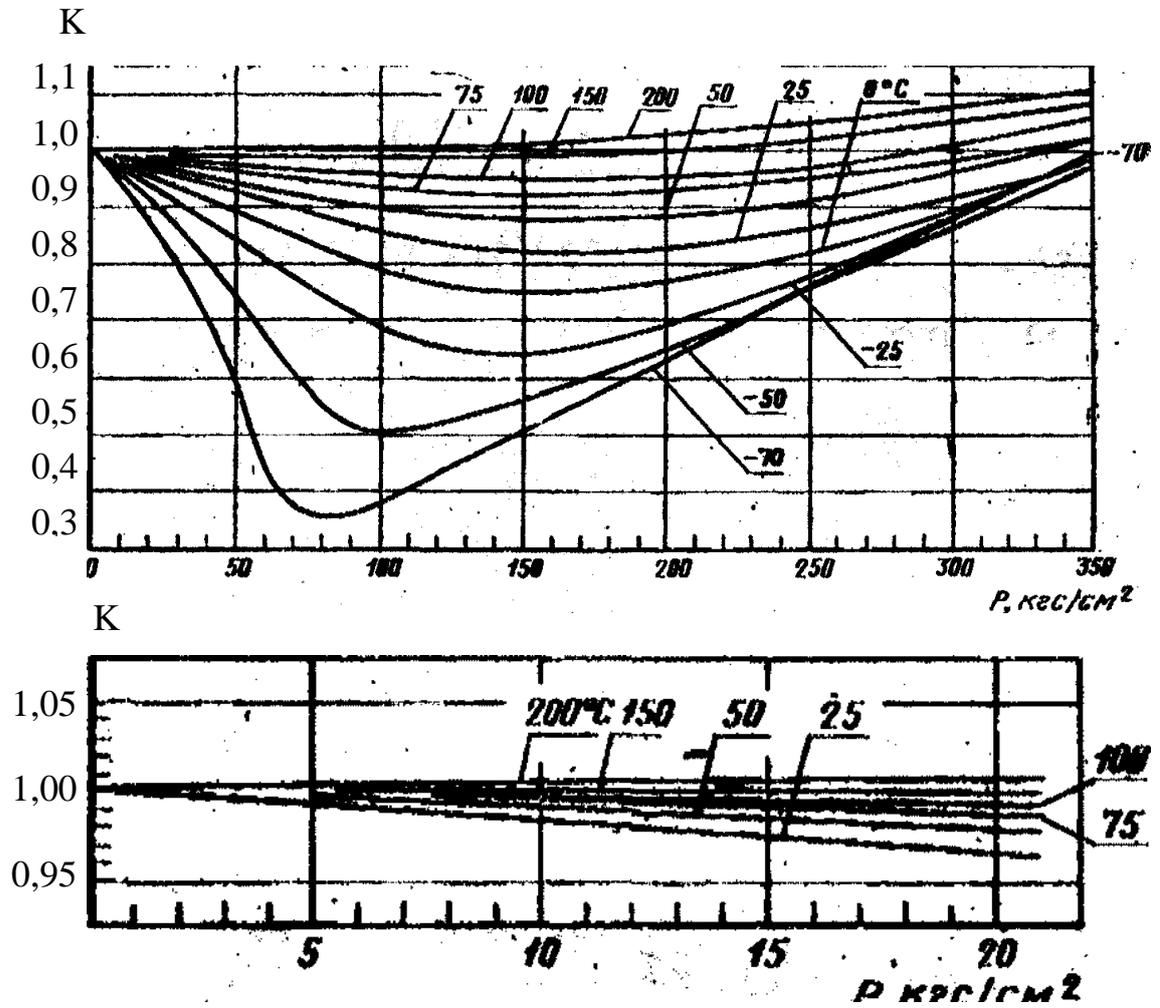


Рисунок 5 - Коэффициенты сжимаемости метана

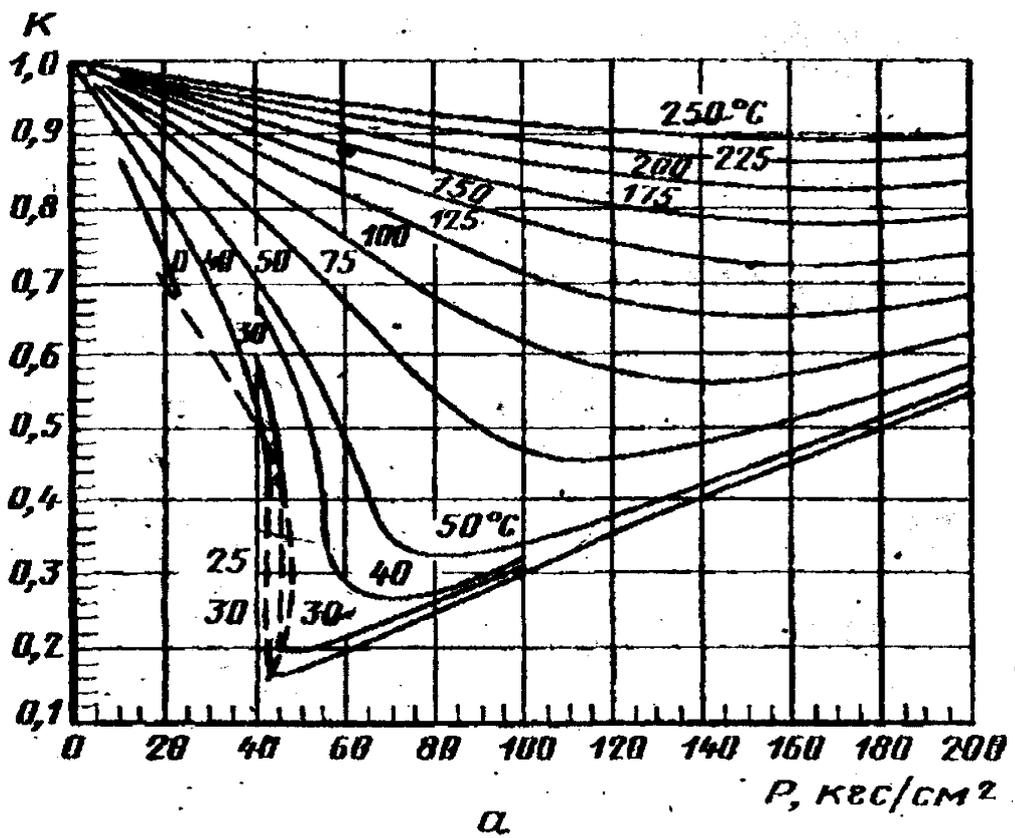


Рисунок 6- Коэффициенты сжимаемости этана

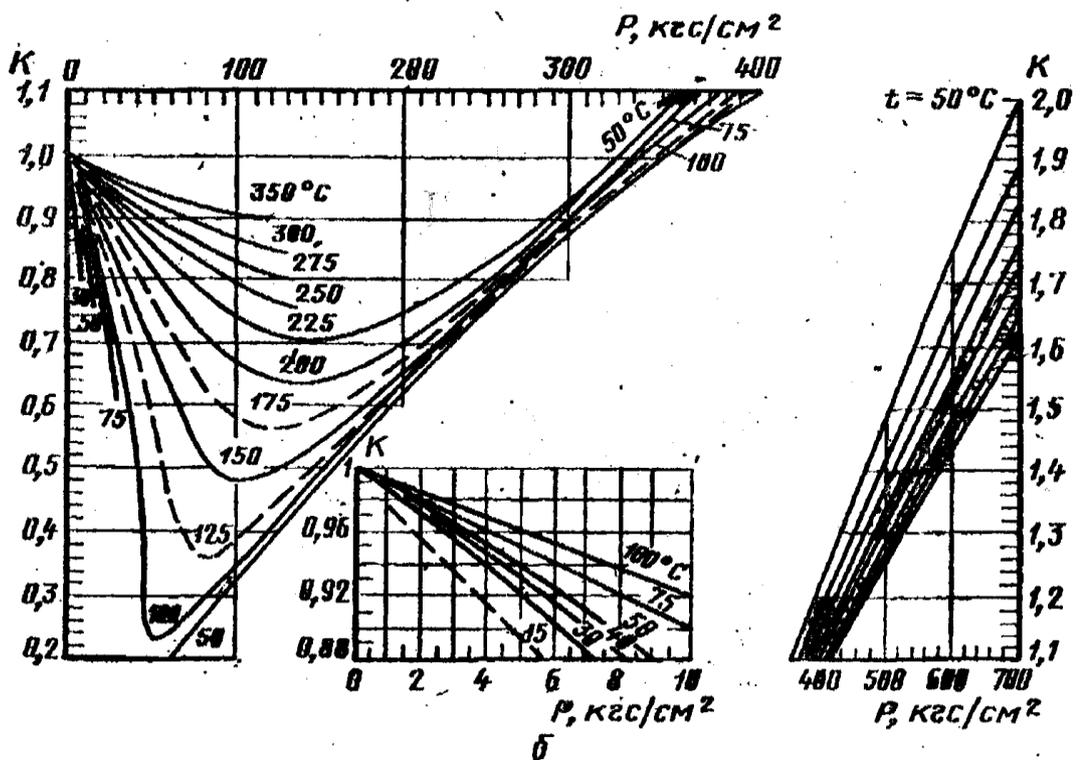


Рисунок 7 - Коэффициенты сжимаемости пропана

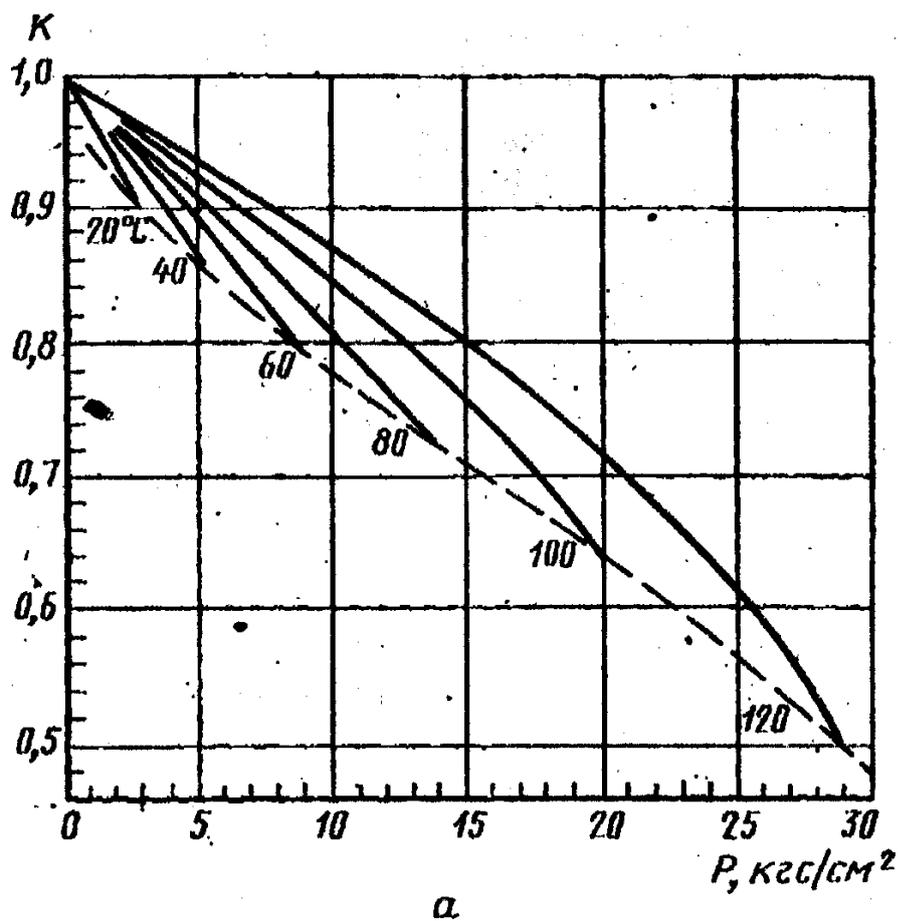


Рисунок 8 - Коэффициенты сжимаемости н-бутана

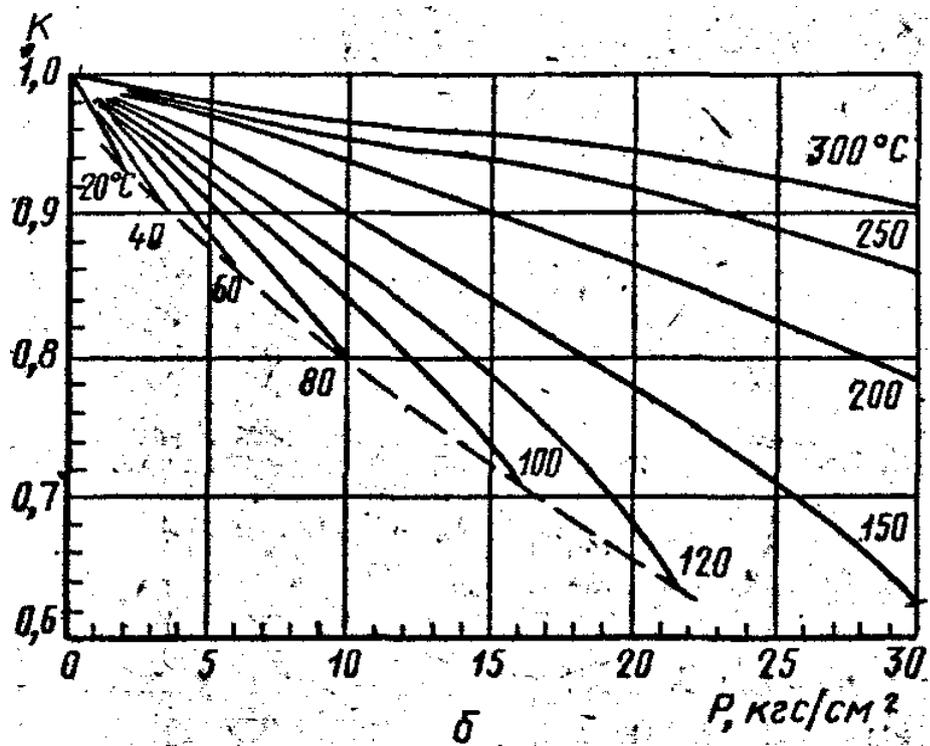


Рисунок 9 - Коэффициенты сжимаемости изобутана

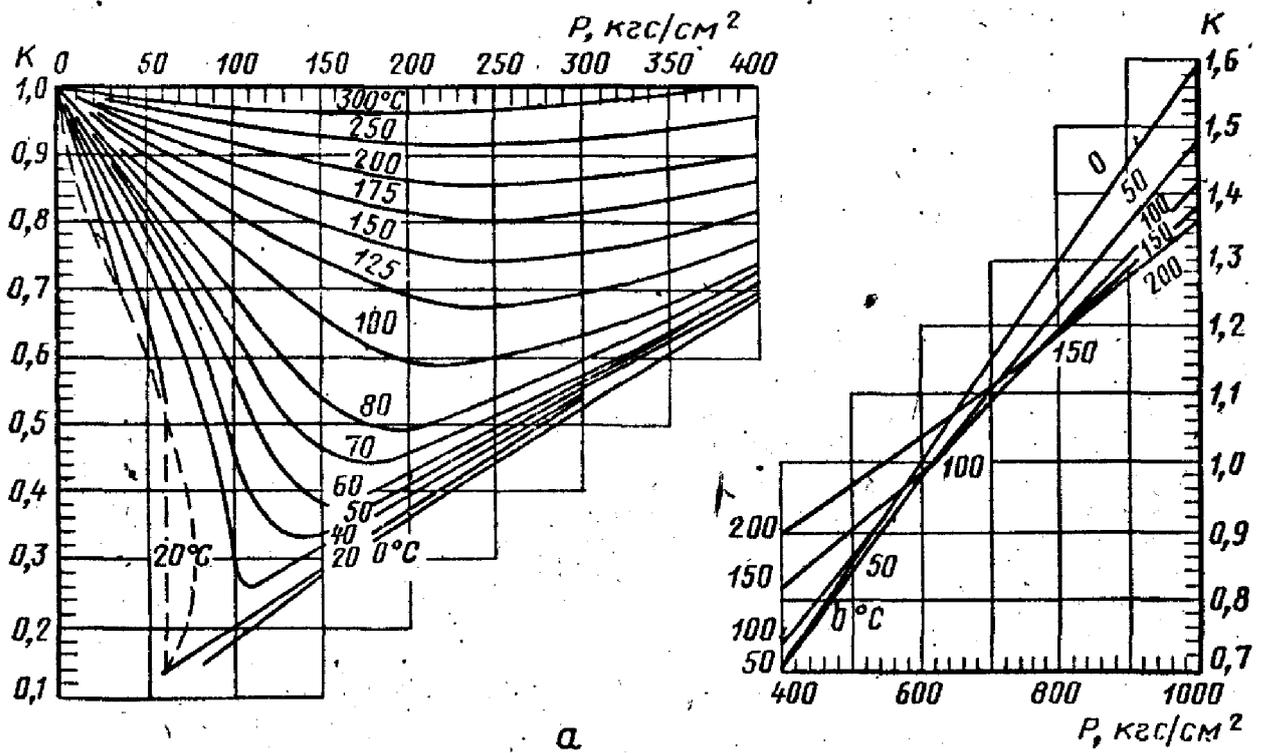


Рисунок 10- Коэффициенты сжимаемости двуокиси углерода

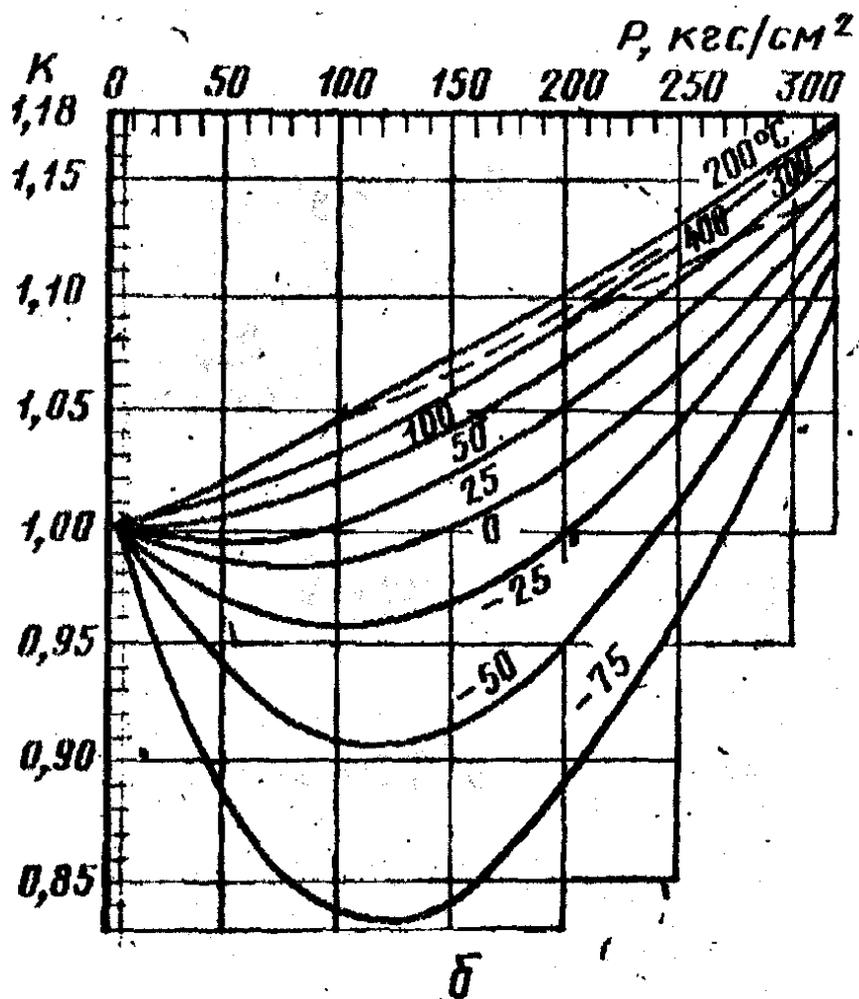


Рисунок 11- Коэффициенты сжимаемости азота

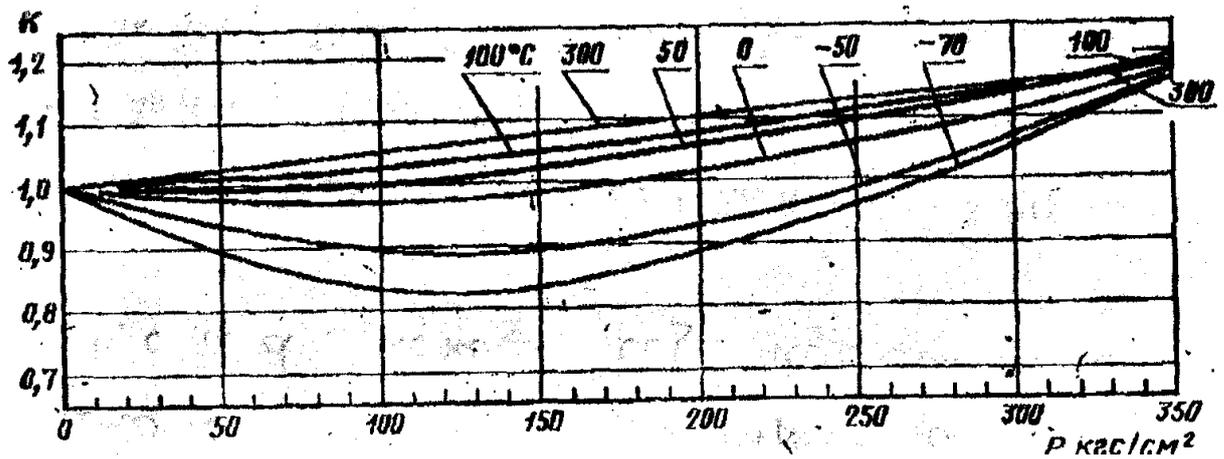


Рисунок 12 - Коэффициенты сжимаемости окиси углерода

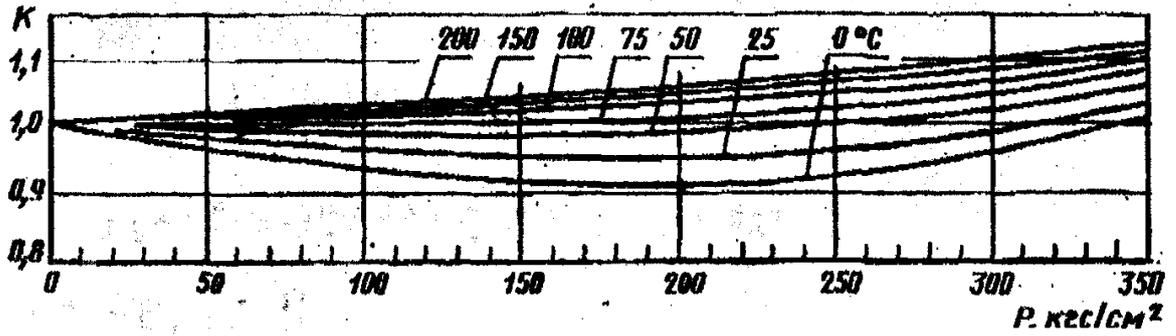
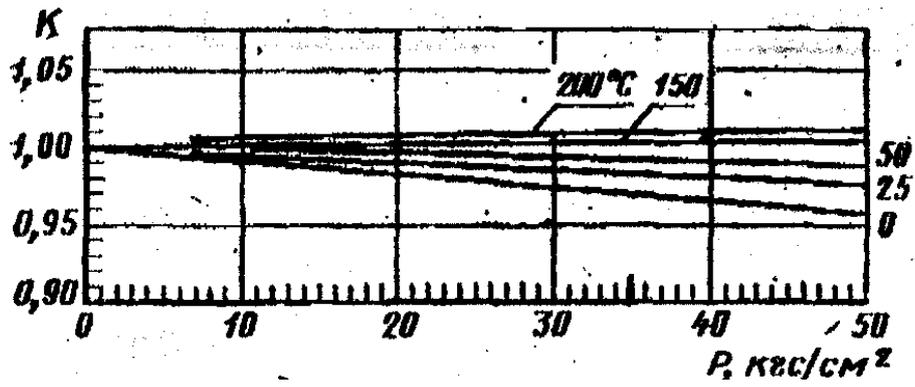


Рисунок 13 – Коэффициенты сжимаемости кислорода

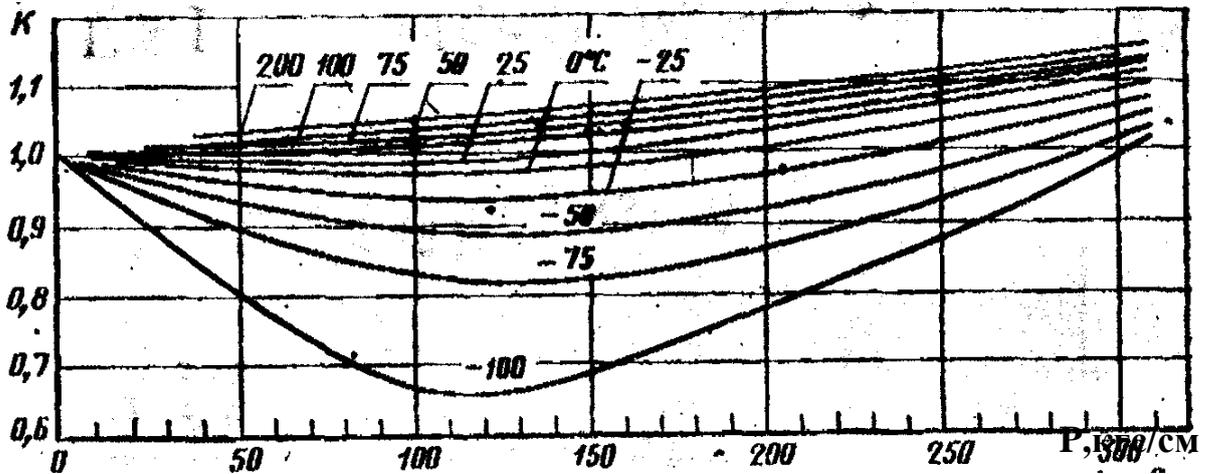
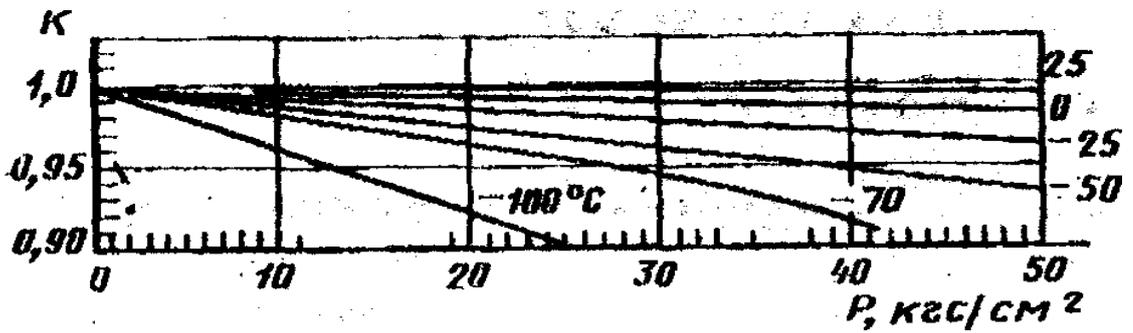


Рисунок 14- Коэффициенты сжимаемости воздуха

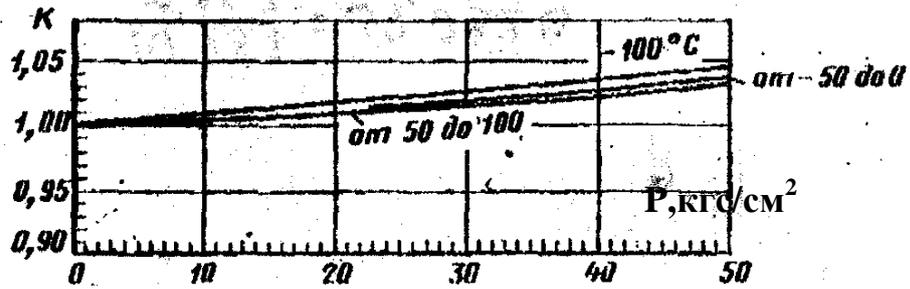
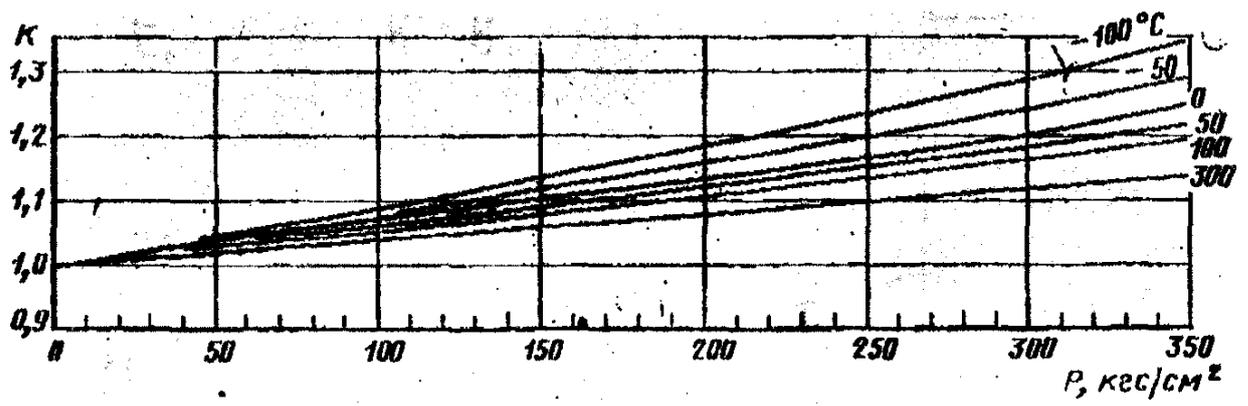


Рисунок 15 - Коэффициенты сжимаемости водорода

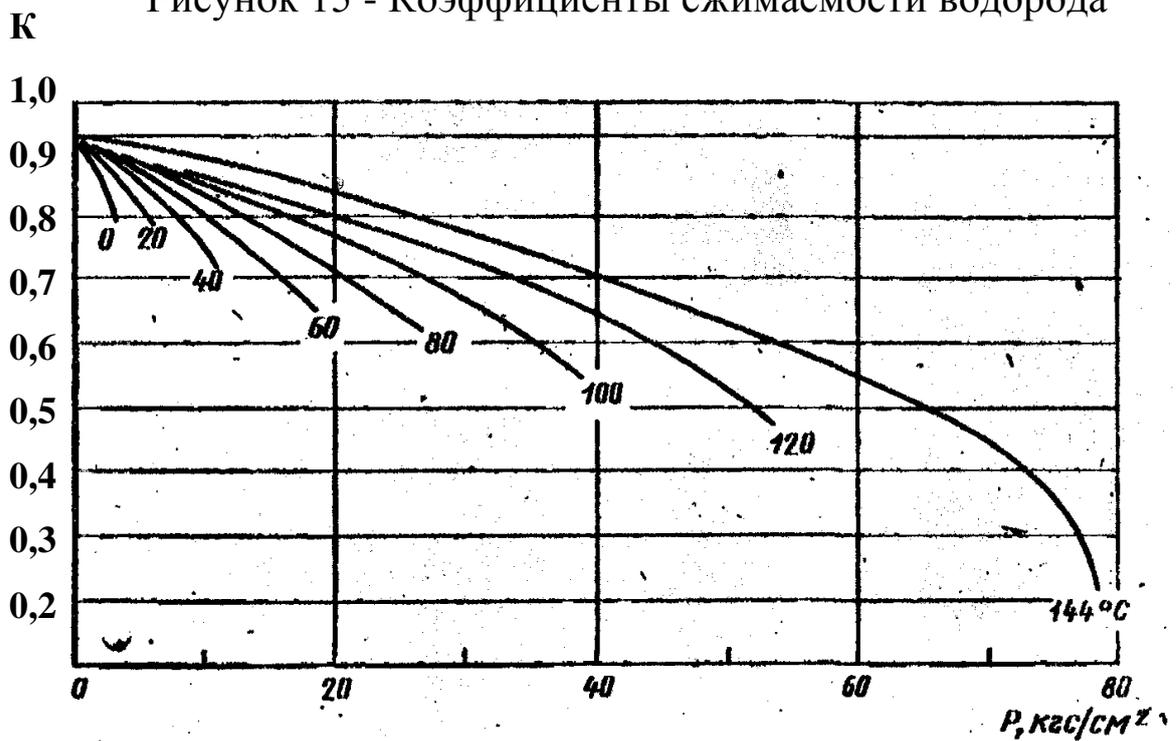


Рисунок 16 - Коэффициенты сжимаемости хлора

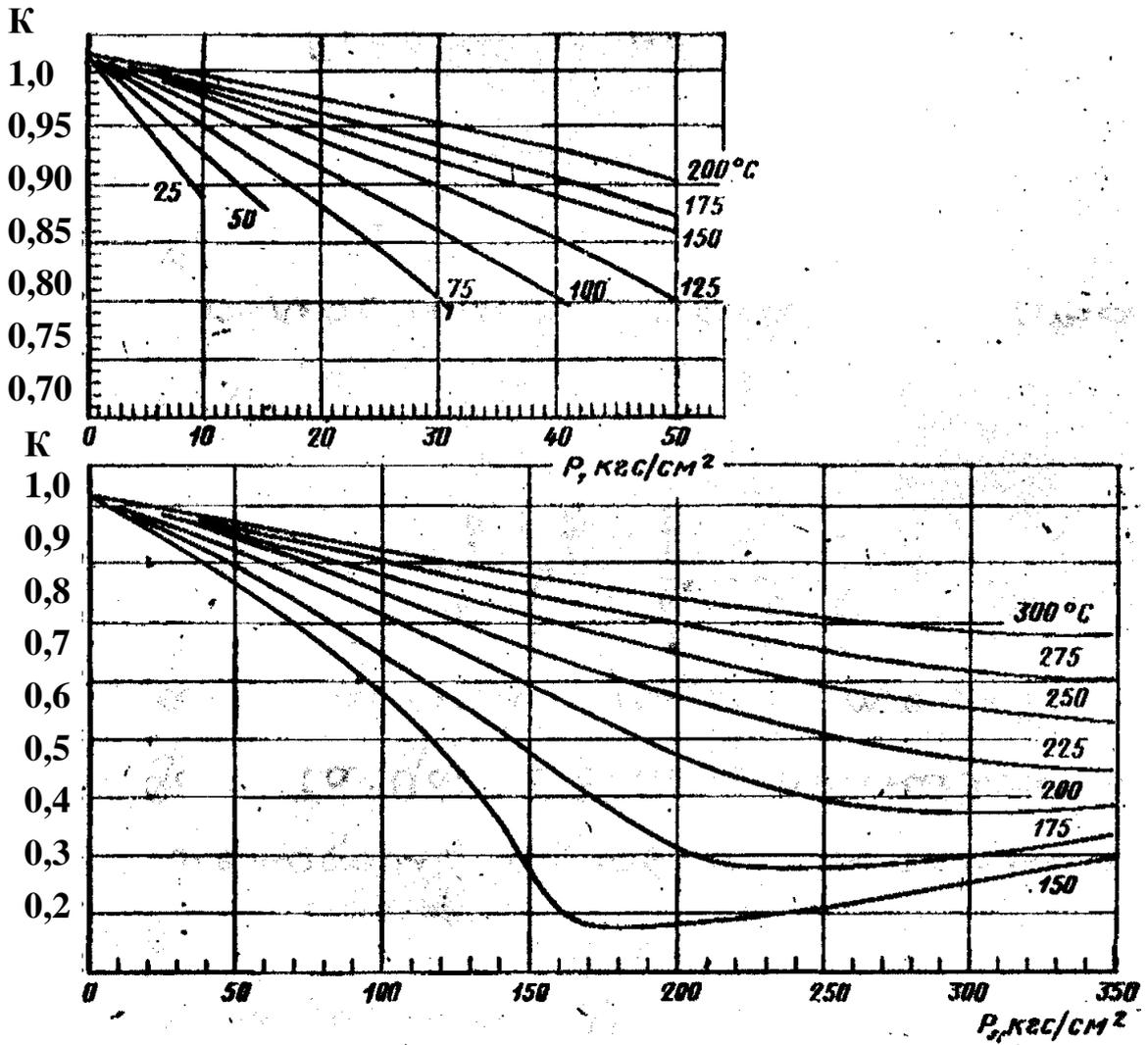


Рисунок 17- Коэффициенты сжимаемости аммиака

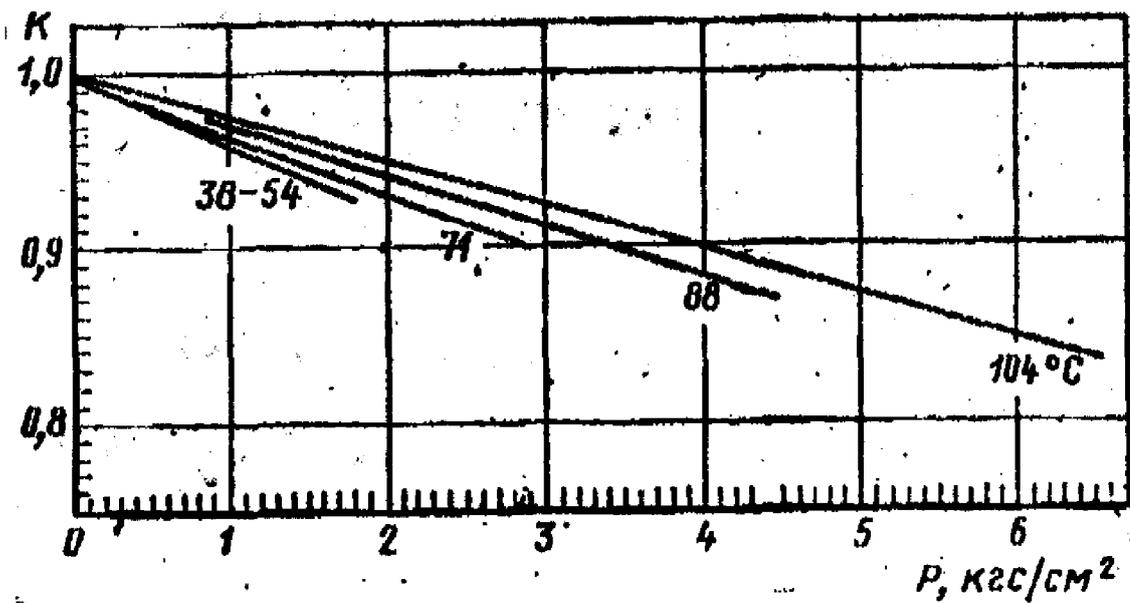
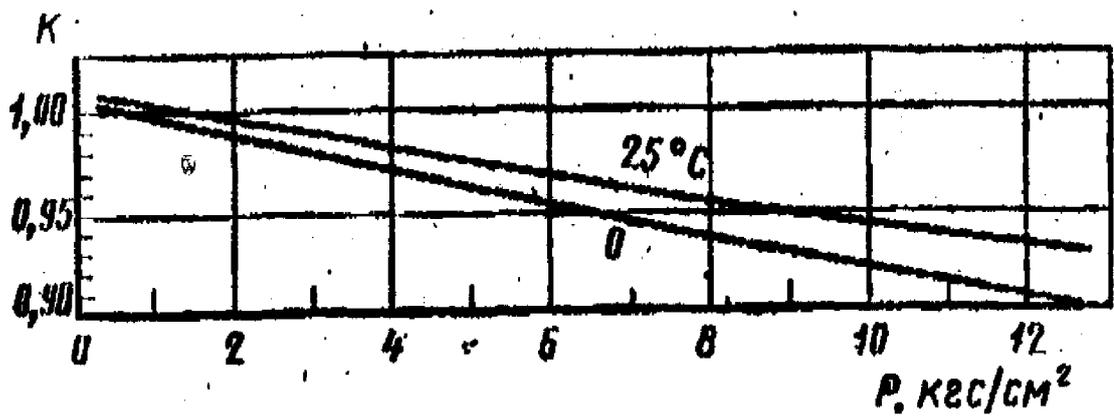


Рисунок 18- Коэффициенты сжимаемости ацетилена и пентана

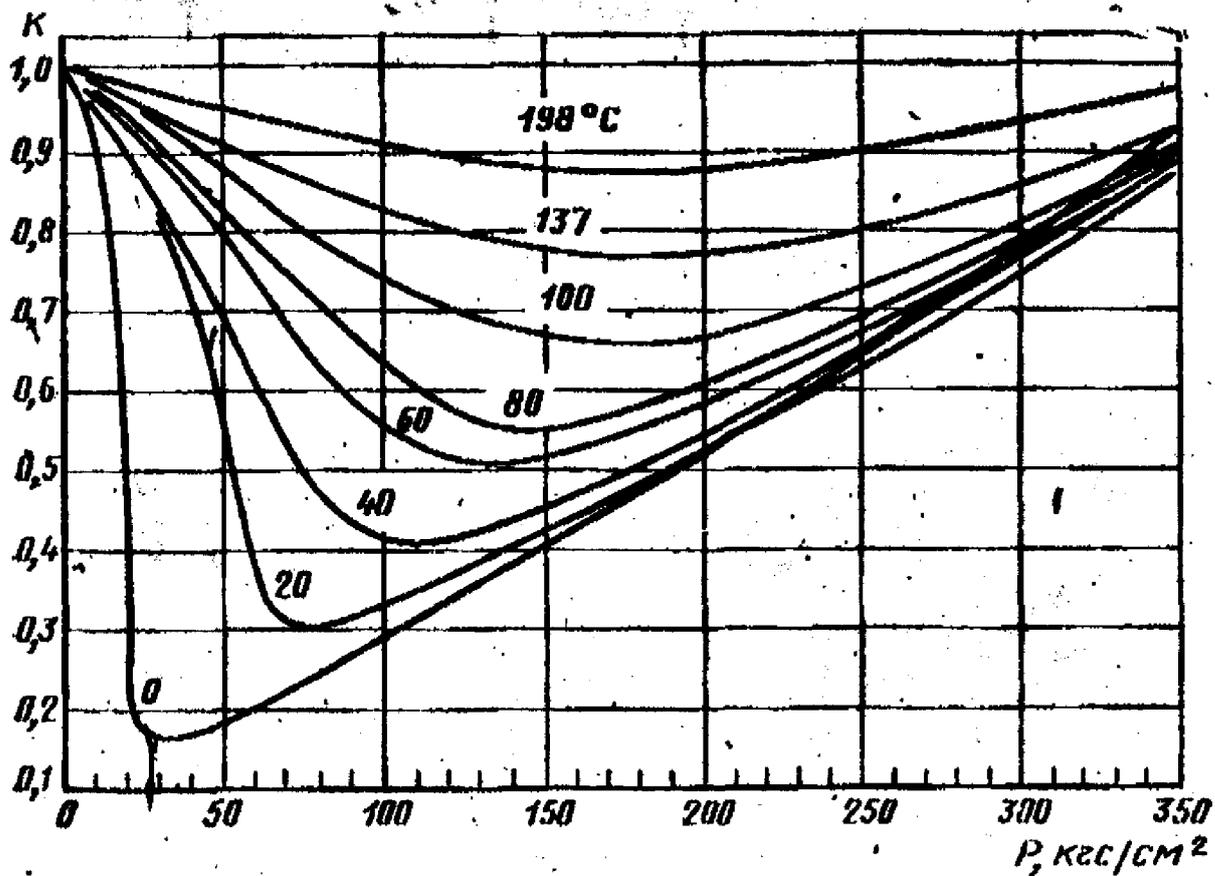


Рисунок 19- Коэффициенты сжимаемости этилена

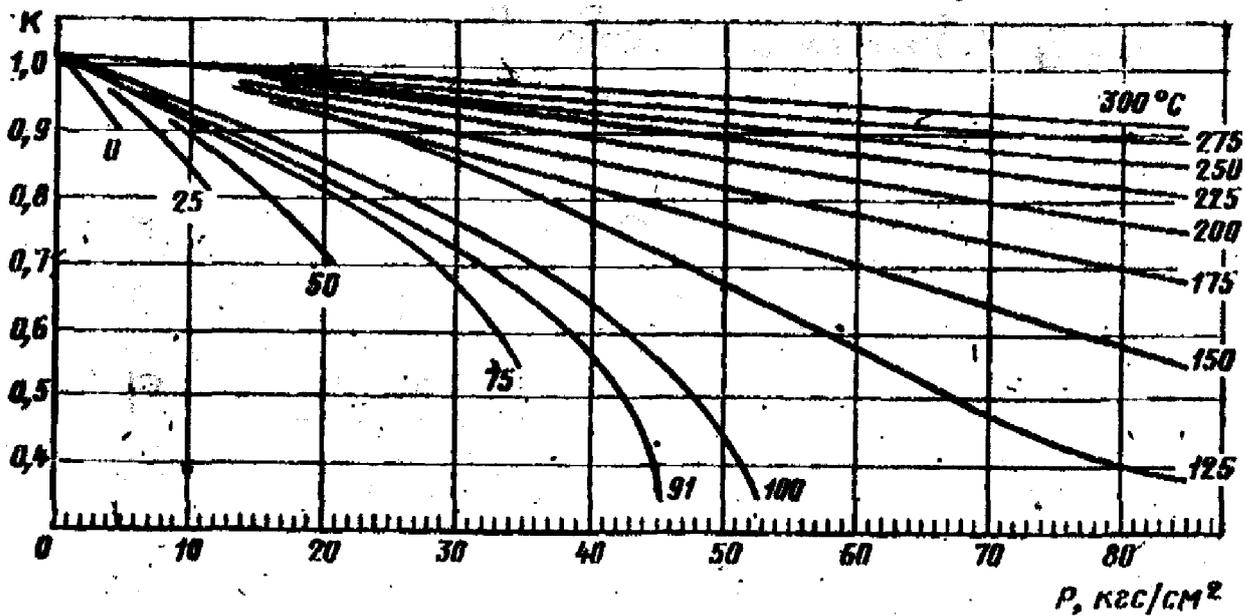


Рисунок 20 - Коэффициенты сжимаемости пропилена



### Приложение 3 (справочное)

#### Основные константы индивидуальных газов и жидкостей

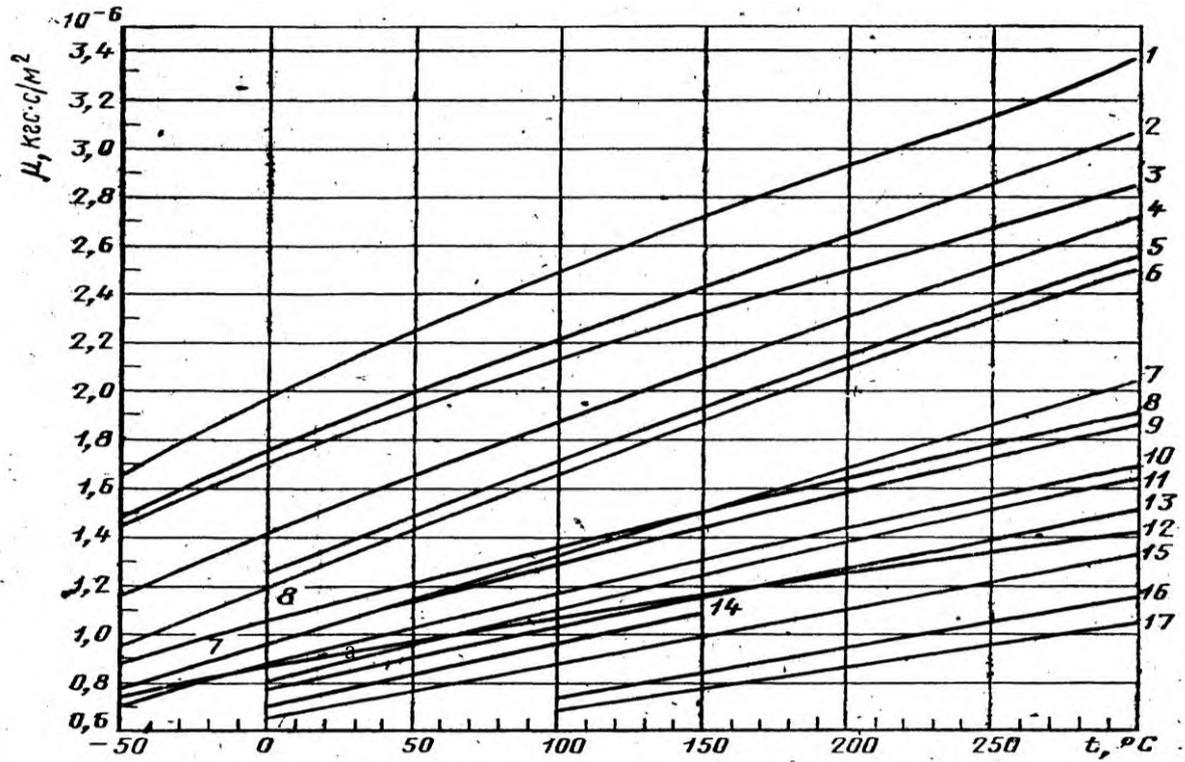
Вещество	Молекулярный вес, $M$	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		Коэффициент сжимаемости $K$ при 20 °С и 760 мм. рт.ст.	$R$ , кг*м/(кг*°С)	Теплоемкость при 0°С и 1атм, ккал/кг*°С		Температура кипения		Теплота сгорания (низшая и высшая) ккал/м <sup>3</sup> при 20 °С и 760 мм. рт. ст.		Вязкость при 20°С и атмосферном давлении $\mu$ *10 <sup>-6</sup> кгс/м <sup>2</sup>	Параметры потенциалов	
		при 0°С и 760 мм. рт.ст.	при 20°С и 760 мм. рт.ст.			$C_p$	$C_v$	°С	К				$Q_{гн}$	$Q_{гв}$
Метан	16,042	0,7172	0,6681	0,9980	52,95	0,5172	0,39361	-161,49	111,66	7980	8860	1,0484	140,0	03,808
Этан	30,068	1,3548	1,2600	0,9917	28,19	0,3934	0,3273	- 88,63	184,52	14300	15620	0,8720	236,0	4,384
Пропан	44,094	2,0090	1,8659	0,9821	19,23	0,3701	0,3252	- 42,07	231,08	20670	22450	0,7649	206,0	5,420
н - Бутан	58,120	2,7010	2,4947	0,9668	14,95	0,3802	0,3466	- 0,50	252,65	27290	29550	0,6956	208,0	5,869
изо - Бутан	58,120	2,6803	2,4911	0,9701	14,95	0,3802	0,3466	- 11,73	261,42	27180	29440	0,7027	217,0	5,819
н - Пентан	72,151	3,4531	3,1633	0,9436	11,75	0,3805	0,3533	36,07	309,22	34400	37180	0,6354	269,0	6,099
изо-Пентан	72,151	3,4531	3,1633	0,9483	11,75	0,3805	0,3533	27,85	301,00	34830	37650	0,6507	269,6	6,057
Гексан	86,178	3,7484	3,5849	0,9134	9,84	0,3827	0,3600	68,74	341,89	38540	41710	0,6119	423,0	5,916
Гептан	100,198	4,4731	4,1679	-	8,46	0,3846	0,3652	98,43	371,58	44630	48270	0,550	288,0	7,000
Октан	114,220	5,030	4,687	-	7,42	0,3856	-	125,66	398,82	51700	55600	0,503	333,0	7,407
Азот	28,016	1,2501	1,1889	0,1998	30,26	0,2482	0,1770	-195,80	77,35	-	-	1,6981	91,5	3,681
Водород	2,016	0,0898	0,0837	1,0008	420,63	3,3904	2,4045	-252,17	20,38	2400	2840	0,85	33,3	2,968
Воздух	28,960	1,2928	1,2046	0,9996	29,27	0,2397	0,1712	-193,0	80,15	-	-	1,7419	97,0	3,617
Водяной пар	18,016	0,8041	0,7496	-	47,06	0,4441	0,3469	-	373,15	-	-	0,9006	809,1	2,641
Кислород	32,000	1,4285	1,3311	0,9994	26,47	0,2185	0,1564	-182,98	90,17	-	-	1,9480	88,0	3,541
Серо-дород	34,082	1,5358	1,4311	0,9905	24,89	0,237	0,178	-60,34	212,81	5200	5640	1,2025	343,0	3,49

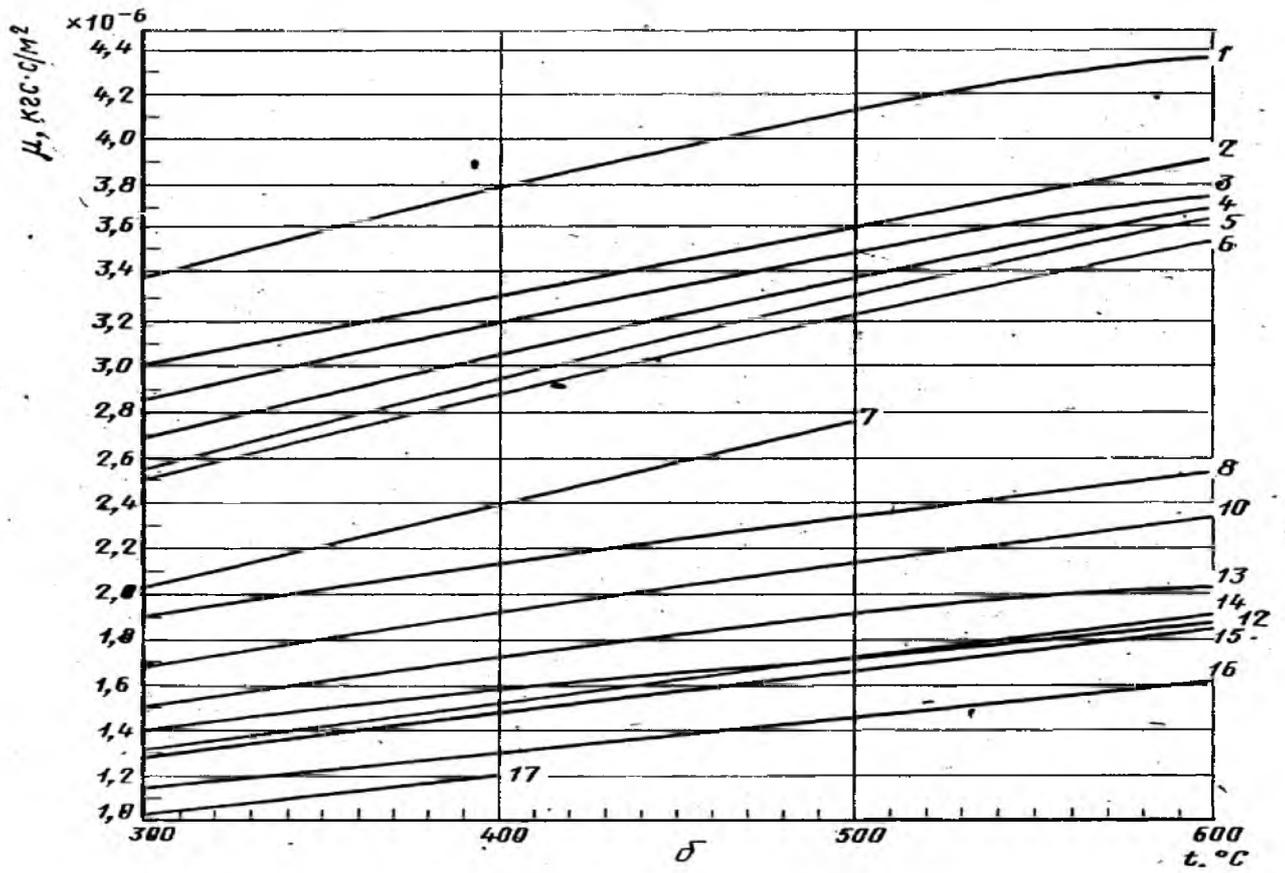
Продолжение приложения 3

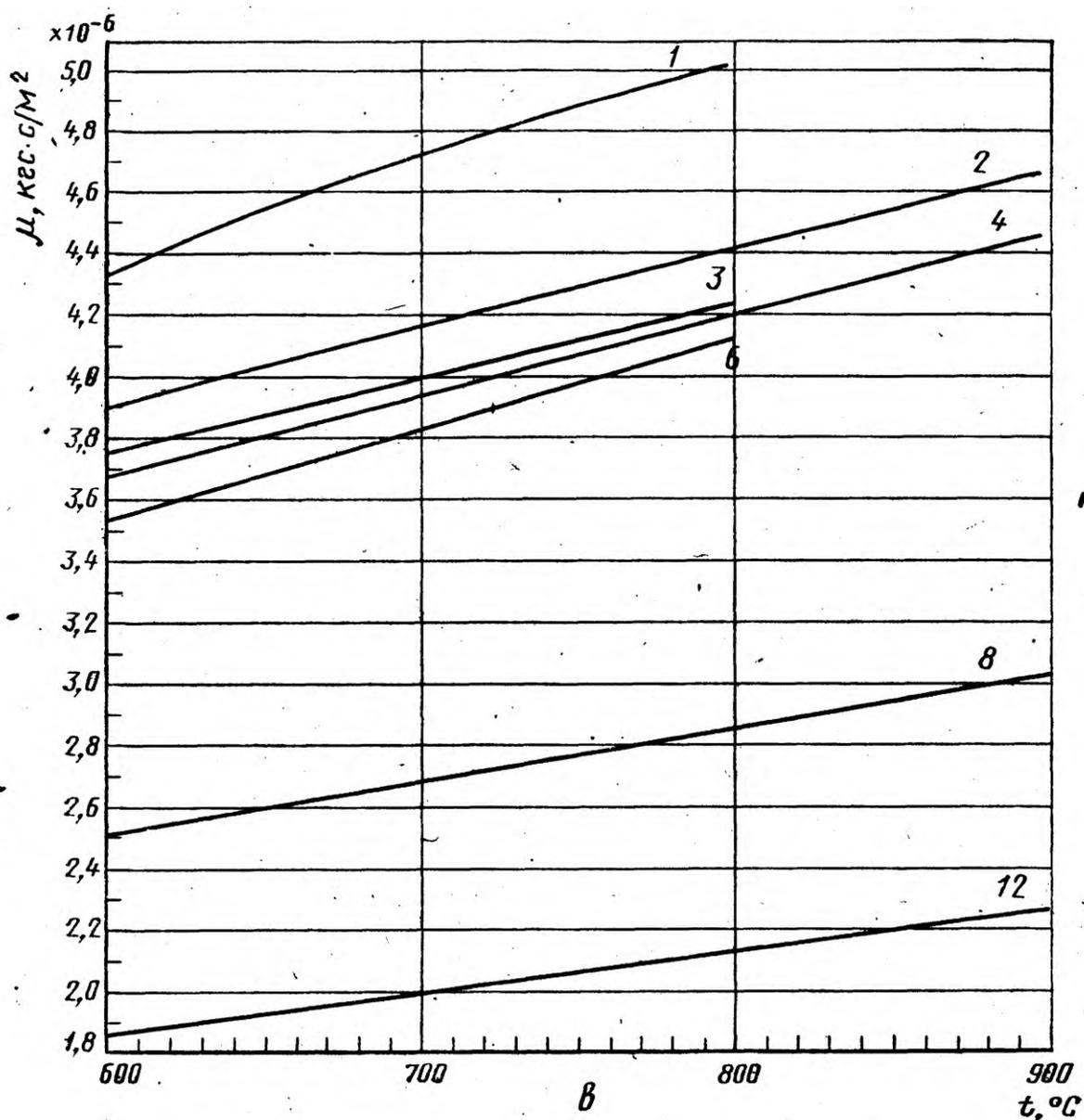
Вещество	Молекулярный вес, $M$	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		Коэффициент сжимаемости $K$ при 20 °С и 760 мм. рт.ст.	$R$ , кг*м/(кг*°С)	Теплоемкость при 0 °С и 1атм, ккал/кг*°С		Температура кипения		Теплота сгорания (низшая и высшая) ккал/м <sup>3</sup> при 20 °С и 760 мм. рт. ст.		Вязкость при 20 °С и атмосферном давлении $\mu^* 10^{-6}$ кгс/м <sup>2</sup>	Параметры потенциалов	
		при 0 °С и 760 мм. рт.ст.	при 20 °С и 760 мм. рт.ст.			$C_p$	$C_v$	°С	К				$\epsilon'/K$ , К	$\sigma_m$ , Å
Двуокись углерода	44,011	1,9767	1,8346	0,9945	19,27	0,1946	0,1496	-78,48	194,67	-	2314	1,3942	190,0	3,996
Окись углерода	28,011	1,250	1,165	0,9997	30,26	0,2483	0,1774	-191,45	81,70	-	3034	1,6951	110,0	3,590
Двуокись азота	46,006	2,055	1,915	-	-	-	-	-	-	-	-	-	220,0	3,879
Окись азота	30,01	1,340	1,249	-	-	0,2386	0,1724	-151,77	121,38	-	-	1,8358	119,0	3,470
Двуокись серы	64,06	2,947	2,727	-	13,15	0,145	0,114	-10,02	263,13	-	-	1,1804	347,0	4,04
Гелий	4,00	0,178	0,166	-	211,84	1,2430	0,75	-268,94	4,20	-	-	1,8970	10,8	2,57
Аргон	39,95	1,784	1,662	-	21,23	0,124	-	-185,86	87,29	-	-	2,1265	124,9	3,423
Криптон	83,80	3,74	-	-	10,23	0,0594	-	-153,34	119,81	-	-	2,3764	166,7	3,679
Фтор	38,00	1,695	-	-	-	-	-	-188,14	85,01	-	-	-	112,0	3,653
Хлор	70,91	3,233	3,012	-	-	-	-	-34,05	239,10	-	-	1,2698	357,0	4,117
Этилмеркаптан	62,13	0,840	-	-	-	-	-	34,70	307,86	-	-	-	447,6	4,644
Вода	18,02	1,0	998,2	-	-	1,0074	-	100,00	373,15	-	-	102,4	775,0	2,52
Ртуть	200,59	13595,5	13546,3	-	-	0,0335	-	356,95	630,10	-	-	157,0	851,0	2,898

Приложение 4  
(справочное)

Коэффициент динамической вязкости газов при нормальном давлении





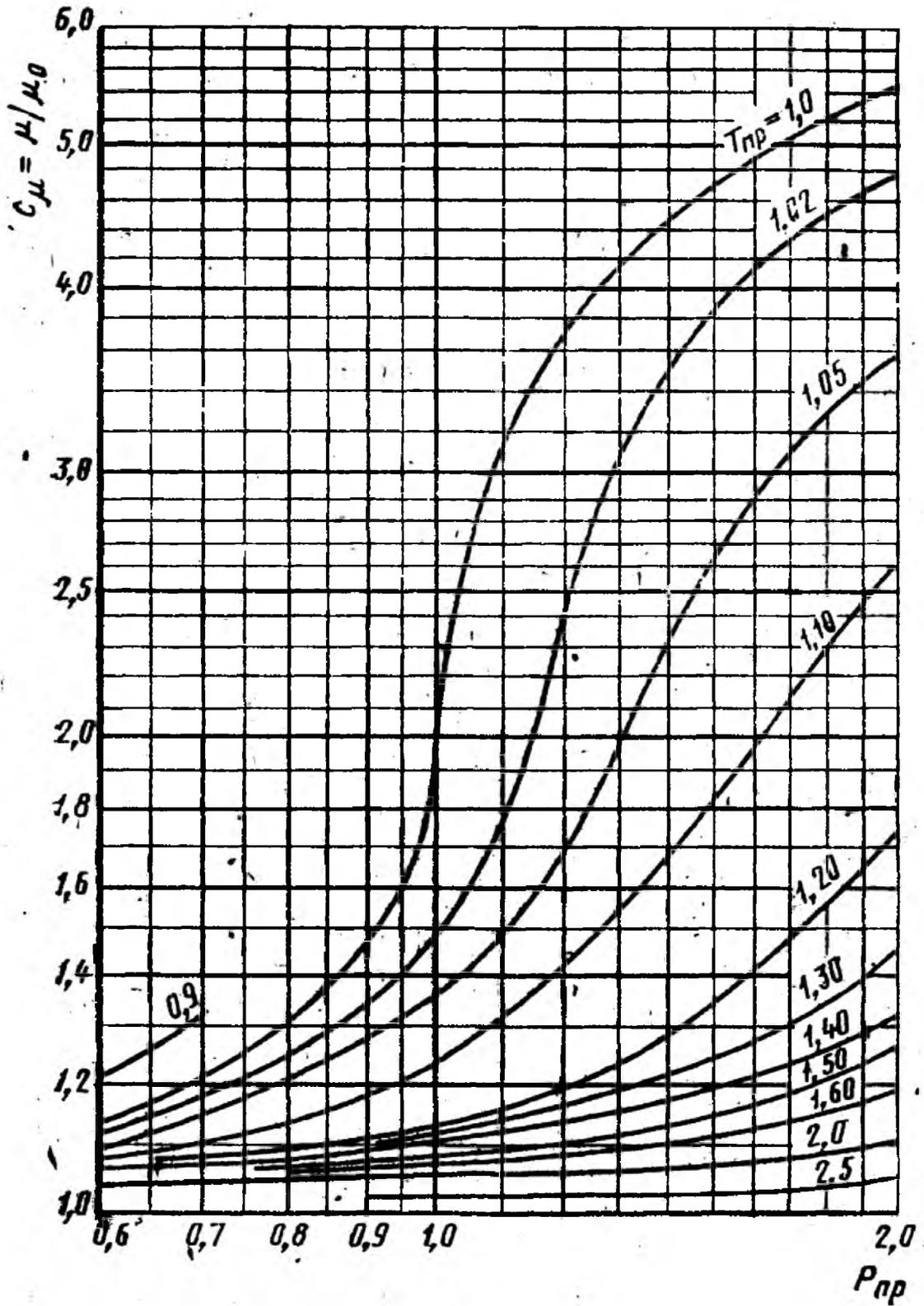


Графики зависимости коэффициента динамической вязкости от температуры в диапазоне температур: а – от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ ; б - от  $300^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ ; в - от  $600^{\circ}\text{C}$  до  $900^{\circ}\text{C}$ ; 1-кислорода; 2-воздуха; 3-азота, окиси углерода (от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ ); 4 - углекислого газа; 5 – хлора; 6 - сернистого газа, сероводорода; 7 - аммиака, ацетилена (от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ), этилена (от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ); 8 - метана, этилена (от  $300^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$ ); 9 - ацетилена (от  $50^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ), этилена (от  $50^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ ); 10 - этана; 11 - пропилена; 12 - водорода; 13 - пропана; 14 - н-бутана, изо-бутана; 15 - н-гексана, изопентана; (от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$ ), н-пентана; 16 – н-гексана; 17 - н-октана

## Приложение 5

(справочное)

Поправочный множитель  $S_\mu$  для вычисления вязкости газов



Приложение 6  
(справочное)

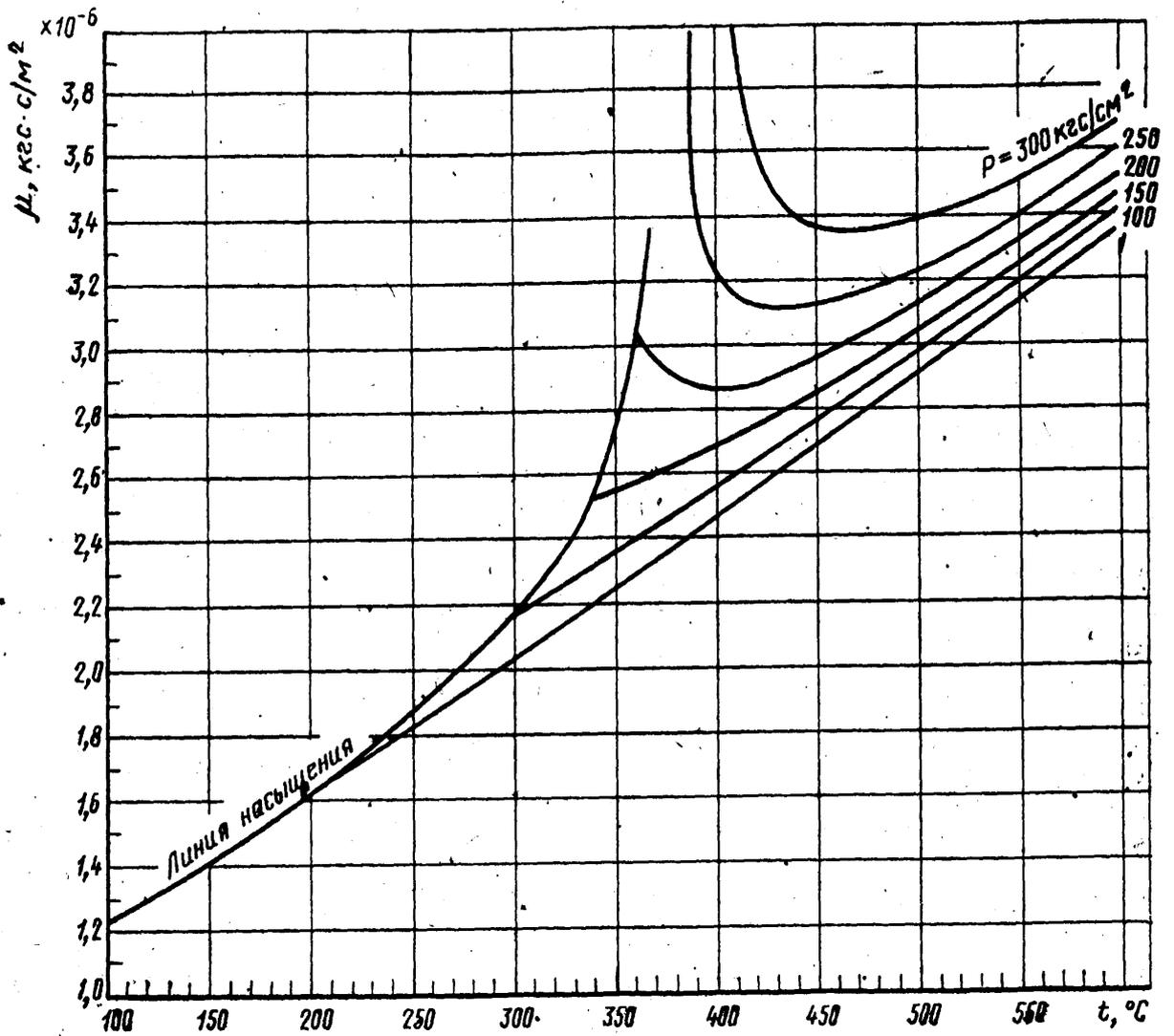
Основные критические параметры индивидуальных газов и веществ

Газ, вещество	Химическая формула	$P_k$ , кгс/см <sup>2</sup>	$T_k$ , К	$V_k$ , см <sup>3</sup> /г·моль	$K_k$	$\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu_k \cdot 10^3$ , кг·с/м <sup>2</sup>
Метан	CH <sub>4</sub>	47,32	190,66	99,5	0,290	162	0,1427
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	49,80	305,46	148	0,285	203	0,2039
Пропан	C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>	43,39	369,90	200	0,277	220	0,2417
н-Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	38,74	425,20	255	0,274	228	0,2498
изо-Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	37,19	408,10	263	0,283	221	0,2753
н-Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	34,40	469,50	311	0,269	232	0,2600
изо-Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	34,59	460,40	310	0,270	236	0,2657
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	30,89	507,30	368	0,264	234	0,2692
Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	27,90	540,30	426	0,352	235	0,2784
Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	25,42	568,60	486	0,256	235	0,2876
Азот	N <sub>2</sub>	34,61	126,20	90,1	0,291	311	0,1846
Водород	H <sub>2</sub>	13,22	33,26	65	0,304	30,7	0,0305
Воздух		38,43	132,46	86,5		335	0,1989
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	225,55	647,30	57	0,234	316	0,3896
Кислород	O <sub>2</sub>	51,76	154,80	74,4	0,292	430	0,2519
Сероводород	H <sub>2</sub> S	91,85	373,60	95	0,268	359	0,3250
Двуокись углерода	CO <sub>2</sub>	75,32	304,26	94	0,274	468	0,3335
Окись углерода	CO	35,64	132,96	93,1	0,294	301	0,1872
Двуокись азота	NO <sub>2</sub>	103,32	431,00	82	0,232	561	-
Окись азота	NO	68,85	180,30	58	0,260	520	0,2766
Двуокись серы	SO <sub>2</sub>	80,28	430,70	122	0,268	525	0,3978
Гелий	He	2,3	5,26	57,8	0,300	69,2	0,0246
Аргон	Ar	49,59	150,76	75,2	0,290	531	0,2917
Криптон	Kr	56,10	209,40	92,2	0,291	908,0	0,4376
Фтор	F <sub>2</sub>	56,83	144,00	-	0,292	630,0	-
Хлор	Cl <sub>2</sub>	78,63	417,20	124	0,276	573,0	0,4160
Этилмеркаптан	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> SH	56,00	499,10	207	0,274	-	-
Вода	H <sub>2</sub> O	233,04	647,40	56	0,228	325	-
Ртуть	Hg	1188,18	1750,00	-	-	-	-

# Приложение 7

(справочное)

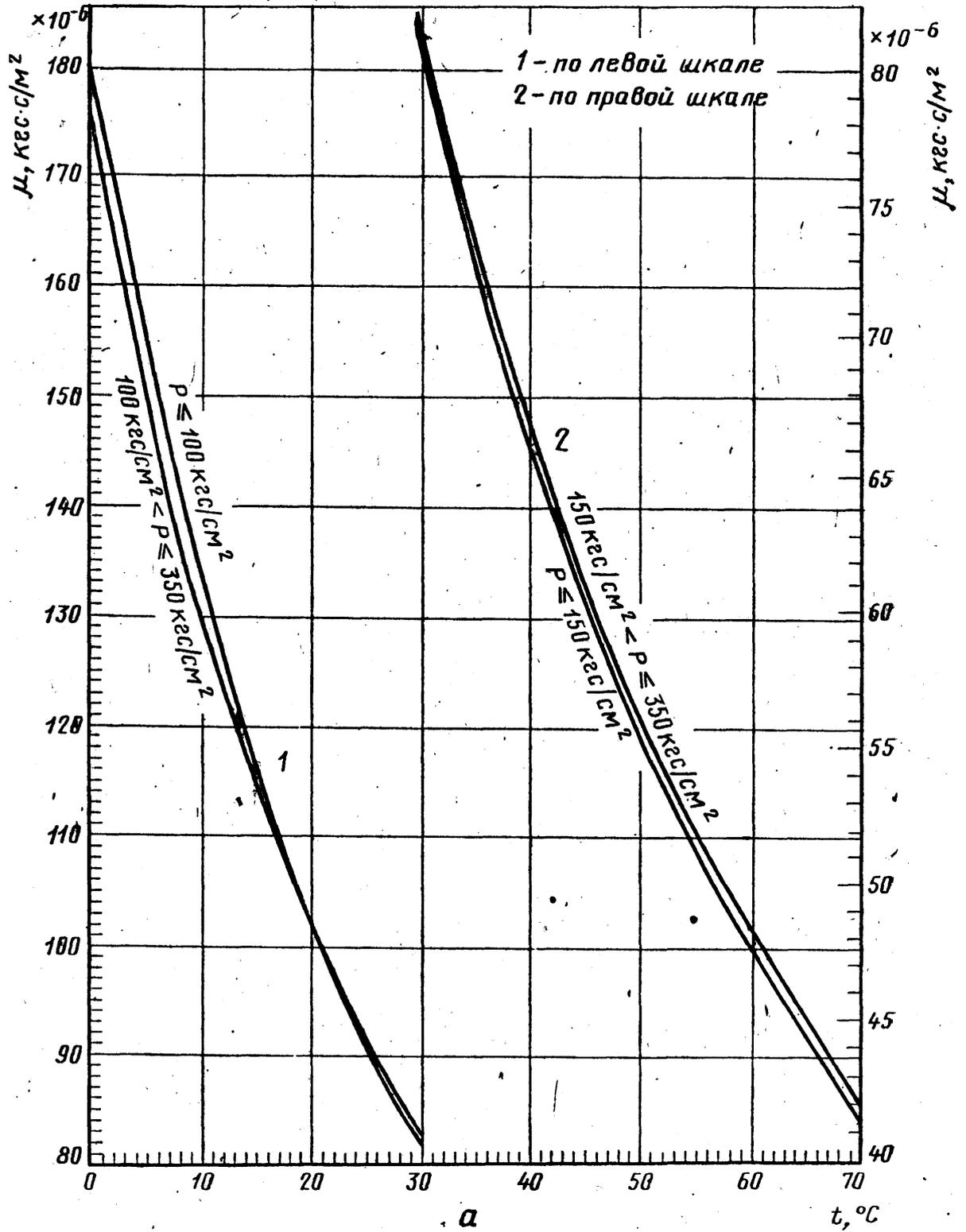
## Динамическая вязкость водяного пара

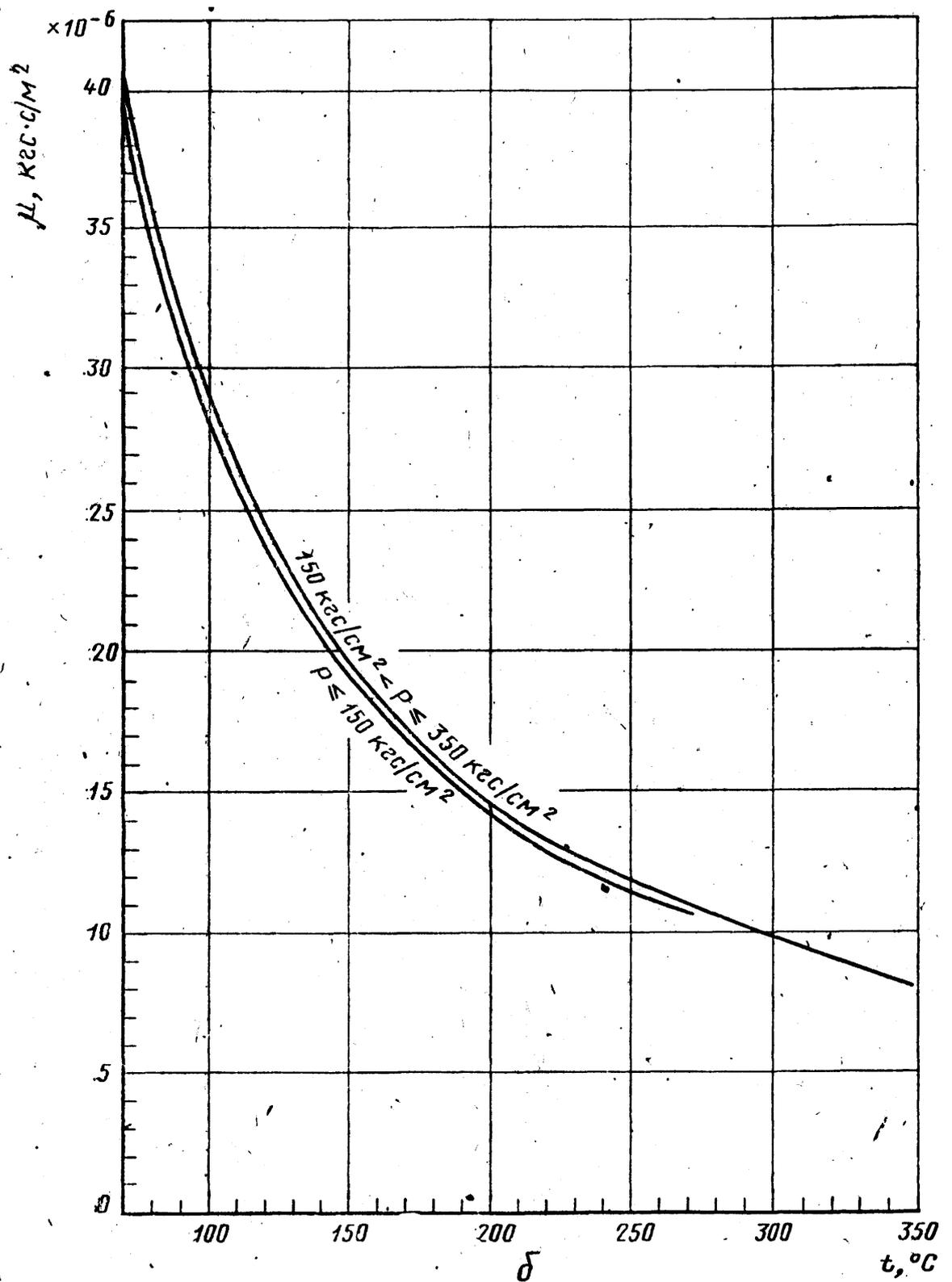


# Приложение 8

(справочное)

## Динамическая вязкость воды





Графики зависимости динамической вязкости от температуры и давления: а—в диапазоне температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $70^{\circ}\text{C}$  (1 — по левой шкале; 2—по правой шкале); б—в диапазоне температур от  $70^{\circ}\text{C}$  до  $350^{\circ}\text{C}$ .

## Приложение 9

(справочное)

### Скорость движения среды в трубопроводах

Трубопровод	Скорость, м/с
Паропроводы свежего пара от котлов к турбинам: сверхвысокого и в.д. повышенного, среднего и н.д.	40 – 50 60 – 70
Паропроводы промежуточного перегрева: горячего холодного	40 – 50 35 – 45
Прочие паропроводы: н.д. насыщенного пара подводов пара к РОУ и БРОУ*	40 – 70 20 – 40 60 – 90
Водопроводы, работающие под действием насосов: питательные трубопроводы котлов конденсатопроводы, вспомогательные трубопроводы (сырой, химически очищенной, технической и смывной воды) всасывающие к насосам всех назначений свободного слива, перелива и т.п.	2,5 – 4 2 – 3 0,6 – 1,5 1 – 2
Магистральные газопроводы	60 – 80
Отводы к паровым котлам	40 – 60
Трубопровод сжатого воздуха и других газов	10 – 20
Трубопроводы вязких веществ (масло, мазут и пр.)	1 – 2
*РОУ – редуционно-охлаждающая установка; БРОУ – то же быстродействующая.	

## Приложение 10

(справочное)

Таблица 1 - Значения  $K_t^2$  для стали 1Х8Н10Т при  $\beta_t=0,165 \cdot 10^{-7}$

4

Диапазон температур t, °С	$K_t^2$
-(30,0 – 27,0)	0,9984
-(23,9 – 20,9)	0,9986
-(17,8 – 14,9)	0,9988
-(11,8 – 8,9)	0,9990
-(5,7 – 2,8)	0,9992
-(0,3 – 3,3)	0,9994
-(6,5 – 9,3)	0,9996
12,5 – 15,3	0,9998
18,5 – 21,5	1,0000
24,7 – 27,5	1,0002
30,7 – 33,5	1,0004
36,7 – 39,7	1,0006
42,9 – 45,7	1,0008
48,9 – 51,8	1,0010
54,9 – 57,9	1,0012
60,9 – 63,9	1,0014
67,0 – 69,9	1,0016
73,0 – 76,0	1,0018
79,1 – 80,0	1,0020

Таблица 2 - Значения  $K_t^2$  для стали ОХ13 при  $\beta_t=0,10 \cdot 10^{-4}$

Диапазон температур t, °С	$K_t^2$
-(30,0 – 27,0)	0,9990
-(22,5 – 17,5)	0,9992
-(12,5 – 7,5)	0,9994
7,5 – 12,5	0,9998
17,5 – 22,5	1,0000
27,5 – 32,5	1,0002
37,5 – 42,5	1,0004
47,5 – 52,5	1,0006
57,5 – 62,5	1,0008
67,5 – 72,5	1,0010
77,5 – 80,0	1,0012

Таблица 3 - Значения  $K_t^2$  для стали 1Х17Т при  $\beta_t=0,105 \cdot 10^{-4}$

Диапазон температур t, °С	$K_t^2$
-(30,0 – 25,2)	0,9990
-(20,2 – 15,7)	0,9992
-(10,9 – 6,2)	0,9994
-(1,4 – 3,3)	0,9996
8,1 – 12,9	0,9998
17,7 – 22,4	1,0000
27,1 – 31,9	1,0002
36,7 – 41,4	1,0004
46,2 – 50,9	1,0006
55,7 – 60,5	1,0008
65,3 – 70,0	1,0010
74,8 – 79,5	1,0012
79,6 – 80,0	1,0014

## Приложение 11

(справочное)

Необходимые длины прямых участков трубопроводов между сужающими устройствами и местными сопротивлениями.

Рисунки местных сопротивлений и их расположения относительно сужающего устройства, графики и таблицы для выбора необходимых длин прямых участков трубопроводов и погрешностей  $\delta_{aL}$

На рисунке 1 показано взаимное расположение сужающего устройства и местного сопротивления.

На рисунке 2 приведен график зависимости  $L_2/D$  от  $m$  при взаимном расположении сужающего устройства и местного сопротивления, показанном на рисунке 1.

На рисунке 3 показано взаимное расположение сужающих устройств.

На рисунке 4 представлены графики зависимости  $L_3/D$  от  $m$ : для диафрагм (1) и для сопел при их взаимном расположении (2), показанном на рисунке 3.

На рисунке 5 показаны группы колен в разных плоскостях или смешивающиеся потоки.

На рисунке 6 показана группа колен в одной плоскости или разветвляющиеся потоки.

На рисунке 7 показан симметричный вход в трубу после емкости (форкамеры).

На рисунке 8 показана прокладка, резко выступающая внутрь трубопровода ( $D_1/D_{20} \approx 0,6$ ).

На рисунке 9 показано внезапное расширение потока (при  $D_1/D_{20} \geq 0,6$ )

На рисунке 10 показано расширение потока при конусности  $K=(D_{20}-d): l$  от 1:2 до 1:4.

На рисунке 11 показано расширение потока при конусности  $K=(D_{20}-d): l$  от 1:1,5 до 1:3.

На рисунке 12 показаны колена или тройник.

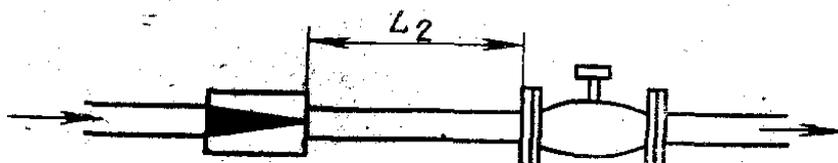


Рисунок 1.

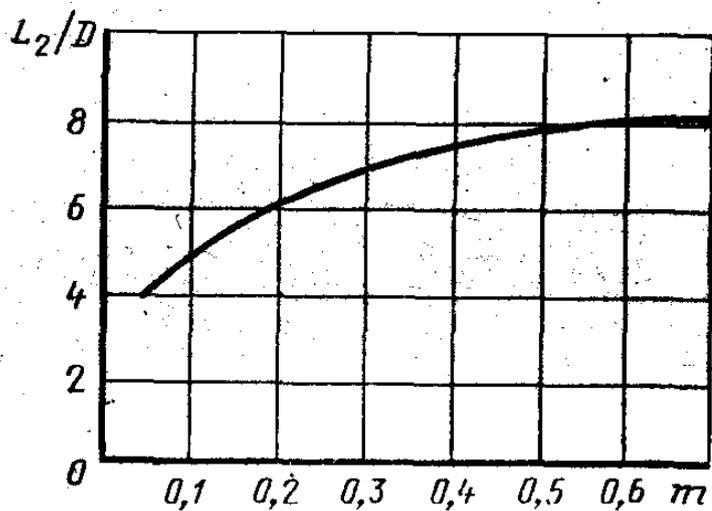


Рисунок 2.

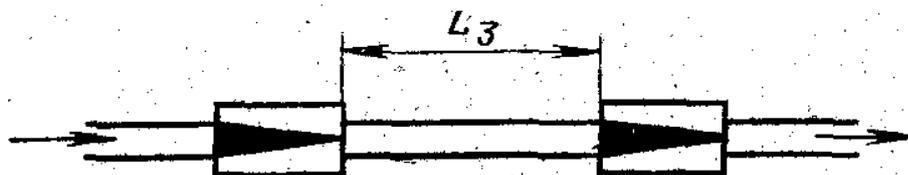


Рисунок 3.

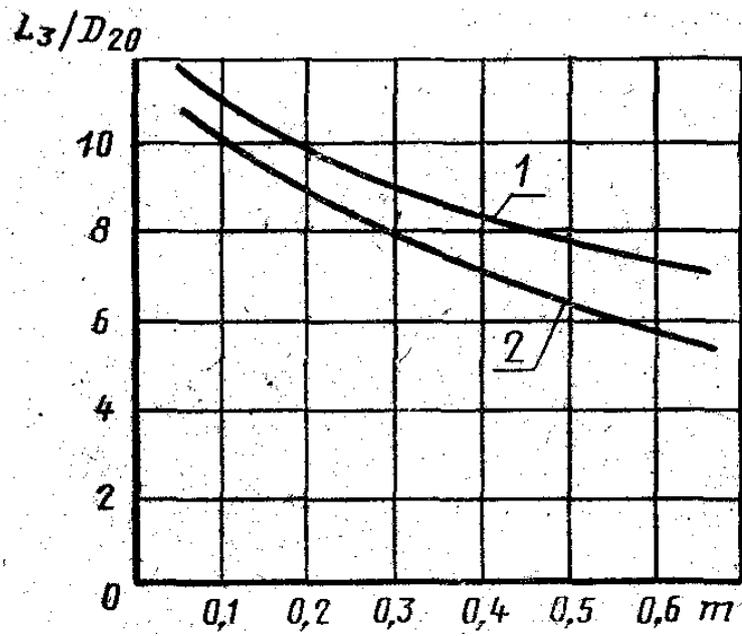


Рисунок 4.

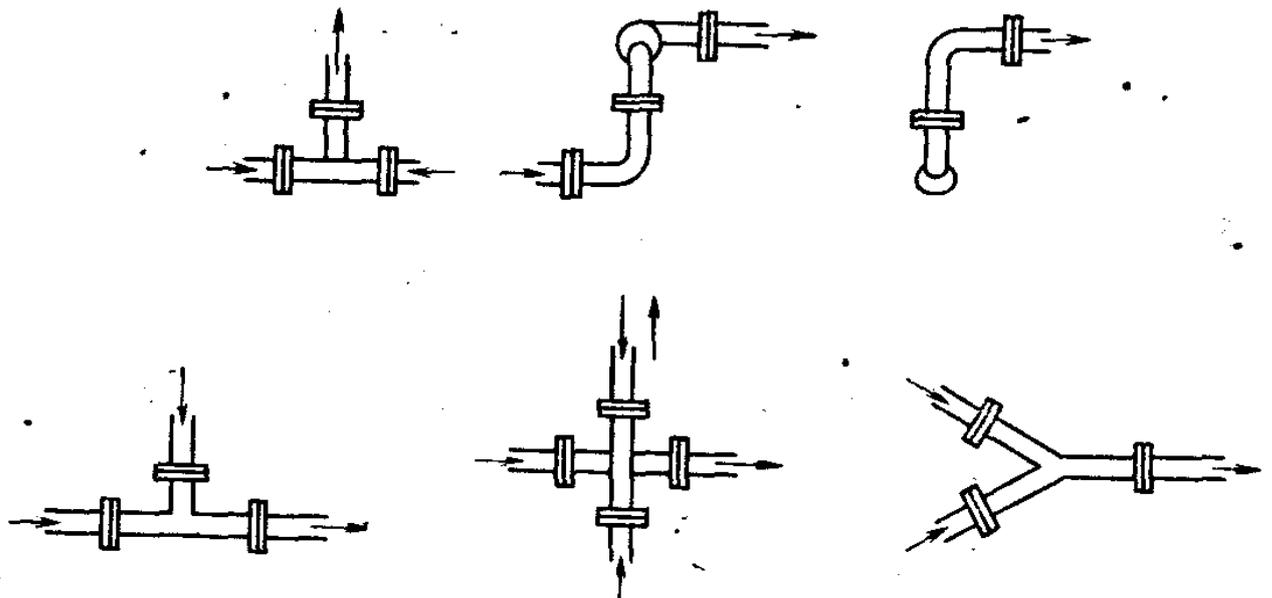


Рисунок 5

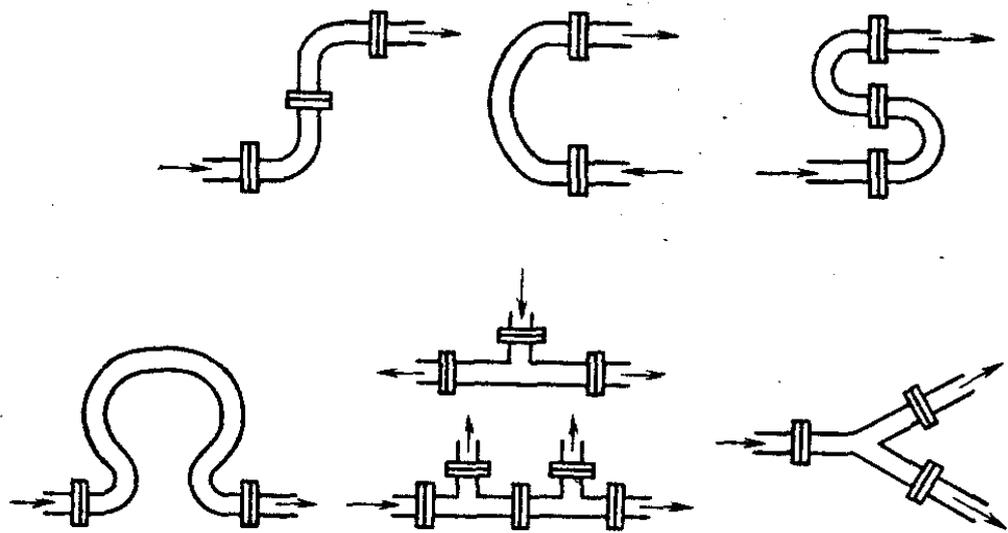


Рисунок 6

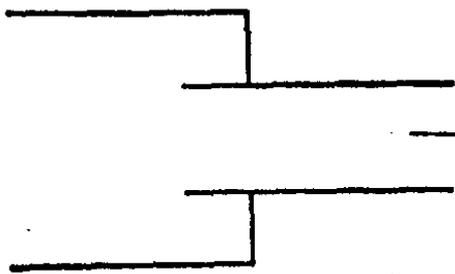


Рисунок 7

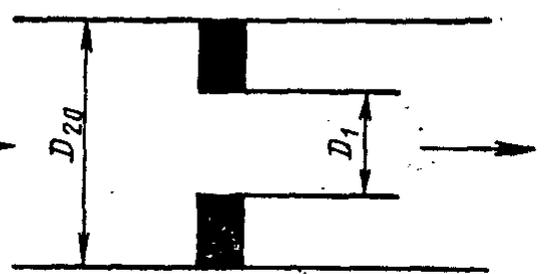


Рисунок 8

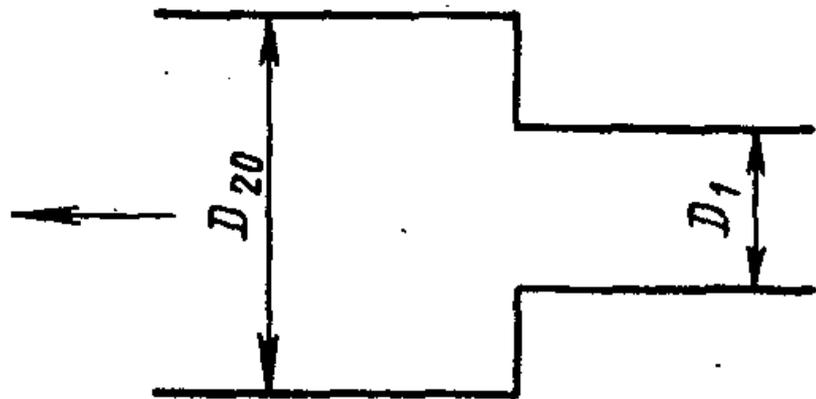


Рисунок 9

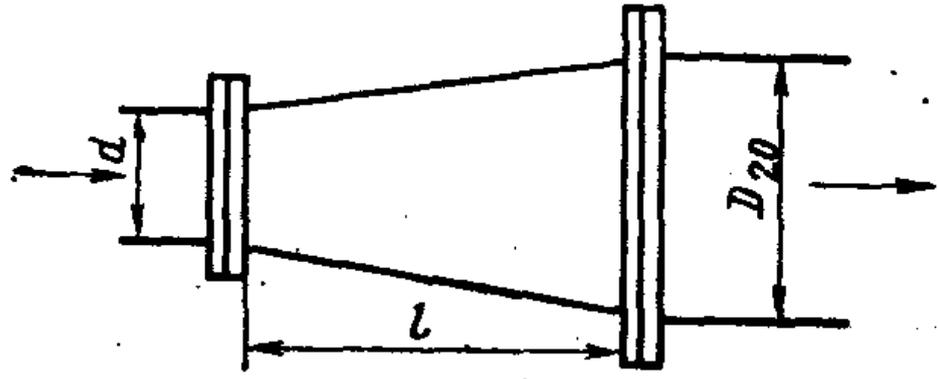


Рисунок 10

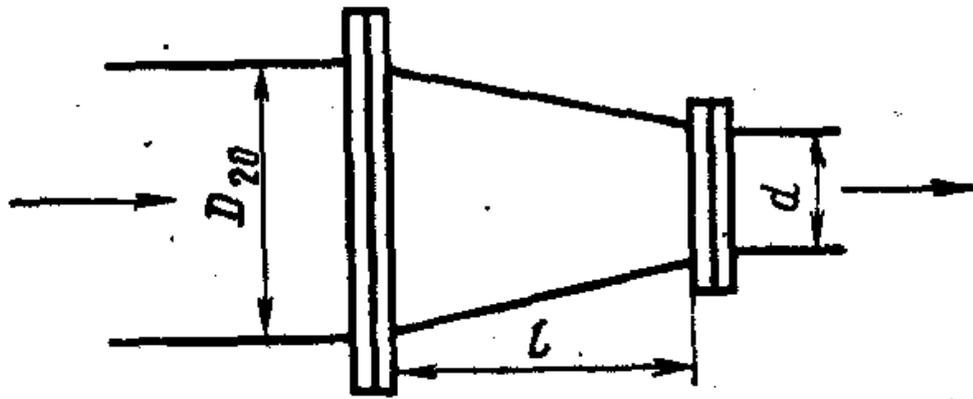


Рисунок 11

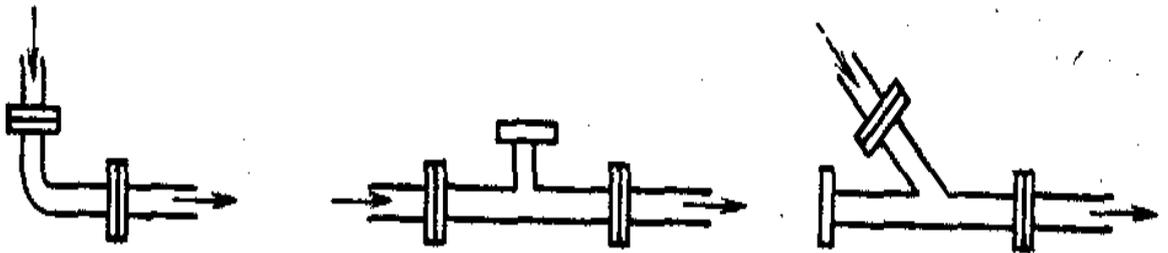


Рисунок 12

Таблица 1 – Значения  $L_1/D_{20}$  для труб Вентури в зависимости от типа местного сопротивления

m	Колено 90° или тройник (расход через один отвод)	Два или более колен 90° в одной плоскости	Два или более колен в различных плоскостях	Сужение от 3D до D на длине 3,5D	Расширение от 0,75D до D на длине 1D	Полностью открытая задвижка
0,15	3	7	17	0,5	7	3
0,20	5	9	19	1,0	8,5	5
0,25	6	10	20	1,5	9	6
0,30	7	12	23	2,0	10	7
0,35	8,5	13	25	2,5	11	7,5
0,40	11	15	28	3,0	13	8,5
0,50	14	20	33	7	15	10
0,60,	20	25	38	12	22	13

Таблица 2 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для группы колен в различных плоскостях или смешивающихся потоков, показанных на рисунке 5

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном					
	20	30	40	50	60	70
0,05	0,42	-	-	-	-	-
0,10	0,42	-	-	-	-	-
0,15	0,45	0,28	-	-	-	-
0,20	0,48	0,29	-	-	-	-
0,25	0,51	0,31	-	-	-	-
0,30	0,57	0,33	-	-	-	-
0,35	0,67	0,37	0,24	-	-	-
0,40	0,77	0,41	0,27	-	-	-
0,45	0,91	0,46	0,30	0,20	-	-
0,50	-	0,53	0,33	0,22	-	-
0,55	-	0,62	0,38	0,25	0,17	-
0,60	-	0,76	0,46	0,30	0,20	-
0,64	-	0,94	0,53	0,34	0,22	0,17

Таблица 3 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для группы колен в одной плоскости или разветвляющихся потоков

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном							
	10	15	20	25	30	35	40	45
0,05	0,35	-	-	-	-	-	-	-
0,10	0,40	-	-	-	-	-	-	-
0,15	0,44	0,32	-	-	-	-	-	-
0,20	0,48	0,34	-	-	-	-	-	-
0,25	0,52	0,37	-	-	-	-	-	-
0,30	0,57	0,39	-	-	-	-	-	-
0,35	0,64	0,43	0,33	-	-	-	-	-
0,40	0,88	0,51	0,38	0,30	-	-	-	-
0,45	-	0,59	0,43	0,34	0,28	-	-	-
0,50	-	0,72	0,49	0,38	0,30	-	-	-
0,55	-	0,94	0,57	0,43	0,33	0,26	-	-
0,60	-	-	0,67	0,48	0,37	0,28	0,22	-
0,64	-	-	0,80	0,57	0,43	0,33	0,25	0,19

Таблица 4 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для задвижки

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном				
	10	15	20	25	30
0,05	-	-	-	-	-
0,10	-	-	-	-	-
0,15	-	-	-	-	-
0,20	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-
0,30	0,36	-	-	-	-
0,35	0,48	-	-	-	-
0,40	0,64	-	-	-	-
0,45	0,84	0,41	-	-	-
0,50	1,11	0,57	-	-	-
0,55	1,45	0,78	0,43	-	-
0,60	1,89	1,08	0,62	0,35	-
0,64	2,47	1,50	0,91	0,55	-

Таблица 5 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для запорного вентиля

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном					
	10	20	30	40	50	60
0,05	0,50	0,32	0,24	0,17	-	-
0,10	0,53	0,34	0,26	0,18	-	-
0,15	0,54	0,35	0,27	0,19	-	-
0,20	0,60	0,36	0,28	0,20	0,12	-
0,25	0,75	0,39	0,30	0,22	0,13	-
0,30	0,90	0,42	0,31	0,23	0,13	-
0,35	-	0,44	0,33	0,24	0,14	-
0,40	-	0,47	0,36	0,26	0,15	-
0,45	-	0,49	0,38	0,27	0,16	-
0,50	-	0,53	0,40	0,28	0,17	-
0,55	-	0,58	0,42	0,30	0,18	-
0,60	-	0,66	0,45	0,32	0,19	-
0,64	-	0,89	0,49	0,35	0,21	-

Таблица 6 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для крана

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном					
	10	20	30	40	50	60
0,05	0,25	-	-	-	-	-
0,10	0,28	-	-	-	-	-
0,15	0,33	-	-	-	-	-
0,20	0,41	-	-	-	-	-
0,25	0,50	0,15	-	-	-	-
0,30	0,63	0,19	-	-	-	-
0,35	0,79	0,25	-	-	-	-
0,40	0,98	0,33	-	-	-	-
0,45	1,22	0,43	0,15	-	-	-
0,50	1,52	0,56	0,20	-	-	-
0,55	1,87	0,73	0,28	-	-	-
0,60	2,31	0,95	0,39	0,16	-	-
0,64	2,83	1,26	0,56	0,25	-	-

Таблица 7 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для шарового клапана

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном				
	10	15	20	25	30
0,05	0,28	0,17	-	-	-
0,10	0,32	0,19	-	-	-
0,15	0,34	0,21	-	-	-
0,20	0,36	0,24	-	-	-
0,25	0,40	0,26	-	-	-
0,30	0,42	0,28	0,16	-	-
0,35	0,45	0,29	0,18	-	-
0,40	0,50	0,33	0,19	0,13	-
0,45	0,55	0,35	0,20	0,15	-
0,50	0,59	0,36	0,21	0,17	-
0,55	0,66	0,38	0,22	0,19	-
0,60	0,75	0,40	0,25	0,20	-
0,64	0,87	0,45	0,26	0,22	0,12

Таблица 8 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для гильзы термометра диаметром  $0,33D_{20} \leq d' \leq 0,13D_{20}$

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном			
	5	10	15	20
0,05	0,28	0,11	-	-
0,10	0,33	0,13	-	-
0,15	0,35	0,16	-	-
0,20	0,38	0,17	-	-
0,25	0,40	0,18	-	-
0,30	0,42	0,20	-	-
0,35	0,44	0,22	-	-
0,40	0,47	0,23	-	-
0,45	0,54	0,27	-	-
0,50	0,61	0,29	0,12	-
0,55	0,71	0,31	0,14	-
0,60	0,83	0,34	0,16	-
0,64	-	0,41	0,18	-

При  $d' \leq 0,03D_{20}$  и  $0,05 \leq m \leq 0,64 - L_1/L_2 \geq 5$

Таблица 9 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для симметричного входа в рубку после ёмкости, показанного на рисунке 7

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном				
	10	15	20	25	30
0,05	0,16	-	-	-	-
0,10	0,21	0,10	-	-	-
0,15	0,24	0,21	-	-	-
0,20	0,27	0,13	-	-	-
0,25	0,31	0,16	-	-	-
0,30	0,33	0,18	-	-	-
0,35	0,36	0,19	0,12	-	-
0,40	0,43	0,22	0,13	-	-
0,45	0,50	0,26	0,15	-	-
0,50	0,56	0,29	0,17	-	-
0,55	0,63	0,34	0,20	-	-
0,60	0,72	0,37	0,22	-	-
0,64	0,89	0,44	0,22	0,12	-

Таблица 10 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для устройств, создающих закрутку потока (с направляющими лопатками, винтовые, лопастные и др.)

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном							
	20	30	40	50	60	70	80	90
Угол закрутки (поворота) $\varphi=30^\circ$								
0,05	0,37	0,23	0,15	0,10	-	-	-	-
0,10	0,39	0,25	0,16	0,12	-	-	-	-
0,15	0,41	0,26	0,17	0,13	0,10	-	-	-
0,20	0,44	0,28	0,19	0,14	0,11	-	-	-
0,25	0,48	0,30	0,21	0,17	0,13	-	-	-
0,30	0,52	0,33	0,24	0,18	0,14	0,10	-	-
0,35	0,57	0,37	0,27	0,20	0,16	0,12	-	-
0,40	0,66	0,41	0,29	0,22	0,18	0,13	-	-
0,45	0,78	0,46	0,33	0,25	0,19	0,14	-	-
0,50	-	0,52	0,37	0,28	0,22	0,16	0,11	-
0,55	-	0,61	0,44	0,33	0,25	0,18	0,12	-
0,60	-	0,76	0,51	0,38	0,29	0,21	0,14	-
0,64	-	1,00	0,58	0,44	0,33	0,24	0,16	-

Продолжение таблицы 10

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном									
	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Угол закрутки (поворота) $\varphi=45^\circ$										
0,05	0,82	0,50	0,31	0,22	0,16	0,11	-	-	-	-
0,10	0,87	0,52	0,32	0,23	0,17	0,12	-	-	-	-
0,15	0,92	0,55	0,33	0,25	0,18	0,13	0,10	-	-	-
0,20	0,94	0,57	0,34	0,26	0,19	0,14	0,11	-	-	-
0,25	-	0,63	0,37	0,27	0,21	0,16	0,12	-	-	-
0,30	-	0,70	0,40	0,30	0,23	0,18	0,14	0,10	-	-
0,35	-	0,80	0,44	0,33	0,26	0,20	0,15	0,11	-	-
0,40	-	0,94	0,48	0,37	0,29	0,22	0,17	0,12	-	-
0,45	-	-	0,53	0,40	0,32	0,24	0,19	0,13	-	-
0,50	-	-	0,59	0,43	0,35	0,27	0,21	0,15	-	-
0,55	-	-	0,72	0,48	0,37	0,30	0,23	0,16	0,10	-
0,60	-	-	0,87	0,54	0,43	0,34	0,26	0,18	0,11	-
0,64	-	-	-	0,62	0,47	0,37	0,28	0,20	0,12	-

Продолжение таблицы 10

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Угол закрутки (поворота) $\varphi=60^\circ$										
0,05	0,64	0,31	0,20	0,13	-	-	-	-	-	-
0,10	0,67	0,33	0,22	0,14	0,10	-	-	-	-	-
0,15	0,69	0,34	0,23	0,15	0,11	-	-	-	-	-
0,20	0,69	0,36	0,25	0,17	0,13	0,10	-	-	-	-
0,25	0,79	0,40	0,28	0,20	0,15	0,12	-	-	-	-
0,30	0,90	0,45	0,32	0,23	0,17	0,14	0,11	-	-	-
0,35	-	0,51	0,36	0,28	0,22	0,17	0,13	-	-	-
0,40	-	0,58	0,40	0,32	0,25	0,20	0,15	0,10	-	-
0,45	-	0,68	0,44	0,35	0,28	0,22	0,17	0,12	-	-
0,50	-	0,81	0,49	0,39	0,31	0,24	0,18	0,13	-	-
0,55	-	0,94	0,56	0,43	0,34	0,27	0,21	0,15	-	-
0,60	-	-	0,65	0,47	0,37	0,30	0,23	0,16	0,10	-
0,64	-	-	0,81	0,54	0,41	0,33	0,25	0,18	0,10	-

Таблица 11 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для прокладки резко выступающей внутрь трубопровода (при  $D_1/D_{20} \approx 0,6$ ), показанной на рисунке 8.

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном				
	10	15	20	25	30
0,05	0,13	-	-	-	-
0,10	0,16	-	-	-	-
0,15	0,18	-	-	-	-
0,20	0,22	0,11	-	-	-
0,25	0,26	0,13	-	-	-
0,30	0,28	0,15	-	-	-
0,35	0,32	0,18	0,10	-	-
0,40	0,36	0,19	0,13	-	-
0,45	0,41	0,23	0,13	-	-
0,50	0,47	0,26	0,14	-	-
0,55	0,53	0,29	0,17	-	-
0,60	0,66	0,36	0,21	-	-
0,64	0,82	0,43	0,25	0,12	-

Таблица 12 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для внезапного расширения потока (при  $D_1/D_{20} \geq 0,6$ ), показанного на рисунке 9.

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0,05	0,33	0,20	0,15	0,12	0,10	-	-	-	-
0,10	0,34	0,21	0,16	0,13	0,11	-	-	-	-
0,15	0,36	0,22	0,17	0,14	0,12	-	-	-	-
0,20	0,38	0,24	0,19	0,16	0,13	0,10	-	-	-
0,25	0,41	0,26	0,21	0,17	0,14	0,11	-	-	-
0,30	0,44	0,28	0,23	0,19	0,16	0,13	-	-	-
0,35	0,47	0,31	0,25	0,21	0,17	0,14	0,10	-	-
0,40	0,50	0,33	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11	-	-
0,45	0,55	0,35	0,28	0,24	0,20	0,16	0,12	-	-
0,50	0,67	0,38	0,31	0,26	0,22	0,17	0,13	-	-
0,55	0,85	0,41	0,33	0,28	0,23	0,18	0,14	-	-
0,60	-	0,44	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	-
0,64	-	0,46	0,38	0,32	0,26	0,21	0,15	0,10	-

Таблица 13 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для расширения потока при конусности  $K=(D_{20}-d)$ :  
 $l$  от 1:2 до 1:4, показанного на рисунке 10

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,05	0,36	-	-	-	-	-	-	-	-
0,10	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-
0,15	0,42	-	-	-	-	-	-	-	-
0,20	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	0,46	0,22	-	-	-	-	-	-	-
0,30	0,50	0,24	-	-	-	-	-	-	-
0,35	0,58	0,28	-	-	-	-	-	-	-
0,40	0,67	0,36	0,22	-	-	-	-	-	-
0,45	0,85	0,43	0,26	0,18	-	-	-	-	-
0,50	-	0,53	0,31	0,21	-	-	-	-	-
0,55	-	0,73	0,42	0,28	0,20	0,16	-	-	-
0,60	-	-	0,64	0,43	0,28	0,21	0,15	0,11	-
0,64	-	-	0,83	0,57	0,41	0,28	0,20	0,14	0,11

Таблица 14 - Значения  $\delta_{\alpha L}$  для сужения потока при конусности  $K=(D_{20}-d): l$  от 1:1,5 до 1:3, показанного на рисунке 11

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном				
	10	15	20	25	30
0,05	-	-	-	-	-
0,10	-	-	-	-	-
0,15	-	-	-	-	-
0,20	-	-	-	-	-
0,25	-	-	-	-	-
0,30	-	-	-	-	-
0,35	-	-	-	-	-
0,40	-	-	-	-	-
0,45	0,32	-	-	-	-
0,50	0,36	-	-	-	-
0,55	0,45	0,27	-	-	-
0,60	0,63	0,37	0,23	-	-
0,64	-	0,61	0,38	0,25	-

Таблица 15 – Значения  $\delta_{\alpha L}$  для колена или тройника, показанных на рисунке  
12

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном						
	10	15	20	25	30	35	40
0,05	-	-	-	-	-	-	-
0,10	-	-	-	-	-	-	-
0,15	0,34	-	-	-	-	-	-
0,20	0,36	-	-	-	-	-	-
0,25	0,37	-	-	-	-	-	-
0,30	0,40	-	-	-	-	-	-
0,35	0,41	0,28	-	-	-	-	-
0,40	0,50	0,32	-	-	-	-	-
0,45	0,62	0,38	0,26	-	-	-	-
0,50	0,81	0,46	0,30	0,21	-	-	-
0,55	-	0,61	0,38	0,26	0,18	-	-
0,60	-	0,82	0,50	0,33	0,22	0,16	-
0,64	-	-	0,68	0,43	0,29	0,20	0,13

Таблица 16 – Значение  $\delta_{\alpha L}$  для регулировочного вентиля

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
<b>Степень открытия <math>H=0,25</math>-</b>									
0,05	0,26	0,15	-	-	-	-	-	-	-
0,10	0,33	0,20	0,12	-	-	-	-	-	-
0,15	0,46	0,27	0,16	-	-	-	-	-	-
0,20	0,63	0,37	0,22	0,13	-	-	-	-	-
0,25	0,85	0,50	0,29	0,17	0,10	-	-	-	-
0,30	1,12	0,66	0,39	0,23	0,13	-	-	-	-
0,35	1,44	0,85	0,50	0,29	0,17	0,10	-	-	-
0,40	1,81	1,06	0,63	0,37	0,22	0,13	-	-	-
0,45	2,23	1,31	0,77	0,45	0,27	0,16	-	-	-
0,50	2,70	1,58	0,93	0,55	0,32	0,19	0,11	-	-
0,55	3,21	1,89	1,11	0,65	0,38	0,23	0,13	-	-
0,60	3,78	2,22	1,31	0,77	0,45	0,27	0,16	-	-
0,64	4,39	2,58	1,52	0,89	0,52	0,31	0,18	0,11	-

Продолжение таблицы 16

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном						
	10	20	30	40	50	60	70
<b>Степень открытия <math>H=0,50</math></b>							
0,05	0,23	0,12	-	-	-	-	-
0,10	0,28	0,15	-	-	-	-	-
0,15	0,35	0,19	0,10	-	-	-	-
0,20	0,46	0,25	0,13	-	-	-	-
0,25	0,59	0,32	0,17	-	-	-	-
0,30	0,76	0,41	0,22	0,12	-	-	-
0,35	0,96	0,51	0,28	0,15	-	-	-
0,40	1,19	0,64	0,34	0,18	0,10	-	-
0,45	1,45	0,78	0,41	0,22	0,12	-	-
0,50	1,74	0,93	0,50	0,27	0,14	-	-
0,55	2,06	1,10	0,59	0,32	0,17	-	-
0,60	2,41	1,29	0,69	0,37	0,20	0,11	-
0,64	2,79	1,49	0,80	0,43	0,23	0,12	-

Продолжение таблицы 16

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном			
	10	20	30	40
<b>Степень открытия <math>H=0,75</math></b>				
0,05	0,19	0,09	-	-
0,10	0,22	0,10	-	-
0,15	0,26	0,12	-	-
0,20	0,32	0,15	-	-
0,25	0,40	0,18	-	-
0,30	0,49	0,23	0,10	-
0,35	0,61	0,28	0,13	-
0,40	0,74	0,34	0,16	-
0,45	0,88	0,40	0,19	-
0,50	1,05	0,48	0,22	0,10
0,55	1,23	0,56	0,26	0,12
0,60	1,43	0,65	0,30	0,14
0,64	1,65	0,75	0,34	0,16

Продолжение таблицы 16

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном			
	10	20	30	40
<b>Степень открытия <math>H=1,00</math></b>				
0,05	0,15	-	-	-
0,10	0,17	-	-	-
0,15	0,19	-	-	-
0,20	0,22	-	-	-
0,25	0,27	0,10	-	-
0,30	0,32	0,12	-	-
0,35	0,38	0,14	-	-
0,40	0,46	0,17	-	-
0,45	0,54	0,20	-	-
0,50	0,63	0,23	-	-
0,55	0,73	0,27	0,10	-
0,60	0,84	0,31	0,11	-
0,64	0,97	0,36	0,13	-

Таблица 17 – Значение  $\delta_{\alpha L}$  для регулировочного клапана

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<b>Степень открытия <math>H=0,25</math></b>										
0,05	0,29	0,18	0,12	-	-	-	-	-	-	-
0,10	0,38	0,24	0,15	0,10	-	-	-	-	-	-
0,15	0,53	0,34	0,22	0,14	-	-	-	-	-	-
0,20	0,73	0,47	0,30	0,19	0,12	-	-	-	-	-
0,25	1,00	0,64	0,41	0,27	0,17	0,11	-	-	-	-
0,30	1,33	0,85	0,55	0,35	0,23	0,14	-	-	-	-
0,35	1,72	1,10	0,71	0,45	0,29	0,19	0,12	-	-	-
0,40	2,17	1,39	0,89	0,57	0,37	0,24	0,15	0,10	-	-
0,45	2,68	1,72	1,10	0,71	0,45	0,29	0,19	0,12	-	-
0,50	3,24	2,08	1,33	0,86	0,55	0,35	0,23	0,15	-	-
0,55	3,87	2,48	1,59	1,02	0,66	0,42	0,27	0,17	0,11	-
0,60	4,56	2,92	1,88	1,20	0,77	0,50	0,32	0,20	0,13	-
0,64	5,30	3,40	2,18	1,40	0,90	0,58	0,37	0,24	0,15	-

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном							
	5	10	15	20	25	30	35	40
<b>Степень открытия <math>H=0,50</math></b>								
0,05	0,25	0,15	-	-	-	-	-	-
0,10	0,31	0,18	0,11	-	-	-	-	-
0,15	0,41	0,24	0,14	-	-	-	-	-
0,20	0,55	0,32	0,19	0,11	-	-	-	-
0,25	0,73	0,43	0,25	0,15	-	-	-	-
0,30	0,95	0,55	0,32	0,19	0,11	-	-	-
0,35	1,20	0,70	0,41	0,24	0,14	-	-	-
0,40	1,50	0,88	0,51	0,30	0,17	0,10	-	-
0,45	1,84	1,07	0,63	0,37	0,21	0,12	-	-
0,50	2,21	1,29	0,75	0,44	0,26	0,15	-	-
0,55	2,63	1,53	0,90	0,52	0,31	0,18	0,10	-
0,60	3,08	1,80	1,05	0,61	0,36	0,21	0,12	-
0,64	3,57	2,09	1,22	0,71	0,42	0,24	0,14	-

Продолжение таблицы 17

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном						
	5	10	15	20	25	30	35
<b>Степень открытия <math>H=0,75</math></b>							
0,05	0,23	0,12	-	-	-	-	-
0,10	0,27	0,14	-	-	-	-	-
0,15	0,33	0,18	-	-	-	-	-
0,20	0,42	0,23	0,12	-	-	-	-
0,25	0,54	0,29	0,15	-	-	-	-
0,30	0,67	0,37	0,19	0,10	-	-	-
0,35	0,86	0,46	0,24	0,13	-	-	-
0,40	1,06	0,56	0,30	0,16	-	-	-
0,45	1,28	0,68	0,36	0,19	0,10	-	-
0,50	1,53	0,81	0,43	0,23	0,12	-	-
0,55	1,81	0,96	0,51	0,27	0,14	-	-
0,60	2,11	1,12	0,60	0,32	0,17	-	-
0,64	1,44	1,30	0,69	0,37	0,20	0,10	-

Продолжение таблицы 17

<i>m</i>	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном					
	5	10	15	20	25	30
<b>Степень открытия <math>H=1,00</math></b>						
0,05	0,20	0,10	-	-	-	-
0,10	0,23	0,11	-	-	-	-
0,15	0,28	0,13	-	-	-	-
0,20	0,34	0,17	-	-	-	-
0,25	0,43	0,21	0,10	-	-	-
0,30	0,53	0,26	0,12	-	-	-
0,35	0,65	0,32	0,15	-	-	-
0,40	0,79	0,38	0,19	-	-	-
0,45	0,95	0,46	0,22	0,1	-	-
0,50	1,13	0,55	0,26	0,13	-	-
0,55	1,33	0,64	0,31	0,15	-	-
0,60	1,54	0,75	0,36	0,18	-	-
0,64	1,77	0,86	0,42	0,20	0,10	-

Таблица 18 – Значение  $\delta_{\alpha L}$  для регулирующей заслонки

$m$	Значения $\delta_{\alpha L}$ , %, при $L_1/D_{20}$ , равном								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0,05	0,32	0,23	0,15	0,10	-	-	-	-	-
0,10	0,40	0,26	0,21	0,15	-	-	-	-	-
0,15	0,46	0,31	0,23	0,16	0,12	-	-	-	-
0,20	0,57	0,36	0,26	0,19	0,13	-	-	-	-
0,25	0,65	0,41	0,28	0,22	0,15	0,10	-	-	-
0,30	0,93	0,47	0,33	0,26	0,16	0,11	-	-	-
0,35	-	0,56	0,38	0,28	0,19	0,13	-	-	-
0,40	-	0,65	0,42	0,30	0,21	0,15	-	-	-
0,45	-	0,76	0,48	0,34	0,23	0,16	-	-	-
0,50	-	0,93	0,55	0,37	0,26	0,17	0,11	-	-
0,55	-	-	0,68	0,43	0,29	0,20	0,14	-	-
0,60	-	-	0,90	0,5	0,34	0,23	0,16	0,10	-
0,64	-	-	-	0,60	0,40	0,27	0,19	0,13	-

Таблица 19 – Значения  $L_1/D_{20}$  между двумя ближайшими к сужающему устройству местными сопротивлениями

Местное сопротивление	$L_1/D_{20}$
Группа колен в одной плоскости или разветвляющийся поток	17,5
Группа колен в разных плоскостях или смешивающиеся потоки	30
Колено или тройник	15
Сужение при конусности от 1:1,5 до 1:3	7,5
Расширение при конусности от 1:2 до 1:4	15
Внезапное расширение потока ( $D_1/D_{20} \geq 0,6$ )	40
Устройство создающее закрутку потока ( $\varphi=30^\circ$ )	45
Устройство создающее закрутку потока ( $\varphi=45^\circ$ )	45
Устройство создающее закрутку потока ( $\varphi=60^\circ$ )	50
Прокладка, резко выступающая внутрь трубопровода ( $D_1/D_{20} \approx 0,6$ )	12,5
Симметричный вход в трубу после ёмкости (формкамеры)	12,5
Гильза термометра ( $0,03D_{20} < d' \leq 0,13D_{20}$ )	10
Гильза термометра ( $d' \leq 0,03D_{20}$ )	2,5
Шаровой клапан	15
Кран	20
Задвижка	10
Запорный вентиль	16
Регулировочный вентиль: $H=0,25$	40
$H=0,50$	30
$H=0,75$	25
$H=1,00$	15

Продолжение таблицы 19

Местное сопротивление		$L_1/D_{20}$
Регулировочный клапан:	$H=0,25$	22,5
	$H=0,50$	17,5
	$H=0,75$	15
	$H=1,00$	12,5
Регулирующая заслонка		22,5

Таблица 20 – Необходимые длины прямых участков для местных сопротивлений установленных перед сужающим устройством, при  $\delta_{\text{от}}=0$

<i>m</i>	Значения $L_1/D_{20}$ для следующих местных сопротивлений						
	группы колен в разных плоскостях или смешивающегося потока	группы колен в одной плоскости или разветвляющегося потока	задвиг-ки	шарового клапана	расширения	сужения	колена или тройника
0,05	34	14	12	18	16	10	10
0,10	34	16	12	18	16	10	10
0,15	36	18	12	20	16	10	14
0,20	38	18	12	20	17	10	14
0,25	40	20	12	22	18	10	14
0,30	44	22	14	24	20	10	16
0,35	48	26	14	26	22	10	18
0,40	54	32	16	28	25	11	22
0,50	62	36	20	32	30	14	28
0,55	70	42	24	36	38	22	36
0,64	80	50	30	44	54	30	46

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования**  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**Невинномысский технологический институт (филиал)**

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Технические измерения и приборы»

Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и  
производств  
Квалификация выпускника – бакалавр

Лабораторный практикум разработан в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки бакалавров направления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Лабораторный практикум предназначен для студентов всех форм обучения. В практикуме содержатся основы теории, описание опытных установок, порядок проведения лабораторных работ и обработки экспериментальных данных, перечень контрольных вопросов для самоподготовки по указанным дисциплинам и список рекомендуемой литературы.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Лабораторная работа № 1. Давление в процессах химической технологии и методы его измерения .....4
2. Лабораторная работа № 2. Изучение физических свойств жидкости.  
Определение плотности и вязкости.....14
3. Лабораторная работа № 3. Изучение принципа измерения расхода воздуха в трубопроводе.....21
4. Лабораторная работа № 4. Изучение принципа измерения и регулирования температуры .....32

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1  
**ДАВЛЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ И  
 МЕТОДЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ**

**Цель и содержание:** практическое ознакомление с приборами и методами для измерения давления в процессах химической технологии.

**Теоретическое обоснование**

Величины, характеризующие состояние рабочего вещества, называют параметрами. Параметры, которые можно измерить, являются основными. К основным параметрам рабочих веществ относят давление, плотность, удельный объем и температуру. В данной работе рассматривается роль давления для процессов и аппаратов химической технологии.

Под давлением понимают напряжение, возникающее от нормальной составляющей силы давления газа или жидкости на стенки сосуда, аппарата, трубопровода. За единицу давления в СИ принята сила в 1Н, приходящаяся на площадь в 1м<sup>2</sup>, или Паскаль:

$$1\text{Н} / 1\text{м}^2 = 1\text{Па}$$

Кратными единицами давления являются килоПаскаль - кПа и мегаПаскаль - МПа: 1кПа = 10<sup>3</sup> Па, 1МПа = 10<sup>6</sup> Па.

Величину давления в жидкостях характеризуют также высотой столба жидкости, создающего давление своим весом, равное измеряемому.

Соотношения между системными единицами измерения давления, и не входящими в СИ, следующие:

$$1\text{ Па} = 0,101972\text{ кгс/м}^2 = 1,01972 \cdot 10^{-5}\text{ ат} = 9,8692310 \cdot 10^{-6}\text{ атм} = 7,50062 \cdot 10^{-3}\text{ мм рт. ст.}$$

$$1\text{ мм рт. ст.} = 133,3\text{ Па}; 1\text{ мм вод ст.} = 9,80665\text{ Па} = 0,073556\text{ мм рт. ст.}$$

Давление, выраженное высотой столба одной жидкости  $h_1$ , можно выразить высотой столба другой жидкости  $h_2$  из соотношения:

$$h_2 = h_1 \cdot \gamma_1 / \gamma_2,$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – удельные веса жидкостей 1 и 2, Н/м<sup>3</sup> (могут быть заменены отношением плотностей).

В процессах химической технологии величина применяемого давления из-

меняется в широких пределах - от глубокого вакуума до нескольких сот МПа. Например, перегонка мазута проводится при давлениях 8...10 кПа, синтез аммиака – при 10...100 МПа, полимеризация этилена при 100...200 МПа. Роль давления для процессов и аппаратов химической технологии крайне разнообразна. Давление, в сочетании с температурой, определяет фазовое состояние рабочих веществ. В процессах перемещения жидкостей и газов, при фильтровании неоднородных систем, при абсорбции, в мембранных процессах разность давлений является движущей силой. В процессах перегонки и ректификации уменьшение давления (создание разрежения или вакуума) улучшает испаряемость тяжелых и малолетучих веществ, снижает температуру процесса. Повышение давления в процессах переработки газов значительно уменьшает их объем, увеличивает производительность оборудования. В ряде химических процессов повышенное давление увеличивает реакционную способность рабочих веществ. Величина рабочего давления оказывает значительное влияние на конструкцию аппарата, толщину стенок корпуса, выбор материала для его изготовления. Для измерения давления и вакуума используют следующие приборы:

- барометры – для измерения атмосферного давления;
- манометры – для измерения избыточного давления;
- вакуумметры – для измерения разрежения;
- мановакуумметры – для измерения давления и разрежения;
- дифференциальные манометры – для измерения разности давлений;
- электрические, комбинированные и специальные приборы – многоцелевого назначения.

В лабораторной практике наибольшее применение получили жидкостные и пружинные приборы.

В жидкостных приборах измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости (воды, спирта, ртути). Пределы измерений от умеренного вакуума до небольшого избыточного давления. В пружинных трубчатых, мембранных и сильфонных приборах измеряемое давление деформирует пружину или мембрану. Величина упругой деформации является мерой давления. Пределы измерения вакуума и давления не ограничиваются.

При помощи указанных выше приборов измеряют величину избыточного давления  $P_{\text{ИЗБ}}$  или разрежения (вакуума)  $P_{\text{ВАК}}$ . В расчетах процессов и аппара-

тов в качестве параметра состояния используют абсолютное давление  $P_{\text{АБС}}$ . Абсолютное давление подсчитывают по показаниям двух приборов. Если абсолютное давление больше атмосферного, то оно подсчитывается по показаниям барометра  $P_{\text{БАР}}$  и манометра, т. е.

$$P_{\text{АБС}} = P_{\text{БАР}} + P_{\text{ИЗБ}} \quad (1)$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то оно подсчитывается по показаниям барометра и вакуумметра, т. е.

$$P_{\text{АБС}} = P_{\text{БАР}} - P_{\text{ВАК}} \quad (2)$$

Взаимосвязь абсолютного давления с избыточным, вакуумметрическим и атмосферным показана на рисунке. 1.1.

При измерении давления в сосудах, аппаратах и трубопроводах при помощи пружинных манометров, вакуумметров и мановакуумметров величину избыточного давления или вакуума отсчитывают в единицах давления непосредственно по шкале прибора. Из жидкостных приборов чаще других применяют пьезометры и дифференциальные U-образные манометры, схемы использования которых приведены на рисунке. 1.2.

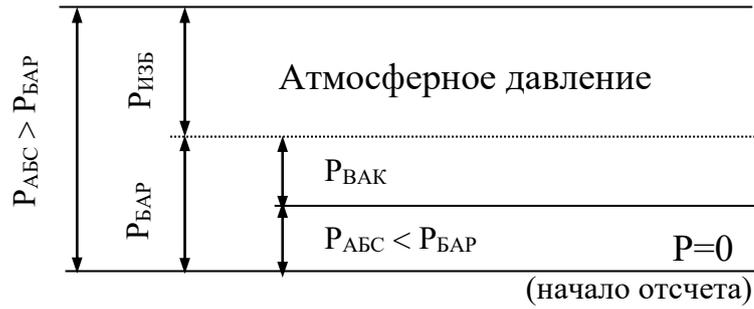


Рисунок. 1.1— Взаимосвязь  $P_{ABS}$ ;  $P_{БАР}$ ;  $P_{ИЗБ}$  и  $P_{ВАК}$ .

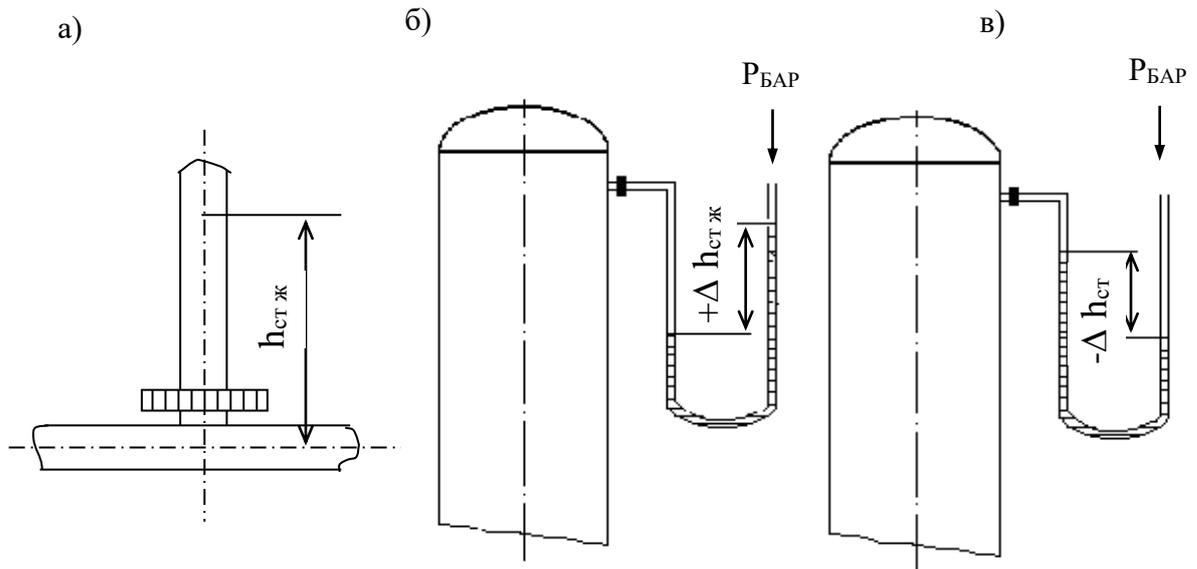


Рисунок.1.2 — Схемы измерения давления пьезометром (а) и U - образным манометром (б, в).

Пьезометр представляет собой прямую вертикальную трубку, изготовленную обычно из стекла и подсоединенную к трубопроводу или другому оборудованию. Величина избыточного давления измеряется по верхнему уровню жидкости в трубке и выражается в мм ст жидкости. Дифференциальные U - образные манометры изготавливают также из стекла. Если давление в сосуде равно атмосферному, то уровень жидкости в обоих коленах прибора одинаков и  $\Delta h = 0$ . Если в сосуде избыточное давление (рисунок. 1.2, б), то уровень жидкости в правом колене выше, чем в левом, а разность давлений выражается величиной  $+\Delta h$ , м (или мм) ст жидкости. При наличии вакуума в сосуде (рисунок. 1.2, в), уровень жидкости в правом колене ниже, чем в левом. При этом разность давлений выражается величиной  $-\Delta h$ , м (или мм) ст. жидкости.

При измерении разности давлений на каком-либо участке трубопровода или аппарата, между двумя аппаратами схема подсоединения U-образного манометра следующая (см. рисунок. 1.3).

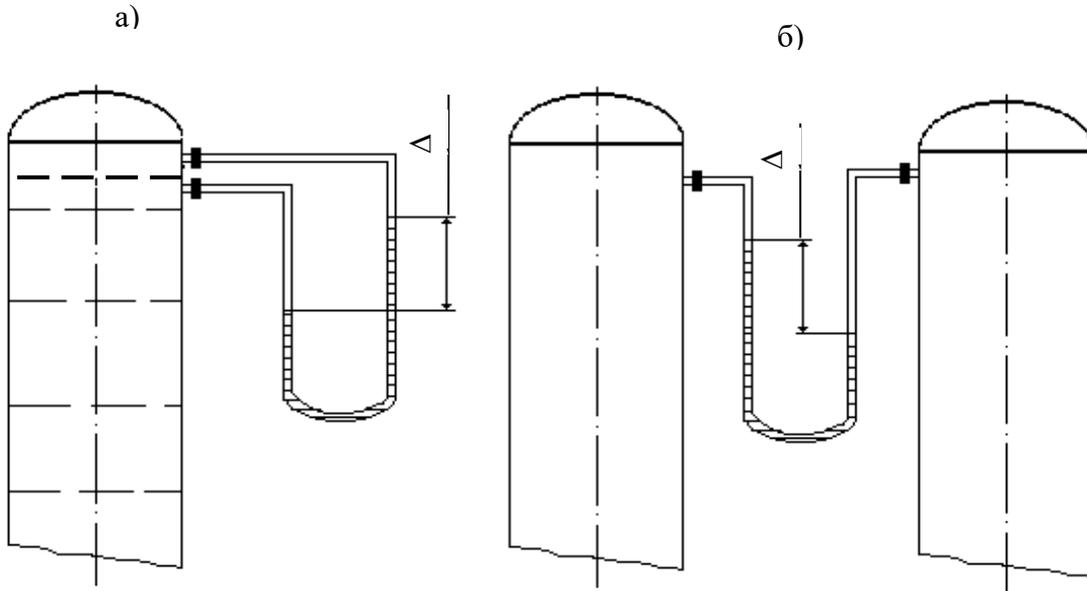


Рисунок 1.3 — Схема измерения разности давлений U-образным манометром на контактной тарелке массообменного аппарата (а) и между двумя сосудами (б).

### **Аппаратура, оборудование и материалы**

Опытная установка, представленная на рисунке 1.4, состоит из объектов, в которых измеряется давление (трубопровод, колба с водой), а также приборов, с помощью которых производятся необходимые измерения давления (барометр, манометр, пьезометр, U — образный манометр).

### Методика и порядок выполнения работы

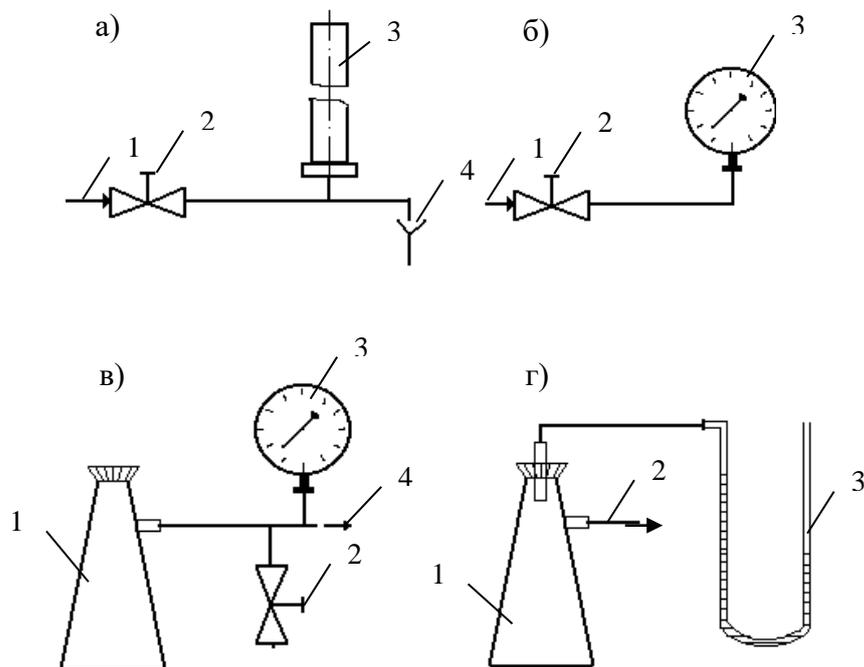


Рисунок. 1.4 —. Схемы экспериментальных установок для измерения давления:

- а) 1 – вода от сети, 2 – вентиль, 3 – пьезометр, 4 – слив;
- б) 1 – вода от сети, 2 – вентиль, 3 – манометр;
- в) 1 – колба, 2 – зажим, 3 – вакуумметр, 4 – линия к вакуум-насосу;
- г) 1 – колба, 2 – линия к водоструйному насосу, 3 – U-образный манометр.

Схемы подключения приборов для экспериментального измерения давления различными способами приведены на рисунке. 1.4.

**Измерения пьезометром** (рисунок. 1.4, а). Для измерения избыточного давления пьезометром медленно открывают вентиль 2 и создают некоторый расход воды по участку трубопровода к сливу 4. При этом в пьезометре 3 будет подниматься столб жидкости (необходимо следить, чтобы вода не выплеснулась через верхний конец пьезометра!). После стабилизации режима течения и неизменности высоты столба жидкости в пьезометре измеряют эту высоту мерной линейкой, начиная от оси трубопровода. Полученная высота  $h_{\text{изб}}$ , мм вод ст. соответствует избыточному давлению воды в трубопроводе в точке измерения. Необходимо выполнить не менее трех замеров при разном расходе жидкости по трубопроводу.

**Измерения манометром** (рисунок. 1.4, б). Для измерения избыточного давления воды в сети необходимо медленно открыть вентиль 2, затем закрыть и вновь открыть его. После того, как показания стрелки манометра 3 перестанут изменяться, необходимо сделать отсчет по шкале прибора. Полученная величина соответствует давлению в трубопроводе  $P_{\text{изб}}$  в единицах давления по шкале прибора.

**Измерения вакуумметром** (рисунок. 1.4, в). Перед включением вакуум-насоса необходимо убедиться, что зажим 2 отпущен. После этого включают вилку шнура питания электродвигателя в сеть и запускают насос нажатием кнопки. Затем при помощи зажима перекрывают линию, соединяющую вакууммируемую систему с атмосферой. После того, как показания стрелки вакуумметра 3 перестанут изменяться, необходимо сделать отсчёт по шкале прибора. Далее следует постепенно отпустить зажим и уравнять давление в системе с атмосферным. При этом стрелка вакуумметра должна возвратиться в первоначальное положение. Только после этого (но не ранее!) можно остановить вакуум-насос при помощи выключателя и отсоединить вилку шнура электропитания от сети. Измеренная величина давления соответствует разрежению или вакууму в системе (колбе 1)  $P_{\text{вак}}$  в единицах давления по шкале прибора.

**Измерения U -образным манометром** (рисунок. 1.4, г). Для измерения разрежения в колбе 1 необходимо медленно открыть вентиль (на схеме не показан) и включить в работу водоструйный насос. При этом необходимо следить, чтобы жидкость из U -образного манометра не была "переброшена" в колбу. После установления некоторого расхода воды через насос и стабилизации показаний прибора следует замерить при помощи мерной линейки разность высот между менисками жидкости в обоих коленах манометра. Полученная высота  $\Delta h_{\text{вак}}$  в мм вод ст соответствует величине разрежения в колбе 1. Необходимо выполнить не менее трех замеров при разном расходе воды через водоструйный насос.

Атмосферное давление  $P_{\text{бар}}$  необходимо принять по показаниям барометра.

Обработка опытных данных

Для каждой величины измеренного давления необходимо вычислить абсолютное давление в системе  $P_{\text{АБС}}$  по формуле (1) или (2) в Па и перевести значение  $P_{\text{АБС}}$  в кгс/м<sup>2</sup>, ат, атм, мм рт ст, мм вод ст. Следует охарактеризовать величины вакуума, достигаемые при помощи вакуум-насоса и водоструйного насоса.

### **Содержание отчета, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе**

В отчёте о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

1. Цель работы.
2. Схемы установок.
3. Результаты измерений.
4. Обработка опытных данных.
5. Выводы по работе.

Выполненное задание оформляется в отдельной тетради с соблюдением требований к отчетным материалам студентов вузов и сдается в сроки, назначенные кафедрой.

К защите допускается студент, выполнивший лабораторную работу в установленном объеме и оформивший отчет согласно требованиям. Защита проводится по теме лабораторной работы

### **Вопросы для защиты работы**

1. Что понимают под параметрами состояния?
2. Какие параметры состояния считаются основными?
3. Какие параметры состояния рабочих веществ являются производными?
4. Что понимают под давлением?
5. Какие размерности давления используются на практике?
6. Какова роль давления для процессов химической технологии?
7. Что понимают под разрежением и избыточным давлением?

8. Какими приборами измеряют давление?
9. Что понимают под абсолютным давлением? Поясните при помощи графической схемы.

**Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме**

Рекомендуемая литература.

Основная литература:

- Шишмарев, В.Ю. Средства измерений: учеб. пособие/ В.Ю. Шишмарев; 3-е изд., стер. М.: Академия, 2009. 320 с.
- Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник/ Г.Г. Раннев: М.: Академия, 2009. 323 с.

Дополнительная литература:

- Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник; М.: Колосс, 2004. 344 с.
- Соснин, О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учеб. пособие / О.М. Соснин; М.: Академия, 2007. 356 с.

Интернет-ресурсы:

- Афонский, А.А. Измерительные приборы и электронные измерения: учеб. пособие / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 541 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Данилов, А.Д. Технические средства автоматизации: учеб. пособие / А.Д. Данилов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2007. 340 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Глухов, Д.А. Технические измерения и приборы: учеб. пособие / Д.А. Глухов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2009. 251 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).

- Николайчук, О.И. Современные средства автоматизации, практические решения: учеб. пособие / О.И. Николайчук; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 256 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Дубов, Г.М. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / Г.М. Глухов; изд. КузГТУ, 2011. 224 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

**ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ.**

**Цель и содержание:** экспериментальное определение плотности и коэффициента кинематической вязкости жидкости.

Определение с помощью вискозиметра кинематической вязкости жидкости, сравнение расчетного и опытного значений вязкости, определение плотности двумя методами — с помощью ареометра и пикнометра.

**Теоретическое обоснование**

При проектировании процессов и аппаратов химической технологии трудозатраты по определению физических свойств рабочих веществ составляют до 40 - 50 % от общих трудозатрат. При этом перечень индивидуальных свойств веществ, обычно используемых в расчетах, превышает два десятка наименований (молярная масса, температура нормального кипения, критические параметры, теплоемкость, теплопроводность, поверхностное натяжение, теплота испарения и др.). В прикладной гидравлике, в гидромеханических процессах наиболее часто используют такие свойства жидкостей как их плотность и вязкость, позволяющие решить большинство возникающих практических задач.

Плотностью называют массу жидкости, содержащуюся в единице объёма:

$$\rho = G/V, \text{ кг/м}^3,$$

где  $G$  - масса жидкости, кг;  $V$  - объем жидкости, м<sup>3</sup>.

Знание плотности позволяет определять удельный вес жидкости

$$\gamma = \rho \cdot g, \text{ Н/м}^3,$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

С использованием плотности выполняют пересчет массового расхода жидкостей по трубопроводам и аппаратам в объемный

$$V = G/\rho, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $G$  - массовый расход, кг/с.

Объемный расход среды служит для вычисления скорости движущегося потока и решения многих задач гидродинамики.

Вязкостью называют свойство жидкости оказывать сопротивление относительно движению (сдвигу) ее частиц. Численно вязкость характеризуют коэффициентами кинематической  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с и динамической вязкости  $\mu$ , Па·с, которые взаимосвязаны соотношением

$$\nu = \mu / \rho.$$

Коэффициент вязкости используют при вычислении критерия гидродинамического подобия Рейнольдса  $Re = w \cdot d / \nu$  ( $w$  - скорость потока, м /с;  $d$  - диаметр канала, м) и при решении различных задач гидродинамики.

Во всех случаях, когда это возможно, следует использовать опытные данные о свойствах рабочих веществ, как наиболее достоверные. В химической технологии плотность жидкостей определяют ареометрическим и пикнометрическим методами, которые являются наименее трудоемкими и наиболее быстрыми. Ареометр представляет собой запаянную стеклянную трубку, расширяющуюся книзу и имеющую на конце стеклянный шарик, заполненный дробью или специальной массой. В узкой части ареометра помещена шкала с делениями, по которым отсчитывают значение плотности. Некоторые типы ареометров снабжены термометром, помещенным внутри расширенной части. Цилиндры для ареометров и ареометры выпускают по ГОСТ 18481-81\*. Измерения плотности жидкости ареометрическим методом проводят в следующем порядке. Исследуемую жидкость предварительно выдерживают при комнатной температуре и заливают в цилиндр. Затем в него опускают ареометр. Когда колебания ареометра прекратятся, делают отсчет по его шкале по верхнему краю мениска. Температуру жидкости измеряют термометром в измерительном приборе или дополнительным термометром.

Пикнометр представляет собой стеклянный баллончик с плоским дном и узким горлышком с пробкой (ГОСТ 22524-77\*). На горлышке имеется метка, ограничивающая измерительную часть объёма пикнометра, который предварительно определяется.

Измерение плотности жидкости при помощи пикнометра проводят в следующем порядке. Исследуемую жидкость заливают в пикнометр несколько выше метки на горлышке и выдерживают в бане при необходимой температуре. Затем удаляют "лишнюю" жидкость до метки на горлышке и проводят взвешивание.

вание. Массу жидкости находят путем вычитания массы пустого пикнометра. Плотность определяют путем деления массы жидкости на объем пикнометра.

Для измерения кинематической вязкости жидкостей наиболее часто используют стеклянные капиллярные вискозиметры (ГОСТ 10028-81\*).

Вискозиметр типа ВПК (Пинкевича) представляет собой стеклянную U - образную трубку, в одно колено которой впаян капилляр, переходящий в два расширения друг над другом. В нижней части второго колена также имеется расширение, а в верхней - отводная трубка для присоединения резиновой груши. Измерения вязкости жидкости проводят в следующем порядке. Заправляют вискозиметр исследуемой жидкостью, согласно указаниям в паспорте прибора, уровень жидкости в нижнем расширении должен составлять  $\approx 3/4$  его высоты. Затем вискозиметр помещают в баню с прозрачными стенками и выдерживают для установления необходимой температуры. Далее при помощи груши жидкость продавливают через капилляр и заполняют оба расширения над ним. После этого дают возможность жидкости течь через капилляр под действием силы тяжести и возвращаться в расширитель в нижней части противоположного колена. Верхний расширитель над капилляром служит для установления необходимого режима течения жидкости, а расположенный под ним - является измерительным и имеет две метки. В задачу измерения вязкости входит определение при помощи секундомера продолжительности истечения объёма жидкости между упомянутыми выше метками расширителя. Значение кинематического коэффициента вязкости определяют по формуле:

$$\nu = \tau \cdot c,$$

где  $\tau$  - продолжительность истечения контрольного объема жидкости через капилляр, с;

$C$  - постоянная вискозиметра, определяемая по его паспортным данным.

Измерение плотности и вязкости жидкостей при давлениях, превышающих атмосферное, требует применения сложной аппаратуры, описание которой можно найти в специальной литературе. При отсутствии возможностей экспериментального определения физических свойств перерабатываемых веществ следует использовать справочные данные, если таковые имеются. В последнюю

очередь необходимо применять расчетные методы определения свойств веществ.

### **Аппаратура, оборудование и материалы**

Для определения физических свойств жидкости (вода) понадобится вискозиметр, ареометр, пикнометр, секундомер, весы.

### **Методика и порядок выполнения работы**

В качестве исследуемой жидкости используют дистиллированную воду. Измерения плотности ареометрическим и пикнометрическим методами и вязкости при помощи вискозиметра типа ВПК проводят при температуре окружающей среды по методикам, описанным выше. Для вязкости необходимо сделать не менее трех замеров времени истечения жидкости через капилляр. По окончании опытов измерительные средства приводят в порядок.

#### **Обработка опытных данных**

Плотность жидкости, измеренную при помощи пикнометра, рассчитывают по формуле:

$$\rho = \frac{G - G_{\text{п}}}{V_{\text{п}}},$$

где  $G$  - масса пикнометра с жидкостью, г;  $G_{\text{п}}$  - масса пикнометра, г;

$V_{\text{п}}$  - объем пикнометра, см<sup>3</sup>.

Полученное значение плотности в г/см<sup>3</sup> переводят в кг/м<sup>3</sup>. При значительном отклонении температуры опыта от 20°C величину  $V_{\text{п}}$  корректируют по указанию преподавателя.

Измеренные двумя методами значения плотности жидкости сравнивают, а при наличии расхождений обсуждают их причины. Удельный вес жидкости рассчитывают по формуле:

$$\gamma = \rho \cdot g.$$

Результаты измерений вязкости усредняют, а опытную величину рассчитывают по формуле:

$$v_{\text{оп}} = \tau \cdot c.$$

При температуре опыта  $t_{\text{оп}}$  рассчитывают вязкость воды по эмпирической формуле:

$$v_p = \frac{0,0178}{(1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2) \cdot 10^4},$$

где  $t = t_{\text{оп}}$ .

Сравнивают найденные величины  $v_{\text{оп}}$  и  $v_p$ , а при наличии расхождений обсуждают их причины.

Динамический коэффициент вязкости жидкости рассчитывают по формуле:

$$\mu = v \cdot \rho.$$

### **Содержание отчета, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе**

В отчете о выполненной работе должны содержаться следующие данные.

1. Цель работы.
2. Эскизы измерительных средств.
3. Результаты измерений.
4. Обработка опытных данных.
5. Выводы по работе.

Выполненное задание оформляется в отдельной тетради с соблюдением требований к отчетным материалам студентов вузов и сдается в сроки, назначенные кафедрой.

К защите допускается студент, выполнивший лабораторную работу в установленном объеме и оформивший отчет согласно требованиям. Защита проводится по теме лабораторной работы.

### **Вопросы для защиты работы**

1. Какие рабочие жидкости применяются в химических производствах?
2. Какие физические свойства жидкостей используют при проектировании процессов и аппаратов химической технологии?

3. Что понимают под мольной массой и нормальной температурой кипения жидкости?
4. Что понимают под критическими параметрами вещества? Как они могут быть определены?
5. Что понимают под теплоёмкостью, теплопроводностью, теплотой испарения, поверхностным натяжением жидкости?
6. Что понимают под плотностью жидкости? Каковы её числовые значения?
7. Что понимают под вязкостью жидкости? Каковы её числовые значения?
8. Какими методами измеряют плотность и вязкость жидкости?

### **Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме**

Рекомендуемая литература.

Основная литература:

- Шишмарев, В.Ю. Средства измерений: учеб. пособие/ В.Ю. Шишмарев; 3-е изд., стер. М.: Академия, 2009. 320 с.
- Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник/ Г.Г. Раннев: М.: Академия, 2009. 323 с.

Дополнительная литература:

- Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник; М.: Колосс, 2004. 344 с.
- Соснин, О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учеб. пособие / О.М. Соснин; М.: Академия, 2007. 356 с.

Интернет-ресурсы:

- Афонский, А.А. Измерительные приборы и электронные измерения: учеб. пособие / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 541 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).

- Данилов, А.Д. Технические средства автоматизации: учеб. пособие / А.Д. Данилов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2007. 340 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Глухов, Д.А. Технические измерения и приборы: учеб. пособие / Д.А. Глухов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2009. 251 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Николайчук, О.И. Современные средства автоматизации, практические решения: учеб. пособие / О.И. Николайчук; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 256 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Дубов, Г.М. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / Г.М. Глухов; изд. КузГТУ, 2011. 224 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3  
**ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА В  
ТРУБОПРОВОДЕ.**

**Цель и содержание:** Практическое изучение методов автоматического измерения расхода и количества воздуха, прошедшего по трубопроводу за заданный интервал времени.

**Теоретическое обоснование**

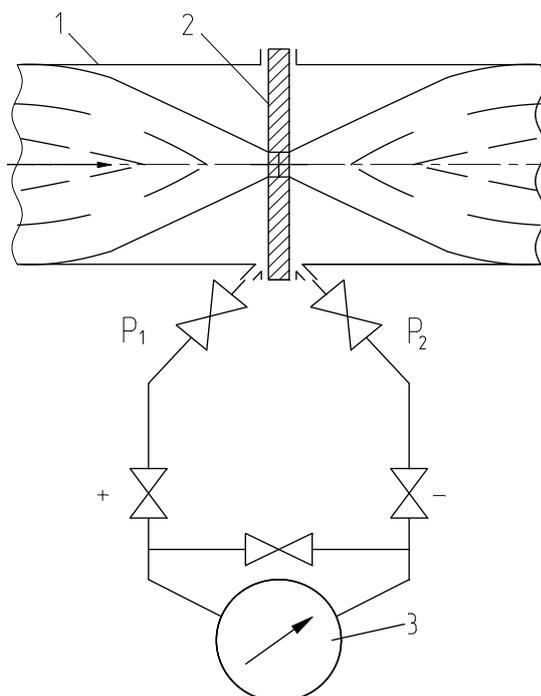
Количество жидкости, газа или пара, проходящее через данное сечение канала в единицу времени, называют расходом этого вещества. В зависимости от того, в каких единицах он измеряется, различают объемный и массовый расходы. Количество вещества измеряют счетчиками количества, а расход—расходомерами.

В химической промышленности наиболее часто применяют расходомеры следующих типов: переменного перепада давления, постоянного перепада давления, переменного уровня и электромагнитные.

*Расходомеры переменного перепада давления* основаны на том, что расход вещества зависит от перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, установленным в трубопроводе, или элементом трубопровода. К этой группе относятся расходомеры с сужающим устройством, с напорным устройством и др.

*Расходомер с сужающим устройством* (рисунок 3.1). Его действие базируется на том, что расход зависит от перепада давления, образующегося в сужающем устройстве в результате частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую. Такой расходомер состоит из установленного в трубопроводе сужающего устройства, перепад давления на котором посредством импульсных соединительных трубок передается на дифманометр и далее на вторичный прибор. Расходомеры этого типа позволяют измерять расходы жидкости, газа и пара в широких пределах при различных температурах и дав-

лениях, а также обеспечивают относительно высокую точность измерения, регистрацию показаний и их передачу на расстояние.



1-трубопровод; 2-диафрагма; 3-дифманометр.

Рисунок 3.1 – Расходомер переменного перепада давления

*Расходомер с напорным устройством.* Его действие базируется на том, что расход зависит от перепада давления, создаваемого напорным устройством в результате перехода кинетической энергии струи в потенциальную. Напорная трубка расходомера, располагаемая по оси трубопровода навстречу потоку, воспринимает полный и статический напоры, разность которых (динамический напор) измеряется посредством дифманометра. Расходомеры с напорным устройством применяются для измерения расхода жидкостей и газов в трубопроводах больших диаметров и при больших скоростях потоков, а также в трубопроводах некруглого сечения.

*Расходомеры постоянного перепада давления* входят в группу расходомеров обтекания. Действие расходомеров постоянного перепада давления основано на том, что расход вещества зависит от вертикального перемещения тела, изменяющего площадь проходного отверстия прибора таким образом, что перепад давления на поплавке остается постоянным. К приборам этого типа относятся ротаметры, поплавковые расходомеры и др.

*Ротаметр* (рисунок 3.2) представляет собой вертикальную коническую, расширяющуюся кверху трубку, в которой находится поплавков. Изменение подачи вещества снизу вверх по этой трубке приводит к перемещению поплавка. Обычно длина трубки ротаметра не менее чем в 10 раз превышает его диаметр, что обеспечивает значительный ход поплавка. При этом поплавок, или связанный с ним стержень, позволяют осуществлять наблюдения.

*Поплавковый расходомер* имеет поплавок конической формы, который вертикально перемещается внутри отверстия на небольшое расстояние (не более диаметра поплавка). Расходомеры снабжаются дистанционной передачей показаний.

Расходомеры постоянного перепада давления имеют большие пределы измерений, позволяют измерять также и малые расходы, обладают небольшими безвозвратными потерями, постоянными во всем диапазоне измерения, имеют равномерную относительную шкалу, но требуют индивидуальной градуировки.

*Расходомеры переменного уровня.* Действие этих приборов основано на том, что расход зависит от высоты уровня жидкости в сосуде при свободном истечении ее через отверстие в дне или боковой стенке сосуда.

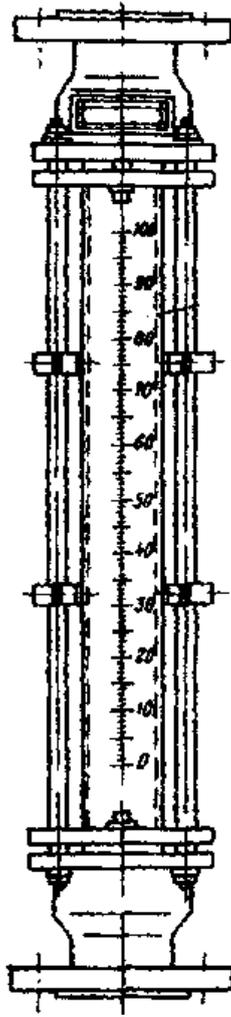


Рисунок 3.2 – Расходомер постоянного перепада давлений.

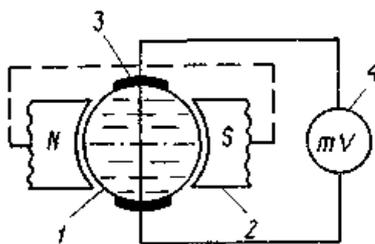
Они состоят из приемника – цилиндрического или прямоугольного сосуда с круглым отверстием для истечения (диафрагмой) в его дне, либо со щелевым отверстием для истечения в боковой поверхности сосуда — и любого стандартного измерителя уровня. Расходомеры переменного уровня применяются для измерения небольших расходов агрессивных жидкостей, пульсирующих жидкостных потоков, а также газожидкостных смесей, находящихся при атмосферном давлении.

*Электромагнитные расходомеры.* Их действие базируется на зависимости ЭДС, индуцируемой в потоке электропроводной жидкости, проходящей через однородное магнитное поле, от средней скорости потока. Они используются для измерения расхода электропроводной жидкости (проводимостью выше  $10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ), протекающей по трубопроводу, расположенному между по-

люсами магнита. Направления потока жидкости и силовых линий магнитного поля взаимно перпендикулярны.

Датчик расходомера (рисунок 3.3) представляет собой отрезок трубы 1 из нержавеющей стали с диаметрально расположенными снаружи полюсами 2 электромагнита. По оси, перпендикулярной им, и заподлицо с внутренней поверхностью трубопровода находятся токосъемные электроды 3. Жидкость, обладающая свойствами проводника в магнитном поле и движущаяся вдоль оси трубопровода, пересекает магнитные силовые линии и в ней наводится ЭДС.

Ионы жидкости перемещаются под действием магнитного поля и отдают свои заряды измерительным электродам, создавая на них ЭДС, пропорциональную скорости течения жидкости и, следовательно, ее расходу. Наводимая ЭДС измеряется вторичным прибором.



1 – труба; 2 – полюса электромагнита; 3 – электроды; 4 – измерительный прибор

Рисунок 3.3 – Электромагнитный расходомер

### Аппаратура, оборудование и материалы

Экспериментальная установка, представленная на рисунок 3.4, включает в себя объект управления, средства автоматизации, управляющую вычислительную машину.

Описание устройства УВМ и его назначение см. в лабораторной работе №1.

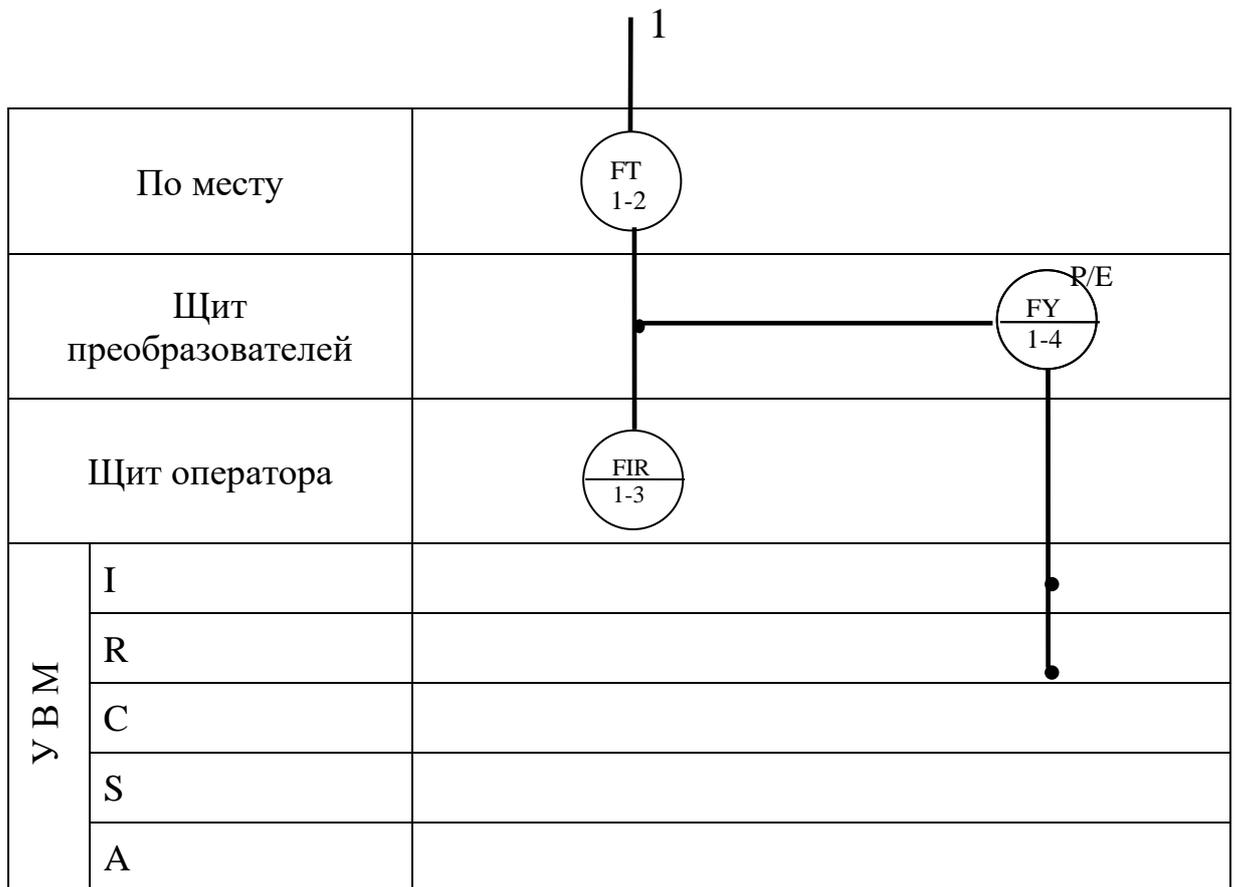
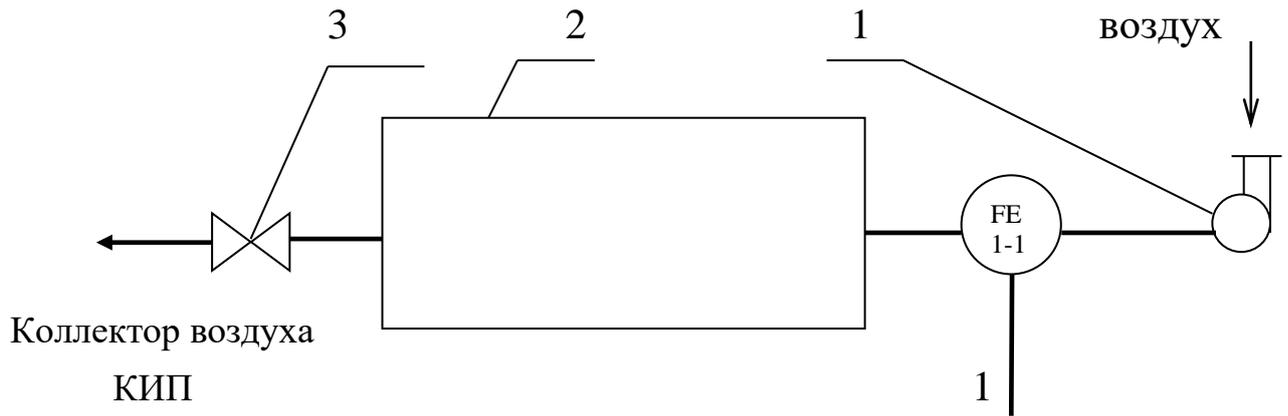
Объектом контроля является трубопровод, а параметром контроля - расход воздуха.

*Функциональная схема контроля расхода воздуха*

Функциональная схема контроля и измерения расхода воздуха в трубопроводе приведена на рисунке 3.4.

Воздух из компрессора 1 поступает в ресивер 2, из которого сбрасывается в атмосферу с помощью ручного вентиля 3.

Первичным преобразователем расхода (датчиком) служит расходомер переменного перепада давления - камерная диафрагма поз. 1-1, установленная на прямолинейном участке трубопровода, сигнал с которой в виде  $\Delta P$  поступает на вход дифманометра поз. 1-2. Выходной сигнал дифманометра 0,02...0,1 МПа (0,2...1 кгс/см<sup>2</sup>) поступает на вторичный прибор поз. 1-3 и пневмоэлектрический преобразователь поз. 1-4, осуществляющий преобразование пневматического сигнала в унифицированный электрический сигнал постоянного тока 0...5 мА, который поступает на УВМ, где происходит измерение значений расхода и количества воздуха, проходящего по трубопроводу.



1 - компрессор; 2 - ресивер воздуха; 3 – вентиль.

Рисунок 3.4 - Функциональная схема измерения расхода.

### Указания по технике безопасности

Перед началом проведения работы проверить, чтобы установка была заземлена и все токоведущие части закрыты.

Включать подачу сжатого воздуха, переключать режимы управления и проводить лабораторную работу только в присутствии преподавателя.

### Методика и порядок выполнения работы

Включить компрессор.

Работа выполняется по вариантам. Исходные условия задания приведены в таблице 3.1.

Для отсчета интервала времени используется драйвер таймера. По истечении заданного интервала времени, программа завершает выполнение.

Таблица 3.1

№ варианта задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Интервал времени, мин	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Определить по прибору расход воздуха и сравнить показания прибора со значениями, подсчитанными УВМ по программе.

Программа для автоматического измерения расхода и количества воздуха, прошедшего по трубопроводу за заданный интервал времени

10 PRINT "Расход и количество"	1010 OUT 11.52: OUT 11.180: OUT
15 INPUT "Интервал (мин)"; TM	11.116
20 GOSUB 1000	1015 OUT 9.2: OUT 9.2
25 GOSUB 700: IF U<0 THEN U=0	1020 OUT 8.2: OUT 8.2
30 F=16*SQR (U/10)	1025 OUT 10.255: OUT 10.255
35 PRINT "F="; F "м.куб./ч."	1030 GOSUB 1100
40 GOSUB 1100: IF TM>T/60 THEN 50	1035 IF S2<255 THEN 1030
45 STOP	1040 OUT 9.255: OUT 9.253
50 DT=(T-TP)/3600: TP=T	1045 OUT 8.87: OUT 8.4
55 SF= SF+F*DT	1050 RETURN
65 GOTO 25	1100 REM отсчет времени

700 REM драйвер МАК	1101 OUT 11.4: OUT 11.132: OUT
710 OUT 6,0	11.68
715 S=INP (4) AND 7	1110 M1=INP(9): S=INP(9)
720 M=INP (5)	1115 M2=INP(10): S2=INP(10)
725 K=S*256+M	1120
730 U=-10+20*K/2048	K=M1+S1*256+M2*256^2+S2*256^3
735 RETURN	1125 T=(256^4-K)/1000
1000 REM драйвер таймера	1130 RETURN
1005 REM запуск таймера	

Аналого-цифровой преобразователь, преобразующий сигнал входного напряжения от -10 до +10 В в одиннадцатиразрядный двоичный код.

S - значение старшего байта кода АЦП;

M - значение младшего байта кода АЦП;

K - измеренный код АЦП;

И - измеренное напряжение.

Сделать выводы по работе и составить спецификацию на применяемые приборы и средства автоматизации. Образец составления спецификации см. в лабораторной работе 1.

### **Содержание отчета, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Функциональная схема, ее описание.
4. Спецификация приборов и средств автоматизации.
5. Результаты выполнения работы.
6. Выводы.

Отчет может быть представлен в рукописном или на формате А4 в машинописном вариантах.

## Вопросы для защиты работы

1. Назначение и принцип действия приборов для измерения расхода и количества вещества.
2. Какие функции выполняет УВМ?
3. Перечислить контрольно-измерительную и регулирующую аппаратуру, дать ей характеристику: назначение, преобразования, диапазон измерения.
4. Назначение преобразующих устройств; с какой целью они используются совместно УВМ?
5. Правила установки сужающих устройств.

К защите допускается студент, выполнивший лабораторную работу в установленном объеме и оформивший отчет согласно требованиям. Защита проводится по теме лабораторной работы.

### **Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме**

Рекомендуемая литература.

Основная литература:

- Шишмарев, В.Ю. Средства измерений: учеб. пособие/ В.Ю. Шишмарев; 3-е изд., стер. М.: Академия, 2009. 320 с.
- Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник/ Г.Г. Раннев: М.: Академия, 2009. 323 с.

Дополнительная литература:

- Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник; М.: Колосс, 2004. 344 с.
- Соснин, О.М. Основы автоматизации технологических процессов и производств: учеб. пособие / О.М. Соснин; М.: Академия, 2007. 356 с.

## Интернет-ресурсы:

- Акулович, Л.М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов: учеб. пособие / Л.М. Акулович, В.К. Шеленг. Минск: новое издание; М.: ИНФА, 2012. 488 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Афонский, А.А. Измерительные приборы и электронные измерения: учеб. пособие / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 541 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Данилов, А.Д. Технические средства автоматизации: учеб. пособие / А.Д. Данилов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2007. 340 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Глухов, Д.А. Технические измерения и приборы: учеб. пособие / Д.А. Глухов; Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 2009. 251 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Николайчук, О.И. Современные средства автоматизации, практические решения: учеб. пособие / О.И. Николайчук; М.: СОЛОМОН–ПРЕСС, 2009. 256 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).
- Дубов, Г.М. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие / Г.М. Глухов; изд. КузГТУ, 2011. 224 с. – Режим доступа: [e/lanbook.com](http://e/lanbook.com).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.

**Цель и содержание:** Практическое изучение методов автоматического измерения температуры паровоздушной смеси и регулирования температуры жидкости с помощью УВМ.

#### Теоретическое обоснование

##### *Измерение температуры*

В устройствах для измерения температуры обычно используют изменение какого-либо физического свойства тела, однозначно зависящего от его температуры и легко поддающегося измерению. К числу свойств, положенных в основу работы приборов для измерения температуры, относятся: объемное расширение тел, изменение давления вещества в замкнутом объеме, возникновение термоэлектродвижущей силы, изменение электрического сопротивления проводников и полупроводников, интенсивность излучения нагретых тел и др.

##### Классификация приборов контроля температуры

В зависимости от принципа действия приборы для измерения температуры делятся на следующие группы:

Термометры расширения, основанные на изменении объема жидкости или линейных размеров твердых тел при изменении температуры.

Манометрические термометры, основанные на изменении давления вещества при постоянном объеме при изменении температуры.

Термоэлектрические термометры, основанные на изменении термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) термопары от температуры.

Термометры сопротивления, основанные на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента (проводников, полупроводников) при изменении их температуры.

Пирометры излучения, из которых наибольшее распространение получили:

а) оптические, основанные на измерении интенсивности монохроматического излучения нагретого тела;

б) цветовые (пирометры спектрального отношения), основанные на измерении распределения энергии в спектре теплового излучения тела;

в) радиационные, основанные на измерении мощности излучения нагретого тела.

Эта классификация положена в основу при рассмотрении методов и приборов для измерения температуры

#### *Термометры расширения*

##### Жидкостные стеклянные термометры

Жидкостные стеклянные термометры - такие приборы, в которых происходит изменение объема жидкости.

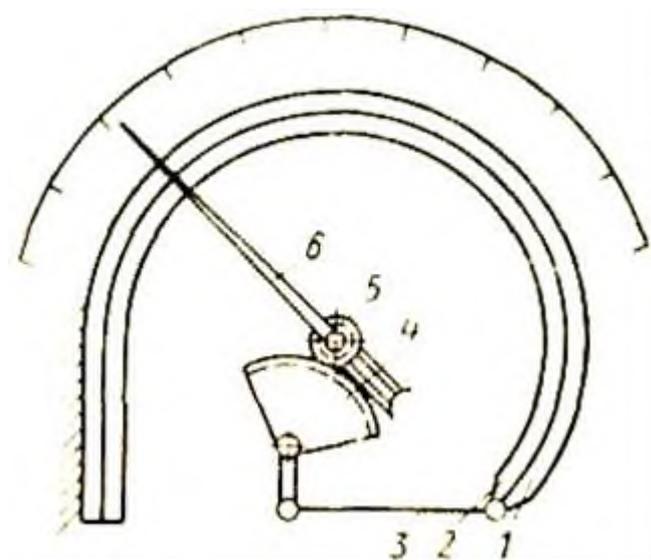
Измерение температуры жидкостными стеклянными термометрами основано на различии коэффициентов объемного расширения жидкости и материала оболочки термометра. Наибольшее распространение получили ртутные стеклянные термометры. Недостаток ртути – сравнительно небольшой температурный коэффициент. Коэффициент расширения ртути мало изменяется при изменении температуры, поэтому шкала ртутного термометра до 200 0С практически линейна.

Термометры с органическими жидкостями из-за ряда недостатков применяются только при измерении низких температур. Из всех таких термометров наибольшее распространение получили спиртовые.

Ртутные стеклянные термометры благодаря простоте и относительно высокой точности показаний довольно широко используются в лабораторной и производственной практике. Основные недостатки жидкостных стеклянных термометров – невозможность регистрации и передачи показаний на расстояние, а также значительная тепловая инерция.

#### *Термометры, основанные на расширении твердых тел*

Биметаллический термометр схематически показан на рисунке 4.1.



1, 2 - пластины; 3 - тяга; 4 - зубчатый сектор; 5 - зубчатое колесо; 6 –  
стрелка.

Рисунок 4.1 - Схема биметаллического термометра с дугообразной пласти-  
ной

Он состоит из дугообразной изогнутой пластинки, изготовленной из двух пластин 1 и 2 из различных металлов (например, меди и инвара) с различными коэффициентами линейного расширения, приваренных одна к другой по всей длине. Обычно внутренняя пластина 2 изготавливается из металла с большим коэффициентом линейного расширения. При повышении температуры пластинка разгибается. Деформация пластинки с помощью тяги 3, зубчатого сектора 4 и зубчатого колеса 5 передается стрелке 6.

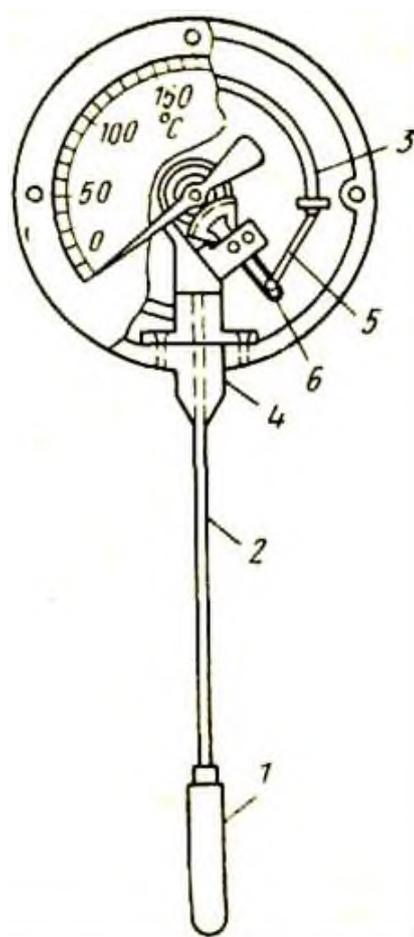
Верхний предел измерения при использовании биметаллической пластинки ограничивается пределом упругости материала. В качестве чувствительного элемента применяют также плоские и винтовые спирали. Пределы измерения биметаллическими термометрами от  $-150$  до  $+700^{\circ}\text{C}$ , погрешность 1—1,5%.

*Манометрические термометры*

Схема манометрического термометра показана на рисунке 4.2

Прибор состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометрической части 3 — 6. Вся система прибора (термобаллон, капилляр, манометрическая пружина) заполняется рабочим веществом. Термобаллон помещают в зону измерения температуры.

При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической трубкой (пружиной), которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора. Термобаллон обычно изготавливают из нержавеющей стали, а капилляр - из медной или стальной трубки внутренним диаметром 0,15—0,5 мм. В зависимости от назначения прибора длина капиллярной трубки может быть различна (до 60 м). Для защиты от механических повреждений капилляр помещают в защитную оболочку из стального плетеного рукава.



1 - термобаллон; 2 - капиллярная трубка; 3 - трубчатая пружина; 4 - держатель; 5 - поводок; 6 - зубчатый сектор.

Рисунок 4.2 - Манометрический термометр с трубчатой пружиной

В манометрических термометрах применяют одновитковые, многовитковые с числом витков от 6 до 9 и спиральные манометрические трубки.

Манометрические термометры широко применяют в химических производствах. Они просты по устройству, надежны в работе и при отсутствии и электропривода - взрыво- и пожаробезопасны. С помощью этих приборов можно измерять температуру в диапазоне от  $-120$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ .

К специфическим недостаткам газовых манометрических термометров относится их сравнительно небольшая тепловая инерция; большие размеры термобаллона, что затрудняет его установку на трубопроводах малого диаметра.

Различают следующие типы манометрических термометров:

Газозаполненные (газовые), вся система которых заполнена газом под некоторым начальным давлением.

Жидкозаполненные (жидкостные), система которых заполнена жидкостью.

Конденсационные, в которых термобаллон частично заполнен низкокипящей жидкостью, а остальное его пространство заполнено парами этой жидкости.

*Термоэлектрические термометры* состоят из термоэлектрического преобразователя (термопары), действие которого основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) термопары от температуры рабочего спая, если температура свободного спая постоянна. При увеличении разности температур между рабочим и свободным спаями термопары величина ТЭДС возрастает.

Любая пара разнородных проводников может образовать термопару, однако, не всякая термопара будет пригодна для практического применения, т.к. термоэлектроды отвечают следующим требованиям: устойчивость к воздействию высоких температур; постоянство термоЭДС во времени; возможно большая величина термоЭДС и однозначная ее зависимость от температуры; небольшой температурный коэффициент электрического сопротивления и большая электропроводность; воспроизводимость термоэлектрических свойств, обеспечивающая взаимозаменяемость термопар.

Всем указанным требованиям не удовлетворяет полностью ни один из известных термоэлектродных материалов. Поэтому приходится пользоваться различными материалами в разных пределах измеряемых температур.

Наибольшее распространение получили следующие типы термоэлектрических преобразователей (таблица 4.1).

Таблица 4.1

Тип преобразователя	Пределы измерения, °С
Платинородий–платинородиевые (ТПР)*	От 300 до + 1600**
Платинородий–платиновые (ТПП)*	От 0 до + 1300***
Хромель–копелевые (ТХК)*	От – 50 до + 1000**
Вольфрамрений–вольфрамрениевые (ТВР):	От – 50 до + 600**
при длительном применении	До 1800
при кратковременном применении	До 2500

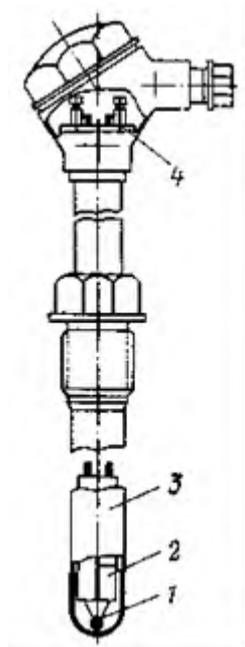
\* При длительном измерении.

\*\* При кратковременном измерении может быть повышен на 200 °С.

\*\*\* То же, на 300 °С.

Конструктивно ТЭП представляет собой две проволоки из разнородных материалов, концы которых скручиваются, а затем свариваются и спаиваются (Как правило, горячий спай промышленных ТЭП изготавливается сваркой в пламени вольтовой дуги. Спай термопары остается голым или изолируется фарфоровым наконечником, помещенным на дне защитной металлической трубки.

Проволочные электроды термопары изолируют один от другого по всей длине от рабочего спая керамическими изоляторами или асбестовым шнуром, помещают термопару в стальной или керамический чехол, свободные концы подключают к клеммнику с крышкой. Рабочий спай изолируется от чехла керамическим наконечником. Устройство ТП показано на рисунке 4.3



1 – рабочий спай термопары; 2 — изоляторы; 3 — чехол; 4 — клеммник

Рисунок 4.3 – Термоэлектрический преобразователь

Для измерения ТЭДС в качестве вторичных приборов обычно применяют потенциометры или милливольтметры. В комплекте с ними термоэлектрические термометры позволяют измерять и регистрировать температуру с высокой точностью и передавать показания на расстояние.

*Термометры сопротивления* состоят из термопреобразователя сопротивления, действие которого основано на использовании зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры.

В качестве вторичных приборов в комплекте с термометрами сопротивления обычно применяются равновесные мосты и логометры.

Наибольшее распространение получили ТС с платиновым чувствительным элементом (ТСП) и медным (ТСМ). Графики зависимости сопротивления от их температуры показаны на рисунке 4.4.

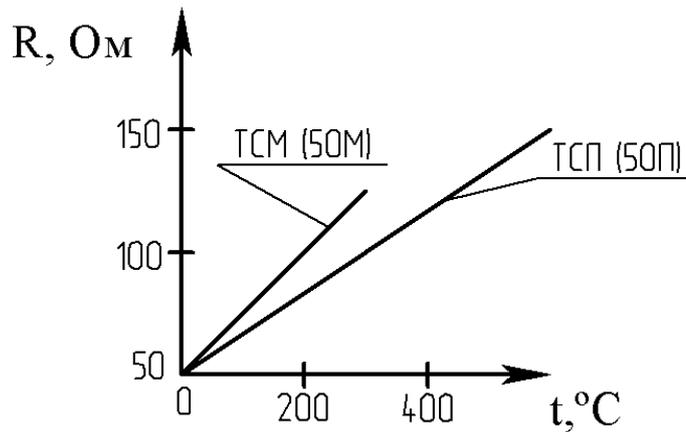


Рисунок 4.4 – Зависимость сопротивления от температуры

Практически – это прямые линии. Значение температурного коэффициента электрического сопротивления меди выше, чем у платины, поэтому ТСМ чувствительнее к изменению температуры. Этим и объясняется большая крутизна графика. Однако, верхний предел измерения температуры для ТСМ – 200 °C, а для ТСП – 1100 °C. Нижние пределы соответственно равны -200 °C и -260 °C.

*Пирометры излучения.* Их действие основано на изменении интенсивности излучения нагретых тел при изменении температуры. К ним относятся (таблица 1.2):

Таблица 4.2

Тип пирометра	Пределы измерения, °C
Пирометры частичного излучения (оптические)	От 700 до 6000
Пирометры полного излучения	От 100 до 2500
Пирометры спектрального отношения (цветовые)	От 1400 до 2800

При измерении пирометрами частичного и полного излучения необходимо вводить поправку на неполноту излучения (степень черноты) тела, температура которого измеряется. Пирометры излучения применяются для бесконтактного определения температуры тел. Погрешности пирометров излучения составляют 0,5...2%.

В химических производствах наибольшее распространение получили термометры расширения, термоэлектрические термометры и термометры сопротивления.

По сравнению с другими средствами автоматизации устройства для измерения температуры, как правило, обладают большей инерционностью и более значительным запаздыванием.

### *Преобразователи*

В автоматических системах управления для взаимного согласования входящих в них элементов, обеспечения дистанционной передачи сигналов по каналам связи, удобства регистрации показаний и т. п. используют преобразователи сигналов и энергии (электрические, пневматические, частотные).

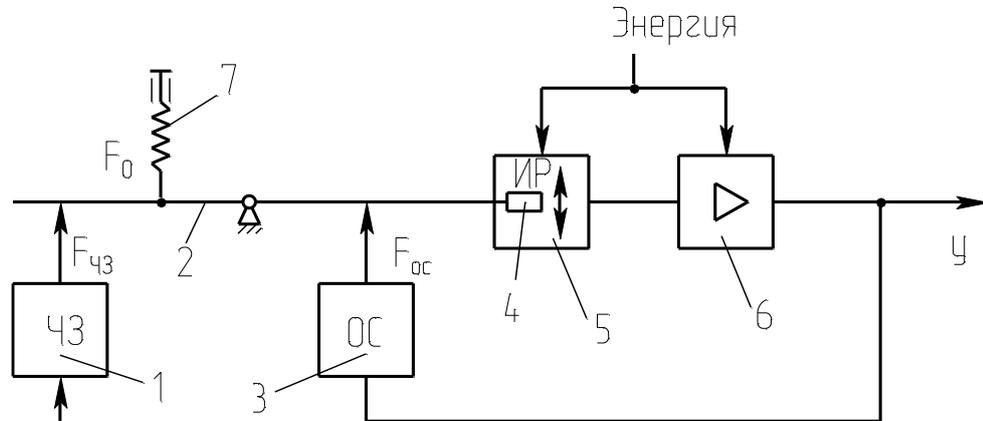
Установлены следующие унифицированные выходные сигналы:

- 1) для электрической аналоговой ветви:  
величина постоянного тока с пределами измерения 0-5, 0-20, 4 -20 и 0-100 мА;  
напряжение постоянного тока 0-10 В и напряжение переменного тока 0-1, 0-2 В;
- 2) для электрической частотной ветви – частота 1500-2500 Гц;
- 3) для пневматической ветви – давление сжатого воздуха с пределами измерения 0,02-0,1 МПа.

Преобразователи электрической аналоговой ветви служат для преобразования неэлектрических величин (расход, уровень, давление и др. параметры) в электрический выходной сигнал и передачи показаний на расстояние. Одной из распространенных систем передачи измерительной информации является электрическая система с унифицированным токовым сигналом. Использование постоянного тока в этой системе повышает ее помехоустойчивость, т. к. позволяет исключить влияние индуктивности и емкости линий связи на сигнал измерительной информации и увеличивает сигнал канала связи до 5-20 км.

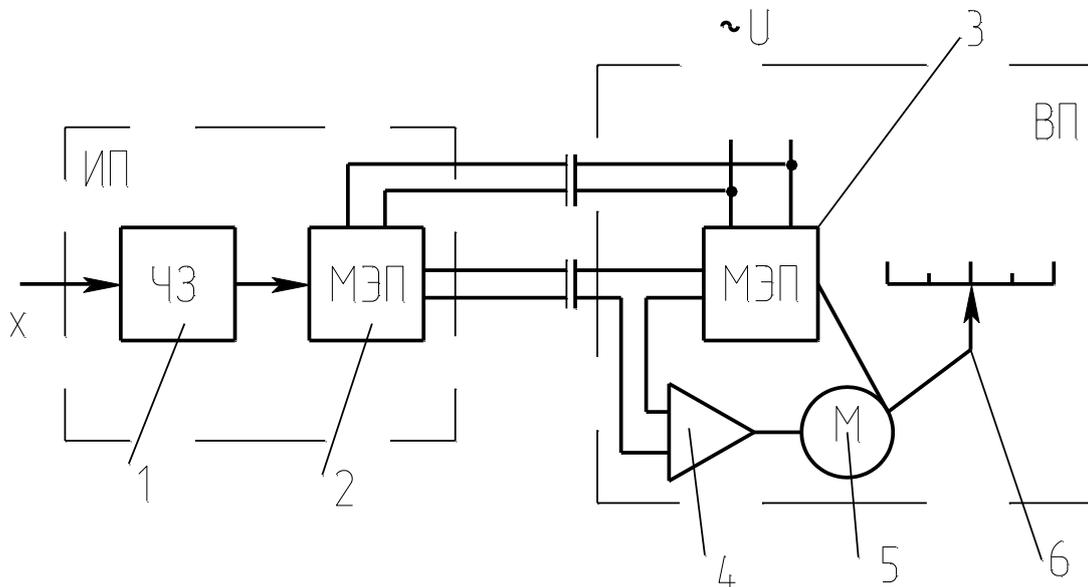
Преобразователи электрической аналоговой ветви могут быть выполнены по схеме компенсации перемещений и по схеме компенсации усилий (рисунки 4.5 и 4.6). В основу положен компенсационный принцип измерения.

Электрические унифицированные измерительные преобразователи предназначены для непрерывного преобразования величин в электрический токовый сигнал дистанционной передачи. Выходной сигнал преобразователя может быть равен  $0...5$ ;  $0...20$  мА.



1-чувствительный элемент; 2-рычаг; 3-узел обратной связи; 4-подвижный элемент; 5-индикатор рассогласования; 6-усилитель; 7-корректор.

Рисунок 4.5 – Схема преобразователя с компенсацией усилий



ИП-датчик (измерительный преобразователь); ВП – вторичный прибор; 1-чувствительный элемент; 2,3-механо-электрические преобразователи; 4-электронный усилитель; 5-реверсивный электродвигатель; 6-указатель.

Рисунок 4. 6 – Схема преобразователя с компенсацией перемещения

В преобразователе, приведенном на рисунке 9, перемещение подвижного элемента первичного прибора уравнивается перемещением подвижного элемента вторичного прибора.

*Нормирующие преобразователи* используют в автоматических системах управления для взаимного согласования входящих в них элементов, обеспечения дистанционной передачи по каналам связи, удобства регистрации показаний и т.п.

*Преобразователь ТЭДС термоэлектрических* термометров в унифицированный токовый сигнал состоит из измерительного моста и усилителя, охваченного обратной связью по выходному току. Ток, протекающий через внешнюю нагрузку, пропорционален выходному напряжению. Падение напряжения при протекании этого тока через резистор обратной связи уравнивает напряжение на выходе измерительного моста.

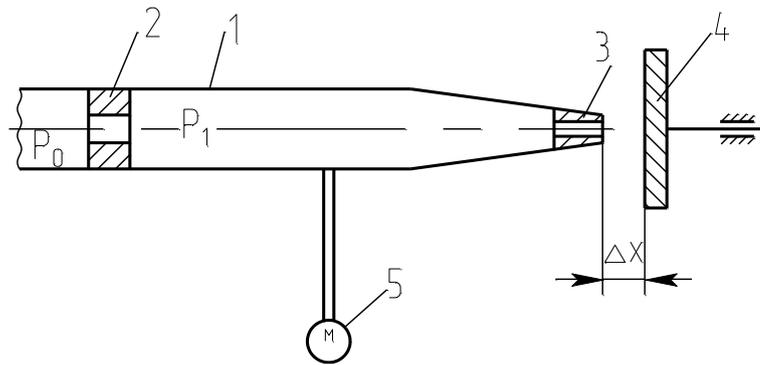
Преобразователь работает с термоэлектрическими термометрами стандартных градуировок. Выходной сигнал преобразователя  $I = 0-5, 4-20$  мА.

*Преобразователь для термометров сопротивления* работает в комплекте с платиновыми и медными термометрами сопротивления, изменение сопротивления которых он преобразует в унифицированный токовый сигнал. Преобразователь состоит из измерительного моста и усилителя, охваченного отрицательной обратной связью по выходному току.

Выходной сигнал преобразователя  $I = 0-5$  мА,  $4-20$  мА.

*Пневматические унифицированные измерительные преобразователи* (рисунки 1.7). В пневматических преобразователях основным элементом является преобразователь типа сопло-заслонка. Измерительные преобразователи предназначены для непрерывного преобразования давления, разрежения, перепада давления, расхода, температуры, уровня, плотности или температуры в унифицированный пневматический выходной сигнал.

Преобразователи состоят из измерительного блока, силового узла и усилителя. Пневматические преобразователи также построены по схеме компенсации усилий и по схеме компенсации перемещений.



1-трубка; 2-дрессель постоянного сечения; 3-сопло; 4-заслонка; 5-манометр.

Рисунок 4.7 – Пневмопреобразователь типа сопло-заслонка

*Электропневматический преобразователь* непрерывного унифицированного сигнала постоянного тока выдает на выходе пневматический унифицированный сигнал. Действие прибора основано на преобразовании тока в пропорциональное усилие при помощи магнитоэлектрического механизма. В схемах измерения и регулирования температуры электропневматический преобразователь работает в комплекте с описанными выше преобразователями для термоэлектрических термометров или термометров сопротивления, выдающими унифицированный токовый сигнал. Входной сигнал преобразователя  $I = 0 - 5$  мА,  $4 - 20$  мА, выходной сигнал преобразователя  $P_{\text{вых}} = 0,02 - 0,1$  МПа ( $0,2 - 1$  кгс/см<sup>2</sup>).

### Аппаратура, оборудование и материалы

Экспериментальная установка, представленная на рисунок 4.8, включает в себя объект управления, нагревательный элемент, средства автоматизации и управляющую вычислительную машину.

В состав УВМ входит блок управления, блок клавиатуры и блок индикации. УВМ обеспечивает ввод алфавитно-цифровой и управляющей информации с блока клавиатуры устройства. УВМ имеет возможность отсчета интервала времени по заданной программе и выполняет аналого-цифровое преобразование величины напряжения постоянного тока, задаваемого блоком управления или подаваемого с внешнего устройства и цифро-аналоговое преобразование.



Температура воды T2 контролируется и регулируется. Первичным преобразователем служит термопара (поз. 2-1), ЭДС с ее выводов подается на преобразователь (эдс - ток) для усиления и нормирования сигнала (поз. 2-2), а с преобразователя на УВМ (модуль ввода - вывода дискретных сигналов МВВ-Д, преобразователь ток - напряжение (I/U), аналого - цифровой преобразователь (АЦП), с которого значение T2 выводится на дисплей УВМ).

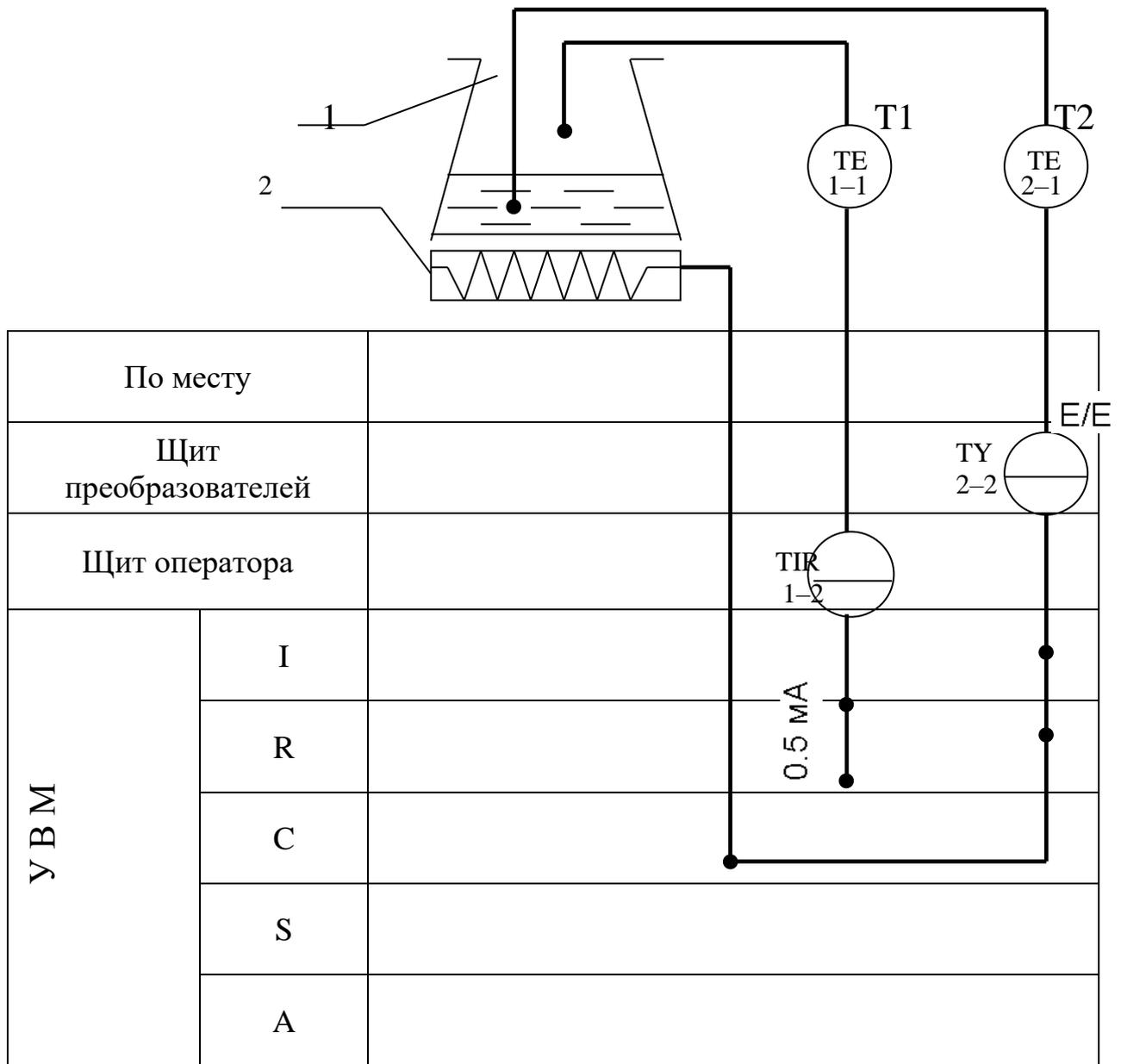
Для регулирования температуры воды T2 используется УВМ, реле с исполнительным контактом K1 и нагреватель.

УВМ выполняет функции задающего устройства, сравнивающего устройства и двухпозиционного регулятора.

Реле и нагреватель выполняют роль исполнительного органа.

Операции контроля, индикации и регулирования реализуются программным путем на УВМ.

В МВВ-Д выход номер "0" используется для подключения контура измерения температуры; выход номер "1" - для подключения контура регулирования температуры; выход номер "2" - для включения и отключения нагревателя.



1 - емкость; 2 – нагреватель.

Рисунок 4.9 – - Измерение и регулирование температуры. Функциональная схема

### Указания по технике безопасности

Перед началом работы проверить, чтобы установка была заземлена и все токоведущие части закрыты.

Включать установку и проводить лабораторную работу только в присутствии преподавателя.

### Методика и порядок проведения работы

Включить установку.

Перед началом выполнения работы необходимо набрать с клавиатуры программу, по которой осуществляется автоматическое измерение температуры паровоздушной смеси и позиционное регулирование температуры жидкости.

Нажав в латинском регистре клавишу "B", осуществить вызов интерпретатора языка "Бейсик" и набрать предложенную программу.

Программа автоматического измерения и регулирования температуры

10 PRINT "Температура"	150 N=2: D=1: GOSUB 600
20 INPUT "Заданная"; T0	160 GOTO 30
30 N=0: D=0: 1: D=1: 36 GOSUB 600	600 y= 2^N
40 N=1: D=1: GOSUB 600	610 z= y*D
50 IF INP (0)< >255 THEN 10	620 DU=DU AND(255-y)
60 GOSUB 700: T1=100*U/10	630 DU=DU OR Z
70 PRINT "T1"; INT(T1);	640 OUT 16, DU
80 N=1: D=0: GOSUB 600	650 RETURN
90 N=0: D=1: GOSUB 600	700 OUT 6,0
100 GOSUB 700: T2=-50+250*U/10	710 S=INP (4) AND 7
110 PRINT "T2="; INT(T2)	720 M=INP(5)
120 IF T2>T0 THEN 150	730 K=S*256+M
130 N=2: D=0: GOSUB 600	740 U=K/102.35-10
140 GOTO 30	750 RETURN

DU - состояние порта вывода дискретных сигналов;

N - номер выхода (лампы);

y - десятичный эквивалент номера выхода;

z - десятичный эквивалент состояния выхода.

Далее следует запустить программу на выполнение и ввести с клавиатуры заданное значение температуры  $T_0$  (по указанию преподавателя).

Т.к. контакт МВВ-Д и реле (контакт К) имеют только 2 состояния "замкнуто" и "разомкнуто", то нагреватель может быть включен или выключен. При включенном нагревателе температура объекта повышается, а при выключенном снижается, стремясь к температуре окружающей среды  $T_{ос}$ .

Т.к. нагреватель и объект достаточно инерционны, то температура воды  $T_2$  повышается плавно при включении нагревателя, а когда она достигает заданного значения  $T_0$ , УВМ дает команду на размыкание контакта 2 и реле замыкает свой контакт К1.

Т.к. температура нагревателя выше температуры объекта, то при отключении обогревателя  $T_2$  продолжает повышаться за счет запаздывания тепловых процессов. Только после снижения температуры нагревателя до температуры объекта начинается их совместное охлаждение.

По результатам проделанного опыта построить график зависимости  $T_2$  от времени, измеряя значения  $T_2$  каждые 5 мин., а также графически изобразить работу нагревателя, т.е. построить динамические характеристики. Сделать выводы по проделанной работе, а также составить спецификацию приборов и средств автоматизации по аналогии с таблицей 4.3.

### **Содержание отчета, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Функциональная схема, ее описание.
5. Программа для выполнения работы.
6. Результаты выполнения работы привести в виде таблицы, построить временные характеристики.
7. Выводы по проделанной работе.

Отчет может быть представлен в тетради в рукописном варианте или на формате А4 в машинописном варианте.

### **Вопросы для защиты работы**

1. Классификация приборов для измерения температуры.
2. Для каких целей предназначена УВМ?
3. Назначение преобразующих устройств, с какой целью они используются совместно с УВМ?
4. Как осуществляется позиционное регулирование паровоздушной смеси?
5. Объяснить принцип работы позиционного регулятора.
6. Привести динамические характеристики позиционного регулятора.
7. На чем основан принцип действия ТЭП?
8. На чем основан принцип действия термометров расширения?
9. Виды термометров расширения.
10. Виды манометрических термометров, достоинства и недостатки.
11. На чем основан принцип действия термометров сопротивления?

К защите допускается студент, выполнивший лабораторную работу в установленном объеме и оформивший отчет согласно требованиям. Защита проводится по теме лабораторной работы.

Таблица 4.3

Заказная спецификация приборов и средств автоматизации							
СКФУ НТИ 40		Производство аммиачной селитры. Отделение нейтрализации			Курсовой проект		
					Лист	Листов	
	Наименование параметра, среда, место отбора импульса	Предельное значение параметра	Место установки	Наименование и характеристика	20 Тип, модель	36 Завод-изготовитель	
1	2	3	4	5	6	7	
1a	Температура, пар, перегретый давлением 8 МПа	200 К	На трубопроводе	Термоэлектрический преобразователь(термопара),предел измерения -40 — +850 <sup>0</sup> С, гр.ХА(К)	ТП-2187	НПП Элемер п.Менделеево	
10	40	15	30	90	30		
240							



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования**  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**Невинномысский технологический институт (филиал)**

Методические указания по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Технические измерения и приборы»

Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и  
производств  
Квалификация выпускника – бакалавр

Лабораторный практикум разработан в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки бакалавров направления 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Лабораторный практикум предназначен для студентов всех форм обучения. В практикуме содержатся основы теории, описание опытных установок, порядок проведения лабораторных работ и обработки экспериментальных данных, перечень контрольных вопросов для самоподготовки по указанным дисциплинам и список рекомендуемой литературы.

## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. До выполнения лабораторных работ каждый студент должен изучить правила техники безопасности.
2. Лабораторные работы выполняются бригадами из 2—3 студентов.
3. Состав бригад, названия лабораторных работ сообщаются студентам на первом лабораторном занятии.
4. Для проведения каждой работы студент обязан дома:
  - а) подготовить теоретический материал;
  - б) подготовить протокол – отчет по лабораторной работе с вычерченными схемами, таблицами для записи показаний приборов и результатов вычислений;
  - в) ответить на контрольные вопросы. Если на некоторые вопросы не будет найден ответ до проведения работы, его нужно получить самостоятельно или при помощи преподавателя в лаборатории.

Без предварительной домашней подготовки студенты к проведению лабораторной работы не допускаются.

5. Перед сборкой электрической цепи нужно ознакомиться с приборами, аппаратами и макетами, записать их краткие характеристики и убедиться в соответствии их рабочих напряжений напряжению сети.
6. Перед выполнением лабораторной работы необходимо распределить обязанности между членами бригады.

При выполнении работы запрещается вносить в нее какие-либо изменения без разрешения преподавателя.

7. Перед сборкой схемы необходимо включить все электронные измерительные приборы для их предварительного прогрева.
8. Сборку схемы следует начинать с главных силовых цепей, а подсоединение их к клеммам питания лабораторной установки производить только после разрешения преподавателя или лаборанта. Для силовых цепей нужно применять провода большего сечения, чем для цепей управления.

9. После проверки собранной цепи всеми членами бригады и преподавателем ее необходимо подключить к питанию, после чего установка может быть включена.
10. Показания приборов следует записывать четко и аккуратно, предварительно вычислив цену деления измерительного прибора.
11. Во время выполнения лабораторной работы от лабораторного стола запрещается.
12. По окончании работы рекомендуется выключить пусковой аппарат на лабораторном щите, но цепь не разбирать до проверки преподавателем полученных результатов.
13. Прежде чем начать следующую лабораторную работу, нужно предъявить отчет о предыдущей. В отчете, кроме записей произведенных дома при подготовке к работе, должны быть вычерчены графики в масштабе и сделаны краткие выводы. Если не предъявлен отчет о проделанной работе, студент не допускается к выполнению следующей работы.
14. Студенты защищают лабораторные работы по графику, составленному преподавателем. При защите могут быть использованы специальные программы – тесты, либо преподаватель принимает устную защиту .

## **ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СБОРКЕ СХЕМЫ И ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ**

1. Перед сборкой схемы нужно убедиться в том, что лабораторная установка отключена от питающей сети. Подсоединение схемы к клеммам питания лабораторной установки производить только после проверки ее преподавателем.
2. После включения лабораторной установки нельзя производить какие-либо изменения в схеме, а также прикасаться к клеммам.
3. Лабораторные столы не должны загромождаться посторонними предметами. Проходы должны быть свободны от стульев и других предметов.
4. Во время сборки схемы нужно прокладывать провода так, чтобы было меньше пересечений. Нельзя допускать свертывания проводов и подсоединения их в натянутом состоянии. Неиспользованные, а также поврежденные соединительные провода следует убирать с лабораторного стола.
5. Собранные схемы подключаются к питанию лабораторной установки только после разрешения преподавателя и предупреждения об этом всех членов бригады, совместно выполняющих эту работу.
6. После окончания испытания или перерыва в работе схему отключают от сети.
7. Во время выполнения работы запрещается:
  - а) производить пересоединения в схеме, находящейся под напряжением;
  - б) прикасаться к оголенным токоведущим частям.
8. При неисправностях в аппаратах, приборах и проводах нужно отключить схему и известить об этом преподавателя.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### “ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЕМКOSTНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ”

**Цель работы:** Исследовать отдельные виды емкостных измерительных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристики, точности и возможности применения.

#### ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Исследование емкостного преобразователя уровня жидкости.
2. Исследование одинарного емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.
3. Исследование дифференциального емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.
4. Исследование емкостного преобразователя углового перемещения.

#### ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

Принцип действия емкостных преобразователей основан на взаимодействии двух заряженных тел (электродов), образующих конденсатор, значение емкости которого изменяется под действием входной неэлектрической величины.

В общем случае емкость конденсатора есть произведение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  на геометрическую проводимость зазора между электродами  $G$

$$C = \varepsilon \cdot G, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ;

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Проводимость  $G$  определяется геометрией электродов и их взаимным расположением. В простейшем случае для плоскопараллельного конденсатора

$$G=S/\delta, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь перекрытия электродов;  
 $\delta$  — расстояние между электродами.

Таким образом, емкость плоского конденсатора

$$C=\varepsilon \cdot S/\delta \quad (3)$$

Входная физическая величина может изменять  $\delta$ ,  $S$  или  $\varepsilon$ . Функциональные связи между этими параметрами и входными величинами позволяют создавать различные варианты датчиков для измерения разнообразных входных величин.

На рисунке 1 приведены некоторые варианты емкостных измерительных преобразователей в зависимости от области их применения:

— преобразователь с переменной длиной воздушного зазора одинарного (рисунок 1а) и дифференциального (рисунок 1б) типов. Применяется для измерения малых перемещений (от единиц микрометров до долей миллиметров), а также для измерения малых сил, давлений, размеров и т.д.;

— преобразователи с переменной площадью перекрытия электродов одинарного (рисунок 1в) и дифференциального (рисунок 1г) типов;

— преобразователи с изменяющейся величиной диэлектрической проницаемости (рисунок 1ж) и с изменяющимся соотношением размеров двух различных диэлектриков в зазоре между электродами (рисунки 1з и 1е).

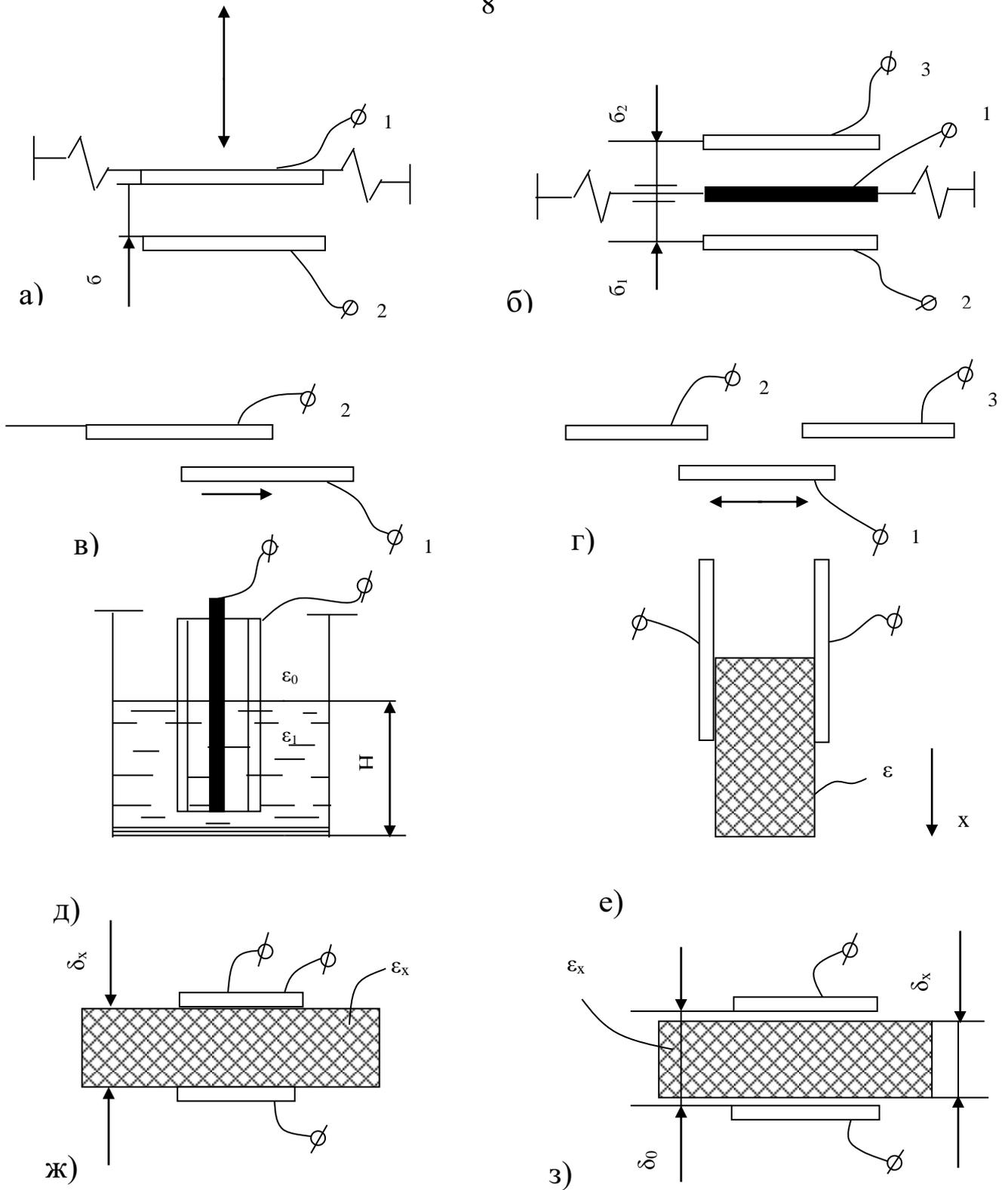


Рисунок 1 – Типы емкостных преобразователей

Из этой группы в качестве примера приведены: преобразователь уровня жидких или сыпучих сред с цилиндрическими электродами (рис.1д), преобразователь толщины диэлектрической ленты (рисунок 1з).

В дифференциальных конструкциях емкостных ИП (рисунки. 1б и 1г) емкости между электродами 1-3 и 1-2 изменяются при перемещении подвижного электрода 1 на одну и ту же величину, но с разными знаками. При включении электродов в разностную измерительную схему, например, мостовую, можно получить существенное улучшение метрологических характеристик. Увеличивается чувствительность, точность, улучшается линейность характеристики.

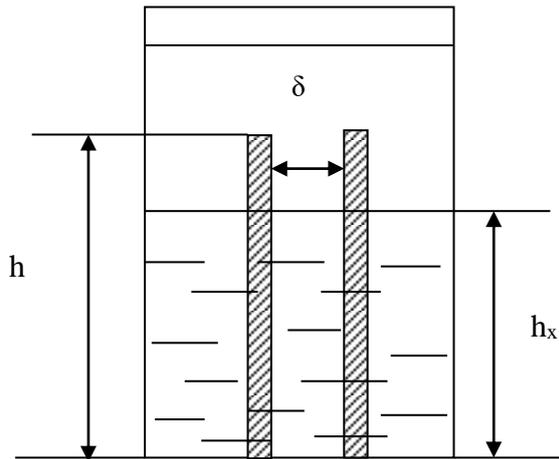
Погрешности емкостного преобразователя возникают в результате изменения температуры, влажности окружающей среды, напряжения и частоты питания, а также вследствие наводок и помех. Последнее в большей степени проявляется на повышенных частотах и требует тщательной экранировки измерительных схем.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Лабораторный макет включает в себя:

1. Плоский конденсатор с диэлектриком из стеклотекстолита, имеющий следующие геометрические размеры:  
 $h=410$  мм — высота пластин,  
 $d=70$  мм — ширина пластин,  
 $\delta=1.9$  мм — расстояние между пластинами.
2. Плоскопараллельный конденсатор с воздушным диэлектриком, помещенный в колбу для измерения уровня трансформаторного масла.  
 Размеры конденсатора:  
 $h=467.5$  мм,  
 $d=70$  мм,  $\delta=1.5$  мм.

На рис. 2 показано устройство емкостного измерительного преобразователя для измерения уровня жидкого диэлектрика.



Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор  $C_1$  образован частью электродов и диэлектриком – жидкостью, уровень которой измеряется, конденсатор  $C_0$  – остальной частью электродов и диэлектриком воздухом.

Рисунок 2 – Преобразователь уровня

Емкость измерительного преобразователя

$$C_{\text{ип}} = C_1 + C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S_1}{\delta} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_0 S_0}{\delta} = \frac{h_x d \epsilon_0 \epsilon_m}{\delta} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_0 d (h - h_x)}{\delta} \quad (4)$$

3. Дифференциальный измерительный преобразователь для измерения линейного перемещения, состоящий из трех одинаковых пластин с размерами:

$L=140$  мм — длина пластин,

$d=90$  мм — ширина пластин,

$\delta=1.9$  мм — толщина диэлектрика.

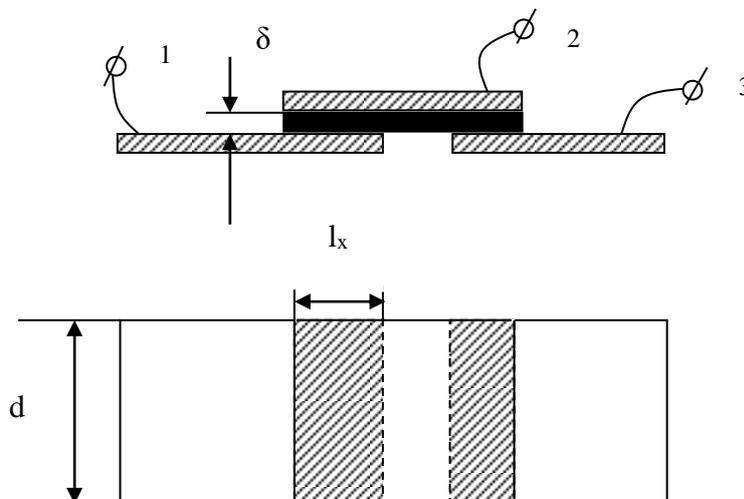


Рисунок 3 – Дифференциальный измерительный преобразователь линейного перемещения

Устройство дифференциального измерительного преобразователя показано на рис. 3. Из рисунка видно, что емкость одинарного преобразователя

$$C_{ИП} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r L_x d}{\delta} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r d}{\delta} L_x \quad (5)$$

4. Измерительный преобразователь угла поворота, представляющий собой многосекционный воздушный конденсатор с переменной площадью перекрытия пластин.

Кроме того, макет укомплектован следующими измерительными приборами:

1. Универсальный мост переменного тока типа Е7-4.
2. Электронный милливольтметр типа ВЗ-38.
3. Генератор синусоидальных колебаний типа ГЗ-34.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Исследование емкостного преобразователя уровня жидкости.

1.1. Подключить емкостной ИП уровня масла к входу универсального моста переменного тока Е7-4. Снять экспериментальную зависимость  $C_{ИП} = f(h_x)$ , постепенно заполняя колбу маслом через заливную воронку. Данные измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Исследование емкостного ИП уровня

$h_x$ , см							
$C_{ИП.эксп.}$							
$C_{ИП.расч.}$							

1.2. По известной емкости преобразователя при  $h_x = h$  (полностью заполненная колба) и известным геометрическим размерам преобразователя рассчитать диэлектрическую проницаемость трансформаторного масла.

1.3.Используя выражение (4) и геометрические размеры преобразователя, рассчитать теоретическую зависимость  $C_{ип}=f(h_x)$ . Данные свести в таблицу 1.

1.4.По результатам п.п. 1.1 и 1.3 на совмещенном графике построить обе зависимости. Сравнить их между собой и сделать выводы. Определить погрешность

$$\gamma_{\max} = \frac{\Delta C_{\max}}{\Delta C_{\text{теор}}} * 100\% .$$

2.Исследование одинарного емкостного измерительного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.

2.1.Подключить к мосту плоский конденсатор и измерить его емкость. По известной величине емкости и известным геометрическим размерам рассчитать диэлектрическую проницаемость стеклотекстолита.

2.2.Снять статическую характеристику одинарного преобразователя  $C_{ип}=f(L_x)$ , где  $L_x$  — перемещение подвижного электрода (пластины). Для снятия характеристики вывести указатель перемещения на нулевую отметку шкалы перемещений и затем, устанавливая подвижный электрод в разные положения (увеличивая  $L_x$ ), измерять емкость преобразователя универсальным мостом. Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование одинарного ИП линейного перемещения

$L_x$ , см							
$C_{ип.}$ , ПФ							
$C_{ип.теор.}$ ,ПФ							

2.3.Используя формулу (5) и геометрические параметры преобразователя, найти теоретическую зависимость  $C_{ип.теор.}=f(L_x)$ .

2.4.По результатам п.п. 2.2 и 2.3 построить графики экспериментальной и теоретической характеристики, сравнить их, определить максимальное

значение абсолютной и относительной погрешностей, а также коэффициент нелинейности экспериментальной характеристики  $K_H$ :

$$K_H = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\max} - \operatorname{tg} \alpha_{\min}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{cp}}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\max}$ ,  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\text{cp}}$  - максимальный, минимальный и средний углы наклона касательной к статической экспериментальной характеристике.

3. Исследование дифференциального емкостного преобразователя линейного перемещения с изменяющейся площадью пластин.

3.1. Собрать мостовую измерительную схему в соответствии с рисунке 4.

В соседние плечи моста включить дифференциальный емкостной преобразователь:  $C_{12}$  и  $C_{23}$ . Два других плеча – полуобмотки выходного симметричного трансформатора генератора синусоидальных сигналов.

К измерительной диагонали моста подключить милливольтметр ВЗ-38.

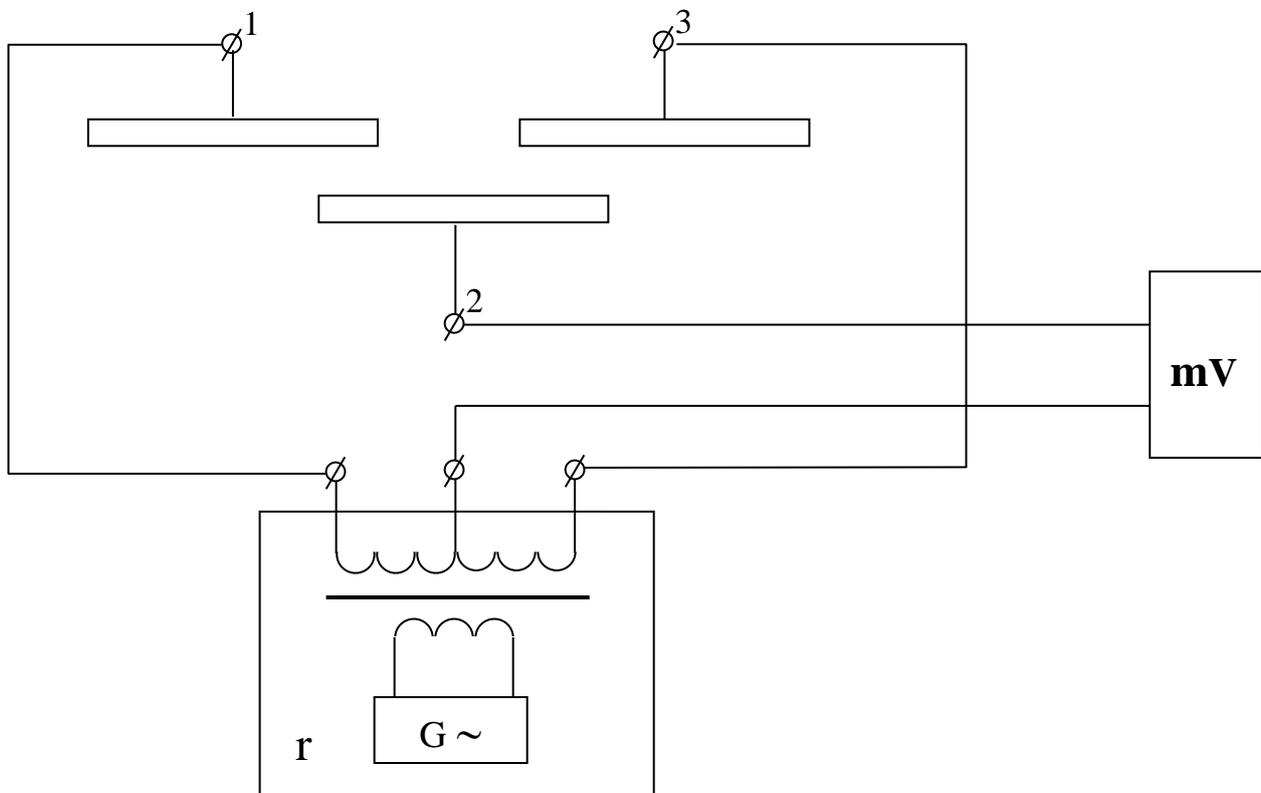


Рисунок 4 – Дифференциальный ИП в схеме моста

3.2. На частоте 1 кГц снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}=f(L_x)$ . Перемещение пластины  $L_x$  задавать через 1 см из крайнего левого положения в крайнее правое или наоборот. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Исследование дифференциального ИП линейного перемещения

$L_x$ , см							
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В							

По данным таблицы 3 построить график и оценить коэффициент нелинейности по формуле (6). Сравнить с нелинейностью одинарного преобразователя и сделать вывод.

4. Исследование емкостного преобразователя угла поворота.

4.1. Подключить емкостной ИП угла поворота (клеммы 4-5) к универсальному мосту. Снять зависимость  $C_{\text{ип}}=f(\alpha)$ . Данные свести в таблицу 4.

Таблица 4 – Исследование емкостного ИП углового перемещения

$\alpha$							
$C_{\text{ип}}$ , пФ							

По полученным экспериментальным данным построить график  $C_{\text{ип}}=f(\alpha)$ , после чего объяснить причину его нелинейного характера.

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы.
7. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Какие типы емкостных преобразователей используются в работе?  
Объясните их устройство, принцип действия.
2. Для измерения каких неэлектрических величин используются емкостные ИП?
3. Каковы преимущества дифференциальных ИП перед одинарными?
4. Как определить погрешность от нелинейности характеристики емкостного ИП?
5. Чем определяется начальная емкость емкостного измерительного преобразователя?
6. Какие причины приводят к появлению погрешностей емкостных ИП?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**  
**“ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ**  
**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ”**

**Цель работы:** Исследовать отдельные виды фотоэлектрических измерительных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристики и точности. Провести анализ и обработку результатов измерений.

**ПРОГРАММА РАБОТЫ**

1. Исследовать вакуумный фотопреобразователь типа СЦВ-3.
2. Исследовать газонаполненный фотоэлемент СЦГ-3.
3. Исследовать фотосопротивление типа ФС-К1.
4. Исследовать фотодиод ФД.
5. Исследовать фотоэлектрический тахометр.
6. Исследовать кодирующий фотоэлектрический преобразователь углового перемещения.

**Элементы теории**

Фотоэлектрическими измерительными преобразователями называются преобразователи, осуществляющие преобразование светового потока, функционально связанного с измеряемой неэлектрической величиной в электрический сигнал.

По принципу действия фотопреобразователи разделяют на преобразователи с внешним фотоэффектом и преобразователи с внутренним фотоэффектом. К первой группе относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы, а ко второй — фоторезисторы и фотодиоды.

В преобразователях первой группы эмиссия электронов с катода возникает при воздействии на него квантов светового излучения — фотонов (фотоэлектронная эмиссия). При этом электроны покидают фотока-

тод, выходя в вакуум или разреженный газ. В соответствии с этим фотоэлементы разделяют на вакуумные и газонаполненные.

Устройство фотоэлемента показано на рис.1. Фотокатодом служит, как правило, слой щелочноземельного металла, нанесенного на серебряную подложку. Анод выполняется в виде проволочного кольца, помещенного в колбе перед катодом.

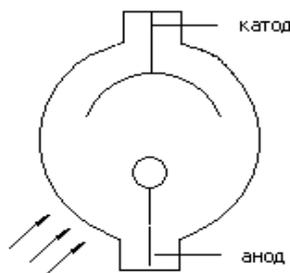


Рисунок 1 – Устройство фотоэлемента

Для практики важно, что число электронов, выходящих с фотокатода, строго пропорционально числу падающих на активный слой фотонов, следовательно, фотоэлектронная эмиссия пропорциональна световому потоку, освещающему фотокатод (закон Столетова). Для создания электронного тока необходим источник анодного напряжения.

Вольт-амперная характеристика (рисунок 2) напоминает ВАХ лампового диода. При малых  $U_a$  фототок растет, но когда при данной освещенности  $\Phi$  фотокатода все электроны достигают анода, наступает насыщение и дальнейшее увеличение  $U_a$  не влияет на величину фототока. Этот ток зависит лишь от освещенности.

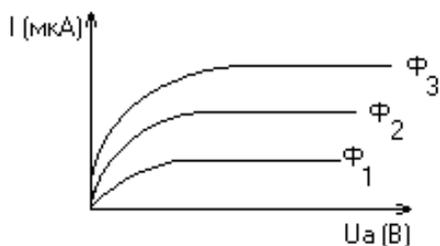


Рисунок 2 – ВАХ фотоэлемента

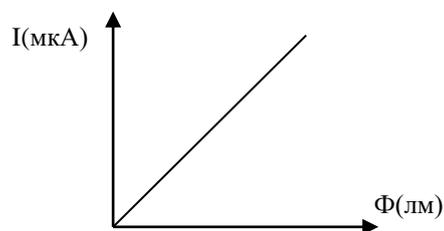


Рисунок 3 – Световая характеристика

Световая характеристика  $I_a=f(\Phi)$  при  $U_a=Const$  вакуумного фотоэлемента линейна (рисунок 3).

Чувствительность фотоэлемента определяется отношением изменения фототока к изменению светового потока.

$$S_i = \frac{\Delta i}{\Delta \varphi}$$

Она относительно мала и составляет 20–80 мкА/лм.

В газонаполненных фотоэлементах эмиссия электронов происходит в среде разреженного газа. Хотя принцип действия вакуумных и газонаполненных фотоэлементов один и тот же, характеристики их существенно различаются.

### **Полупроводниковые фотопреобразователи.**

Полупроводниковые фотопреобразователи используют внутренний фотоэффект и, в зависимости от принципа действия, разделяются на две группы:

1. Фоторезисторы (фотосопротивления) являются фотоэлементами с внутренним фотоэффектом, т.к. воздействие лучистой энергии увеличивает число носителей электрических зарядов внутри самого фотоэлемента.
2. Фотоэлементы с запирающим слоем, в которых воздействие светового потока создает разность потенциалов на границе электронно-дырочного перехода в полупроводнике.

Фоторезистор по своему устройству является простейшим фотоэлементом. В нем лучистая энергия, поглощаемая слоем полупроводника, вызывает значительное увеличение числа носителей, а, следовательно, уменьшение сопротивления резистора. Фоторезистор обычно включается последовательно с управляемым им устройством и источником электроэнергии (рисунок 4).

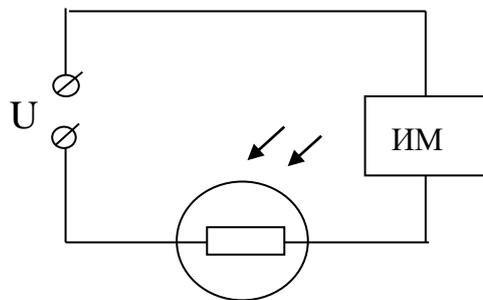


Рисунок 4 – Схема включения фоторезистора

Сопротивление резистора в неосвещенном состоянии называют темновым  $R_{\text{тем}}$ . Под действием источника через фоторезистор в этих условиях протекает небольшой темновой ток.

$$I_{\text{тем}} = U/R_{\text{тем}}$$

Фотоэлементы с запирающим слоем — это фотодиоды и фототранзисторы. Поглощение лучистой энергии фотодиодом приводит к появлению новых пар носителей зарядов — дырок и электронов. Но у р-п перехода существует электрическое поле, созданное разделением основных носителей. Под действием этого поля не основные носители заряда электроны из дырочной области и дырки из электронной области полупроводника удаляются через р-п переход: электроны в n-область, дырки — в р-область.

Вследствие увеличения концентрации зарядов областей, потенциал дырочной области повышается, а электронной — понижается. Чем больше освещенность фотодиода, тем больше разность потенциалов между областями р и n. Таким образом, под действием света одному электроду сообщается заряд одного знака, а другому — заряд другого знака.

Такой фотоэлемент может служить источником тока и не требует каких-либо дополнительных источников. В нем лучистая энергия непосредственно преобразуется в электрическую. Особенно широко фотодиоды используются в солнечных батареях. Их к.п.д. составляет 11%.

## ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Макет лабораторной работы смонтирован в унифицированном корпусе, в нижней части которого в специальных отсеках размещены различные фотоэлементы с источниками света. Под каждой из камер установлены тумблеры управления источниками света.

Схемы для исследования различных фотоэлементов собраны внутри корпуса. Все коммутации элементов схем осуществляются при помощи тумблеров, установленных на передней панели корпуса. В верхней части передней панели установлены измерительные приборы.

Кроме того в состав лабораторного макета входит стенд для демонстрации практического применения фотоэлектрических ИП на примере тахометра. В стенде использован двигатель постоянного тока типа ДПМ с укрепленным на валу дискретным диском. Питание двигателя осуществляется от регулируемого источника постоянного тока, смонтированного внутри стенда. Источник позволяет изменять выходное напряжение в диапазоне 1,2 – 28В.

В стенд встроены четырехразрядный десятичный счетчик, который позволяет измерять скорость якоря двигателя в об/мин. Тахометр производит измерения за 5 секунд, поэтому для наглядности снабжен индикаторной шкалой времени измерения.

Общий вид лицевой панели стенда приведен на рисунке 5.

Элементы управления стендом:

1. Клеммы для подключения внешнего вольтметра.
2. Дискретный диск на валу якоря двигателя.
3. Оптопара тахометра.
4. Шкала степени выполнения измерений (5 позиций).
5. Регулятор напряжения подаваемого на якорь двигателя.
6. Вакуумные индикаторы показывают обороты вала ДПТ в об/мин.

7. Выключатель питания стенда со встроенным индикатором подключения к сети.
8. Индикатор режима работы тахометра.

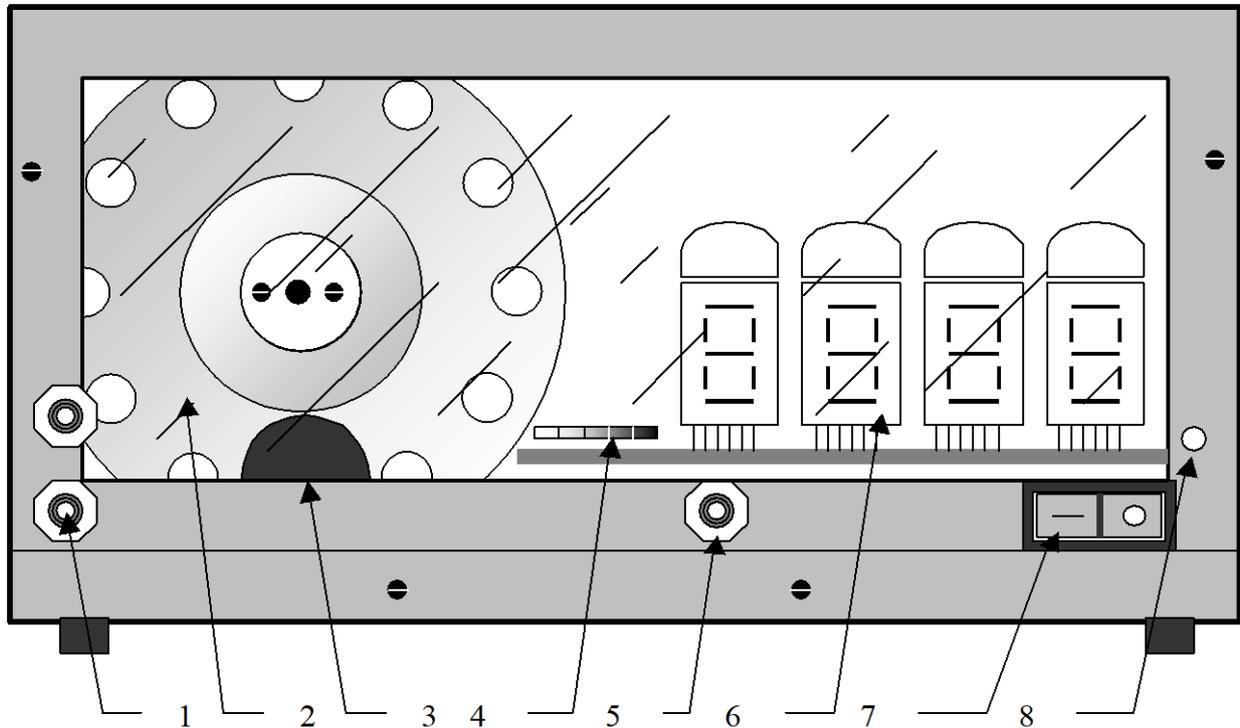


Рисунок 5 – Лицевая панель тахометра

После включения стенда в сеть, начинает светиться индикатор, встроенный в выключатель питания, сигнализируя о подключении. Для включения стенда необходимо перевести выключатель 7 в положение I. После прохождения одного цикла измерения стенд будет готов к работе.

Управление двигателем производится с помощью регулятора 5, подачей напряжения на обмотку якоря в пределах 1,2...28В постоянного напряжения от встроенного в стенд источника. Величина напряжения определяется с помощью внешнего вольтметра подключаемого к клеммам 1.

Определение частоты вращения вала происходит в полностью автоматическом режиме. Тахометр (ТМ) может находиться в одном из состояний – «измерение» или «индикация». Текущее состояние показывает индикатор 8. В

каждом состоянии ТМ находится 5 секунд. Время до перехода в следующие состояние отображается индикатором 4, одна позиция – 1 секунда.

Сразу после перехода в режим «индикации» на индикаторах 6 устанавливается измеренное значение и остаётся в течение 4 секунд, одновременно с загоранием пятого элемента шкалы 4 (красный) значения на индикаторах 6 обнуляются и через 1 с. начнётся новое измерение. Для получения достоверных значений измерений необходимым условием является завершение электромеханических переходных процессов ДПТ, что составляет не более секунды. Поэтому достоверными считаются показания, начиная со второго измерения после включения стенда. Причём регулировка напряжения якоря должна быть завершена до того как загорится красный индикатор шкалы прогресса в режиме индикации, иначе измерение не считается достоверным. Измерения производятся с точностью до одного оборота в минуту.

На отдельной приставке смонтирован измерительный преобразователь угла поворота вала сельсина – датчика в двоичный код, представляющий собой кодирующий преобразователь пространственного кодирования. В этих преобразователях непрерывная измеряемая величина предварительно преобразуется в пространственное перемещение (угловое или линейное), а затем пространственное перемещение преобразуется в код.

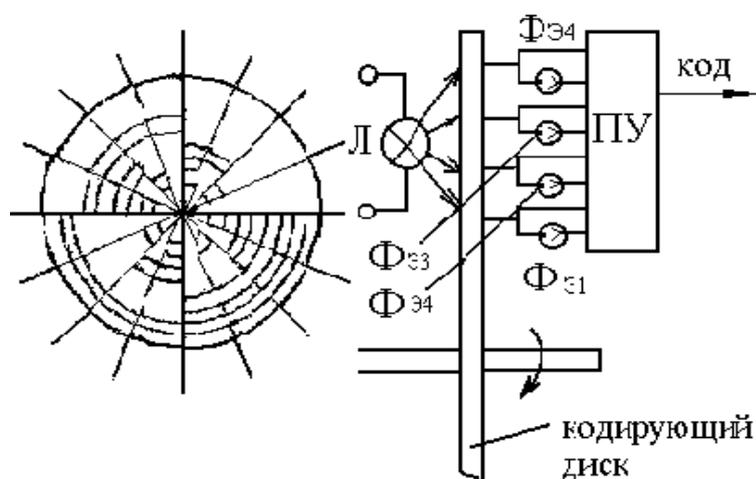


Рисунок 6 – Устройство кодирующего диска

На рисунке 6 изображено кодирующее устройство с диском для преобразования углового перемещения в двоичный код.

Диск, показанный на рисунке, служит для образования четырехрядного двоичного кода. Поэтому на нем имеются четыре группы concentрически расположенных отверстий. Каждая группа, находящаяся на одинаковом расстоянии от центра, соответствует определенному разряду. По одну сторону диска расположена осветительная лампа, а по другую — фотоэлектрические преобразователи (фоторезисторы), один фоторезистор на каждое кольцо (группу отверстий).

Луч света от лампы через отверстия в диске достигает фоторезисторов. Таким образом, при различных углах поворота диска засвечиваются различные фоторезисторы и на выходе электронного блока формируются уровни напряжений, соответствующие в двоичном коде "0" или "1". Индикаторами уровней служат светодиоды. Уровню "1" соответствует включенное (светящееся) состояние светодиода.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

1. Исследование вакуумного фотоэлемента.

1.1. Снять вольт-амперную характеристику вакуумного фотоэлемента, для чего установить тумблер  $B_7$  в положение "вакуумный". Тумблером  $B_8$  устанавливается световой поток  $\Phi_1$ , при этом тумблеры  $B_9$ ,  $B_{10}$  и  $B_{11}$  должны быть выключены. Регулируя напряжение питания  $U_a$  резистором  $R_{12}$ , устанавливаются требуемые напряжения от 0 до 100 В, на аноде фотоэлемента при этом фиксируются соответствующие значения тока через фотоэлемент по прибору ИП<sub>1</sub>; тумблером  $B_8$  устанавливается световой поток  $\Phi_2$  и снимается новая вольт-амперная характеристика для потока  $\Phi_2$ , после чего тумблер  $B_8$  устанавливается в среднее положение. Данные эксперимента заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Вольт-амперная характеристика вакуумного фотопреобразователя

$\Phi = \Phi_1$	$U_a$ (В)						
	$I_a$ (мкА)						
$\Phi = \Phi_2$	$U_a$ (В)						
	$I_a$ (мкА)						

1.2. По результатам п.1.1 построить вольт-амперные характеристики и определить статическую чувствительность фотоэлемента

$$S_{\phi} = \frac{dI_a}{d\phi} \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В.}$$

2. Исследование газонаполненного фотоэлемента.

2.1. Снять вольт-амперную характеристику газонаполненного фотоэлемента, для чего тумблер В7 устанавливается в положение "газонаполненный". Тумблер В9 устанавливается в положение  $\Phi_1$ . Снятие вольт-амперной характеристики производится так же, как и для вакуумного фотоэлемента. Полученные данные свести в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование газонаполненного фотопреобразователя

$\Phi = \Phi_1$	$U_a$ (В)						
	$I_a$ (мкА)						
$\Phi = \Phi_2$	$U_a$ (В)						
	$I_a$ (мкА)						

2.2. По данным таблицы 2 построить вольт-амперные характеристики газонаполненного фотоэлемента, из которых определить статическую чувствительность

$$S_{\phi} = \frac{dI_a}{d\phi} \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В.}$$

и чувствительность по напряжению

$$g = \frac{dI_a}{dU_a} \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{В}} \right] \text{ при } \varphi = \text{Const.}$$

3. Исследование полупроводникового фотосопротивления ФС-К1.

3.1. Снять вольт-амперные характеристики фотосопротивления, для чего необходимо тумблеры В<sub>8</sub> и В<sub>9</sub> поставить в среднее положение, а тумблер В<sub>10</sub> установить для  $\Phi=0$  в среднее положение, для  $\Phi=\Phi_1$  — в правое, а для  $\Phi=\Phi_2$  — в левое положение.

Включить тумблер В<sub>2</sub> и регулировкой напряжения  $U_a$  резистором R<sub>12</sub> установить различные значения напряжения, которые измеряются вольтметром ИП<sub>2</sub>. Ток через фоторезистор измеряется прибором ИП<sub>3</sub>.

Затем необходимо установить световой поток  $\Phi=\Phi_1$  и снять новую ВАХ. Повторить эксперимент при  $\Phi=\Phi_2$ , после чего тумблер В<sub>10</sub> поставить в среднее положение. Результаты измерений свести в таблицу 3.

Таблица 3 – Вольт-амперные характеристики фоторезистора

Φ=0	U <sub>a</sub> (В)						
	I <sub>a</sub> (мкА)						
Φ=Φ <sub>1</sub>	U <sub>a</sub> (В)						
	I <sub>a</sub> (мкА)						
Φ=Φ <sub>2</sub>	U <sub>a</sub> (В)						
	I <sub>a</sub> (мкА)						

3.2. По полученным данным определить статическую чувствительность

$$S_{\varphi} = \frac{dI_a}{d\varphi} \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{лм}} \right] \text{ при } U_a = 100 \text{ В}$$

и чувствительность по напряжению

$$g = \frac{dI_a}{dU_a} \left[ \frac{\text{мкА}}{\text{В}} \right] \text{ при } \varphi = \text{Const.}$$

3.3. По полученным данным опыта рассчитать темновое и световое сопротивления.

## 4. Исследование фотодиода.

4.1. Снять нагрузочные характеристики фотодиода ФД-1, для чего тумблер В<sub>3</sub> установить в положение "фотогенератор". Тумблером В<sub>11</sub> установить световой поток  $\Phi = \Phi_1$ . Переключателем В<sub>1</sub> установить различные значения сопротивления нагрузки. Ток фотодиода измеряется прибором ИП<sub>2</sub>. Далее переключить В<sub>11</sub> в положение  $\Phi_2$  и снять те же характеристики для нового значения светового потока. Данные свести в таблицу 4.

Таблица 4 – Нагрузочные характеристики фотодиода

$\Phi = \Phi_1$	R <sub>н</sub> (Ом)						
	I <sub>a</sub> (мкА)						
$\Phi = \Phi_2$	R <sub>н</sub> (Ом)						
	I <sub>a</sub> (мкА)						

4.2. По полученным данным определить вентильную ЭДС при R<sub>н</sub> = 500 Ом,  $\Phi = \Phi_1$  и  $\Phi = \Phi_2$  и чувствительность

$$S_{\phi} = \frac{dI_H}{d\phi} \text{ при } R_H = 500 \text{ Ом.}$$

4.3. Снять вольт-амперные характеристики фотодиода ФД1 в режиме фотопреобразователя, для чего В<sub>3</sub> установить в положение "фотопреобразователь", при этом фотодиод оказывается подключенным к регулируемому источнику напряжения 0–12 В. Регулировка напряжения U<sub>a</sub> осуществляется резистором R<sub>10</sub>, а измерение — прибором ИП<sub>2</sub>. Нагрузочное сопротивление указывается преподавателем. Данные свести в таблицу 5.

Таблица 5 – Вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

$\Phi = \Phi_1$	I <sub>a</sub> (мкА)						
	U <sub>a</sub> (В)						
$\Phi = \Phi_2$	I <sub>a</sub> (мкА)						
	U <sub>a</sub> (В)						

4.4. По данным таблицы 5 построить ВАХ фотодиода.

4.5. Снять нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя, для чего установить определенное напряжение и поддерживать его неизменным при помощи резистора  $R_{10}$ . Изменяя нагрузочные сопротивления переключателем  $B_1$ , измерить ток. Данные опыта свести в таблицу 6.

Таблица 6 – Нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

$R_H$ (Ом)							
$I_a$ (мкА)							

4.6. По данным таблицы 6 построить нагрузочные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя.

5. Исследование фотоэлектрического тахометра.

5.1. Включить стенд тахометра в сеть 220В, 50Гц.

5.2. К клеммам 1 (рис.5) подключить внешний вольтметр. Включить стенд выключателем 7 (на выключателе загорается световой индикатор) и, регулируя напряжение на обмотке двигателя регулятором 5 в пределах 2–25В, снять регулировочную характеристику

$$n=f(U),$$

где  $n$  — скорость вращения двигателя (об/мин);

$U$  — управляющее напряжение (В).

5.3. Построить регулировочную характеристику двигателя постоянного тока и сделать выводы.

6. Исследование кодирующего измерительного преобразователя углового перемещения.

6.1. Установить кодирующий диск в положение 0 и считать код.

6.2. Поворачивая диск по часовой стрелке, снять зависимость  $КОД=f(\varphi)$ ,

где  $\varphi$ —угол поворота диска. Данные опыта занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Исследование кодирующего диска

$\alpha^\circ$					
Двоичный код					

Примечание: Каждое деление шкалы отчетного устройства диска соответствует  $22.5^\circ$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое фотоэлектрический эффект и каковы его проявления?
2. Какие характеристики определяют свойства фотопреобразователя?
3. Что называется чувствительностью фотопреобразователя?
4. Что представляют собой фотоэлементы, фоторезисторы и фотодиоды?
5. В каких режимах может работать фотодиод?
6. Что представляет собой дифференциальный фоторезистор?
7. Какие источники излучения применяются в данной лабораторной работе?
8. От чего зависит интегральная чувствительность фоторезисторов?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7**  
**“ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТЕПЛОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ**  
**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ”**

**Цель работы:** Исследовать тепловые измерительные преобразователи для измерения температуры. Изучить способы линеаризации характеристик тепловых ИП и измерительные схемы включения. Получить практические навыки измерения температуры различными ИП, научиться проводить анализ и обработку результатов измерения.

**Программа работы**

1. Исследования полупроводниковых термопреобразователей.
2. Исследования термометров сопротивления и термопары.
3. Исследования работы терморегулятора ТЭУ – 0,3.

**Элементы теории**

Для измерения температуры применяются разнообразные измерительные преобразователи. Одной из наиболее обширных и распространенных групп являются терморезисторы.

Терморезисторы — это измерительные преобразователи (ИП) температуры в изменение активного сопротивления. Применяются металлические и полупроводниковые ИП. Металлические терморезисторы обладают положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), лежащим в пределах от 0.35 до 0.7 % на один градус изменения температуры. Для изготовления терморезисторов применяются металлы, обладающие высокой стабильностью ТКС, инертностью к воздействию окружающей среды. Это платина, медь, никель. Платиновые терморезисторы используются в диапазоне температур от -200 до +650°С. Сопротивление платиновых терморезисторов выражается соотношениями:

— в диапазоне от 0° до +650 °С:

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t^0 + B \cdot t^{02}), \quad (1)$$

— в диапазоне от  $-200^\circ$  до  $0^\circ \text{C}$ :

$$R_t = R_0[1 + A \cdot t^0 + B \cdot t^{02} + C(t^0 - 100)^3], \quad (2)$$

где  $R_0$  — сопротивление при  $0^\circ \text{C}$ ;

$A, B, C$  — коэффициенты, определяемые свойствами металла.

Медные терморезисторы применяются в диапазоне от  $-60$  до  $+180^\circ \text{C}$ .

При расчете медных термопреобразователей можно пользоваться соотношением:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t^0), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — ТКС меди.

Свойства платиновых терморезисторов отличаются высокой стабильностью. Они обладают химической инертностью к измеряемой среде. Медные терморезисторы имеют линейную зависимость  $R_t=f(t^0)$ . При  $t^0$  выше  $200^\circ \text{C}$  медь окисляется.

Промышленные терморезисторы (термометры сопротивления) выпускаются двух типов: ТСП — термосопротивления платиновые и ТСМ — термосопротивления медные.

Металлические термометры сопротивлений являются одним из наиболее точных преобразователей температуры. Так, например, платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка  $0.001^\circ \text{C}$ .

Конструктивно промышленные термометры сопротивления выпускаются в виде чувствительных элементов, помещенных в защитный корпус. Чувствительный элемент изготавливается в виде спирали из платиновой или медной проволоки, закрепленной на слюдяном или керамическом каркасе.

Полупроводниковые терморезисторы (ПТР) отличаются от металлических меньшими габаритами и большими значениями ТКС.

Полупроводниковые терморезисторы могут иметь отрицательный ТКС (термисторы) и положительный ТКС (позисторы). Температурная зависимость термисторов описывается формулами:

$$R_t = A \cdot e^{\frac{\beta}{t}}, \quad (4)$$

где  $T$  — абсолютная температура;

$A$  и  $b$  — коэффициенты;

или

$$R_t = R_1 \cdot e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad (5)$$

где  $R_1$  — сопротивление термистора при температуре  $T_1$ .

Точность измерения температуры с помощью ПТР может быть достаточно высокой. С помощью разного типа ПТР можно измерять температуру в диапазоне от  $-200$  °С до  $+1000$  °С.

К основным недостаткам ПТР относятся: нелинейность зависимости  $R_t=f(T)$ , значительный разброс параметров от образца к образцу.

Нелинейность характеристики и технологический разброс параметров терморезисторов затрудняет получение линейных шкал термометров. Чтобы улучшить линейность и обеспечить взаимозаменяемость терморезисторов, необходимых при массовом производстве термометров, приходится применять специальные схемы линеаризации и унификации.

На рисунке 1 представлены пассивные четырехполюсники, применяемые для коррекции нелинейности характеристик термисторов. Число термонезависимых резисторов ( $R_1, R_2, R_3, \dots$ ) в четырехполюснике может быть разным и определяется в зависимости от того, в скольких точках характеристики нужно совместить характеристику с линейной.

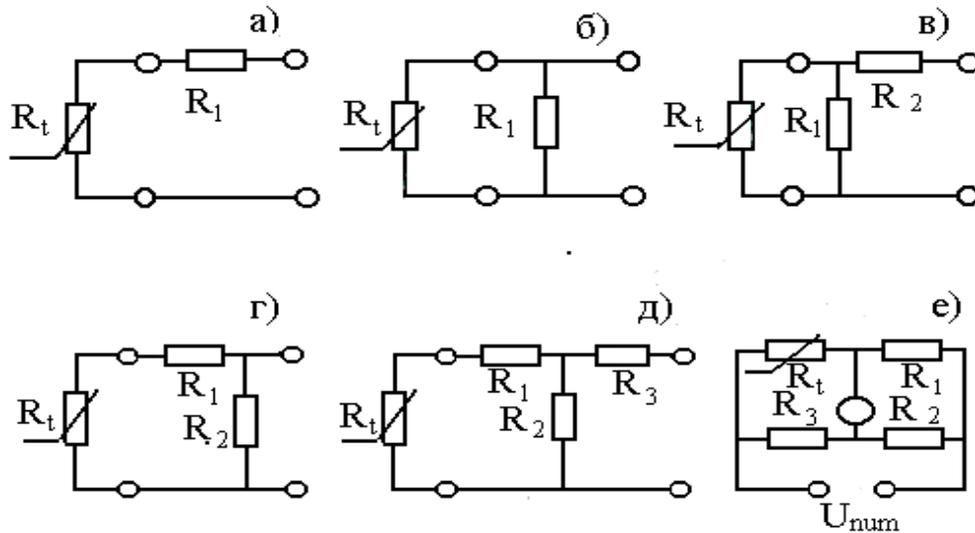


Рисунок 1 – Пассивные четырехполюсники

На рисунках 1а,б,в представлены соответственно последовательная, параллельная и последовательно-параллельная схемы коррекции. На рисунках 1г и д — комбинированные схемы и на рисунке 1е — мостовая схема, получившая наибольшее распространение при включении терморезистивных ИП.

Для измерения температуры применяются также другие виды полупроводниковых преобразователей. В частности, термодиоды, термотранзисторы, стабилитроны, работающие в диапазоне  $-80 \div +150^\circ\text{C}$  на основе открытых и закрытых p-n переходов. Например, при заданном токе, напряжение на открытом p-n переходе или стабилитроне линейно изменяется с температурой, причем ТКС для открытого p-n перехода отрицателен и составляет 2–3 мВ/К, а для стабилитрона — положителен и достигает 8 мВ/К.

## Термоэлектрические преобразователи (термопары)

Термопара представляет собой два проводника или полупроводника, два конца которых соединены между собой (рабочий спай), а два других (свободные концы) могут быть включены в цепь измерительного прибора (рисунок 2).

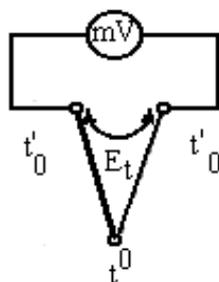


Рисунок 2 – Устройство термопары

Рабочий спай нагревается до измеряемой температуры  $t^{\circ}$ , а свободные концы имеют постоянную температуру  $t_0^{\circ}$ .

В цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила  $E_t$ , которая является функцией разности температур

$$E_t = f(t^{\circ} - t_0^{\circ}), \quad (6).$$

Зависимость  $E_t = f(t^{\circ})$  в широком диапазоне температур обычно нелинейна.

Промышленностью выпускаются разные виды термопар, некоторые из которых приведены в таблице 1.

Градуировка термопар осуществляется при температуре свободных концов равной нулю. Если при практическом использовании термоэлектрического преобразователя температура свободных концов отлична от нуля, то термо-ЭДС будет меньше и необходимо ввести соответствующую поправку в показания.

Таблица 1 – Некоторые типы промышленных термопар

Материал электродов	термо-	Обозначение типа термопары	Предел измерения при длительном применении (°C)	Максимальная $t^{\circ}$ кратковременного режима (°C)
Медь – копель		ТМК	-200°C ... +100°C	
Хромель – копель		ТХК	-50°C ... +600°C	800°C
Хромель – алюмель		ТХА	-200°C... +1000°C	1300°C

Точность преобразования термопар ниже, чем у терморезисторов. На показания влияет нестабильность температуры свободных концов, изменение сопротивления термоэлектродов и соединительных проводов. Однако они широко используются на практике, т. к. имеют широкий диапазон измеряемых величин, надежны в работе, не требуют специальных измерительных схем включения.

### Описание лабораторного макета

Лабораторный макет состоит из трех частей: двух камер для создания требуемой температуры и терморегулятора ТЭУ-03. Камеры выполнены из пенопласта. В качестве нагревателей использованы лампы накаливания.

Температура внутри камер контролируется спиртовым термометром. В первой камере установлены терморезисторы КМТ-1, КМТ-8 и ММТ-4, размещенные на общем основании. Схема подключения термопреобразователей показана на рисунке 3.

Выводы 0÷3 подключаются поочередно к клеммам 1–2 при помощи галетного переключателя П.

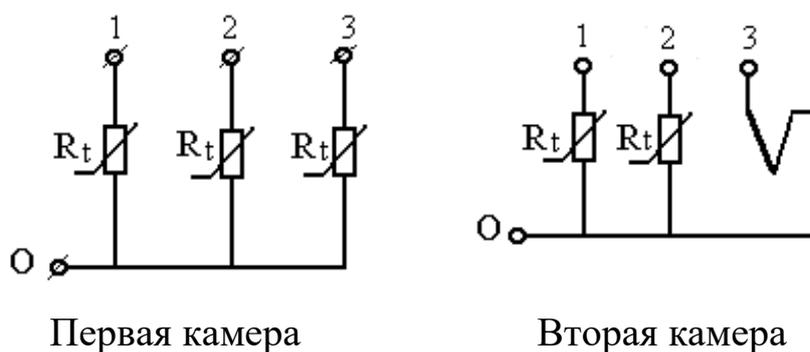


Рисунок 3 – Схема подключения термопреобразователей

Во вторую камеру помещены платиновый термометр сопротивления ТСП, медный термометр сопротивления ТСМ и термопара ТХК (хромель—копель). Выводы 0÷3 подключаются поочередно к клеммам 1–2 при помощи галетного переключателя П, смонтированного на общем основании. На этом же основании смонтированы термoneзависимые резисторы и клеммы для включения платинового термометра сопротивления в мостовую схему.

Для питания моста постоянным напряжением используется регулируемый выпрямитель.

Терморегулятор ТЭУ-0,3 предназначен для автоматического поддержания температуры воздуха в жилых помещениях, теплицах, бытовых инкубаторах и т.д. в диапазоне от 5 до 45 °С в комплексе с бытовыми электронагревательными приборами мощностью от 25 до 300 Вт.

Терморегулятор имеет выносной термодатчик 1 и блок управления (рисунок 4). Нагревательный элемент подключают к розетке 2, ручкой регулировки 3 устанавливают необходимую температуру, а по индикатору 4 следят за режимом работы терморегулятора. Терморегулятор включается в сеть вилкой 5.

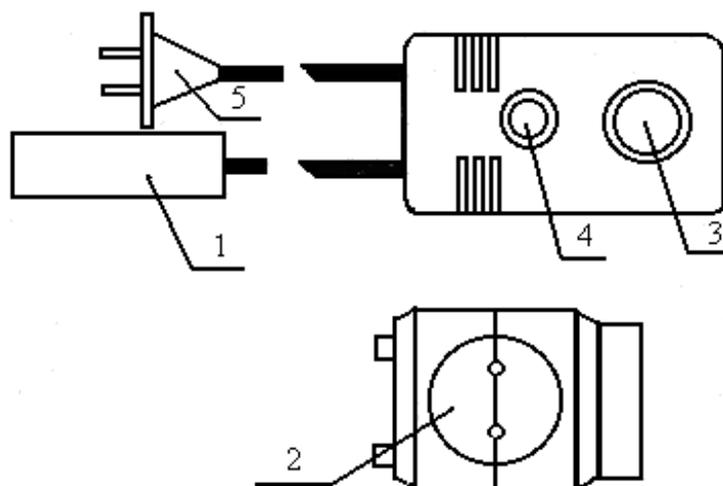


Рисунок 4 – Устройство терморегулятора ТЭУ – 0,3

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

### 1. Исследование полупроводниковых термопреобразователей.

1.1. Подготовить первую камеру и цифровой прибор к работе, для чего включить прибор Щ4313 в сеть и подключить при помощи соединительных шнуров к клеммам 1—2. При помощи кнопочного переключателя установить прибор в режим омметра и задать предел измерения. Переключатель П поставить в положение "1", что соответствует включению в цепь омметра терморезистора КМТ-1. Не включая нагреватель, измерить поочередно сопротивления тепловых ИП при комнатной температуре. Подключение соответствующего ИП к выходным клеммам 1—2 осуществляется переключателем П в следующей последовательности.

Положение переключателя	1	2	3
Тип ИП	КМТ 1	КМТ 8	ММТ 4

1.2. Включить нагреватель камеры и фиксируя температуру внутри камеры спиртовым термометром измерить сопротивления термопреобразователей при разных значениях температуры. Данные эксперимента занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Исследование полупроводниковых термопреобразователей

Тип ИП	t °С							
	Комнатная	30°	40°	50°	60°	70°	75°	S Ом/град
R, Ом								
R <sub>н</sub>								
R, Ом								
R <sub>н</sub>								
R, Ом								
R <sub>н</sub>								

Чувствительность ИП к изменению температуры определяется из соотношения:

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta t} \left[ \frac{\text{Ом}}{\text{град.}} \right], \quad (7)$$

Рекомендуется определять S в диапазоне изменения температур 40°—60°С.

1.3. Построить графики  $R_n=f(t^0)$  для всех видов используемых ИП.  $R_n$ — нормированное значение сопротивления

$$R_n = \frac{R_t}{R_{\text{комн}} \cdot t^0}, \quad (8)$$

Для всех исследуемых ИП рассчитать коэффициент нелинейности

$$K_H = \frac{\text{tg } \alpha_{\text{max}} - \text{tg } \alpha_{\text{min}}}{\text{tg } \alpha_{\text{cp}}},$$

Где  $\alpha_{\text{max}}$ ,  $\alpha_{\text{min}}$  и  $\alpha_{\text{cp}}$  — максимальный, минимальный и средний углы наклона касательной к характеристике.

На основании полученных данных сделать выводы по чувствительности и линейности.

1.4. Собрать мостовую схему согласно рисунка 5. Переключатель П поставить в положение 1. К клеммам 2—3 подключить измерительный прибор Щ4313, предварительно переключив его в режим измерения постоянного

напряжения. К клеммам 3—4 подключить магазин сопротивлений, задав значение  $R_M=1000$  Ом, а к клеммам 1—4 подключить источник регулируемого постоянного напряжения.

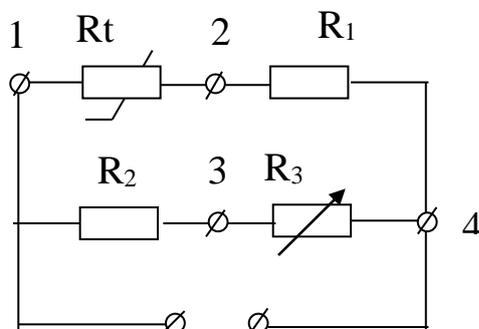


Рисунок 5 – Мостовая схема включения терморезистора

Кроме того, на выход источника подключить вольтметр постоянного напряжения. Включить стенд и, вращая рукоятку ЛАТРа, по вольтметру выставить напряжение источника  $U_{пит}=10$  В.

Не включая нагреватель камеры магазином  $R_3$ , произвести уравнивание моста.

Включить нагреватель и, фиксируя по спиртовому термометру температуру внутри камеры при каждом заданном значении температуры, измерить напряжение разбаланса моста. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Исследование терморезистора КМТ-1 в схеме моста

$t^{\circ}\text{C}$	комнатная	$30^{\circ}$	$40^{\circ}$	$50^{\circ}$	$60^{\circ}$	$70^{\circ}$	$80^{\circ}$
$U_M$ (мВ)							

1.5. Построить график зависимости  $U_M=f(t^{\circ})$  и сравнить с графиком  $R_n=f(t^{\circ})$  для терморезистора КМТ-1. Для полученного графика рассчитать коэффициент нелинейности  $K_n$  и сравнить его с  $K_n$  по п. 1.3. Сделать вывод.

2. Исследование термометров сопротивления и термопары.

2.1. Подготовить вторую камеру к эксперименту, для чего подключить прибор Щ4313 к выходным клеммам этой камеры, а переключатель П по-

ставить в положения 1. Положения переключателя П соответствуют подключению к клеммам 1—2 следующих ИП:

Положение переключателя	1	2	3
Тип ИП	ТСП	ТСМ	Термопара

2.2. Провести исследование перечисленных ИП, пользуясь методикой, приведенной в п. 1.2.

Примечание: Не забывайте переключать измерительный прибор Щ4313 на измерение постоянного напряжения (мВ) при исследовании термоэлектрического ИП. Данные эксперимента свести в таблицу 4.

Таблица 4 – Исследование термометров сопротивления и термопары

Тип ИП		t°С							S Ом/град
		комнатная	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
ТСП	R, Ом								
	R <sub>n</sub>								
ТСМ	R, Ом								
	R <sub>n</sub>								
Термопара E, мВ									

2.3. По данным таблицы 4 построить характеристики ИП и сделать выводы по чувствительности преобразователей и линейности характеристик.

3. Исследование работы терморегулятора ТЭУ-0,3.

3.1. Подключить терморегулятор к клеммам 1—2 первой камеры, установив переключатель П в положение 1. Нагреватель камеры подключить к термометру, как показано на рисунке 4.

Установить ручку регулировки 3 в положение 40°. Включить терморегулятор в сеть и, используя секундомер и спиртовой термометр, снять зависимость  $t^0=f(t)$ , где  $t$  – время. Данные занести в таблицу 5.

3.2. По данным таблицы построить график зависимости  $t^0=f(t)$  и сделать выводы.

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какие ИП применяются для измерения температуры? Их принцип действия.
2. Особенности металлических и полупроводниковых терморезисторов.
3. Характер зависимости  $R=f(t^0)$  у полупроводниковых терморезисторов, схемы линеаризации.
4. Принцип работы термоэлектрического преобразователя.
5. Дать описание лабораторного макета и объяснить, как установить выбранную температуру в камере термостата.
6. Измерительные схемы включения терморезисторов, дать характеристику схем.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ  
КОМБИНИРОВАННОГО ЦИФРОВОГО ПРИБОРА Щ4313

1. Комбинированный цифровой прибор Щ4313 предназначен:

- для измерения силы и напряжения постоянного и переменного тока;
- для измерения сопротивления постоянному и переменному току.

2. Технические данные:

2.1. Диапазон измерения:

U: 200 мВ 2000 ÷ мВ; I: 200 мА 2000 ÷ мА; R: 200 Ом 2000 ÷ кОм.

3. Устройство выполнено в виде блоков бесфутлярной конструкции. На передней панели прибора расположены кнопки и тумблеры управления:

- тумблер включения питания от сети;
- кнопки выбора режима работы;
- кнопки выбора вида режима;
- кнопки переключения диапазонов;
- клеммы с указанием режима работы и полярности;
- цифровое отсчетное устройство.

4. Порядок работы.

4.1. Включить в сеть шнур питания прибора.

4.2. Выбрать режим работы и вид режима, диапазон измерения нажатием кнопок (если значение измеряемой величины неизвестно, то измерение необходимо начинать с наибольшего предела измерений).

4.3. Тумблер "Сеть" установить в положение "вкл", при этом должно загореться цифровое отсчетное устройство.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8**  
**«ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИНДУКТИВНЫХ**  
**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ»**

**Цель работы:** Исследовать отдельные виды индуктивных преобразователей с точки зрения их чувствительности, линейности характеристики и точности. Провести анализ и обработку результатов измерений.

**Программа работы**

1. Исследование индуктивного измерительного преобразователя линейного перемещения с переменной длиной воздушного зазора.
2. Исследование индуктивного ИП линейного перемещения с переменной площадью воздушного зазора.

**Элементы теории**

Индуктивные измерительные преобразователи (ИП) относятся к электромагнитной группе. Основные типы конструкций показаны на рисунке 1 (а, б, в): а – с переменной длиной воздушного зазора (рабочее перемещение подвижной части 0.01 - 5 мм); б – с изменяющейся площадью воздушного зазора (5 - 20 мм); в – с разомкнутой магнитной цепью (10 - 100 мм).

Для улучшения свойств ИП (увеличения линейности характеристики, чувствительности и уменьшения погрешности) индуктивные ИП выполняются дифференциальными. Некоторые их конструкции и схемы включения обмоток показаны на рисунках 1 (г, д, е).

Например, рисунок 1,г при  $X_{вх} = 0$  якорь расположен симметрично относительно обоих сердечников и магнитные сопротивления для потоков, создаваемых катушками, одинаковы. Изменения магнитных сопротивлений, происходящие под действием  $X_{вх}$ , имеют противоположные знаки.

Ток  $I_{YK}$  в выходной диагонали моста может быть с известным приближением выражен так:  $I_{YK} \approx k (z_1 z_4 - z_2 z_3)$ , где  $k$  – постоянный множитель,  $z_1$  и  $z_2$  – сопротивления катушек ИП.

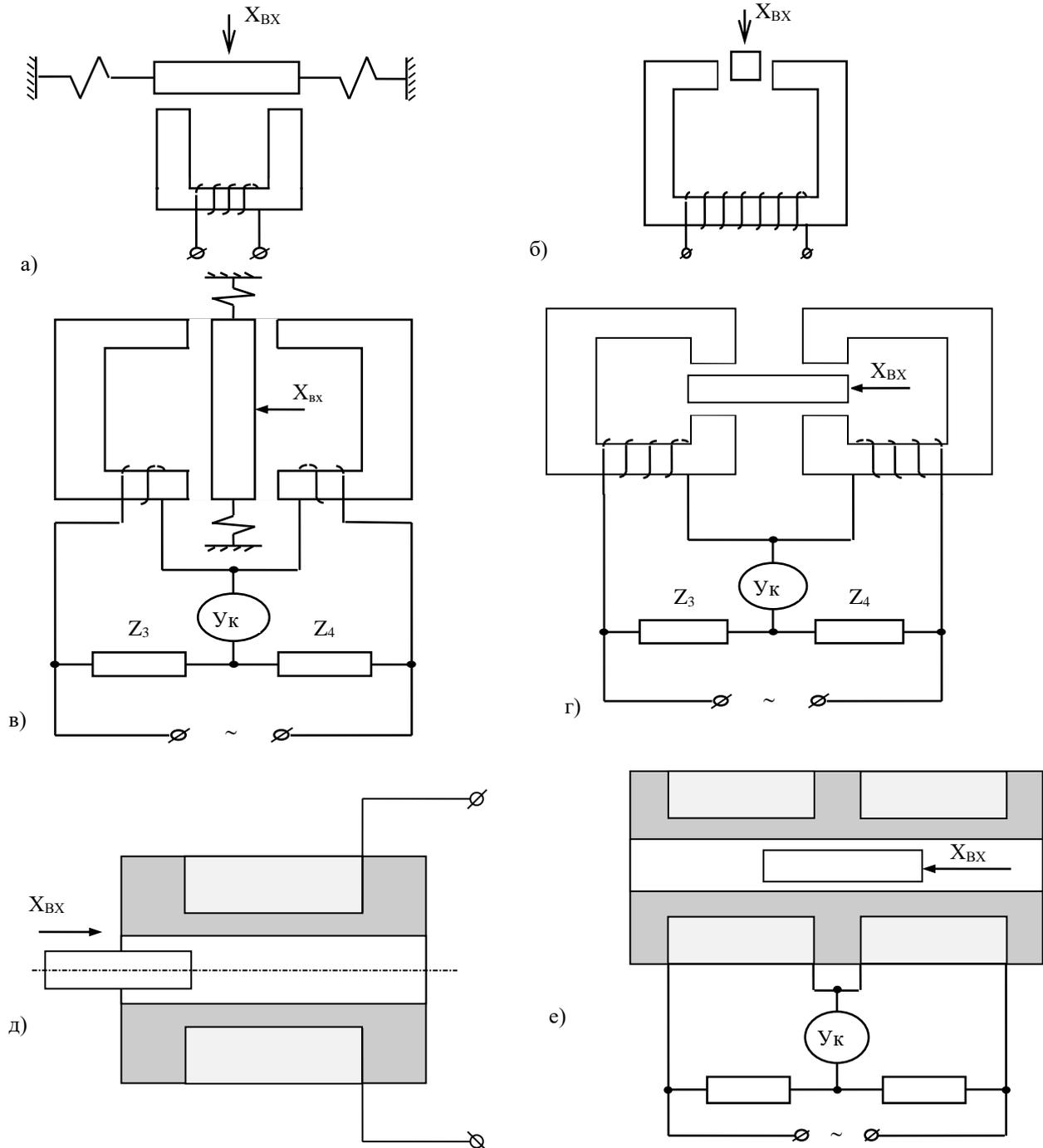


Рисунок 1 – Основные конструкции индуктивных преобразователей

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя два макета. На первом смонтирован индуктивный дифференциальный преобразователь с изменяющейся длиной воздушного зазора. Магнитная цепь преобразователя выполнена из двух половин ферритового сердечника броневого типа 1, 2 (рисунок 2), в которых размещены обмотки преобразователя 3.

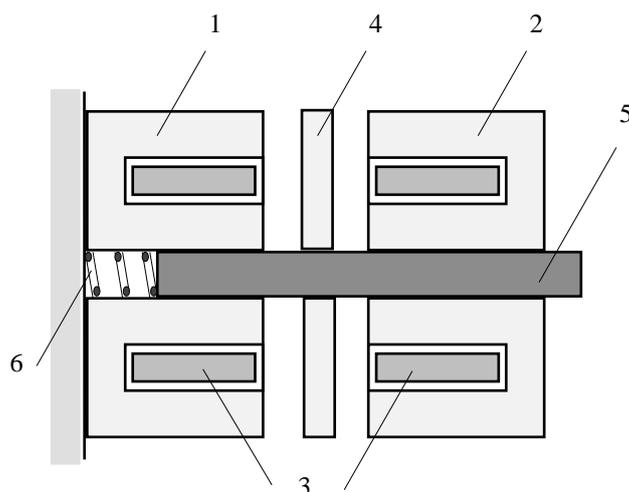


Рисунок 2 – Дифференциальный преобразователь с изменяющейся длиной зазора

Подвижный сердечник выполнен в виде ферритового диска 4, укрепленного на подвижном штоке 5 из диэлектрического материала, жестко связанного с подвижным штоком микрометра, при помощи которого задается измеряемое перемещение. Обратный ход диска обеспечивается возвратной пружиной 6.

Преобразователь с изменяющейся площадью зазора (рисунок 3) выполнен из неподвижного броневого сердечника с обмоткой и подвижного ярма жестко связанного со штоком, при помощи которого задается измеряемое перемещение.

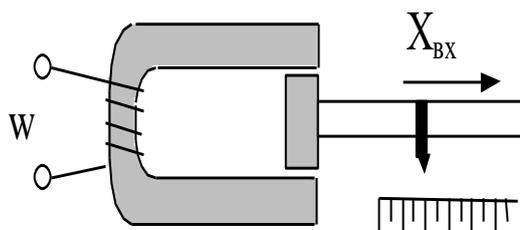


Рисунок 3 – Преобразователь с изменяющейся площадью зазора

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРОГРАММЫ РАБОТЫ

1. Исследование индуктивного ИП с переменной длиной воздушного зазора.

1.1. Определение зависимости тока в катушке I одинарного ИП от длины зазора  $\delta$  [ $I = f(\delta)$ ].

Общая электрическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.

Собрать измерительную цепь согласно схеме на рисунке 5, для чего подключить к клеммам 3 и 4 генератор, а к клеммам 5 и 6 электронный цифровой вольтметр, что соответствует измерительной цепи, показанной на рисунке 5.

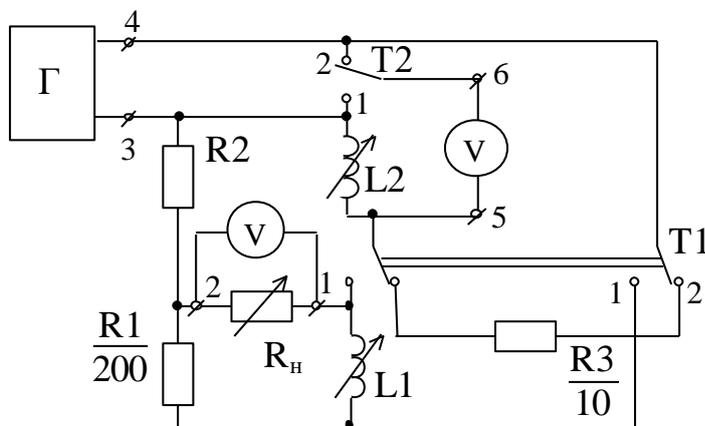


Рисунок 4

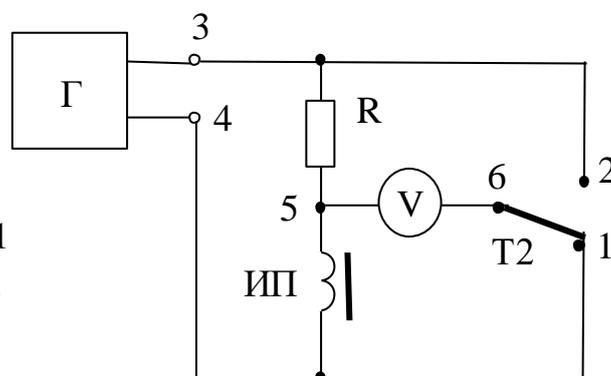


Рисунок 5

Установить при помощи микрометра подвижный сердечник ИП в крайнее левое положение ( $\delta=0$ ). Поставить переключатель Т1 в положение 2, а Т2 в положение 1 и при помощи регулировок генератора установить напряжение на преобразователе  $U_{инп} = 2,5$  В при частоте  $f = 1000$  Гц.

Поставить переключатель Т2 в положение 2 и при помощи вольтметра измерить падение напряжения на резисторе R ( $U_{2.5}$ ). Вычислить ток преобразователя  $I = U_{2.5}/R$  ( $R = 10$  Ом).

Поддерживая неизменным в каждом опыте напряжение на преобразователе  $U_{инп} = 2,5$  В (переключатель Т2 в положении 1) и изменяя величину зазора  $\delta$  в пределах 0 - 2 мм с шагом 0,2 мм, снять зависимость  $I = f(\delta)$ . Данные опыта занести в таблицу 1.

Таблица 1

$\delta$ , мм	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$U_{2.5}$											
I, мА											

1.2. По результатам измерений п. 5.1.1 построить график зависимости  $I = f(\delta)$ .

1.3. Используя данные таблицы 1, рассчитать и построить график зависимости относительной чувствительности S от величины зазора

$$S = \frac{\Delta z / z_m}{\Delta \delta / \delta_m},$$

где  $\delta_m$  - максимальное перемещение сердечника (2 мм);

$z_m = U_m / I_m$  - полное сопротивление катушки преобразователя при  $U_{инп}=2,5$  В и токе  $I_m$ , соответствующем максимальному зазору  $\delta_m = 2$  мм;

$\Delta \delta$  - изменение зазора, равное 0,2 мм;

$\Delta z = z_{k+1} - z_k$  - приращение модуля полного сопротивления при изменении зазора  $\Delta \delta$ ;

$Z_k$  - модуль полного сопротивления при зазоре  $\delta_k$ ;

$Z_{k+1}$  - модуль полного сопротивления при зазоре  $\delta_{k+1}$  ( $\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta$ );

$\delta_k$  - абсолютная величина зазора, отсчитываемая по микрометру.

## 2. Определение оптимального значения сопротивления нагрузки мостовой схемы с дифференциальным ИП.

При работе схем с измерительными преобразователями немаловажное значение имеет согласование сопротивления нагрузки с выходным сопротивлением измерительной цепи  $R$ . При правильно выбранном сопротивлении нагрузки  $R_H$  в ней будет выделяться максимальная мощность.

Для получения зависимости  $P_H = f(R_H)$  собрать мостовую схему включения дифференциального измерительного преобразователя согласно рисунку 6, для чего установить переключатель  $T1$  в положение 1.

В качестве сопротивления нагрузки подключить к клеммам 1, 2 магазин сопротивлений и установить сопротивление нагрузки  $R_H = 20$  Ом. Установить напряжение питания моста  $U_{3-4} = 2,5$  В,  $f = 1000$  Гц. Электронный вольтметр подключить к клеммам 1, 2.

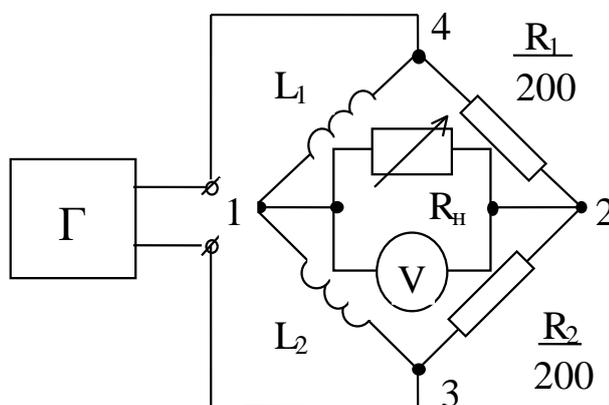


Рисунок 6

Перемещая микрометром подвижный сердечник сбалансировать мост.

Разбалансировать мостовую схему, переместив подвижный сердечник ИП на 1 мм, в любую сторону и измерить напряжение разбаланса  $U_H$  вольтметром.

Изменяя сопротивление магазина в пределах 20-200 Ом с шагом  $\Delta R_H=20$  Ом, измерить напряжение разбаланса. Данные опыта занести в таблицу 2.

Таблица 2

$R_H$ , Ом								
$U_H$ , мВ								
$P_H$ , мкВт								

По данным таблицы 2 построить зависимость  $P_H = f(R_H)$ , из которой определить величину оптимального сопротивления нагрузки. Мощность, выделяемая в нагрузке, равна

$$P_H = U_H^2 / R_H$$

3. Снятие характеристики дифференциального ИП при оптимальном сопротивлении нагрузки.

3.1. Установить на магазине сопротивлений оптимальное значение  $R_H$ , полученное в предыдущем опыте.

3.2. Изменяя величину зазора в пределах 0 - 2 мм с шагом 0,2 мм, снять зависимости  $\Delta U_H = f(\delta)$ . Результаты свести в таблицу 3.

Таблица 3

$\delta$ , мм								
$\Delta U$ , мВ								

По данным таблицы 3 построить зависимость  $\Delta U_H = f(\delta)$ .

Сравнить полученные результаты с результатами исследования одинарного ИП и сделать выводы.

4. Исследование индуктивного преобразователя с изменяющейся площадью воздушного зазора.

4.1. Подключить измерительный преобразователь (клеммы 1 и 2) ко входу универсального моста. Установить частоту питания  $f=100$  Гц.

4.2. Установить подвижный сердечник в исходное положение (“0” на мерной линейке). Измерить мостом индуктивность преобразователя.

4.3. Задавая перемещения сердечника в диапазоне 0 - 10 мм с шагом  $\Delta X = 1$  мм, снять зависимость  $L = f(X)$ .

4.4. По данным п. 4.3 построить график зависимости  $L = f(X)$ , рассчитать чувствительность  $S = \Delta L / \Delta X$  и сравнить исследуемые преобразователи по чувствительности и линейности.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Принцип действия индуктивного ИП с переменной величиной зазора (одинарного и дифференциального).
2. Принцип действия индуктивного ИП с переменным сечением воздушного зазора.
3. В чем преимущества дифференциальных ИП перед одинарным?
4. Как влияет сопротивление нагрузки на работу мостовой цепи?
5. Каким образом измеряется ток через катушку индуктивного ИП в работе?
6. Что значит уравновесить мост?