

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова**

## **ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2014

УДК 621.1.002.56(075.8)

ББК 31.32я71

А92

**Атрошенко Ю.К.**

А92      Теплотехнические измерения и приборы: учебное пособие / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 151 с.

В пособии приведены основные теоретические сведения по измерению теплотехнических параметров и приборам, предназначенным для контроля различных величин. По итогам каждого раздела предлагаются индивидуальные задания.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника».

**УДК 621.1.002.56(075.8)**  
**ББК 31.32я71**

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа  
*А.А. Светлаков*

Руководитель отдела АСУ ТП  
ООО «Центр энергетических технологий»  
*А.Н. Малиновский*

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2014  
© Атрошенко Ю.К., Иванова Е.В., 2014  
© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	6
1.1. Жидкостные стеклянные термометры.....	6
1.2. Манометрические термометры .....	9
1.3. Биметаллические и дилатометрические термометры .....	11
1.4. Термоэлектрические преобразователи .....	13
1.5. Термопреобразователи сопротивления .....	24
1.6. Пирометры излучения .....	29
2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ.....	32
2.1. Жидкостные и чашечные манометры.....	33
2.2. Деформационные манометры.....	39
2.3. Электрические преобразователи давления .....	43
2.4. Грузопоршневые манометры.....	51
3. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА .....	57
3.1. Общие сведения об измерении расхода .....	57
3.2. Расходомеры переменного перепада давления .....	59
3.3. Расходомеры постоянного перепада давления .....	63
3.4. Электромагнитные расходомеры.....	66
3.5. Ультразвуковые расходомеры.....	69
3.6. Тахометрические расходомеры.....	71
4. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ.....	74
4.1. Уровнемеры с визуальным отсчетом и гидростатические уровнемеры.....	74
4.2. Поплавковые и буйковые уровнемеры.....	77
4.3. Емкостные и индуктивные уровнемеры .....	79
4.4. Акустические и ультразвуковые и акустические уровнемеры .....	83
5. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ .....	87
5.1. Измерение состава газов .....	87
5.2. Измерение состава жидкостей.....	92
6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ .....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ П1 .....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ П2.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ П3.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ П4.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ П5.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ П6.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ П7.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ П8.....	144

ПРИЛОЖЕНИЕ П9 .....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ П10.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ П11 .....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ П12.....	150

## ВВЕДЕНИЕ

Качество функционирования автоматизированных систем управления во многом определяется работой уровня получения первичной информации – работой средств измерений. При управлении крупными технологическими объектами измеряется большое количество параметров, основными из которых являются температура, давление, расход.

Так как получение достоверной информации о параметрах технологических процессов является одним из главных факторов, влияющих на работу систем автоматизации, важно правильно учитывать особенности и условия работы первичных преобразователей при оценке погрешности измерений.

Для измерения технологических параметров существует большое количество средств измерений, основанных на различных физических явлениях. Охватить такое разнообразие в рамках одного учебного пособия невозможно, поэтому в настоящем пособии даны только основные понятия и теоретические сведения о принципах и методах измерения, описываются наиболее распространенные средства измерений.

Задачи, приведенные к каждому разделу пособия, позволяют закрепить теоретический материал. Хотя в заданиях не могут быть рассмотрены все случаи, встречающиеся в практике теплотехнических измерений, они подобраны так, чтобы проверить основные знания о приборах и методах измерения. Кроме того, задачи сформулированы таким образом, чтобы в процессе получения численного результата проводился анализ физических особенностей того или иного принципа измерения.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура является одним из основных параметров, измеряемых в промышленности. Температура – величина, характеризующая степень «нагретости» тела, т. е. температура характеризует тепловое состояние вещества и пропорциональна средней кинетической энергии  $E$  его молекул:

$$T = \frac{2}{3} \cdot k \cdot E, \quad (1.1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Непосредственное измерение температуры невозможно. Количественная оценка температуры возможна только при сравнении показаний термометра с некоторой эталонной температурой.

Для унификации результатов измерений различными средствами, основанными на различных методах, применяется международная температурная шкала [1].

Каждый метод измерения температуры имеет свои особенности, определяемые как принципом, так и применяемыми средствами и схемами их подключения. Кроме того, при измерении температуры следует учитывать взаимодействие между термопреобразователями и измеряемой средой [2].

### 1.1. Жидкостные стеклянные термометры

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основа на тепловом расширении жидкостей. При измерении температуры изменяется объем термометрической жидкости, при этом изменяется уровень жидкости в капилляре, по которому отсчитывается значение температуры [1].

Коэффициент объемного расширения рабочей жидкости при изменении давления от значения  $V_1$  до значения  $V_2$  вследствие изменения температуры от значения  $t_1$  до значения  $t_2$  зависит от объема жидкости  $V_0$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  и определяется выражением

$$\alpha_{жс} = \frac{V_2 - V_1}{V_0 \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (1.2)$$

Изменение высота столба жидкости в капилляре при изменении температуры от значения  $t_1$  до значения  $t_2$  зависит от внутреннего диаметра капилляра  $d$  и определяется по формуле

$$\Delta h = 1,275 \cdot \frac{V_1 (\alpha_{жс} - \alpha_c) \cdot (t_2 - t_1)}{d^2}, \quad (1.3)$$

Характеристики некоторых термометрических жидкостей приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

*Характеристики рабочих жидкостей термометров*

Термометрическое вещество	Предел измерения термометра, °С	$\alpha_{ж}, K^{-1}$
Ртуть	– 35...+ 600	16
Ртуть-галлий	– 60...+ 100	16
Спирт этиловый	– 80...+ 80	103
Спирт метиловый	– 80...+ 80	115
Пентан	– 190...+ 20	170
Изопентан	– 200...+ 20	170
Толуол	– 80...+ 100	120
Керосин	0...+ 300	93
Метилкарбитол	– 50...+ 100	93
Петролейный эфир	– 100...+ 20	140
Галлий-индий-олово	+ 10...+ 1200	198

Если при использовании стеклянного термометра для измерения температуры жидкости нет возможности погрузить его в измеряемую среду до отсчитываемой отметки, в показания термометра вводится поправка на выступающий столбик:

$$\Delta t = n \cdot \alpha_{ж} (t - t_{в.с}), \quad (1.4)$$

где  $t$  – показания термометра, °С;  $t_{в.с}$  – средняя температура выступающего столбика, °С;  $n$  – число делений шкалы, равное высоте выступающего столбика [3].

Задача 1.1.1

Лабораторный стеклянный термометр, заполненный пентаном, показывает по шкале  $X_{П}$  °С. Термометр погружен в измеряемую среду до отметки  $X_{пог}$  °С. Температура выступающего столбика составляет  $X_{в.с}$ , °С. Коэффициент видимого объемного теплового расширения рабочей жидкости в стекле –  $\alpha_{ж}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	Рабочая жидкость	$X_{в.с}, °С$	$X_{П}, °С$	$X_{пог}, °С$
1	Ртуть	10	155	10
2	Керосин	5	55	15
3	Изопентан	10	– 105	– 155
4	Спирт этиловый	20	40	– 50

Окончание табл. 1.2

5	Ртуть – таллий	15	55	– 40
6	Толуол	10	22	– 50
7	Метилкарбитол	20	33	– 50
8	Галлий – индий – олово	25	605	100
9	Петролейный эфир	10	– 20	– 100
10	Керосин	5	70	5
11	Ртуть	15	206	25
12	Пентан	20	– 45	– 100
13	Галлий – индий – олово	25	450	50
14	Толуол	10	45	– 50
15	Изопентан	10	– 68	– 170
16	Ртуть – таллий	15	10	– 50
17	Метилкарбитол	15	10	– 30
18	Петролейный эфир	10	0	– 85
19	Спирт этиловый	20	– 10	– 80
20	Пентан	20	– 50	– 100

### Задача 1.1.2

В термостат помещено два термометра: технический с пределами измерения  $X_H \dots X_B$  °С с пределом допускаемой основной погрешности  $\pm \Delta$  °С и лабораторный термометр. Показания технического и лабораторного термометров составили  $X_{П1}$  °С и  $X_{П2}$  °С соответственно. Известно, что поправка на показания лабораторного термометра по свидетельству о поверке составляет  $-1$  °С, поправка на показания на выступающий столбик равна  $+0,5$  °С. Определить, выходят ли за пределы допускаемой погрешности показания технического термометра. Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$X_H, \text{°C}$	$X_B, \text{°C}$	$X_{П1}, \text{°C}$	$X_{П2}, \text{°C}$	$\Delta, \text{°C}$
1	0	500	450	452	4
2	0	100	92	96	3
3	– 20	+20	2	0	1
4	– 30	+30	15	19	3,5
5	0	25	9	14	2
6	10	30	12	13	1,5
7	0	50	41	38	2
8	0	60	52	48,3	4
9	20	50	21	21	0,5
10	– 50	+50	48	47,5	1
11	0	500	92	91	3



12	- 30	+30	16	14	1,5
13	20	50	41	38	1,5
14	- 20	+20	15	18	0,5
15	0	50	16	14	2
16	0	600	502	500	2
17	0	200	184	180	3
18	0	100	48	54	3
19	- 20	+20	- 15	- 17	1,5
20	- 50	0	- 28	- 27	2

## 1.2. Манометрические термометры

Изменение показаний манометрических термометров возможно также за счет изменения давления, независимо от значения температуры. Например, одним из таких факторов может быть разность уровней между термобаллоном и манометром для жидкостных манометрических термометров [2].

Если известна величина давления газа  $P_0$  при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и термический коэффициент давления  $\beta$ , то, при неизменном объеме газа в термосистеме, его давление  $P_t$  при температуре  $t\text{ }(^{\circ}\text{C})$  будет определяться выражением

$$P_t = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \quad (1.5)$$

Давление  $P_k$ , соответствующее верхнему пределу измерения температуры  $t_k$ , зависит от значения давления  $P_n$ , соответствующего нижнему пределу измерения температуры  $t_n$ , и определяется выражением

$$P_k = P_n \cdot \frac{1 + \beta \cdot t_k}{1 + \beta \cdot t_n}. \quad (1.6)$$

Преобразовав выражение (1.6), можно получить уравнение шкалы манометрического термометра

$$\Delta P = P_k - P_n = \frac{P_n \cdot \beta \cdot (t_k - t_n)}{1 + \beta \cdot t_n}. \quad (1.7)$$

### Задача 1.2.1

Определите, какое начальное давление должно быть создано в системе манометрического газового термометра при  $t_1\text{ }(^{\circ}\text{C})$ , чтобы при изменении температуры от  $X_{нп}$  до  $X_{вп}\text{ }(^{\circ}\text{C})$  давление в системе изменялось на  $P$  (МПа). Термический коэффициент расширения газа –  $\beta$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$X_{\text{нп}}, ^\circ\text{C}$	$X_{\text{вп}}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$\beta, \text{K}^{-1}$
1	0	0	600	10	0,00366
2	0	0	500	10	0,00355
3	0	0	400	9	0,00220
4	20	0	300	9	0,00300
5	20	0	200	8	0,00331
6	20	0	100	8	0,00289
7	25	0	150	7	0,00370
8	25	0	250	7	0,00264
9	25	0	350	6	0,00341
10	10	0	450	6	0,00303
11	10	0	550	10	0,00295
12	10	0	600	10	0,00215
13	5	0	500	11	0,00200
14	5	0	400	11	0,00159
15	5	0	300	12	0,00315
16	0	0	200	12	0,00322
17	0	0	100	5	0,00367
18	0	0	150	4	0,00284
19	15	0	250	3	0,00212
20	15	0	350	2	0,00275

## Задача 1.2.2

Определить температуру, измеряемую с помощью манометрического термометра в текущий момент, если при увеличении температуры на величину  $\Delta t$  ( $^\circ\text{C}$ ) давление в термобаллоне увеличилось с  $n$  раз при начальном давлении  $P_n$  (МПа). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$n$	$P_n, \text{МПа}$	$\beta, \text{K}^{-1}$
1	420	2,0	4,15	0,00295
2	380	1,9	4,47	0,00215
3	360	1,6	4,53	0,00200
4	380	1,8	4,28	0,00159
5	450	2,2	4,29	0,00315
6	360	1,7	4,84	0,00322
7	380	1,8	5,12	0,00367
8	390	1,9	5,14	0,00284

9	430	2,0	4,98	0,00212
10	440	2,1	5,32	0,00275
11	450	1,8	4,25	0,00366
12	460	2,2	4,36	0,00355
13	360	1,9	4,78	0,00220
14	480	2,2	5,12	0,00300
15	500	2,3	5,79	0,00331
16	450	1,8	5,13	0,00289
17	463	1,9	5,14	0,00370
18	467	2,0	5,16	0,00264
19	493	2,1	5,16	0,00341
20	490	2,2	5,02	0,00303

### 1.3. Биметаллические и dilatометрические термометры

Принцип действия биметаллических термометров основан на том, что полочка из двух свальцованных друг с другом пластин из металлов с различными коэффициентами расширения искривляется при изменении температуры.

Так как искривление происходит приблизительно пропорционально изменению температуры, этот эффект положен в основу приборов для измерения температуры, называемых биметаллическими. В сравнительно небольшом температурном диапазоне зависимость длины твердого тела  $l_t$  от температуры  $t$  зависит от начальной длины тела (при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и коэффициента линейного расширения материала и определяется выражением

$$l_t = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t). \quad (1.8)$$

Значения коэффициентов линейного расширения материалов биметаллических и dilatометрических термометров приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

#### Средние коэффициенты линейного расширения материалов

Материал	$\alpha \cdot 10^{-6},\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Хромомолибден	12,3
Латунь	18,3...23,6
Никелевая сталь	20,0
Красная медь	15,3
Плавленый кварц	0,55
Инвар	0,9
Сталь 12X18H9T	15,5
Сталь 12X18H12T	16,6

Другим типом термометров, в основу работы которых также положено свойство твердых тел изменять свои линейные размеры при изменении температуры, являются дилатометрические термометры. Для них также справедливо уравнение (1.8). Такой термометр состоит из металлической трубы, внутри которой помещен стержень, причем материал трубы обладает большим коэффициентом  $\alpha_T$  линейного расширения по сравнению с коэффициентом  $\alpha_c$  материала стержня. Термометр снабжен электроконтактным устройством, соединяемым со стержнем. Так как при повышении температуры от значения  $t_H$  до значения  $t_K$  труба удлиняется сильнее стержня, последний перемещается вниз. При этом перемещение стержня определяется выражением

$$\Delta l = l_K - l_H = \frac{l_H (\alpha_T - \alpha_c) (t_K - t_H)}{1 + (\alpha_T - \alpha_c) \cdot t_H}, \quad (1.9)$$

где  $l_K$  – длина трубы при температуре  $t_K$ ;  $l_H$  – длина трубы при температуре  $t_H$ .

Из уравнения (1.9) чувствительность термометра определяется выражением

$$\Delta l = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_H \cdot (\alpha_T - \alpha_c)}{1 + (\alpha_T - \alpha_c) \cdot t_H}. \quad (1.10)$$

### Задача 1.3.1

При увеличении температуры  $t_H$  (°C) на  $\Delta t$  (°C) относительное изменение длины трубы составило  $\delta l$  (%) от исходного значения  $l_0$ . Определить чувствительность термометра и коэффициент линейного расширения материала стержня, если труба термометра изготовлена из латуни. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл.1.7.

Таблица 1.7

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$t_H, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\delta l, \%$
1	0	200	1,2
2	25	190	1,5
3	30	195	1,4
4	48	196	1,3
5	90	205	1,2
6	50	206	1,1
7	60	204	0,8
8	102	203	0,9
9	75	202	0,7
10	76	210	1,0
11	48	195	0,8
12	43	197	0,9

Окончание табл. 1.7

13	54	202	0,8
14	58	204	0,7
15	61	206	0,6
16	62	196	0,5
17	68	198	0,9
18	70	196	1,0
19	75	194	1,2
20	76	202	1,4

### Задача 1.3.2

Определить минимальную длину трубы дилатометрического термометра, имеющего стержень, изготовленный из инвара, с пределами измерения  $t_n \dots t_k$ , если известно, что во всем диапазоне измерения относительное удлинение трубы не должно превышать  $\delta l$  (%). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$t_n \dots t_k, ^\circ\text{C}$	$\delta l, \%$	Материал трубы
1	0...200	2,4	Никелевая сталь
2	0...150	3,0	Хромомолибден
3	0...100	2,8	Сталь 12X18Н9Т
4	100...400	2,6	Никелевая сталь
5	0...400	2,4	Латунь
6	0...300	2,2	Сталь 12X18Н12Т
7	200...400	1,6	Латунь
8	0...100	1,8	Сталь 12X18Н9Т
9	0...250	1,4	Хромомолибден
10	0...350	2,0	Сталь 12X18Н9Т
11	0...320	1,6	Латунь
12	0...180	1,8	Сталь 12X18Н12Т
13	0...250	1,6	Никелевая сталь
14	0...280	1,4	Хромомолибден
15	0...350	1,2	Красная медь
16	100...350	1,0	Сталь 12X18Н12Т
17	150...400	1,8	Никелевая сталь
18	0...200	2,0	Красная медь
19	0...300	2,4	Сталь 12X18Н9Т
20	0...100	2,4	Сталь 12X18Н9Т

## 1.4. Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрические преобразователи являются одним из наиболее распространенных видов средств измерения температуры.

Принцип работы преобразователей основывается на термоэлектрическом эффекте – возникновении ТЭДС в цепи, состоящей из двух разнородных проводников и имеющей разную температуру в местах спаев проводников. Пара таких проводников используется в качестве чувствительного элемента термоэлектрических преобразователей (ТЭП) и называется термопарой. Схема цепи термопары приведена на рис. 1.1.

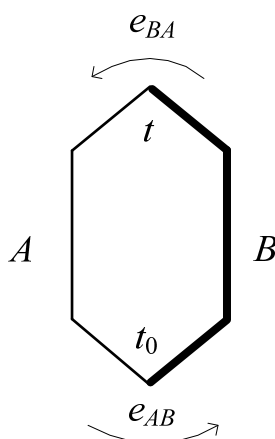


Рис. 1.1. Схема термопары

Результирующая ТЭДС, возникающая в цепи (рис. 1.1) термопары, состоящей из проводников  $A$  и  $B$ , равна сумме ТЭДС  $e_{AB}(t_0)$  и  $e_{BA}(t)$ , возникающих вследствие разности потенциалов и температур  $t$  и  $t_0$ :

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{BA}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (1.11)$$

В случае если спаи термопары имеют одну температуру, т. е.  $t = t_0$ , тогда результирующая ТЭДС будет равна нулю и будет справедливо равенство

$$e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0). \quad (1.12)$$

Подставив выражение (1.12) в выражение (1.11), получим уравнение термоэлектрического эффекта

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{AB}(t_0) \quad (1.13)$$

Если температура  $t_0 = 0$  °С, результирующая ТЭДС пропорциональна температуре  $t$ . Однако на практике температура свободных концов термопары  $t_0$  редко оказывается равной 0 °С. Этим обусловлена необходимость введения поправки на температуру свободных концов термопары.

Величина поправки определяется с помощью номинальной статической характеристики (НСХ) термоэлектрического преобразователя –

зависимости значений ТЭДС от значений температуры рабочего спая при  $t_0 = 0$  °С, которая может быть представлена в графическом или табличном виде.

Помимо НСХ, ТЭП характеризуются пределом допускаемой основной абсолютной погрешности, определяемым для различных классов допуска ТЭП. Значения допускаемых отклонений в соответствии с [4] приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

*Пределы допускаемых отклонений от НСХ ТЭП*

Тип ТЭП	Класс допуска	Диапазон измерений, °С	Предел допускаемого отклонения, $\pm \Delta t_{\theta}$ °С
ТПП (S, R)	2	0...+600; св. +600...+1600	1,5; $0,0025 \cdot t$
	1	0...+1100; св. +1100...+1600	1,0; $1,0 + 0,003 \cdot (t - 1100)$
ТХА (K)	2	-40...+334; св. +334...+1300	2,5; $0,0075 \cdot t$
	1	-40...+375; св. +375...+1300	1,5; $0,004 \cdot t$
ТХК (L)	3	-200...-100; св. -100...+100	$1,5 + 0,01 \cdot t$ ; 2,5
	2	-40...+300; св. +300...+800	2,5; $0,7 + 0,005 \cdot t$
ТХК <sub>H</sub> (E)	2	-40...+334; св. +334...+900	2,5; $0,0075 \cdot t$
	1	-40...+375; св. +375...+800	1,5; $0,004 \cdot t$
ТВР (A)	2	+1000...2500	$0,005 \cdot t$
ТПР (B)	3	+300...+800; св. 800...+1800	4,0; $0,005 \cdot t$
	2	+600...+1800	$0,0025 \cdot t$
ТМК (T)	2	-40...+135; св. 135...+400	1,0; $0,0075 \cdot t$
	1	-40...+125; св. +125...+350	0,5; $0,004 \cdot t$
ТЖК (J)	2	-40...+334; св. +334...+900	2,5; $0,0075 \cdot t$
	1	-40...+375; св. +375...+750	1,5; $0,004 \cdot t$

Допускаемое отклонение ТЭДС рассчитывается по формуле

$$\Delta E_{\text{д}} = \Delta t_{\text{д}} \cdot S, \quad (1.14)$$

здесь  $S$  – чувствительность ТЭП, определяемая выражением:

$$S = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (1.15)$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1$  – разность температур в окрестности значения измеряемой температуры  $t$  ( $t_2 > t > t_1$ ),  $\Delta E = E_2 - E_1$  – разность ТЭДС, соответствующих значениям температур  $t_2$  и  $t_1$ .

Схема подключения ТЭП к измерительному прибору показана на рис. 1.2.

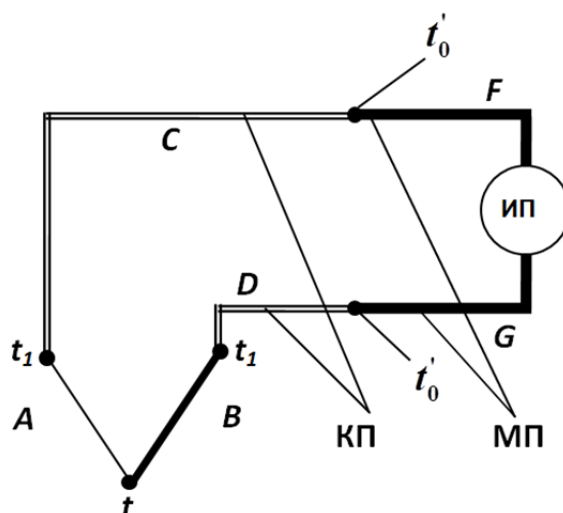


Рис. 1.2. Схема подключения ТЭП к измерительному прибору:  
 КП – компенсационные провода; МП – медные провода;  
 ИП – измерительный прибор

Компенсационные провода используются для отвода свободных концов ТЭП в область более постоянных или низких температур. Такие провода чаще всего изготавливают из тех же материалов, что и электроды ТЭП, или из других, развивающих такую же ТЭДС, что и в цепи ТЭП.

В качестве измерительных приборов для ТЭП могут использоваться пирометрические милливольтметры, автоматические потенциометры, микропроцессорные регистраторы.

Пирометрические милливольтметры являются простейшими средствами измерения ТЭДС. Это приборы магнитоэлектрической системы. Принцип их действия основан на взаимодействии тока  $I$ , протекающего через подвижную рамку прибора  $1$  (рис. 1.3), с полем постоянного магнита  $2$ . Полюсные наконечники  $3$  выполняются концентрически с неподвижным сердечником  $4$ , вокруг которого вращается рамка  $1$ .



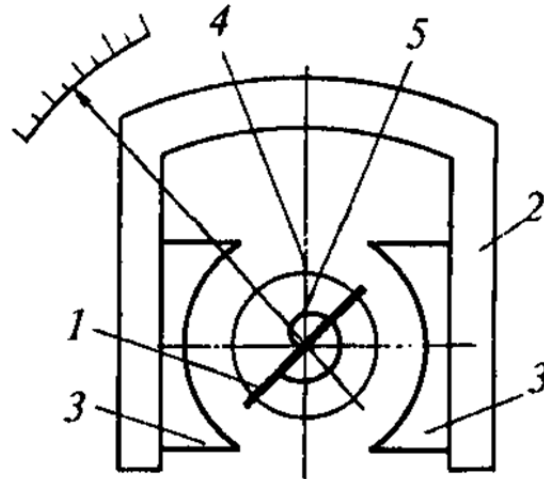


Рис. 1.3. Схема термометрического милливольтметра:  
 1 – рамка; 2 – постоянный магнит; 3 – полюсные наконечники; 4 – неподвижный сердечник; 5 – пружина

При постоянном зазоре между полюсными наконечниками 3 с сердечником 4 индукция  $B$  в зазоре постоянна и действующий на рамку вращающий момент определяется уравнением:

$$M_{\text{вр}} = 2 \cdot \psi \cdot I, \quad (1.16)$$

где  $\psi = n \cdot l \cdot r \cdot B$  – потокосцепление рамки, здесь  $n$  – число витков в рамке;  $l$  – активная длина рамки;  $r$  – радиус рамки,  $B$  – магнитная индукция.

Для создания противодействующего момента используется пружина 5. Один конец пружины соединен с неподвижным сердечником 4, а другой – с рамкой 1. Закручивание пружины на угол  $\varphi$  создает противодействующий момент  $M_{\text{пр}}$ , пропорциональный углу  $\varphi$ :

$$M_{\text{пр}} = k \cdot \varphi, \quad (1.17)$$

где  $k$  – коэффициент упругости пружины.

Так как в состоянии равновесия системы вращающий и противодействующий моменты будут равны:

$$\psi \cdot I = k \cdot \varphi. \quad (1.18)$$

Откуда угол поворота рамки

$$\varphi = I \cdot \frac{\psi}{k}. \quad (1.19)$$

Таким образом, при постоянном внутреннем сопротивлении милливольтметра между напряжением на его зажимах и током, протекающим через рамку, существует однозначная зависимость между напряжением на его зажимах и током, протекающим через рамку. Так как милливольтметры предназначены для измерения температуры в ком-

плекте с ТЭП, они градуируются в градусах Цельсия и называются пирометрическими.

Подключение ТЭП к пирометрическому милливольтметру осуществляется по схеме, показанной на рис. 1.2. В этом случае сила тока, протекающего через рамку,

$$I = \frac{E}{R_{кп} + R_{мп} + R_{ин}}, \quad (1.20)$$

где  $R_{кп}$  – сопротивление компенсационных проводов;  $R_{мп}$  – сопротивление медных проводов;  $R_{ин}$  – внутреннее сопротивление измерительного прибора.

Схема потенциометра, реализующего компенсационный метод измерения ЭДС, приведена на рис. 1.4.

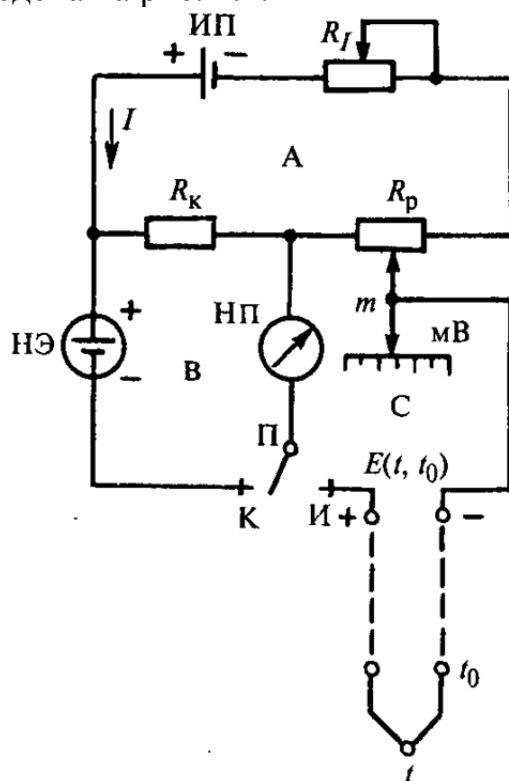


Рис. 1.4. Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

Потенциометр содержит три контура: контур  $A$  рабочего тока  $I$ , контур  $B$  – нормального элемента;  $C$  – контур включения ТЭП. В контур рабочего тока  $A$  включены источник питания  $ИП$ , реостат регулировки тока  $R_I$ , контрольное сопротивление  $R_K$  и реохорд  $R_P$ . Гальванометр  $НП$ , выполняющий функции нуль-индикатора, подключается в положении  $K$  в цепи нормального элемента, а в положении  $И$  – к цепи измеряемого сигнала.

Постоянство рабочего тока определяет точность измерений, поэтому для его контроля используется высокостабильный источник ЭДС, равной 1,086 В. Ток, проходящий через *НП*, будет равен нулю, если выполняется условие

$$E_{\text{нэ}} = I \cdot R_{\text{к}}. \quad (1.21)$$

Тогда рабочий ток цепи будет равен

$$I = \frac{E_{\text{нэ}}}{R_{\text{к}}}. \quad (1.22)$$

После установления рабочего тока нуль-прибор подключается к цепи измеряемого сигнала переключением в положение *И*.

Реохорд в схеме выступает в качестве делителя напряжения. Если движок реохорда находится в крайнем левом положении, то часть сопротивления реохорда *m*, включенная в контур *С*, равна 0 и напряжение на этом участке реохорда  $m \cdot R_{\text{р}} \cdot I = 0$ . Напряжение на участке реохорда, если реохорд находится в крайнем правом положении ( $m = 1$ ), составит  $R_{\text{р}} \cdot I$ . В произвольном положении реохорда напряжение на участке реохорда будет равно  $m \cdot R_{\text{р}} \cdot I$ ,  $0 < m < 1$ . При измерении напряжения ток через НП будет отсутствовать, если будет выполнено условие:

$$E(t, t_0) = m \cdot R_{\text{р}} \cdot I. \quad (1.23)$$

С учетом выражения (1.19) уравнение компенсации будет иметь вид:

$$E(t, t_0) = m \cdot R_{\text{р}} \cdot \frac{E_{\text{нэ}}}{R_{\text{к}}}. \quad (1.24)$$

Чувствительность потенциометра определяется чувствительностью нуль-прибора[1].

#### Задача 1.4.1

Рассчитать величину поправки на показания термоэлектрического преобразователя и определить температуру рабочего конца, если известно, что ТЭДС термоэлектрического преобразователя типа *X* равна *E*, а температура свободных концов – *t*. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.10.

Таблица 1.10

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	НСХ ТЭП	<i>E</i> , мВ	<i>t</i> , °С
1	ТМК	2,078	18
2	ТЖК	11,11	23

Окончание табл. 1.10

3	ТХК	15,954	21
4	ТХК <sub>н</sub>	28,961	19
5	ТХА	12,207	28
6	ТПП	14,61	25
7	ТПР	0,561	22
8	ТВР	6,158	20
9	ТМК	10,469	26
10	ТЖК	7,622	22
11	ТХК	28,435	29
12	ТХК <sub>н</sub>	3,301	18
13	ТХА	13,874	26
14	ТПП	3,193	18
15	ТХК	14,975	27
16	ТХК <sub>н</sub>	15,284	19
17	ТХА	24,604	25
18	ТПП	7,519	24
19	ТПР	1,048	33
20	ТВР	8,670	31

#### Задача 1.4.2

Определите температуру рабочего конца термоэлектрического преобразователя для измерительной цепи, представленной на рис. 1.4. Известно, что  $t_1$ ;  $t'_0$ ;  $t_n$  – температура в месте измерительного прибора. ТЭДС, измеряемая лабораторным потенциометром, равна  $E$ , тип термоэлектрического преобразователя –  $X$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t'_0, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ мВ}$	Тип ТЭП
1	78	28	18	23,52	ХА
2	69	23	18	40,71	ХК
3	76	26	18	8,23	ВР
4	79	29	18	3,51	ПП
5	70	20	18	0,44	ПР
6	73	23	18	18,71	ХК <sub>н</sub>
7	75	25	18	10,00	ЖК
8	77	27	18	9,66	МК
9	80	24	18	20,64	ХА
10	74	25	18	36,31	ХК
11	77	27	18	7,62	ВР
12	75	25	18	1,98	ПП
13	72	22	18	1,09	ПР

Окончание табл. 1.11

14	70	20	18	25,04	ХК <sub>Н</sub>
15	76	26	18	34,51	ЖК
16	72	22	18	18,36	МК
17	81	22	18	21,45	ХА
18	76	26	18	42,03	ХК
19	75	25	18	8,67	ВР
20	78	28	18	3,27	ПП

#### Задача 1.4.3

Оцените значение погрешности измерения температуры пара термоэлектрическим преобразователем типа Х в комплекте с измерительным прибором (ИП). ИП находится в помещении блочного щита, температура в котором  $-20 \pm 1$  °С. Термоэлектрический преобразователь подключен с помощью компенсационных термоэлектродных проводов. Шкала ИП  $x_n - x_v$  (°С), класс  $k$ . Показания ИП –  $x$  (°С). Пределы допускаемых значений погрешностей ТЭП и компенсационных термоэлектродных проводов приведены. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Тип ТЭП	Тип ИП	Шкала, °С, класс ИП	Показания ИП, °С
1	ХА	АП	0... + 600; 1	550
2	ХК	ПМВ	-100... + 300; 1,5	220
3	ВР	АП	+ 1000... + 2500; 2	1750
4	ПП	ПМВ	0... + 600; 1	530
5	ПР	АП	+ 300... + 800; 1,5	670
6	ХК <sub>Н</sub>	ПМВ	+ 400... + 900; 1	710
7	ЖК	АП	0... + 300; 1	275
8	МК	ПМВ	+ 150... 400; 1,5	330
9	ХА	АП	+ 400... + 800; 2	720
10	ХК	ПМВ	+ 300... + 800; 1,5	690
11	ВР	АП	+ 1500... + 2500; 2,5	2300
12	ПП	ПМВ	+ 1200... + 1600; 1	1500
13	ПР	АП	+ 800... + 1800; 2	1350
14	ХК <sub>Н</sub>	ПМВ	+ 350... + 900; 1,5	780
15	ЖК	АП	0... + 300; 2,5	275
16	МК	ПМВ	-40... + 125; 1	105
17	ХА	АП	+ 350... + 1000; 2	940
18	ХК	ПМВ	-100... + 100; 2,5	65
19	ВР	АП	+ 1000... + 2500; 1	2100
20	ПП	ПМВ	+ 0 ... 1100; 1	990

#### Задача 1.4.4

Определить силу тока, протекающего через рамку пирометрического милливольтметра при измерении температуры  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в комплекте с ТЭП, если он градуирован при внутреннем сопротивлении  $R_{\text{вн}}$  (Ом) и сопротивлении измерительной цепи  $R_{\text{из}}$  (Ом). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	НСХ ТЭП	$t$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{вн}}$ , Ом	$R_{\text{из}}$ , Ом
1	ХА	550	130	15
2	ХК	220	132	14
3	ВР	1750	134	13
4	ПП	530	135	12
5	ПР	670	136	11
6	ХК <sub>н</sub>	710	138	10
7	ЖК	275	128	16
8	МК	330	129	19
9	ХА	720	130	20
10	ХК	690	125	17
11	ВР	2300	126	18
12	ПП	1500	128	15
13	ПР	1350	130	16
14	ХК <sub>н</sub>	780	135	17
15	ЖК	275	134	18
16	МК	105	133	19
17	ХА	940	138	15
18	ХК	65	138	14
19	ВР	2100	140	13
20	ПП	990	149	18

#### Задача 1.4.5

Определить силу рабочего тока в цепи потенциометра и положение движка реохорда, при измерении температуры  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) в комплекте с ТЭП, если его контрольное сопротивление –  $R_{\text{к}}$  (Ом), сопротивление реохорда –  $R_{\text{р}}$  (Ом). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.14.

Таблица 1.14

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	НСХ ТЭП	$t$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{к}}$ , Ом	$R_{\text{р}}$ , Ом
1	ХА	550	150	90
2	ХК	220	152	94

Окончание табл. 1.14

3	ВР	1750	154	95
4	ПП	530	155	91
5	ПР	670	156	92
6	ХК <sub>н</sub>	710	158	93
7	ЖК	275	148	97
8	МК	330	149	98
9	ХА	720	150	99
10	ХК	690	145	100
11	ВР	2300	146	84
12	ПП	1500	148	90
13	ПР	1350	150	86
14	ХК <sub>н</sub>	780	155	88
15	ЖК	275	154	90
16	МК	105	153	92
17	ХА	940	158	86
18	ХК	65	158	94
19	ВР	2100	160	96
20	ПП	990	169	90

Задача 1.4.6

Определить минимальное значение сопротивления реохорда потенциометра, работающего в комплекте с ТЭП и имеющего пределы измерения  $t_{н...t_{к}}$  (°C), если известно, что контрольное сопротивление равно  $R_{к}$  (Ом). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.15.

Таблица 1.15

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	НСХ ТЭП	$t$ , °C	$R_{к}$ , Ом	$R_{р}$ , Ом
1	ХА	550	150	90
2	ХК	220	152	94
3	ВР	1750	154	95
4	ПП	530	155	91
5	ПР	670	156	92
6	ХК <sub>н</sub>	710	158	93
7	ЖК	275	148	97
8	МК	330	149	98
9	ХА	720	150	99
10	ХК	690	145	100
11	ВР	2300	146	84
12	ПП	1500	148	90
13	ПР	1350	150	86

14	ХКн	780	155	88
15	ЖК	275	154	90
16	МК	105	153	92
17	ХА	940	158	86
18	ХК	65	158	94
19	ВР	2100	160	96
20	ПП	990	169	90

### 1.5. Термопреобразователи сопротивления

Термопреобразователь сопротивления (ТПС) – это первичный измерительный преобразователь температуры, основанный на зависимости электрического сопротивления от температуры [1].

Для большинства ТПС электрическое сопротивление  $R_t$  при температуре  $t$  зависит от сопротивления проводника  $R_0$  при температуре  $t_0 = 0$  °С и температурного коэффициента сопротивления  $\alpha$ , определяемого для каждого материала, и определяется по формуле

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad (1.25)$$

Для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) ТПС используются чистые металлы, обладающие большим температурным коэффициентом сопротивления, который определяется сопротивлением проводника  $R_0$  при температуре 0 °С и сопротивлением  $R_{100}$  при температуре 100 °С:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100} \quad (1.26)$$

или определяется отношением

$$W_{100} = R_{100} / R_0. \quad (1.27)$$

Чувствительность ТПС равна отношению изменения сопротивления к вызвавшему его изменению температуры:

$$S = R_0 \cdot \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t}. \quad (1.28)$$

ТПС в основном изготавливаются из платины (ТСП), меди (ТСМ) и никеля (ТСН). Обозначения НСХ ТПС приведены в табл. 1.16.

Таблица 1.16

#### Обозначения НСХ ТПС

Тип ТПС	$R_0$ , Ом	Обозначение НСХ в РФ	Международное обозначение
		$W_{100} = 1,385$	
ТСП	1	1П	Pt1



Окончание табл. 1.16

Тип ТПС	$R_0$ , Ом	Обозначение НСХ в РФ	Международное обозначение
	10	10П	Pt10
	50	50П	Pt50
	100	100П	Pt100
	500	500П	Pt500
		$W_{100} = 1,426$	$W_{100} = 1,428$
ТСМ	10	10М	Cu10
	50	50М	Cu50
	100	100М	Cu100
ТСН	100	100Н	Ni100

Допускаемые отклонения от НСХ и пределы измерений в соответствии с [5] приведены в табл. 1.17.

Таблица 1.17

Характеристики ТПС

Класс допуска	Допускаемое отклонение, °С	Диапазон измерений, °С			
		ТПС		ТСМ	ТСН
		Проволочный ЧЭ	Пленочный ЧЭ		
АА	$\pm (0,10 + 0,0017  t )$	- 50...+ 250	-0...+ 150	—	—
А	$\pm (0,15 + 0,0020  t )$	- 100...+ 450	- 30...+ 300	- 50...+ 120	—
В	$\pm (0,30 + 0,0050  t )$	- 196...+ 660	- 50...+ 500	- 50...+ 200	
С	$\pm (0,60 + 0,0100  t )$	- 196...+ 660	- 50...+ 600	-180...+ 200	-60...+ 180

Допускаемые отклонения сопротивления определяются аналогично определению допускаемого отклонения ТЭДС для ТЭП.

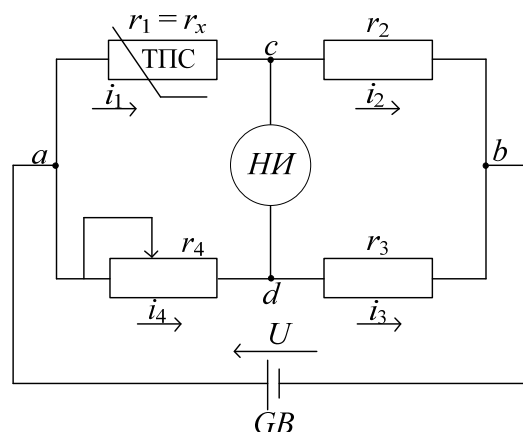


Рис. 1.5. Схема уравновешенного моста

Термопреобразователи сопротивления применяются в комплекте с логометрами, автоматическими электронными мостами. Схема четырехплечевое уравновешенного моста показана на рис. 1.5.

При измерении сопротивления ТПС с помощью четырехплечевое моста, показанного на рис. 1.5, неизвестное сопротивление  $r_x$  определяется соотношением

$$r_x = r_4 \cdot \frac{r_2}{r_3}, \quad (1.29)$$

получаемым из условия равновесия мостовой схемы

$$r_x \cdot r_3 = r_4 \cdot r_2. \quad (1.30)$$

При выполнении равенства (1.30) ток, протекающий через нуль-индикатор (рис. 1.3), равен нулю. Таким образом, при постоянных значениях  $r_2$  и  $r_3$  определение неизвестного сопротивления ТПС производится подбором значения калиброванного сопротивления  $r_4$ .

### Задача 1.5.1

Медный термопреобразователь сопротивления имеет сопротивление  $R_{20}$  при температуре  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Определите его сопротивление при 100 и 150  $^{\circ}\text{C}$ . Температурный коэффициент –  $\alpha$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.18.

Таблица 1.18

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$t, ^{\circ}\text{C}$	$R_{20}, \text{Ом}$	$\alpha, \text{K}^{-1}$
1	20	1,75	4,26
2	19	1,76	4,27
3	18	1,77	4,28
4	17	1,78	4,29
5	16	1,79	4,30
6	15	1,80	4,31
7	14	1,79	4,32
8	13	1,78	4,33
9	11	1,77	4,34
10	10	1,76	4,35
11	11	1,75	4,34
12	12	1,74	4,33
13	13	1,73	4,32
14	14	1,72	4,31
15	15	1,71	4,3
16	16	1,70	4,29
17	17	1,71	4,28
18	18	1,72	4,27
19	19	1,73	4,26
20	20	1,74	4,25

### Задача 1.5.2

Сопротивление термопреобразователя сопротивления измеряется уравновешенным мостом по схеме, изображенной на рис. 1.6.

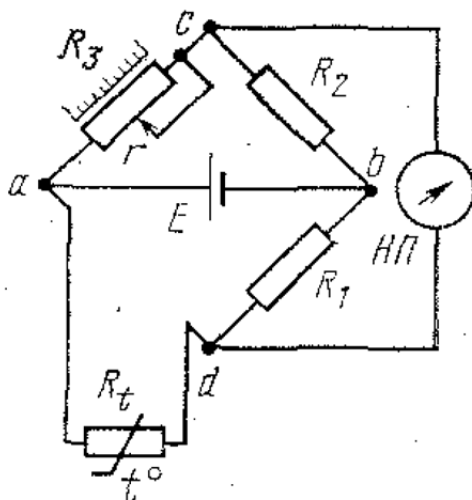


Рис. 1.6. Схема уравновешенного моста

Термопреобразователь сопротивления градуировки –  $X$ , измеряемая температура –  $t$ , шкала моста –  $t_{\text{нп}} \dots t_{\text{вп}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Определите изменение показаний прибора, возникающее за счет увеличения сопротивления переходного контакта реохорда  $R_3$  на 0,2 Ом, при условии, что  $R_1=R_2$ , а  $R_t=R_{\text{нп}}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	НСХ ТПС	$t$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{нп}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{вп}}$ , $^{\circ}\text{C}$
1	50М	180	0	200
2	50П	150	0	300
3	100М	150	-100	200
4	100П	400	0	500
5	100П	130	0	150
6	50М	100	-200	200
7	50П	150	-200	200
8	100М	110	-100	200
9	100П	300	0	600
10	100М	50	-60	180
11	50М	140	0	200
12	50П	350	0	800
13	100М	40	-200	200

Окончание табл. 1.19

14	100П	0	-200	200
15	100М	50	0	100
16	50М	100	0	200
17	50П	80	-100	300
18	100М	0	-200	200
19	100П	100	0	700
20	100П	20	0	180

### Задача 1.5.3

Рассчитайте сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_n$  уравновешенного моста, предназначенного для работы с термопреобразователем сопротивления градуировки  $X$  со шкалой  $t_{нп} \dots t_{вп}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 1.7). Для расчета примите следующие сопротивления:  $R_p$ ;  $R_0$ ;  $R_n$ ;  $R_2=R_3$ . Нерабочие участки реохорда не учитывать. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.20.

Таблица 1.20

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	НСХ ТПС	$t_{нп} \dots t_{вп}$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_p$ , Ом	$R_0$ , Ом	$R_n$ , Ом	$R_2=R_3$
1	50М	0..200	90	5	2,5	200
2	50П	0...300	100	3	1,5	100
3	100М	100...200	80	4	2	150
4	100П	0...500	70	5	2	150
5	100П	0...150	110	2	1	250
6	50М	-200...200	90	3	1,5	150
7	50П	-200...200	100	4	2	250
8	100М	-100...200	80	5	2,5	150
9	100П	0...600	70	2	0,5	160
10	100М	-60...180	110	3	1	250
11	50М	0...200	90	4	1,5	200
12	50П	0...800	100	5	2	300
13	100М	-200...200	80	2	0,5	200
14	100П	-200...200	70	3	1,5	180
15	100П	0...100	110	4	1,5	250
16	50М	0...200	90	5	2,5	250
17	50П	-100...300	100	2	0,5	280
18	100М	-200...200	80	3	1,5	200
19	100П	0...700	70	4	2	200
20	100М	0...180	110	5	2	300

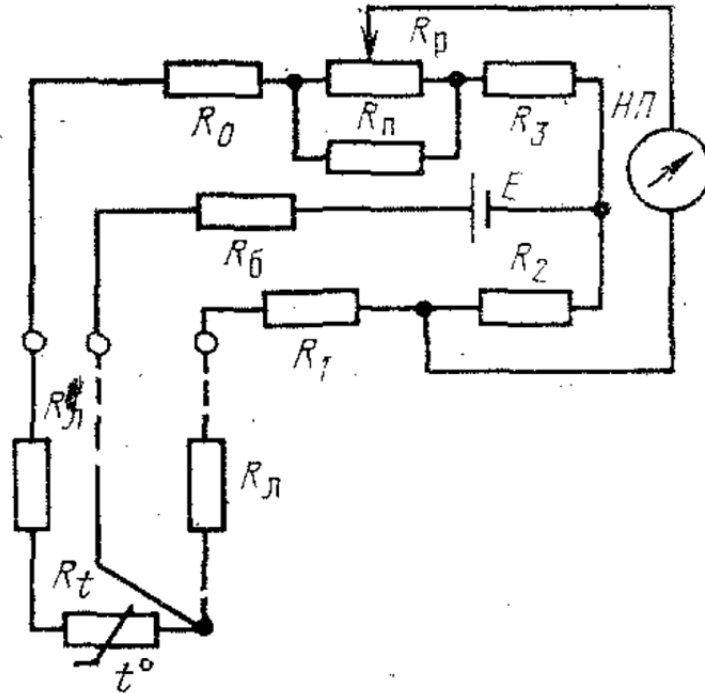


Рис. 1.7. Схема уравновешенного моста

### 1.6. Пирометры излучения

Для измерения температуры тела или среды по тепловому излучению используют бесконтактные средства измерения или пирометры. Связано это с тем, что спектральная энергетическая яркость (СЭЯ) тела увеличивается при увеличении его температуры. В зависимости от измеряемого спектра пирометры разделяют на квазимонохроматические и пирометры полного излучения [1].

СЭЯ и интегральное излучение зависят от физических свойств нагреваемого тела, поэтому шкалы пирометров градуируются по излучению абсолютно черного тела (АЧТ), степень черноты которого  $\varepsilon = 1$ .

Спектральная энергетическая яркость абсолютно черного тела в диапазоне температур до 3000 К описывается уравнением Вина

$$E_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (1.31)$$

где  $E_{0\lambda}$  – СЭЯ АЧТ для волны длиной  $\lambda$ ;  $T$  – абсолютная температура тела;  $C_1, C_2$  – постоянные излучения, числовые значения которых зависят от принятой системы единиц и определяются выражениями

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2; \quad (1.32)$$

$$C_2 = \frac{N_A \cdot h \cdot c}{R},$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Реальные физические тела излучают энергию менее интенсивно, чем АЧТ. В результате измерения пирометрами квазимонохроматического или полного излучения получают соответственно яркостную или условную температуру. Для перехода от яркостной температуры к реальной температуре используют преобразованное уравнение Вина для АЧТ –

$$B_{0\lambda}(T_{\text{я}}) = K \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}}}, \quad (1.33)$$

где  $B_{0\lambda}$  – яркость АЧТ для волны  $\lambda$ ;  $T_{\text{я}}$  – яркостная температура АЧТ;  $K$  – коэффициент пропорциональности, определяемый соотношением:

$$K = \frac{B_{0\lambda}(T_{\text{я}})}{E_{0\lambda}}, \quad (1.34)$$

$T$  – реальная температура нагретого тела, равная

$$T = \left( \frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \right)^{-1}, \quad (1.35)$$

где  $T_{\text{я}}$  – яркостная температура реального тела, измеренная квазимонохроматическим пирометром.

#### Задача 1.6.1

Температура газохода измеряется квазимонохроматическим (оптическим) пирометром. Стрелка пирометра показывает температуру  $T$ . Определите действительную температуру газохода и систематическую погрешность измерения температуры стенки, если коэффициент теплового излучения ее составляет  $\varepsilon_{\lambda}$ . Эффективная длина волны пирометра  $\lambda_{\text{э}}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 1.21.

Таблица 1.21

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{\lambda}$	$\lambda_{\text{э}}, \text{мкм}$
1	1100	0,75	0,65
2	1200	0,11	0,55
3	1300	0,84	0,45
4	2000	0,23	0,35
5	2500	0,98	0,75
6	3000	0,31	0,85
7	2700	0,18	0,95
8	1900	0,64	0,25

*Окончание табл. 1.21*

9	2100	0,44	0,15
10	1800	0,28	0,4
11	2200	0,95	0,5
12	3100	0,37	0,6
13	2400	0,22	0,7
14	2600	0,77	0,8
15	3500	0,35	0,9
16	3300	0,16	0,3
17	1400	0,62	0,2
18	2900	0,94	0,1
19	1700	0,87	0,45
20	3200	0,66	0,65

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Давление относится к числу наиболее распространенных измеряемых физических величин. Контроль и управление большинством технологических процессов практически во всех отраслях промышленности связаны с измерением давления, разности давлений рабочих сред.

Давление – широкое понятие, характеризующее нормально распределенную силу  $F$ , действующую со стороны одного тела на единицу поверхности  $S$  другого [1]:

$$P = \frac{F}{S}. \quad (2.1)$$

В молекулярно-кинетической теории газа давление рассматривается как результат ударов молекул о стенки сосуда. Давление связано со средней кинетической энергией поступательного движения молекул  $m v^2 / 2$  и их числом  $N$  в объеме  $V$  следующей формулой:

$$P = \frac{N \cdot m \cdot v^2}{3 \cdot V}, \quad (2.2)$$

где  $m$  – масса молекулы;  $v^2$  – квадрат средней скорости молекулы.

В практике теплотехнических измерений наиболее часто используют понятия давления: абсолютного  $P_{\text{абс}}$ , избыточного  $P_{\text{изб}}$  и вакууметрического  $P_{\text{в}}$ , различие которых состоит в отношении к атмосферному (барометрическому) давлению  $P_{\text{атм}}$ . Суммарное давление, действующее на вещество, определяется суммой атмосферного и избыточного давлений и называется абсолютным:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}}. \quad (2.3)$$

Следовательно, избыточное давление представляет собой разность между абсолютным и атмосферным:

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}}. \quad (2.4)$$

Таким образом, приборы, предназначенные для измерения избыточного давления, на практике измеряют разность давлений [6].

Единица измерения давления в системе СИ – Паскаль (Па), равный давлению, создаваемому силой в один ньютон, действующей на площадь в один квадратный метр ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ). Кроме того, часто встречаются такие единицы измерения, как килограмм-сила на квадратный сантиметр ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ ) и квадратный метр ( $\text{кгс}/\text{м}^2$ ), последняя численно равна миллиметру водяного столба (мм вод. ст.). Соотношение между единицами измерения давления приведены в табл. 1.1 [1].



Таблица 2.1

## Единицы измерения давления

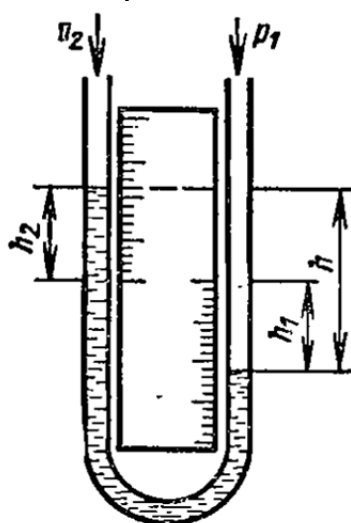
Единица измерения	Па	Бар	кгс/см <sup>2</sup>	кгс/м <sup>2</sup> (мм вод. ст.)	мм рт. ст.
Па	1	10 <sup>-5</sup>	1,0197·10 <sup>-5</sup>	0,10197	7,5006·10 <sup>-3</sup>
Бар	10 <sup>5</sup>	1	1,0197	1,0197·10 <sup>4</sup>	750,06
кгс/см <sup>2</sup>	9,8066·10 <sup>4</sup>	0,98066	1	10 <sup>4</sup>	735,56
кгс/м <sup>2</sup> (мм вод. ст.)	9,8066	0,98066·10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	7,3556·10 <sup>-2</sup>
мм рт. ст	133,32	1,3332·10 <sup>-3</sup>	1,3595·10 <sup>-3</sup>	13,595	1

Средства измерения, предназначенные для измерения давления и разности давлений, называют манометрами. Манометры, предназначенные для измерения давления или разрежения в диапазоне до 40 кПа, называют напоромерами и тягомерами.

В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения другой физической величины, средства измерения давления разделяются на жидкостные, деформационные, электрические, ионизационные, тепловые и грузопоршневые [1].

## 2.1. Жидкостные и чашечные манометры

Приборы *U*-образные (двухтрубные) и чашечные (однотрубные) относятся к группе жидкостных приборов с видимым уровнем. Приборы *U*-образные и чашечные используются в промышленности как местные приборы, т. е. устанавливаемые на площадках обслуживания или на отдельных элементах технологического оборудования. На рис. 2.1 показана схема *U*-образного манометра.

Рис. 2.1. Схема *U*-образного манометра

Манометр состоит из  $U$ -образной стеклянной трубки, заполненной рабочей жидкостью, и шкалы, позволяющей проводить отсчет уровней в обеих трубках. Измеряемое давление, разрежение или разность давлений уравнивается и измеряется столбом  $h$  рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов  $h_1$  и  $h_2$  в обеих трубках. Обычно с помощью  $U$ -образного прибора давление, разрежение или разность давлений измеряют в миллиметрах водяного или ртутного столба. Результат измерения может быть выражен не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в паскалях по формуле

$$P = hg(\rho - \rho_c), \quad (2.5)$$

где  $g$  – местное ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $h$  – разность уровней рабочей жидкости,  $\text{м}$ ;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_c$  – плотность среды над рабочей жидкостью,  $\text{кг/м}^3$ . Если  $\rho \gg \rho_c$ , уравнение 2.5 примет вид

$$P = hg\rho. \quad (2.6)$$

Среды, используемые в качестве рабочих жидкостей, приведены в табл. 2.2

Таблица 2.2

*Плотность рабочих жидкостей*

Жидкость	Плотность, $\text{г/см}^3$
Ртуть	1,350
Спирт метиловый	0,791
Спирт этиловый	0,789
Вода	1,000
Трансформаторное масло	0,900

Чашечный (однотрубный) манометр, показанный на рис. 2.2, состоит из цилиндрического сосуда и сообщающейся с ним измерительной стеклянной трубки.

При этом площадь сечения сосуда значительно больше, чем измерительной трубки. Рабочую жидкость (воду, ртуть или другую жидкость) заливают в широкий сосуд настолько, чтобы уровень ее в измерительной трубке находился напротив нулевой отметки шкалы. При измерении давления в объекте его соединяют с помощью трубки с сосудом прибора, а при измерении разрежения – с измерительной трубкой. При измерении разности давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее – в измерительную трубку.

Пусть под действием давления, разрежения или разности давлений жидкость в измерительной трубке поднимается на высоту  $h_1$ , а в широ-

ком сосуде опускается на высоту  $h_2$ , тогда высота столба  $h$ , соответствующая измеряемой величине, будет равна

$$h = h_1 + h_2. \quad (2.7)$$

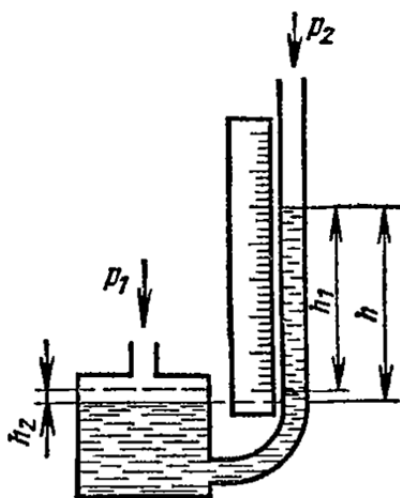


Рис. 2.2 Схема чашечного манометра

Если  $F_1$  – площадь сечения измерительной трубки, а  $F_2$  – площадь сечения широкого сосуда, то

$$F_1 h_1 = F_2 h_2, \quad (2.8)$$

так как объем  $F_1 h_1$  жидкости в измерительной трубке равен объему  $F_2 h_2$  жидкости, вытесненной из широкого сосуда.

Решив уравнения (2.7) и (2.8) относительно  $h$ , получим

$$h = h_1 \left( 1 + \frac{F_1}{F_2} \right) = h_1 \left( 1 + \frac{d^2}{D^2} \right). \quad (2.9)$$

Таким образом, действительная высота столба  $h$ , соответствующая измеряемой величине, больше отсчитываемой высоты столба  $h_1$  на значение  $h_1 d^2/D^2$ , где  $d, D$  – внутренние диаметры измерительной трубки и широкого сосуда, м.

С помощью однострубногo манометра давление, разрежение или разность давлений обычно измеряют в миллиметрах столба рабочей жидкости. В этом случае измеряемое давление определяют по формуле (2.9).

Если результаты измерения должны быть выражены не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в паскалях, то используются формулы (2.5), (2.6), (2.9).

Микроманометры являются переносными приборами, их применяют в лабораторной практике и в промышленных условиях для измерения малых давлений, разрежений или разностей давлений воздуха и не-

агрессивных газов. На рис. 2.3 показана схема микроманометра с наклонной трубкой.

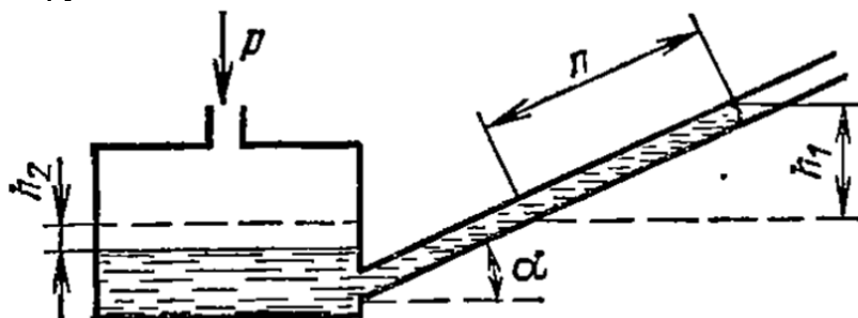


Рис. 2.3. Схема микроманометра

Наклон измерительной трубки в этом приборе сделан с целью уменьшения погрешности измерений. Длина шкалы у микроманометров с наклонной трубкой обычно выполняется равной 250 мм.

Пусть под действием измеряемого давления, разрежения или разности давлений воздуха уровень жидкости в трубке, наклоненной на угол  $\alpha$  к горизонтальной плоскости, поднимется по вертикали на высоту  $h_1$ , в широком сосуде опустится на  $h_2$ , тогда разность высот уровней рабочей жидкости в приборе, уравнивающая измеряемую величину, будет равна

$$h = h_1 + h_2 = n \cdot \sin \alpha + h_2, \quad (2.10)$$

где  $n$  – длина столба жидкости в наклонной трубке.

Показания прибора в кгс/м<sup>2</sup> определяются по формуле

$$P = k \cdot n, \quad (2.11)$$

где  $n$  – отсчет по шкале,  $k$  – постоянная прибора, определяемая выражением:

$$k = \rho \left( \sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right), \quad (2.12)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – площадь сечений наклонной трубки и сосуда соответственно. [3]

#### Задача 2.1.1

В U-образном манометре с водяным заполнением внутренние диаметры трубок соответственно равны  $d_1$  и  $d_2$  мм. При измерении давления уровень в первой трубке переместился на  $h'$  мм. Измеряемое давление считалось равным  $p$  кПа. Оцените погрешность, вызванную «неучетом» реального уровня во второй трубке. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм	$h'$ , мм	$p$ , кПа
1	8,12	8,40	238	4,10
2	8,06	8,38	239	4,09
3	7,87	7,36	240	4,08
4	7,92	7,34	236	4,07
5	7,98	7,32	234	4,06
6	7,56	7,10	242	4,05
7	7,48	7,30	237	4,04
8	7,84	8,00	241	4,03
9	8,00	8,12	240	4,02
10	7,86	8,38	243	4,01
11	8,10	8,40	238	4,10
12	7,88	8,38	239	4,09
13	8,12	7,36	240	4,08
14	8,14	7,34	236	4,07
15	8,16	7,32	234	4,06
16	8,18	7,10	242	4,05
17	8,20	7,30	237	4,04
18	7,66	8,00	241	4,03
19	7,86	8,12	242	4,02
20	8,5	8,38	237	4,01

## Задача 2.1.2

Определите цену деления чашечного манометра, заполненного рабочей жидкостью, в единицах давления. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта				Рабочая жидкость
1	6	11	16	Ртуть
2	7	12	17	Спирт этиловый
3	8	13	18	Спирт метиловый
4	9	14	19	Трансформаторное масло
5	10	15	20	Вода

## Задача 2.1.3

Длина столбика жидкости в трубке микроманометра составляла 95 делений при постоянной  $k_1$  шкалы прибора. Изменится ли относительная погрешность измерения давления, если трубку установить в поло-

жение, при котором постоянная шкалы прибора –  $k_2$ ? Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$k_1$	$k_2$
1	0,65	0,38
2	0,64	0,39
3	0,63	0,31
4	0,62	0,37
5	0,61	0,33
6	0,60	0,45
7	0,67	0,48
8	0,68	0,49
9	0,71	0,41
10	0,58	0,42
11	0,59	0,48
12	0,61	0,39
13	0,57	0,57
14	0,63	0,31
15	0,65	0,34
16	0,68	0,38
17	0,69	0,41
18	0,71	0,42
19	0,72	0,37
20	0,74	0,35

Задача 2.1.4

Показания микроманометра, заполненного этиловым спиртом, составляют  $p'$  кгс/м<sup>2</sup>. Угол наклона измерительной трубки –  $\alpha$ , площадь сечений наклонной трубки и сосуда соответственно равны  $F_1$  и  $F_2$ . Определить, напротив какой отметки  $n$  находится столбик жидкости. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$\alpha, ^\circ$	$F_1, \text{мм}^2$	$F_2, \text{см}^2$	$p', \text{кгс/м}^2$
1	30,25	8,12	200,9	25,8
2	30,29	8,06	198,8	25,7
3	30,35	7,87	196,7	25,8
4	31,52	7,92	201,4	25,9
5	31,85	7,98	200,4	26,1
6	31,24	7,56	185,5	30,4
7	31,18	7,48	183,5	94,5

8	30,89	7,84	198,4	12,5
9	31,2	8,00	197,8	68,6
10	28,2	7,86	196,3	75,6
11	26,4	8,10	189,8	73,2
12	28,6	7,88	187,3	74,2
13	29,8	8,12	197,6	86,8
14	31,2	8,14	194,8	92,1
15	31,8	8,16	198,6	43,5
16	30,9	8,18	192,6	56,8
17	30,7	8,20	199,8	38,6
18	30,6	7,66	200,2	72,2
19	28,8	7,86	200,4	69,7
20	27,4	8,5	200,6	70,0

## 2.2. Деформационные манометры

В деформационных манометрах используется зависимость деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Пропорциональная давлению деформация или сила преобразуется в показания или соответствующие изменения выходного сигнала. Большинство деформационных манометров содержат упругие чувствительные элементы, осуществляющие преобразование давления в пропорциональное перемещение рабочей точки. Наиболее распространенные упругие чувствительные элементы приведены на рис. 2.4.

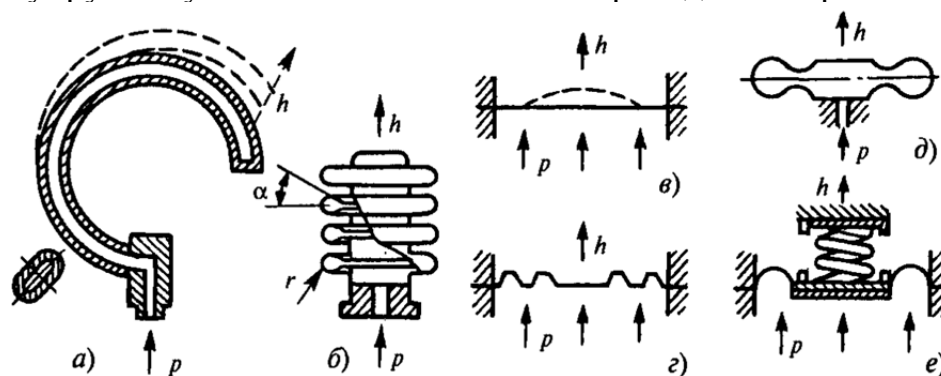


Рис. 2.4. Упругие чувствительные элементы:

*а – трубчатая пружина; б – сильфон; в – плоская мембрана; г – гофрированная мембрана, д – мембранная коробка; е – вялая мембрана с жестки центром*

Упругие свойства чувствительных элементов характеризуются жесткостью по силе

$$k_F = \frac{F}{h} = \frac{p \cdot S_{\text{э}}}{h}, \quad (2.13)$$

где  $F$  – сила, действующая на упругий чувствительный элемент;  $S_{\text{Э}}$  – эффективная площадь элемента;  $h$  – перемещение рабочей точки.

Полые одновитковые трубчатые пружины (рис. 2.4, а) имеют эллиптическое или плоскоовальное сечение. Один конец пружины, в который поступает измеряемое давление, закреплен неподвижно в держателе, второй может перемещаться. Под действием давления, подаваемого во внутреннюю полость трубки, пружина деформируется в поперечном сечении, принимая форму, изображенную пунктиром (рис. 2.4, а). Схема перемещения пружины приведена на рис. 2.5, а [1, 3].

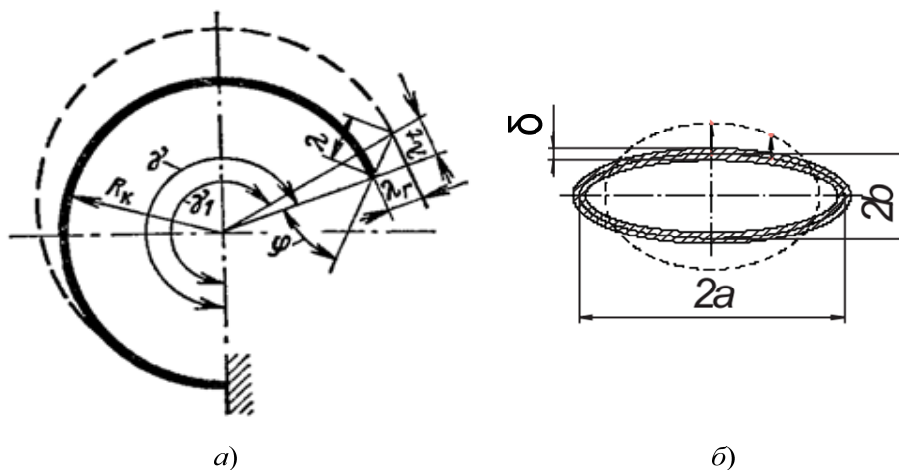


Рис. 2.5. Трубчатая пружина деформационного манометра:  
а – схема перемещения свободного конца трубчатой пружины;  
б – поперечное сечение пружины

Пружина будет разгибаться, и ее свободный конец совершит некоторое линейное перемещение  $\lambda$ . При этом уменьшается кривизна трубки на угол  $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_1$  (рис. 2.5, а).

Трубчатая пружина тем чувствительней, чем больше ее радиус кривизны  $R_k$  и меньше толщина стенки трубки  $\delta$ . Кроме того, чувствительность пружины зависит от отношения  $a/b$  осей поперечного сечения (рис. 2.5, б).

Относительное изменение центрального угла тонкостенной пружины в зависимости от измеряемого давления определяются по формуле:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R_k}{b \cdot \delta} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2}, \quad (2.14)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от отношения  $a/b$ ,  $E$  – модуль упругости материала пружины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\chi$  – главный параметр пружины, определяемый по формуле

$$\chi = \frac{R_k \cdot \delta}{a^2}. \quad (2.15)$$



Полное перемещение  $\lambda$  свободного конца пружины определяется как геометрическая сумма радиального  $\lambda_r$  и тангенциального  $\lambda_t$  перемещений (рис. 2.5, а):

$$\lambda = \sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_t^2} = \frac{\Delta y}{\gamma} \cdot R_K \cdot A, \quad (2.16)$$

где  $A = \sqrt{(1 - \cos \gamma)^2 + (\gamma - \sin \gamma)^2}$ .

Чувствительность пружины по давлению определяется по формуле

$$s_p = \frac{1 - \mu^2}{E} \cdot \frac{R_K^2}{b \cdot \delta} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \cdot \frac{\alpha \cdot A}{\beta + \chi^2}. \quad (2.17)$$

Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  для различных значений  $a/b$  и форм поперечного сечения пружин приведены в табл. 2.7 [3].

Таблица 2.7

*Значения коэффициентов для расчета трубчатых пружин*

Форма поперечного сечения	$a/b$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Эллиптическая	$\alpha$	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	$\beta$	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
Плоскоовальная	$\alpha$	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	$\beta$	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118

### Задача 2.2.1

Чувствительным элементом манометра является сильфон. Уравновешивание давления осуществляется за счет упругого противодействия сильфона и пружины, эффективная площадь сильфона –  $S_{\text{эф}}$ , жесткость пружин –  $K_{\text{п}}$ . При перемещении стрелки манометра от начала до конца шкалы доньшко сильфона перемещается на  $h$ . Определить пределы измерения манометра. Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$S_{\text{эф}}$ , мм <sup>2</sup>	$K_{\text{п}}$ , Н/мм	$h$ , мм
1	31,5	0,25	4,5
2	30,2	0,19	5,0
3	30,1	0,27	4,5
4	30,3	0,28	4,3
5	31,4	0,20	4,2
6	31,6	0,18	3,9
7	31,2	0,17	5,1
8	31,1	0,26	5,5

Окончание табл. 2.8

9	30,9	0,24	5,9
10	31,3	0,16	2,0
11	30,4	0,15	4,3
12	31,9	0,25	4,0
13	31,4	0,14	5,0
14	30,6	0,24	5,6
15	30,8	0,23	5,1
16	30,9	0,18	5,7
17	31,0	0,17	4,9
18	30,8	0,18	5,0
19	31,7	0,28	5,8
20	30,7	0,25	5,9

### Задача 2.2.2

Определить чувствительность и полное перемещение конца пружины деформационного манометра при измерении давления  $p$ , если манометр имеет параметры: параметры поперечного сечения  $a$ ,  $b$ ; радиус кривизны пружины  $R_K$ ; центральный угол  $\gamma = 240^\circ$ ; толщина стенки пружины  $\delta$ ; материал пружины – латунь Л62 (модуль упругости  $E = 1,16 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>); коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ . Построить зависимость перемещения конца пружины при изменении измеряемого давления от 0 до 10 кгс/см<sup>2</sup>. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$a$ , мм	$b$ , мм	$\delta$ , мм	$R_K$ , мм	$p$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	10,5	3,2	2,2	46	7,1
2	10,3	2,5	2,2	46	7,2
3	9,8	2,6	1,9	45	6,8
4	10,2	2,7	1,8	47	6,9
5	10,1	3,1	1,7	50	7,3
6	9,9	3,4	1,6	50	7,4
7	8,7	2,8	2,0	50	6,8
8	8,9	2,5	2,1	51	6,9
9	9,5	2,9	1,5	47	7,1
10	9,2	2,3	1,6	48	7,2
11	10,2	4,5	1,7	49	7,4
12	10,4	4,6	1,2	43	7,5
13	9,6	3,2	0,8	45	7,6
14	9,7	3,0	0,9	46	7,6
15	8,2	2,6	0,7	47	7,4

16	9,6	2,7	0,8	48	7,3
17	10,2	2,9	2,1	49	7,2
18	10,3	2,3	2,2	50	7,6
19	10,4	2,8	2,2	51	7,3
20	9,8	3,1	1,8	52	7,2

### 2.3. Электрические преобразователи давления

Электрические приборы применяются в технике для измерения давления различных сред. В основу действия этих приборов положены различные физические явления, например, возникновение электростатических зарядов, изменение электрического сопротивления, изменение индуктивности или электрической емкости.

Манометры, действие которых основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов (кварца, турмалина, титаната бария и др.), называются пьезоэлектрическими. [3]

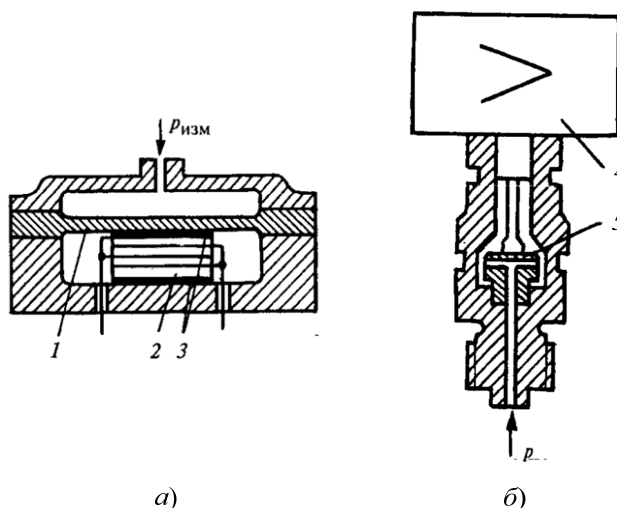


Рис. 2.6. Схемы электрических манометров:

*а* – пьезометрический манометр; *б* – манометр с тензопреобразователем;  
 1 – мембрана; 2 – кварцевые пластины; 3 – металлизированные плоскости;  
 4 – электронный блок; 5 – тензопреобразователь

Сущность пьезоэлектрического эффекта состоит в возникновении электрических зарядов на поверхности сжатой пластины, которая вырезается перпендикулярно оси кристаллов материала. Схема пьезоэлектрического кварцевого манометра приведена на рис. 2.6, *а*.

Измеряемое давление с помощью мембраны 1 преобразуется в усилие, сжимающее кварцевые пластины 2. Электрический заряд, возникающий в металлизированных плоскостях 3 под действием усилия  $F$  со стороны мембраны, определяется выражением

$$Q = k \cdot F = k \cdot S \cdot p, \quad (2.18)$$

где  $p$  – давление, действующее на мембрану;  $S$  – эффективная площадь мембраны;  $k$  – пьезомодуль материала.

Напряжение на входе усилителя, подключенного к выходу пьезопреобразователя, определяется общей емкостью измерительной цепи  $C$  [1]:

$$U = \frac{Q}{C}. \quad (2.19)$$

Чувствительность пьезоэлектрического преобразователя при параллельном соединении пластин определяется по формуле

$$S = \frac{k}{\left(\frac{C}{n} + C_0\right)}, \quad (2.20)$$

где  $n$  – число пластин;  $C_0$  – емкость одной пластины;  $C$  – емкость измерительной цепи.

Параметры некоторых пьезоэлектрических материалов приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

*Параметры пьезоэлектрических материалов*

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Диэлектрическая проницаемость	Пьезомодуль, Кл/Н
Кварц	2600	4,5	$2,31 \cdot 10^{-12}$
Дигидрофосфат аммония	1800	15,3	$2,40 \cdot 10^{-11}$
Сульфат лития	2050	10,3	$1,63 \cdot 10^{-11}$
Сегнетова соль	1770	350	$2,75 \cdot 10^{-10}$
Сульфоидид сурьмы	5200	2200	$1,50 \cdot 10^{-10}$
Ниобат лития	4640	28,6	$1,62 \cdot 10^{-11}$
Титанат бария	5300	1500	$4,5 \cdot 10^{-11}$

Кварц, в отличие от других сегнетоэлектриков, обладающих пьезоэффектом, является механически прочным и имеет высокую жесткость, что исключает влияние упругой характеристик мембраны. Кроме того, пьезоэлектрический модуль кварца отличается стабильностью и слабой зависимостью от температуры [1].

Сегнетова соль является одним из наиболее эффективных диэлектриков, обладает высокой чувствительностью, но имеет допустимую температуру использования 45 °С, что затрудняет ее использование [6].

К пьезоэлектрическим преобразователям давления по быстродействию близки манометры с тензопреобразователями. Их чувствитель-

ные элементы представляют собой мембраны, на которых размещены проволочные, фольговые или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется при деформации мембраны под действием давления. В тензопреобразователях давления (рис. 2.6, б) измеряемое давление воздействует на мембрану, вызывая изменение сопротивления тензопреобразователя [1].

Основная характеристика такого эффекта – коэффициент относительной тензочувствительности, определяемый как изменение сопротивления проводника к изменению его длины:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (2.21)$$

где  $\Delta R/R$  – относительное изменение сопротивления,  $\Delta l/l$  – относительное изменение длины проводника.

Для изготовления тензорезисторов используются различные материалы, наиболее распространенным из которых является манганин. Диапазон измерения давления манганиновыми манометрами составляет от 100 МПа до 4 ГПа. Уравнение измерений манганинового манометра имеет вид:

$$p = \alpha \left( \frac{\Delta R}{R} \right) + \beta \left( \frac{\Delta R}{R} \right)^2, \quad (2.22)$$

где  $R$  – сопротивление проводника при отсутствии давления;  $\Delta R$  – изменение сопротивления при давлении  $p$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала проводника [7].

Тензопреобразователи могут выполняться в виде проволоки или фольги. Проволока закрепляется между электроизолированными опорами или фиксируется на поверхности чувствительного элемента.

Одним из основных недостатков тензорезистивных методов измерения является температурная зависимость. Снижения такого эффекта можно добиться измерительными схемами, работающими в комплексе с первичными измерительными преобразователями.

Высокими метрологическими характеристиками обладают манометры с емкостными преобразователями. Принцип их действия основан на зависимости электрической емкости конденсатора, при постоянной площади электродов, от расстояния между ними.

Электрическая емкость  $C$ , образованная двумя плоскими электродами площадью  $S$ , находящимися на расстоянии  $h$  друг от друга, заполненными средой с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{h}, \quad (2.23)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

На рис. 2.7, а показана схема преобразователя разности давлений.

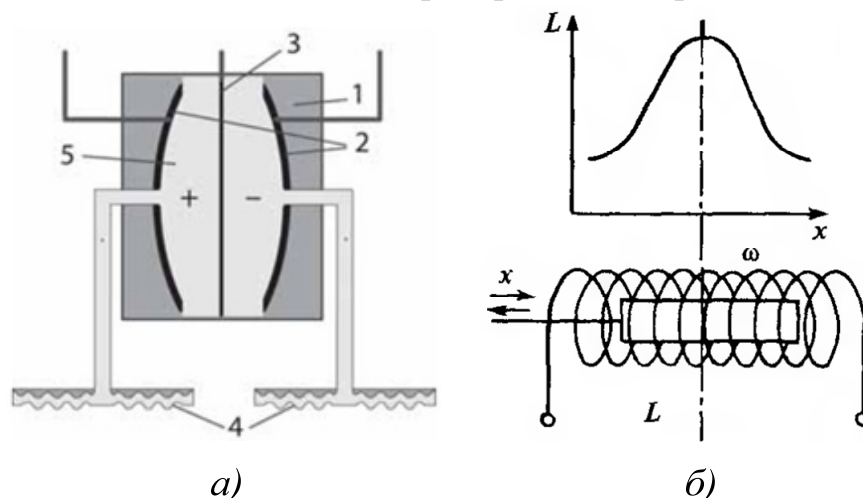


Рис. 2.7. Схема преобразователя давления:

а – емкостной преобразователь разности давлений; б – электромагнитный преобразователь давления; 1 – защитная капсула; 2 – пластины конденсатора; 3 – сенсорная мембрана; 4 – разделительные мембраны; 5 – заполняющая жидкость

Таким образом, при жесткой конструкции электродов основными переменными, оказывающими влияние на электрическую емкость конденсатора, являются диэлектрическая проницаемость заполняющего вещества и расстояние между электродами.

Преимуществом емкостного метода является относительная простота конструкции первичных преобразователей. К недостаткам относятся повышенные требования к электрической изоляции, необходимость экранирования соединительных линий.

Еще одним видом электрических преобразователей давления являются электромагнитные манометры. Действие их основано на изменении индуктивности  $L$  катушки преобразователя:

$$L = \frac{n^2}{R_n}, \quad (2.24)$$

где  $n$  – количество витков катушки преобразователя,  $R_n$  – магнитное сопротивление.

На рис. 2.7, б представлен индуктивный соленоидный преобразователь с ферромагнитным сердечником. В такой конструкции изменение положения сердечника в магнитном поле катушки существенно изменяет магнитное сопротивление и соответственно значение индуктивности.

Выходными сигналами электрических преобразователей давления являются унифицированные токовые сигналы: 0...5 мА, 0...20 мА,

4...20 мА; сигнал по напряжению 0,8...3,2 В, 1...5 В. Характеристика приборов может быть линейной и квадратичной. Статическая характеристика представляет собой зависимость выходного сигнала от величины измеряемого давления. Для линейной характеристики значение выходного сигнала  $Y$  в зависимости от измеряемого давления  $P$  определяется по формуле

$$Y = Y_{\min} + (Y_{\max} - Y_{\min}) \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (2.25)$$

где  $Y_{\min}$  – значение выходного сигнала, соответствующее нижнему пределу измерения  $P_{\min}$ ,  $Y_{\max}$  – значение выходного сигнала, соответствующее верхнему пределу измерения  $P_{\max}$  [3,6].

### Задача 2.3.1

Определить диапазон выходного напряжения пьезоэлектрического преобразователя давления при измерении давления в диапазоне 0...10 МПа, если известно, что ширина пластинки –  $a$  (мм), длина –  $b$  (мм), емкость электрической цепи –  $C$  (нФ). Построить статическую характеристику. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	Материал пластины	$a$ , мм	$b$ , мм	$C$ , нФ
1	Кварц	10,5	15,2	0,15
2	Дигидрофосфат аммония	10,3	18,3	1,5
3	Сульфат лития	9,8	10,2	1,0
4	Дигидрофосфат аммония	10,2	14,6	1,4
5	Сульфоидид сурьмы	10,1	15,8	10
6	Сульфат лития	9,9	16,9	1,1
7	Сегнетова соль	8,7	17,2	9
8	Сульфоидид сурьмы	8,9	16,4	11
9	Дигидрофосфат аммония	9,5	16,9	1,3
10	Титанат бария	9,2	17,8	1,5
11	Сегнетова соль	10,2	12,9	9
12	Сульфат лития	10,4	10,9	1,1
13	Кварц	9,6	18,2	0,14
14	Дигидрофосфат аммония	9,7	12,8	1,2
15	Ниобад лития	8,2	15,9	1,3
16	Титанат бария	9,6	17,8	1,6
17	Дигидрофосфат аммония	10,2	19,3	1,6
18	Сегнетова соль	10,3	21,2	9
19	Титанат бария	10,4	18,8	1,4
20	Дигидрофосфат аммония	9,8	19,9	1,4

### Задача 2.3.2

Определить материал пластин и чувствительность пьезоэлектрического преобразователя давления с емкостью измерительной цепи  $C$  (нФ), если известно, что при измерении давления 12 МПа выходное напряжение составляет 14,2 В. Емкость одной из  $n$  пластин равна  $C_0$  (пФ), эффективная площадь равна  $S_{\text{эф}}$  (мм<sup>2</sup>). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.12.

Таблица 2.12

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$S$ , мм	$C$ , нФ	$C_0$ , нФ	$n$
1	224	0,437	0,015	43
2	220	51,13	0,017	42
3	230	4,66	0,014	31
4	200	0,390	0,011	34
5	250	9,507	0,012	35
6	238	3,278	0,010	46
7	241	3,299	0,017	48
8	229	0,447	0,018	39
9	232	29,41	0,019	40
10	234	4,746	0,013	37
11	245	3,354	0,018	46
12	229	29,03	0,015	31
13	228	3,141	0,019	32
14	230	8,746	0,011	43
15	231	53,68	0,015	41
16	234	4,863	0,014	40
17	225	3,08	0,013	38
18	226	52,52	0,015	36
19	221	3,044	0,016	34
20	245	9,317	0,014	43

### Задача 2.3.3

Определить коэффициент относительной чувствительности преобразователя давления на основе манганинового тензорезистора, если показания прибора составляют  $p$  (МПа), при этом относительное удлинение проводника равно  $\Delta/l$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.13.



Таблица 2.13

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$\alpha$ , МПа	$\beta$ , МПа	$\rho$ , МПа	$\Delta l/l, \cdot 10^{-3}$
1	40300	11523	800	39,4
2	40584	11862	815	38,1
3	40985	12856	920	35,2
4	40357	13584	1023	40,1
5	40352	14225	851	41,1
6	40387	13585	953	37,2
7	40954	14985	946	38,2
8	41165	12586	975	36,5
9	40587	11789	875	37,9
10	41035	13526	853	34,9
11	40987	13279	854	37,2
12	40354	14997	354	37,8
13	40852	14123	158	38,9
14	40985	11500	853	37,9
15	40325	12553	1059	34,6
16	40032	13789	2000	41,3
17	40023	14358	582	44,1
18	41025	14853	679	43,0
19	41003	11985	987	45,1
20	40658	11789	534	43,2

## Задача 2.3.4

Построить график зависимости изменения емкости преобразователя давления при изменении расстояния между пластинами от 0,4 мм до 4 мм с шагом 2 мм. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.14

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$S$ , мм	$\varepsilon$ , Ф/м
1	220	1,1
2	224	1,8
3	268	2,2
4	248	2,8
5	256	2,9
6	254	1,8
7	298	1,5
8	268	1,6
9	274	1,8
10	258	1,9

Окончание табл. 2.14

11	260	2,0
12	258	2,5
13	264	2,9
14	238	2,1
15	274	2,8
16	296	0,1
17	298	2,8
18	302	2,9
19	300	2,2
20	294	2,1

Задача 2.3.5

Рассчитать таблицу значений статической характеристики электрического преобразователя давления с пределами измерения от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  с выходным сигналом  $Y_{\min} \dots Y_{\max}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.15

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$P_{\min}$ , МПа	$P_{\max}$ , МПа	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$
1	0	4	0,8 В	3,2 В
2	0	6	1 В	5 В
3	0	10	0 мА	20 мА
4	0	16	0 мА	5 мА
5	0	1,6	4 мА	20 мА
6	0	0,4	0 мА	20 мА
7	0	4	1 В	5 В
8	0	6	4 мА	20 мА
9	0	10	1 В	5 В
10	0	16	4 мА	20 мА
11	0	1,6	0 мА	5 мА
12	0	0,4	0,8 В	3,2 В
13	0	4	0 мА	5 мА
14	0	6	4 мА	20 мА
15	0	4	0 мА	20 мА
16	0	6	1 В	5 В
17	0	10	4 мА	20 мА
18	0	16	0,8 В	3,2 В
19	0	1,6	0 мА	5 мА
20	0	0,4	4 мА	20 мА

### Задача 2.3.6.

Определите погрешность манометра с электрическим выходным сигналом  $Y_{\min} \dots Y_{\max}$  и имеющим пределы измерения от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ , МПа (см. данные задания 2.3.5)  $P'$  МПа выходной сигнал составил  $Y'$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.16.

Таблица 2.16

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$P'$ , МПа	$Y'$
1	3,2	2,62
2	5,1	4,61
3	8,2	16,12
4	4,8	1,65
5	1,3	16,78
6	0,17	8,31
7	1,1	2,05
8	4,2	15,38
9	4,7	2,95
10	4,9	8,98
11	1,5	4,65
12	0,27	2,44
13	1,9	2,38
14	3,9	14,25
15	3,2	15,73
16	4,7	4,15
17	9,7	19,52
18	14,2	2,87
19	1,3	4,05
20	0,2	11,37

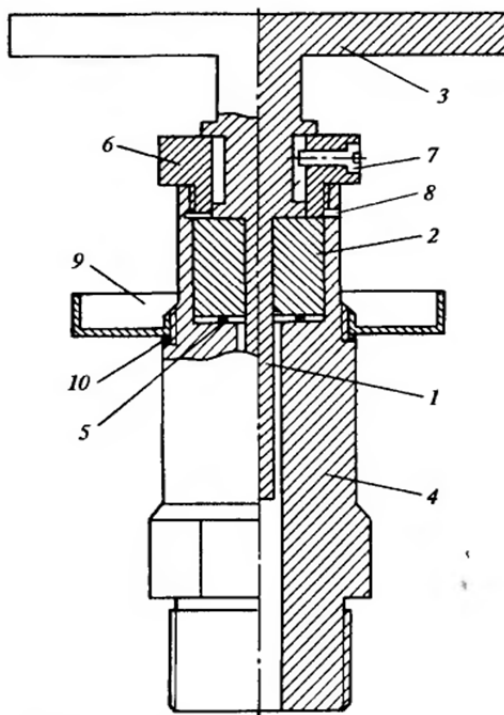
## 2.4. Грузопоршневые манометры

Грузопоршневые манометры применяются в качестве рабочих эталонов давления для поверки различных типов манометров, вакууметров, мановакууметров и т. п., а также в качестве самостоятельных измерителей давления в широком диапазоне.

Принцип работы грузопоршневого манометра основан на удержании цилиндра в поршне в определенном положении, когда с разных сторон на этот поршень действуют измеряемое давление и калиброван-

ные грузы. По массе этих грузов судят о значении измеряемого давления.

Основным рабочим элементом грузопоршневого манометра является измерительная колонка (рис. 2.8). При этом зазор между поршнем и цилиндром не должен превышать 3-5 мкм.



*Рис. 2.8. Схема измерительной колонки грузопоршневого манометра:*

*1 – поршень; 2 – калибровочный цилиндр; 3 – грузоприемная тарелка;  
4 – корпус; 5 – резиновое кольцо; 6 – прижимная гайка; 7 – упор;  
8 – сливное отверстие; 9 – маслосборник; 10 – уплотнительное кольцо*

Среда измеряемого давления поступает снизу и действует на поршень 1, установленный в цилиндре 2, и вызывает его подъем – вертикальное перемещение вверх. Для уравнивания этого воздействия и возврата поршня в начальное положение на грузоприемную тарелку 3 накладываются калиброванные грузы. Калиброванный цилиндр размещается в корпусе 4. Герметичность такой установки достигается с помощью резинового кольца 5 и уплотнения цилиндра прижимной гайкой 6. Поршень имеет в цилиндре и соответственно в корпусе свободный вертикальный ход, который ограничивается упором 7, выполненным в виде винта в прижимной гайке. Обязательным является положение поршня, в котором специальная кольцевая метка, нанесенная на верхней его части, должна находиться в одной плоскости с верхней образующей прижимной гайки.

Измеряемое давление определяется отношением массы груза, действующего на поршень  $G$ , к площади поперечного сечения торца поршня  $S$ :

$$p = \frac{G}{S}. \quad (2.26)$$

Масса грузов для грузопоршневых манометров рассчитывается по формуле

$$m = \left(1 + \frac{\rho_B}{\rho_M}\right) \cdot S \cdot \frac{p}{g}, \quad (2.27)$$

где  $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_M = 8000 \text{ кг/м}^3$  – плотности воздуха и материала грузов соответственно;  $p$  – измеряемое давление;  $g$  – ускорение свободного падения.

Каждый груз соответствует определенному значению давления. На практике необходимо уточнять действительное значение  $g$  и вводить поправку

$$\Delta p = p \left( \frac{g}{g_n} - 1 \right). \quad (2.28)$$

Кроме того, выражение (2.26) действительно при температуре окружающей среды  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При отклонении температуры окружающей среды от указанной давление корректируется по следующей формуле [6]:

$$\Delta p_t = p(20 - t) \cdot 3 \cdot 10^{-5}. \quad (2.29)$$

В качестве рабочих жидкостей используются трансформаторное масло, керосин и касторовое масло. Их характеристики приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

*Характеристики рабочих жидкостей грузопоршневых манометров*

Вещество	Динамическая вязкость $\cdot 10^{-3}$ , Па·с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Масло трансформаторное	31,6	895
Масло касторовое	987	960
Керосин	2	780

Основные эксплуатационные параметры – утечка рабочей жидкости через зазор поршневой пары и продолжительность свободного вращения поршня по инерции.

Расход жидкости через зазор поршневой пары определяется выражением

$$Q = \frac{\pi \cdot r \cdot h^3 \cdot p}{6 \cdot \mu \cdot l}, \quad (2.30)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость рабочей жидкости;  $l$  – длина зазора между поршнем и цилиндром.

Если давление жидкости измеряется в замкнутом объеме, то по мере утечки жидкости происходит ее замещение путем опускания поршня, вследствие чего давление уменьшается очень мало. С учетом (2.29) скорость опускания поршня определяется по формуле [7]

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} = \frac{h^3 \cdot p}{6 \cdot \mu \cdot l \cdot r}. \quad (2.31)$$

#### Задача 2.4.1

Рассчитать массу грузов для измерения давления грузопоршневым манометром, имеющим площадь поперечного сечения поршня  $S$  мм<sup>2</sup>. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.18

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$S$ , мм <sup>2</sup>	$P$ , МПа								
		1,0	2,7	4,7	6,8	9,2	11,2	13,2	15,1	18,9
1	10,2	1,0	2,7	4,7	6,8	9,2	11,2	13,2	15,1	18,9
2	10,1	1,2	2,2	4,9	6,9	8,4	11,3	13,4	16,2	19,2
3	10,3	1,3	2,4	4,8	6,1	8,5	11,5	12,8	15,3	19,3
4	10,2	1,5	2,5	4,2	6,2	8,3	11,6	13,2	15,4	18,2
5	10,1	1,4	2,9	4,9	6,3	9,1	10,9	13,8	15,9	18,1
6	10,9	1,6	2,5	4,2	6,4	9,2	10,1	13,2	15,8	18,2
7	10,2	1,8	2,1	4,1	6,8	8,6	10,2	13,9	15,9	19,2
8	10,5	1,9	2,9	3,8	6,9	8,9	11,9	13,7	15,3	19,3
9	10,6	1,2	2,1	3,9	7,1	8,1	10,3	13,8	15,2	20,1
10	12,0	1,1	2,6	3,7	5,8	8,2	11,2	14,2	16,8	20,3
11	10,6	1,0	2,3	3,6	5,9	8,3	11,4	14,3	16,3	20,8
12	10,8	0,8	2,4	4,2	5,7	8,4	11,5	15,3	16,9	19,5
13	10,9	0,9	2,9	4,1	6,3	9,3	11,6	14,4	16,4	18,6
14	10,6	1,2	2,7	4,3	5,1	9,4	10,9	12,3	16,5	18,6
15	10,1	1,3	2,8	4,8	5,4	9,5	10,7	13,9	16,3	18,7
16	10,6	0,9	2,4	4,9	6,2	8,1	10,8	13,7	16,2	18,8
17	10,9	0,8	3,1	4,5	5,2	9,6	10,3	12,8	16,5	19,1
18	10,8	1,2	3,2	4,9	6,7	9,9	10,3	14,9	16,2	19,5
19	10,9	1,8	3,5	4,6	6,8	9,8	10,6	12,5	16,8	19,8
20	10,7	1,9	2,8	3,9	6,9	9,3	10,7	13,0	16,9	20,0

### Задача 2.4.2

Рассчитать поправки на температуру окружающей среды и действительное значение ускорения свободного падения. Определить измеряемое давление (см. задание 2.4.1) с учетом поправок. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.19.

Таблица 2.19

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$t, ^\circ\text{C}$	$g, \text{ м/}^2$
1	26,3	9,8025
2	24,6	9,8135
3	27,8	9,8098
4	27,2	9,8076
5	28,9	9,8068
6	22,1	9,8035
7	19,2	9,8097
8	12,6	9,8052
9	17,5	9,8068
10	15,6	9,8087
11	35,2	9,8485
12	36,9	9,8258
13	31,8	9,8398
14	34,6	9,8298
15	35,2	9,8345
16	37,5	9,8345
17	34,9	9,8125
18	31,2	9,8358
19	31,8	9,8245
20	38,2	9,8154

### Задача 2.4.3

Определить основные эксплуатационные характеристики грузопоршневого манометра (площадь поперечного поршня – см. задание 2.4.1) при измерении давления  $p$  (МПа), если величина зазора между поршнем и цилиндром составляет  $h$  (мкм), длина зазора –  $l$  (мм). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 2.20.

Таблица 2.20

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	Рабочая жидкость	$p$ , МПа	$h$ , мкм	$l$ , мм
1	Трансформаторное масло	20,2	1,2	48
2	Касторовое масло	38,1	1,1	45
3	Керосин	0,04	1,8	46
4	Трансформаторное масло	16,3	2,3	43
5	Керосин	0,06	2,8	42
6	Керосин	0,10	2,4	39
7	Касторовое масло	45,2	2,9	52
8	Трансформаторное масло	19,8	1,9	51
9	Керосин	0,25	1,5	53
10	Керосин	0,25	1,6	49
11	Трансформаторное масло	21,2	1,8	48
12	Касторовое масло	52,9	1,7	47
13	Трансформаторное масло	18,2	1,9	51
14	Трансформаторное масло	19,8	2,0	38
15	Керосин	0,16	2,1	39
16	Керосин	0,06	2,3	58
17	Касторовое масло	125,1	2,2	60
18	Трансформаторное масло	20,3	2,6	51
19	Касторовое масло	230,1	2,5	52
20	Керосин	0,04	1,9	49



### 3. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

#### 3.1. Общие сведения об измерении расхода

Расходом вещества обычно называют количество вещества (массы или объема), проходящее через определенное сечение канала (трубопровода) в единицу времени [8].

Единицы измерения расхода могут быть объемные (м<sup>3</sup>/ч, м<sup>3</sup>/мин) и массовые (кг/ч, т/ч). Объемный расход можно найти из формулы  $Q_0 = v \cdot \frac{\pi D^2}{4}$ , а массовый – соответственно  $Q_m = \rho \cdot Q_0$ .

Перепад давления  $\Delta P$ , образующийся в комбинированной напорной трубке, равен динамическому напору. Скорость  $v$ , соответствующая этому перепаду, определяется [2] из уравнения

$$v = k_T \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}. \quad (3.1)$$

В зависимости от принципа действия приборы для измерения расхода вещества можно разделить на следующие группы:

- расходомеры переменного перепада давления;
- расходомеры постоянного перепада давления;
- электромагнитные расходомеры;
- тахометрические расходомеры;
- ультразвуковые расходомеры [8].

#### Задача 3.1.1

По трубе диаметром  $D$  (мм) движется поток жидкости со средней скоростью  $v$  (м/с). Определите массовый расход жидкости, если ее плотность –  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$D$ , мм	$v$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	150	10	850
2	32	1,5	1505
3	500	24	1020
4	100	3	780
5	200	5	791
6	25	0,85	730

Окончание табл. 3.1

7	800	44	875
8	1200	50	3120
9	50	1	1010
10	160	2,3	1060
11	80	1,8	1000
12	300	18	72
13	225	15	861
14	65	6	147
15	600	21	1260
16	110	4	1150
17	40	0,9	820
18	250	17	8550
19	1000	41	925
20	400	22	1065

### Задача 3.1.2

Определите расход дымовых газов через цилиндрический трубопровод, если перепад давления на напорной трубке  $\Delta P$  (кгс/м<sup>2</sup>). Диаметр трубопровода –  $D$  (мм), коэффициент трубки –  $k_T$ , плотность газов –  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$\Delta P$ , кгс/м <sup>2</sup>	$D$ , мм	$k_T$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	50	300	0,98	1,25
2	49,5	225	0,97	1,98
3	50,5	65	0,96	1,3042
4	51	600	0,95	2,9
5	49	110	0,94	2,57
6	50,2	40	0,975	0,77
7	49,8	250	0,965	1,78
8	50,9	1000	0,955	1,17
9	49,1	400	0,945	2,99
10	50,1	150	0,6	2,67
11	49,7	32	0,7	2,7
12	50,6	500	0,8	0,09
13	49,3	100	0,65	3,66
14	50,8	200	0,75	5,79
15	49,2	25	0,942	3,48
16	50,25	800	0,972	3,66
17	49,4	1200	0,72	1,54
18	49,9	50	0,62	5,81
19	50,3	160	0,947	1,53
20	49,6	80	0,64	1,29

### 3.2. Расходомеры переменного перепада давления

Метод измерения расхода по перепаду давления на сужающих устройствах (СУ) основан на зависимости перепада давления на неподвижном сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Создаваемый перепад давления измеряется преобразователем разности давлений. Такой метод используется для измерения расхода пара, газа и жидкостей в трубопроводах диаметром свыше 300 мм.

Уравнение, связывающее перепад давления и величину расхода называется уравнением расхода и имеет вид [2]

$$Q = K \cdot \sqrt{\Delta P}, \quad (3.2)$$

где  $K$  – постоянный для данной диафрагмы коэффициент;  $\Delta P$  – перепад давления на сужающем устройстве, кгс/м<sup>2</sup>.

Основные расчетные уравнения расхода вещества, протекающего через сужающее устройство, имеют вид:

– для объемного расхода, м<sup>3</sup>/ч,

$$Q_0 = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (3.3)$$

– для массового расхода, кг/ч,

$$Q_m = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \rho}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода;  $\varepsilon$  – поправка на расширение измеряемой среды;  $m$  – модуль сужающего устройства;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, мм;  $\rho$  – плотность измеряемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Широкое распространение получили стандартные сужающие устройства – диафрагмы, сопла, сопла Вентури. Такие СУ нормализованы и могут применяться в комплекте с преобразователями разности давлений по результатам расчета без индивидуальной градуировки. При этом в процессе установки и эксплуатации сужающих устройств должны соблюдаться требования к месту установки сужающих устройств.

При выборе места установки сужающего устройства (СУ) необходимо, чтобы участки трубопровода до и после СУ были прямыми, так как различные местные гидравлические сопротивления (колена, тройники, вентили, задвижки) приводят к искажению профиля скоростей по сечению потока и, следовательно, влияют на коэффициент расхода. Поэтому проверяют соблюдение требований к установке СУ – достаточность длины прямых участков трубопроводов перед СУ  $L_1$  и  $L_2$ . Необходимые длины прямых участков трубопроводов перед СУ приведены в табл. 3.3 [9].

Таблица 3.3

Необходимые длины прямых участков для местных сопротивлений, установленных перед СУ

$m$	Значения $L_1/D$ для местных сопротивлений					
	Группы колен в разных плоскостях	Группы колен в одной плоскости	Задвижки	Шаровые клапана	Расширения	Колена, тройники
0,05	34	14	12	18	16	10
0,10	34	16	12	18	16	10
0,12	36	18	12	20	16	14
0,20	38	18	12	20	17	14
0,25	40	20	12	22	18	14
0,30	44	22	14	24	20	16
0,35	48	26	14	26	22	18
0,40	54	32	16	28	25	22
0,50	62	36	20	32	30	28
0,55	70	42	24	36	38	36
0,64	80	50	30	44	54	46

При измерении расхода вязких жидкостей, загрязненных жидкостей и газов, а также при малых значениях числа Рейнольдса используются специальные СУ – сдвоенные диафрагмы, сопло с профилем в четверть круга, сегментные диафрагмы и др.

#### Задача 3.2.1

При установке диафрагмы в трубопроводе предполагалось, что номинальный расход среды составляет  $Q$ , диафрагма была рассчитана на  $Q_{\max}$ , а дифманометр – на  $\Delta P_{\max}$ . Однако в процессе эксплуатации выяснилось, что расход среды будет равен  $Q_p$ . Сменить диафрагму не представляется возможным. Подберите дифманометр, с помощью которого можно было бы измерить расход  $Q_p$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$Q$ , т/ч	$Q_{\max}$ , т/ч	$\Delta P_{\max}$ , кПа	$Q_p$ , т/ч
1	230	250	4	380
2	270	300	2	400
3	330	350	3	420
4	370	400	5	490
5	420	450	4,5	520

Окончание табл. 3.4

6	480	500	2,5	600
7	520	550	3,5	620
8	180	200	5,5	350
9	130	150	4,2	300
10	70	100	2,2	180
11	25	50	3,2	120
12	220	250	5,2	350
13	280	300	4,7	405
14	320	350	2,7	470
15	380	400	3,7	510
16	430	450	5,7	550
17	470	500	4,3	620
18	530	550	2,3	660
19	170	200	3,3	300
20	125	150	5,3	270

### Задача 3.2.2

Расход воды, протекающий по трубопроводу  $D$ , составляет  $Q_m$ . Модуль диафрагмы  $m$ , давление воды  $P$ , температура  $t$ ,  $\varepsilon = 1$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$D$ , мм	$Q_m$ , т/ч	$m$	$P$ , МПа	$t$ , °С	$\alpha$
1	25	250	0,5	10	200	0,698
2	800	300	0,3	9	190	0,697
3	1200	350	0,4	8	180	0,696
4	50	400	0,322	7	210	0,695
5	160	450	0,52	6	220	0,694
6	80	500	0,18	5	201	0,693
7	300	550	0,467	9,5	191	0,692
8	225	200	0,513	8,5	181	0,691
9	150	150	0,284	7,5	211	0,69
10	32	100	0,198	6,5	221	0,699
11	500	50	0,32	4,5	199	0,7
12	100	250	0,512	10,5	189	0,701
13	200	300	0,406	9,3	209	0,702
14	65	350	0,38	8,3	219	0,703
15	600	400	0,27	7,3	202	0,704
16	110	450	0,212	6,3	192	0,705
17	40	500	0,495	5,3	182	0,706
18	250	550	0,361	10,3	212	0,707
19	1000	200	0,499	9,7	222	0,708
20	400	150	0,146	8,7	205	0,709

### Задача 3.2.3

Определите длины прямых участков трубопровода до и после сужающего устройства, если перед сужающим устройством стоит элемент  $A$ , а после него – элемент  $B$ : для диафрагмы и для сопла. Диаметр трубопровода –  $D$ , у обоих сужающих устройств –  $m$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	Элемент $A$	Элемент $B$	$D$ , мм	$m$
1	Группы колен в разных плоскостях	Задвижки	150	0,5
2	Задвижки	Группы колен в одной плоскости	32	0,3
3	Колена	Группы колен в разных плоскостях	500	0,4
4	Шаровые клапана	Задвижки	100	0,322
5	Группы колен в разных плоскостях	Задвижки	200	0,52
6	Задвижки	Расширения	25	0,18
7	Тройники	Группы колен в разных плоскостях	800	0,467
8	Шаровые клапана	Группы колен в одной плоскости	1200	0,513
9	Группы колен в разных плоскостях	Задвижки	50	0,284
10	Расширения	Колена	160	0,198
11	Задвижки	Группы колен в разных плоскостях	80	0,32
12	Шаровые клапана	Группы колен в одной плоскости	300	0,512
13	Группы колен в разных плоскостях	Задвижки	225	0,406
14	Тройники	Расширения	65	0,38
15	Тройники	Группы колен в разных плоскостях	600	0,27
16	Задвижки	Группы колен в одной плоскости	110	0,212
17	Группы колен в разных плоскостях	Колена	40	0,495
18	Шаровые клапана	Задвижки	250	0,361
19	Тройники	Группы колен в разных плоскостях	1000	0,499
20	Шаровые клапана	Группы колен в одной плоскости	400	0,146

#### Задача 3.2.4

На трубопроводе  $D$  перед сужающим устройством с относительной площадью  $m$  необходимо установить элемент  $A$ . Определите необходимую длину прямого участка, а также возможное уменьшение необходимой длины за счет уменьшения относительной площади сужающего устройства до  $m_1$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$D$ , мм	$m$	Элемент $A$	$m_1$
1	25	0,32	Задвижки	0,25
2	800	0,512	Группы колен в одной плоскости	0,45
3	1200	0,406	Группы колен в разных плоскостях	0,35
4	50	0,38	Задвижки	0,3
5	160	0,27	Задвижки	0,2
6	80	0,212	Расширения	0,15
7	300	0,495	Группы колен в разных плоскостях	0,45
8	225	0,361	Группы колен в одной плоскости	0,3
9	150	0,499	Задвижки	0,4
10	32	0,146	Колена	0,1
11	500	0,5	Группы колен в разных плоскостях	0,45
12	100	0,3	Группы колен в одной плоскости	0,25
13	200	0,4	Задвижки	0,35
14	65	0,322	Расширения	0,25
15	600	0,52	Группы колен в разных плоскостях	0,45
16	110	0,18	Группы колен в одной плоскости	0,1
17	40	0,467	Колена	0,4
18	250	0,513	Задвижки	0,45
19	1000	0,284	Группы колен в разных плоскостях	0,2
20	400	0,198	Группы колен в одной плоскости	0,1

### 3.3. Расходомеры постоянного перепада давления

К расходомерам постоянного перепада давления относятся ротаметры, которые предназначены для измерения объемного расхода плавно меняющихся однородных потоков чистых и слабозагрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями инородных частиц [8].

Ротаметр представляет собой вертикальную коническую трубку  $1$  (рис. 3.1), внутри которой располагается поплавок  $2$ . Поплавки могут иметь различную форму, одна из них – цилиндрическая с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда при протекании через эти канавки

обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки, что способствует устранению его трения о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор  $f_k$  при прохождении через который поток сужается, скорость его при этом растет, и возникает разность между давлением  $P_1$  в сечении  $AA$  до начала сужения и давлением  $P_2$  в самом узком сечении  $BB$  кольцевой струи. С подъемом поплавка площадь зазора  $f_k$  увеличивается. Принцип ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка  $G$  силами, действующими на него со стороны жидкости, – силой  $F$ , обусловленной разностью давлений, возникающей вследствие ускорения потока, и динамическим напором  $W$  [1].

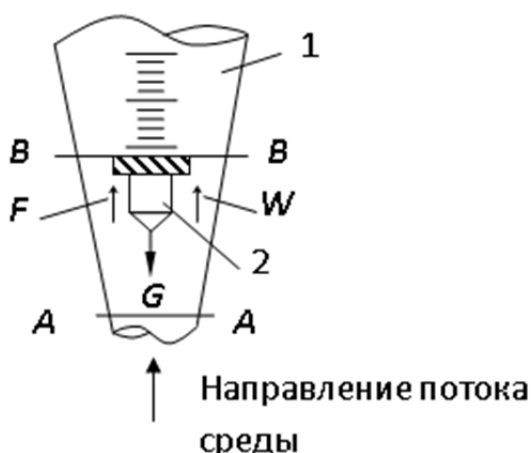


Рис. 3. 1. Ротаметр:

1 – коническая стеклянная трубка; 2 – поплавок; AA – сечение до начала сужения; BB – сечение самого узкого кольцевого потока; F – сила, возникающая в вследствие ускорения потока; G – сила тяжести; W – динамический напор

Любому расходу будет соответствовать определенная площадь  $f_k$  кольцевого зазора, т. е. определенное положение поплавка:

$$Q_0 = \alpha \cdot f_k \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot V \left( \rho_n - \frac{\rho}{\rho \cdot f} \right)} = C \cdot f_k, \quad (3.5)$$

где  $\rho$  – плотность измеряемой среды;  $V$  – объем поплавка;  $\alpha$  – коэффициент расхода;  $f$  – площадь наибольшего сечения поплавка;  $\rho_n$  – плотность материала поплавка;  $C$  – коэффициент пропорциональности.

Из выражения (3.5) следует, что положение поплавка зависит не только от расхода, но и от плотности контролируемой среды. Ввиду большого разнообразия контролируемых сред ротаметры делятся на две группы: для жидкостей (градуируются по воду) и для газов (градуируются по воздуху). В связи с этим в случае, когда ротаметры использу-



ются для измерения расхода других сред, их показания умножают на поправочный множитель

$$k = \sqrt{\frac{\rho_{гр}(\rho_n - \rho)}{\rho(\rho_n - \rho_{гр})}}, \quad (3.6)$$

где  $\rho_{гр}$  – плотность градуировочной среды [1].

### Задача 3.3.1

Определить площадь кольцевого зазора для нижнего предела измерения ротаметра (рис. 3.1), равного  $Q_H$ . Расчетная плотность воды –  $\rho$ , сечение поплавка –  $f$ , объем поплавка –  $V$ , плотность материала поплавка  $\rho_n$ , коэффициент расхода ротаметра постоянен и равен  $\alpha$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$Q_H$ , л/ч	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$f$ , мм <sup>2</sup>	$V$ , мм <sup>3</sup>	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$
1	10	998,2	78,6	600	7870	0,98
2	11	998,1	78,4	500	7770	0,99
3	12	998,0	78,2	400	7670	0,987
4	13	997,9	78,0	600	7570	0,983
5	14	997,8	76,8	500	7470	0,981
6	15	997,6	76,4	400	7840	0,971
7	9	997,7	76,2	600	7740	0,97
8	8	997,5	76,0	500	7640	0,982
9	7	997,4	74,8	400	7540	0,978
10	6	997,3	74,6	600	7440	0,969
11	5	997,2	74,4	500	7810	0,989
12	10	997,1	74,2	400	7710	0,984
13	11	997,0	74,0	600	7610	0,973
14	12	996,9	72,8	500	7510	0,983
15	13	996,8	72,6	400	7410	0,979
16	14	996,7	72,4	600	7890	0,976
17	15	996,6	72,2	500	7790	0,974
18	9	996,5	72,0	400	7690	0,985
19	8	996,4	71,8	600	7590	0,977
20	7	996,3	71,6	500	7490	0,988

### Задача 3.3.2

Имеется два ротаметра с параметрами, приведенными в задании 3.3.1. Первый градуирован для измерения расхода воздуха ( $\rho_{гр} = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>), его оцифрованные отметки шкалы: 0,25 м<sup>3</sup>; 0,50 м<sup>3</sup>; 0,75 м<sup>3</sup>; 1 м<sup>3</sup>; 1,25 м<sup>3</sup>; 1,5 м<sup>3</sup>; 1,75 м<sup>3</sup>; 0,25 м<sup>3</sup>. Второй градуирован для измерения расхода воды ( $\rho_{гр} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>), его оцифрованные отметки шкалы: 10 м<sup>3</sup>;

10,5 м<sup>3</sup>; 11 м<sup>3</sup>; 11,5 м<sup>3</sup>; 12 м<sup>3</sup>; 12,5 м<sup>3</sup>; 13 м<sup>3</sup>; 13,5 м<sup>3</sup>; 14 м<sup>3</sup>; 14,5 м<sup>3</sup>; 15 м<sup>3</sup>.  
 Определить поправочные коэффициенты и скорректировать значения оцифрованных отметок с учетом плотностей измеряемых сред. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$	$\rho_{г}, \text{кг/м}^3$
1	998,2	0,69
2	998,1	0,84
3	998,0	0,71
4	997,9	0,73
5	997,8	0,74
6	997,6	0,81
7	997,7	0,85
8	997,5	0,70
9	997,4	0,73
10	997,3	0,75
11	997,2	0,78
12	997,1	0,79
13	997,0	0,73
14	996,9	0,84
15	996,8	0,83
16	996,7	0,85
17	996,6	0,76
18	996,5	0,79
19	996,4	0,78
20	996,3	0,77

### 3.4. Электромагнитные расходомеры

Электронные расходомеры применяются для непрерывного автоматического измерения расхода жидкостей с удельной электропроводностью не менее  $10^{-5}$  См/см. Принцип действия основан на явлении электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости [1,8].

Принцип действия электромагнитных расходомеров показан на рис. 3.2.

Рабочий участок трубы 1 (рис. 3.2), изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией 2, расположен между полюсами электромагнита. Через стенку трубы изолированно от нее по диаметру введены электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. При этом силовые линии магнитного поля

направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

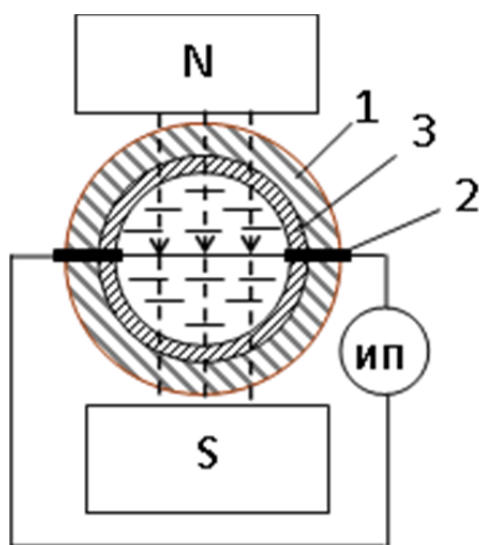


Рис. 3.2. Электромагнитный расходомер:  
1 – корпус преобразователя; 2 – электрическая изоляция; 3 – электроды;  
ИП – измерительный прибор

При прохождении электропроводной жидкости через однородное магнитное поле в ней наводится ЭДС:

$$E = B \cdot D \cdot v, \quad (3.7)$$

где  $E$  – ЭДС, В;  $B$  – электромагнитная индукция в зазоре между полюсами магнита, Тл;  $l$  – расстояние между электродами, м (равна диаметру трубопровода);  $v$  – средняя скорость потока, м/с [1].

Зависимость между напряжением на входе усилителя-преобразователя  $U$  и ЭДС  $E$ , снимаемой с электродов преобразователя расхода, имеет вид

$$U = \frac{E}{1 + \frac{Z_n}{Z_y}}, \quad (3.8)$$

где  $Z_y$  – входное сопротивление усилителя-преобразователя;  $Z_n$  – внутреннее сопротивление преобразователя расхода. Для обеспечения малого внутреннего влияния внутреннего сопротивления электромагнитного преобразователя соотношение  $Z_n / Z_y$  выбирают в пределах 100...500.

#### Задача 3.4.1

Определите значение ЭДС, индуцируемой в электромагнитном расходомере с диаметром проходного отверстия  $D$ , при расходе воды  $Q$ .

Индукция магнитного поля –  $B$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$D$ , мм	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$B$ , Тл
1	150	250	0,01
2	32	300	0,02
3	500	350	0,03
4	100	400	0,04
5	200	450	0,05
6	25	500	0,06
7	800	550	0,07
8	1200	200	0,08
9	50	150	0,09
10	160	100	0,10
11	80	50	0,11
12	300	250	0,12
13	225	300	0,13
14	65	350	0,14
15	600	400	0,15
16	110	450	0,16
17	40	500	0,17
18	250	550	0,18
19	1000	200	0,19
20	400	150	0,20

Задача 3.4.2

Определить объемный расход, измеряемый электромагнитным преобразователем расхода, если напряжение на входе усилителя-преобразователя составляет  $U$  (В). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.11

Таблица 3.11

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$D$ , мм	$B$ , Тл	$Z_n / Z_v$	$U$ , В
1	20	0,12	120	0,3
2	32	0,14	380	0,15
3	40	0,01	140	0,1
4	50	0,15	150	0,8
5	65	0,19	230	1,3
6	80	0,05	255	0,5

7	100	0,12	302	1,2
8	150	0,14	204	2,1
9	32	0,15	105	1,4
10	40	0,16	119	1,5
11	50	0,13	120	1,6
12	65	0,11	138	1,8
13	80	0,08	145	0,9
14	100	0,07	163	0,8
15	150	0,13	187	2,6
16	32	0,15	196	0,7
17	40	0,16	126	0,8
18	50	0,18	215	1,3
19	65	0,19	278	1,3
20	80	0,17	304	1,4

### 3.5. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры получили большое распространение благодаря высокой точности измерений, а также возможности применения для измерения расхода неэлектропроводных сред (нефтепродукты), загрязненных сред. Принцип их работы основан на измерении зависящего от расхода акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа.

На рис. 3.3 схематично показан пример ультразвукового расходомера.

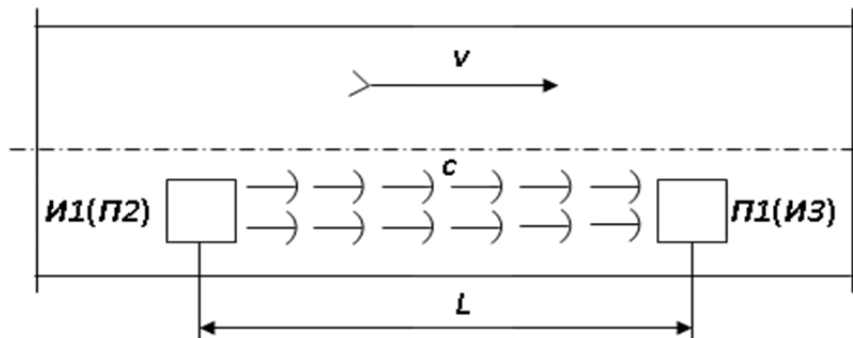


Рис. 3.3. Ультразвуковой расходомер:  
 И1, И2 – электроакустические излучатели; П1, П2 – приемники;  
 L – расстояние от излучателя до приемника; c – скорость звука;  
 v – скорость потока среды

Если расстояние между излучателем (И) и приемником (П) обозначить как  $L$ , то продолжительность распространения звуковой волны со скоростью  $c$  по направлению движения потока, движущегося со скоростью  $v$ , от излучателя И1 до приемника П1

$$\tau_1 = \frac{L}{c+v}. \quad (3.9)$$

Продолжительность распространения звуковой волны против направления движения потока от излучателя И2 до приемника П2

$$\tau_2 = \frac{L}{c-v}. \quad (3.10)$$

Разность времен прохождения импульсов, с учетом (3.9) и (3.10),

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{2 \cdot L \cdot v}{(c^2 - v^2)} = \frac{2 \cdot L \cdot v}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3.11)$$

Учитывая, что  $v^2/c^2 \ll 1$ , и используя соотношения, приведенные в п. 3.1, можно получить

$$\Delta\tau = 2 \cdot \varphi \cdot \frac{L}{F \cdot c^2} \cdot Q, \quad (3.12)$$

где  $F$  – площадь сечения потока;  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий распределение скоростей по сечению потока [7].

### Задача 3.5.1

В трубопроводе диаметром  $D$  протекает вода, расход которой меняется от 0 до 300 м<sup>3</sup>/ч. Для измерения расхода установлены ультразвуковые излучатель и приемник. Расстояние между излучателем и приемником –  $L$ . Определите время прохождения ультразвуковых колебаний при распространении их «по потоку» и «против потока». Скорость распространения звуковых колебаний в воде  $c = 1500$  м/с. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.12

Таблица 3.12

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$D$ , мм	$L$ , мм
1	300	300
2	225	400
3	65	310
4	600	390
5	110	320
6	40	380
7	250	330
8	1000	370
9	400	340
10	150	360
11	32	350
12	500	200

Окончание табл. 3.12

13	100	290
14	200	210
15	25	280
16	800	220
17	1200	270
18	50	230
19	160	260
20	80	240

### Задача 3.5.2

В трубопроводе диаметром  $D$  (мм) измеряется расход среды, при этом длина измерительного тракта составляет  $L$  (мм). При скорости распространения звуковых колебаний в среде  $c$  (м/с) получены значения  $\Delta\tau$  (с). Определить скорость движения потока и объемный расход среды. Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.13

Таблица 3.13

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$D$ , мм	$c$ , м/с	$\varphi$	$\Delta\tau$ , с	$L$ , мм
1	25	1000	120	0,0026	300
2	32	1200	135	0,0026	340
3	40	1300	136	0,0026	350
4	50	1250	112	0,0026	400
5	65	1340	115	0,0026	420
6	80	1500	116	0,0019	430
7	100	1480	128	0,0023	425
8	125	1180	131	0,0029	431
9	150	1190	132	0,0038	380
10	200	1285	134	0,0037	390
11	250	1345	140	0,0029	382
12	300	1435	145	0,0035	394
13	350	1432	138	0,0031	396
14	400	1283	132	0,0032	402
15	450	1345	121	0,0034	403
16	500	1325	118	0,0029	405
17	600	1210	117	0,0035	410
18	700	1100	119	0,0037	422
19	800	1050	128	0,0048	412
20	900	1080	139	0,0056	438

## 3.6. Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры, в которых скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу измеряе-

мой среды. В большинстве случаев рабочее тело (крыльчатка, турбинка, шарик и т. п.) под воздействием потока вращается, при этом частота вращения измеряется электрическим преобразователем и преобразуется в электрический сигнал, измеряемый затем вторичным прибором. Тахометрические расходомеры используются для измерения расхода различных жидкостей (реже газов) и получили наибольшее распространение в системах учета потребления воды.

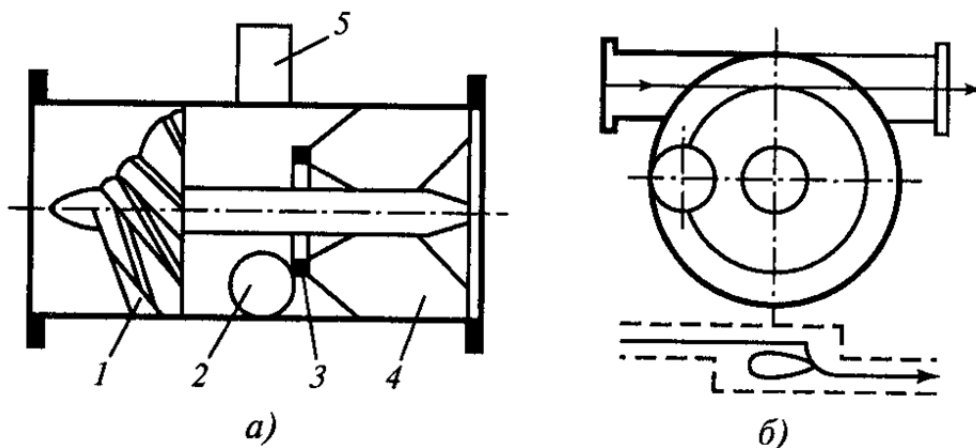


Рис. 3.4. Устройство шариковых преобразователей расхода:  
 а – для измерения больших расходов; б – для измерения малых расходов;  
 1 – формирователь потока; 2 – шарик; 3 – ограничительное кольцо;  
 4 – струевыпрямитель; 5 – тахометрический преобразователь

Шариковые расходомеры (рис.3.4) предназначены для измерения сравнительно небольших расходов. Шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока – к ограничительному кольцу. Под действием сил со стороны потока шар вращается вокруг оси, частота импульсов тахометрического преобразователя связана с объемным расходом  $Q_0$  следующим соотношением:

$$f = \frac{k \cdot Q_0 (1 - S)}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (3.12)$$

здесь  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $r$  – радиус вращения центра шарика,  $S$  – коэффициент скольжения, определяемый соотношением

$$S = \frac{v - v_{ш}}{v}, \quad (3.13)$$

где  $v$  – скорость потока;  $v_{ш}$  – скорость движения шарика.

Диапазон измерения шариковых расходомеров обычно составляет 20...100 % от верхнего предела измерения, однако в диапазоне 20...30 % они обладают повышенной погрешностью по сравнению с диапазоном 30...100 % [1].



### Задача 3.6.1

Определить диапазон действительного значения расхода, измеряемого шариковым тахометрическим расходомером с верхним пределом измерения  $Q_{\max}$  (м<sup>3</sup>/ч), если его показания составляют  $Q$  (м<sup>3</sup>/ч), предел допускаемой относительной погрешности в диапазоне измерения 0...30 % составляет  $\delta_1$  (%), в диапазоне измерения 30...100 % –  $\delta_2$  (%). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{\max}$ , м <sup>3</sup> /ч	$\delta_1$ , %	$\delta_2$ , %
1	2,9	8	2,5	1,5
2	4,8	10	2,0	0,5
3	5,9	6	1,5	0,5
4	1,3	12	2,5	1,0
5	12,4	50	1,5	0,5
6	10,8	12	2,5	1,0
7	1,3	10	2,0	1,0
8	2,5	4	2,0	1,5
9	1,3	8	2,5	1,5
10	0,5	10	1,5	0,5
11	3,4	8	1,5	0,5
12	3,2	12	2,5	1,5
13	1,8	12	2,5	1,5
14	8,9	50	2,0	0,5
15	2,5	8	2,5	0,5
16	2,4	8	2,5	1,0
17	4,1	12	1,5	0,5
18	4,2	10	1,5	0,5
19	2,3	6	1,0	0,25
20	2,2	4	1,5	0,5

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной плоскости, принятой за начало отсчета.

Средства измерения уровня – уровнемеры – состоят из совокупности измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, необходимых для осуществления процесса измерений (устройств для линеаризации функции преобразования, отсчетных устройств и др.).

Первичный преобразователь воспринимает измеряемую величину и преобразует ее в выходной сигнал, поступающий на последующие преобразователи, или в показания, отсчитываемые по шкале уровнемера.

Принцип действия первичных преобразователей уровнемеров основан на различии физических свойств веществ, образующих границу раздела [7].

В зависимости от условий измерения и характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня.

### 4.1. Уровнемеры с визуальным отсчетом и гидростатические уровнемеры

Действие уровнемеров с визуальным отсчетом основано на визуальном измерении высоты уровня жидкости. Уровень измеряется в стеклянной трубке (рис. 4.1), сообщающейся с жидкостным и газовым пространством контролируемого резервуара

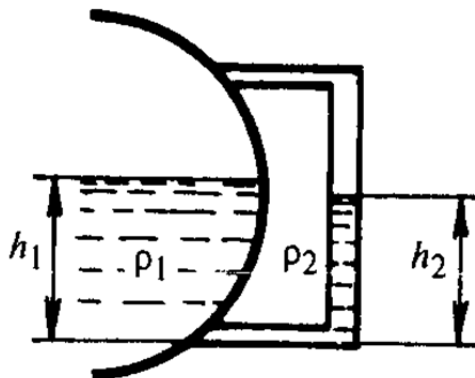


Рис. 4.1. Схема измерения уровня с помощью уровнемера с визуальным отсчетом

Основным источником дополнительной погрешности таких уровнемеров является разница плотностей жидкости в контролируемом резервуаре и в стекле, вызванная различием их температур. Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре  $h_1$  и указатель-

ном стекле  $h_2$ , при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right), \quad (4.1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности жидкости в резервуаре и указательном стекле.

При использовании гидростатических уровнемеров измерение уровня  $H$  жидкости постоянной плотности  $\rho$  сводится к измерению гидростатического давления  $P$ , создаваемого жидкостью:

$$P = \rho \cdot g \cdot H. \quad (4.2)$$

Измерение высоты уровня непосредственно по величине гидростатического давления можно производить в резервуарах, находящихся как под атмосферным, так и под отличающимся от него давлением [1].

#### Задача 4.1.1

Уровень воды в барабане парогенератора измеряется водомерным стеклом (рис. 4.1). Давление пара в барабане –  $P_1$  (МПа), вода в барабане находится при температуре насыщения. Действительное значение уровня –  $h_1$  (м). Определить уровень в водомерном стеклянной трубке  $h_2$ , если температура воды в водомерном стекле –  $t_2$  (°C). Таблицы плотности воды приведены в прил. П10, варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$P_1$ , МПа	$h_1$ , м	$t_2$ , °C
1	10,8	0,51	202
2	10,5	0,53	210
3	11,2	0,48	220
4	11,0	0,49	215
5	11,1	0,52	230
6	10,5	0,54	204
7	10,9	0,53	206
8	10,5	0,49	231
9	10,4	0,48	224
10	10,6	0,50	201
11	10,7	0,54	200
12	10,8	0,52	238
13	10,8	0,53	235
14	10,5	0,49	234
15	10,7	0,48	236

Окончание табл. 4.1

16	10,9	0,52	240
17	10,7	0,51	236
18	10,8	0,53	220
19	10,2	0,54	224
20	10,3	0,48	216

Задача 4.1.2

Рассчитать относительную погрешность измерения уровня воды для задачи 4.1.1.

Задача 4.1.3

Построить график изменения показаний датчика гидростатического давления при измерении температуры воды, если начальный уровень –  $h_0$  (м), давление воды в резервуаре поддерживается постоянным и равно  $p$  (МПа). Таблицы плотности воды приведены в прил. П10, варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$p$ , МПа	$h_0$ , м	$t_0$ , °C	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_3$ , °C	$t_4$ , °C	$t_5$ , °C	$t_6$ , °C
1	15,3	8,0	256,3	261,8	263,9	268,9	275,6	279,8	293,2
2	14,2	7,6	238,9	251,3	253,2	261,8	278,3	288,9	297,3
3	14,3	7,2	243,1	252,3	258,9	265,3	275,4	281,2	286,3
4	14,6	7,2	243,8	252,8	259,7	263,8	271,3	275,6	286,3
5	14,7	7,3	240,9	249,6	254,3	260,3	268,9	274,3	280,3
6	15,2	7,8	245,3	246,8	258,6	263,8	270,1	280,9	294,3
7	15,1	7,9	238,5	249,8	256,3	267,5	274,3	280,1	293,2
8	14,9	7,0	240,8	246,4	251,9	259,6	268,5	276,9	283,1
9	14,8	8,1	243,2	249,9	254,3	261,8	263,8	269,7	281,2
10	15,4	8,6	238,5	249,5	251,8	259,3	264,9	270,6	285,3
11	15,8	8,9	240,9	248,3	254,8	261,9	271,2	279,5	280,5
12	15,9	8,3	237,6	243,6	261,8	271,8	276,3	280,3	290,5
13	14,3	8,4	236,9	247,9	268,3	275,9	280,2	286,6	294,3
14	14,2	8,5	235,4	246,3	264,1	271,6	279,6	287,3	293,2
15	14,3	7,9	234,6	244,4	268,3	276,8	283,2	286,9	294,2
16	15,6	8,0	241,3	247,3	261,2	271,3	281,3	287,9	296,7
17	15,8	8,1	240,6	249,8	260,1	270,9	280,2	290,1	297,1
18	13,2	8,5	237,4	243,8	258,4	268,9	279,8	289,3	296,3
19	13,3	8,6	234,6	249,3	251,3	263,6	273,1	290,1	296,8
20	14,8	8,9	231,5	246,9	249,3	257,1	264,3	276,3	285,3

## 4.2. Поплавковые и буйковые уровнемеры

В поплавковых и буйковых уровнемерах используется метод измерения уровня, который основан на использовании различий плотности веществ, который образуют границу раздела. Принципиальная схема поплавкового уровнемера приведена на рис. 4.2, а. В качестве первичного преобразователя поплавкового уровнемера используется шарообразный или цилиндрический поплавок, плавающий на поверхности жидкости и погруженный в нее на постоянную глубину. Под действием выталкивающей силы ( $F_A = \rho_{ж} \cdot g \cdot V$ ) поплавок перемещается одновременно с изменением уровня. Таким образом, об уровне жидкости судят по положению поплавка, преобразуемому в электрический сигнал вторичным преобразователем. Связь поплавка со вторичным преобразователем осуществляется с помощью механических элементов (трос, лента) или бесконтактными (оптические, акустические и др.) следящими системами.

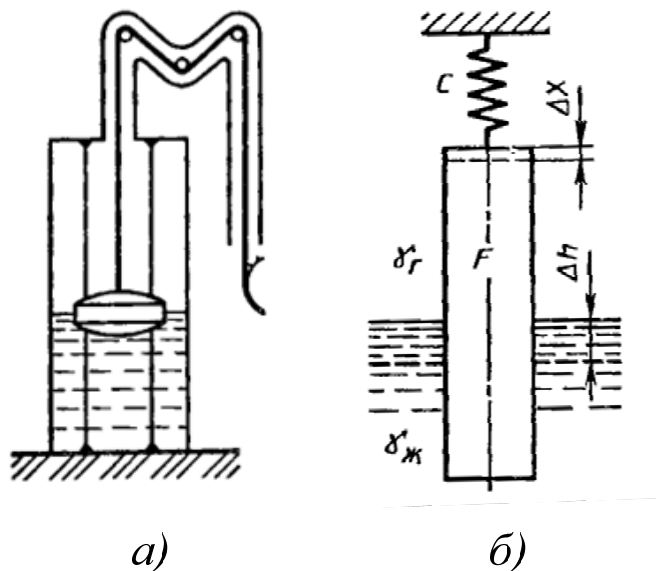


Рис. 4.2. Принципиальная схема уровнемера:  
а – поплавковый уровнемер; б – буйковый уровнемер

Чувствительный элемент буйкового уровнемера (рис. 4.2, б) – буй представляет собой подвешенное вертикально внутри сосуда тело. При изменении уровня жидкости в сосуде степень погружения буя изменяется, а значит и выталкивающая его сила. Буйковый уровнемер имеет пружину или другой упругий элемент, который, деформируясь, компенсирует выталкивающую силу. Таким образом, деформация упругого элемента является мерой изменения уровня жидкости в сосуде.

Вторичный преобразователь преобразует деформацию упругого элемента в выходной электрический сигнал.

Упругая деформация пружины определяется выражением

$$\Delta x = \frac{\Delta h}{1 + C \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) \cdot g \cdot F}, \quad (4.3)$$

где  $\Delta h$  – изменение положения буйка;  $C$  – жесткость пружины;  $F$  – площадь поперечного сечения буйка [7].

#### Задача 4.2.1

Масса поплавка уровнемера составляет  $m_{\text{п}}$  кг, плотность материала поплавок –  $\rho_{\text{п}}$  (кг/м<sup>3</sup>). Поплавок связан с противовесом массой  $m_{\text{пр}}$  тросом, масса которого составляет  $m_{\text{тр}}$  на погонный метр. При измерении верхнего уровня поплавков находится на расстоянии  $h_1$  от дна резервуара, противовес – на расстоянии  $h_2$  от дна резервуара. Какая часть объема поплавок погружена, если плотность жидкости в резервуаре равна  $\rho_{\text{ж}}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$m_{\text{п}}$ , кг	$m_{\text{пр}}$ , кг	$m_{\text{тр}}$ , кг	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$\rho_{\text{п}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{ж}}$ , кг/м <sup>3</sup>
1	2,9	2,0	0,20	5,1	2,0	1500	986
2	2,8	2,1	0,15	4,9	1,9	1560	995
3	2,7	1,9	0,19	5,0	1,8	170	978
4	2,8	2,0	0,18	4,8	1,6	1580	996
5	2,9	2,1	0,17	4,9	1,7	1600	995
6	3,0	2,2	0,16	4,2	2,1	1530	987
7	3,2	2,4	0,15	4,3	2,3	1540	965
8	3,1	2,5	0,16	4,5	2,4	1546	963
9	3,0	2,2	0,18	4,6	1,4	1578	985
10	2,9	2,2	0,19	4,7	1,5	1562	975
11	2,8	2,2	0,20	4,9	1,6	1485	965
12	2,9	2,3	0,21	5,0	1,7	1596	978
13	2,7	2,1	0,22	5,2	1,8	1423	958
14	2,5	1,7	0,25	5,1	1,9	1489	976
15	2,6	1,8	0,18	5,2	2,0	1496	985
16	2,8	1,9	0,23	5,3	2,1	1465	978
17	3,0	2,3	0,24	4,9	2,2	1500	963
18	2,9	2,2	0,25	4,8	2,3	1532	996
19	2,7	2,3	0,19	4,9	2,4	1596	978
20	2,8	2,2	0,20	5,0	2,9	1562	954

### Задача 4.2.2

Определить нижний предел измерения уровня жидкости с плотностью  $\rho_{ж}$  (кг/м<sup>3</sup>) с помощью буйкового уровнемера, если масса цилиндрического буйка равна  $m$  (кг), а диаметр –  $D$  (мм). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$m$ , кг	$\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>	$D$ , мм
1	5,9	965	40
2	5,8	978	41
3	5,7	958	42
4	5,8	976	45
5	5,9	985	50
6	6,0	978	52
7	5,2	963	53
8	5,1	996	54
9	6,0	978	49
10	5,9	954	48
11	5,8	986	53
12	5,9	995	54
13	5,7	978	49
14	5,5	996	50
15	5,6	995	40
16	5,8	987	45
17	6,0	965	55
18	6,9	963	46
19	5,7	985	47
20	6,8	975	49

### 4.3. Емкостные и индуктивные уровнемеры

Емкостными называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от ее уровня.

Конструкция конденсаторных преобразователей для неэлектропроводных жидкостей отличается от конструкции для измерения уровня электропроводных жидкостей и включает в себя два коаксиально расположенных электрода – 1 и 2 (рис. 4.3), помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня.

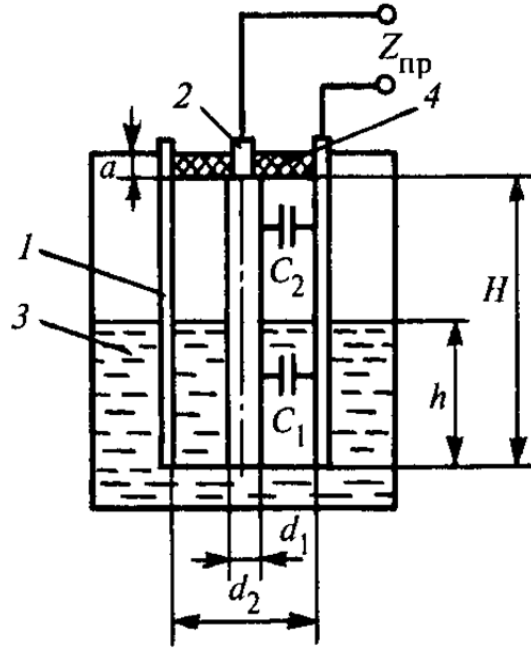


Рис. 4.3. Схема емкостного уровнемера:  
1, 2 – электроды; 3 – резервуар; 4 – изолятор

Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором 4. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, часть межэлектродного пространства которого высотой  $H$  заполнена контролируемой жидкостью, оставшаяся часть высотой  $(H - h)$  – ее парами.

В общем виде емкость цилиндрического конденсатора определяется выражением

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln(d_2 / d_1)}, \quad (4.4)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство;  $H$  – высота электродов,  $d_1$ ,  $d_2$  – диаметры внутреннего и наружного электродов.

На основании формулы (4.4) можно записать выражения для емкости  $C_1$  части преобразователя, находящейся в жидкости, и для емкости  $C_2$  части, находящейся в газовом пространстве:

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{ж} \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln(d_2 / d_1)}, \quad (4.5)$$

$$C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{г} \cdot \varepsilon_0 \cdot (H - h)}{\ln(d_2 / d_1)}, \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon_{ж}$  – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости;  $\varepsilon_{г}$  – относительная диэлектрическая проницаемость газа.



Суммарное выходное сопротивление преобразователя, кроме емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , определяется также емкостью  $C_0$  проходного изолятора и его активным сопротивлением, а также емкостью и проводимостью соединительного кабеля.

Таким образом, суммарная электрическая емкость преобразователя

$$C_{\text{пр}} = C_1 + C_2 + C_0. \quad (4.7)$$

Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаимной индуктивности двух катушек от глубины их погружения в электропроводную жидкость.

Индуктивный преобразователь (рис. 4.4) состоит из обмотки возбуждения 1, по которой протекает переменный ток возбуждения, и вторичной обмотки 2, с которой снимается выходной сигнал. Преобразователь помещен в герметично закрепленный в крышке резервуара защитный чехол 3. Под действие потока возбуждения в толще контролируемой среды возникают вихревые токи. Это приводит к зависимости взаимной индуктивности между обмотками от уровня среды. Так как эта зависимость линейна, выходное напряжение будет линейно зависеть от уровня.

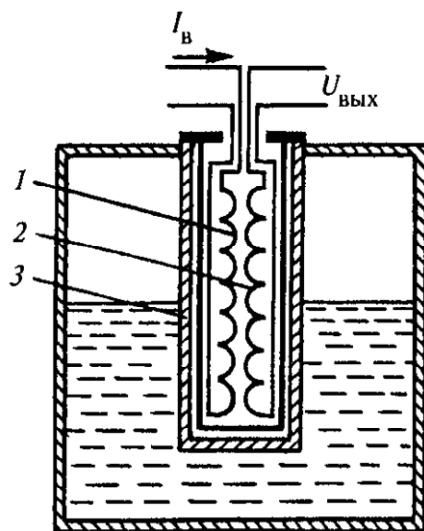


Рис. 4.4. Схема индуктивного уровнемера:  
1 – обмотка возбуждения; 2 – вторичная обмотка;  
3 – металлический защитный чехол

#### Задача 4.3.1

Определить емкость измерительного преобразователя емкостного уровнемера, предназначенного для измерения уровня в баках-хранилищах керосина, от нулевого до максимального  $H_{\text{max}}$  (м) значения.

Емкостный преобразователь состоит из полого металлического цилиндра диаметром  $D$  (мм) (внешний электрод), внутри которого коаксиально расположен металлический тросик диаметром  $d$  (мм), покрытый слоем изоляции толщиной  $b$  (мм) (внутренний электрод). Длина преобразователя  $l = H_{\max}$ , емкость конструктивных элементов  $C_0=75$  пФ. Относительная диэлектрическая проницаемость паров керосина  $\varepsilon_{\text{п}}=1$ , керосина  $\varepsilon_{\text{к}}=2,1$ , изоляционного покрытия тросика  $\varepsilon_{\text{и}}=4,2$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$H_{\max}$ , м	$D$ , мм	$d$ , мм	$b$ , мм
1	8	60	1,5	1,0
2	6	56	1,6	0,8
3	10	50	1,4	0,9
4	12	52	1,8	0,5
5	8	58	1,6	0,6
6	10	62	1,2	0,4
7	12	46	1,4	0,5
8	8	48	1,6	0,6
9	6	62	1,8	0,6
10	12	52	2,0	0,8
11	10	54	2,2	1,0
12	6	48	1,8	1,2
13	10	56	1,6	1,0
14	8	60	1,4	1,2
15	12	48	2,2	1,4
16	10	46	2,0	1,2
17	12	44	2,4	1,4
18	10	50	1,8	1,4
19	12	52	1,6	1,0
20	12	48	1,4	0,8

Задача 4.3.2

Определить значение емкости уровнемера при измерении уровня  $0,25H_{\max}$  и  $0,75H_{\max}$  жидкости с относительной диэлектрической прони-

цаемостью  $\varepsilon$ , если начальная емкость преобразователя уровня при отсутствии в нем жидкости равна  $C$  (пФ). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$\varepsilon$	$C$ пФ
1	1,3	45
2	1,6	50
3	1,8	58
4	2,0	51
5	2,3	52
6	2,2	48
7	6,3	41
8	5,4	39
9	4,2	42
10	7,1	48
11	8,0	43
12	7,3	50
13	6,2	51
14	6,4	49
15	5,1	48
16	4,2	49
17	4,9	44
18	5,8	48
19	2,5	46
20	4,3	49

#### 4.4. Акустические и ультразвуковые уровнемеры

Акустические и ультразвуковые уровнемеры основаны на эффекте отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела двух сред. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности.

В акустических уровнемерах в качестве меры уровня жидкости в резервуаре принимается время распространения ультразвуковых колебаний  $t$  от излучателя (акустического преобразователя) до поверх-

ности границы раздела жидкой и газообразной сред и обратно до приемника.

Акустический преобразователь  $I$ , установленный на крышке резервуара (рис. 4.5, а), вырабатывает ультразвуковые импульсы, которые, распространяясь вдоль акустического тракта, отражаются от границы раздела сред и попадают на тот же преобразователь  $I$ . После чего сигнал поступает в электронный блок и преобразуется в электрический унифицированный выходной сигнал.

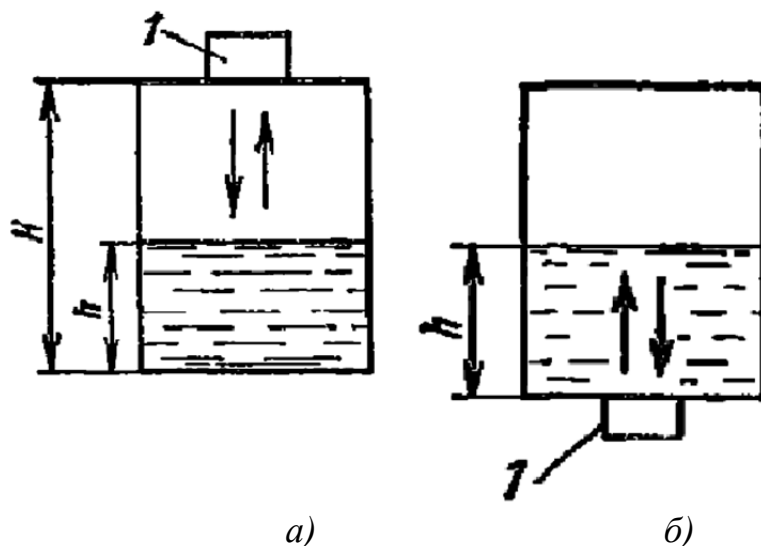


Рис. 4.5. Схема уровнемера:  
а – акустический уровнемер; б – ультразвуковой уровнемер

Время распространения колебаний определяется выражением

$$t = \frac{2(H-h)}{c} = \frac{2H}{c} - \frac{2h}{c}, \quad (4.8)$$

где  $H$  – расстояние от источника колебаний до нулевого уровня, равное высоте резервуара;  $h$  – уровень жидкости;  $c$  – скорость распространения звуковых колебаний.

В ультразвуковых уровнемерах (рис. 4.5, б) применяется способ измерения уровня по времени отражения звуковых колебаний от границы раздела двух сред со стороны жидкости. В этом случае время прохождения ультразвуковых колебаний от пьезометрического преобразователя до плоскости границы раздела и обратно определяется по формуле

$$t = \frac{2h}{c}. \quad (4.9)$$

Максимальная измеряемая высота уровня такими уровнемерами составляет 25 м, а давление и температура не должны превышать

25 МПа и 120 °С соответственно при плотности контролируемой среды от 500 до 1500 кг/м<sup>3</sup> [1,3].

#### Задача 4.4.1

Определить значение уровня жидкости, измеренное акустическим преобразователем в резервуаре высотой  $H$  (м), если измеренное значение времени распространения колебаний составило  $t$  (мс). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

#### *Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$h$ , м	$c$ , м/с	$t$ , мс
1	8	394	70,56
2	10	396	79,80
3	12	410	86,34
4	8	413	66,83
5	6	414	57,49
6	12	410	87,80
7	10	402	75,62
8	6	386	57,51
9	10	340	94,12
10	8	356	78,09
11	12	358	99,44
12	10	397	80,10
13	12	391	90,54
14	8	364	74,18
15	10	385	81,04
16	12	386	92,23
17	8	397	70,53
18	6	399	64,66
19	12	402	88,06
20	6	405	63,21

#### Задача 4.4.2

Определить относительную погрешность измерения уровня жидкости ультразвуковым уровнемером, если при времени распространения

звуковых колебаний  $t$  (мс) измеренное значение составило  $h$  (м). Варианты индивидуальных заданий приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$c$ , м/с	$t$ , мс	$h$ , м
1	1399	17,30	12,3
2	1484	16,71	11,5
3	1330	20,75	13,8
4	1192	26,68	15,8
5	1166	35,16	20,5
6	1470	19,46	14,1
7	1484	32,48	24,0
8	1450	28,69	20,3
9	1500	26,53	20,0
10	1380	27,10	18,9
11	1398	23,18	16,1
12	1484	20,75	15,4
13	1423	21,50	15,1
14	1489	20,01	14,8
15	1470	19,73	14,6
16	1480	18,65	13,9
17	1399	17,16	12,1
18	1412	17,14	12,1
19	1413	16,84	11,8
20	1448	17,68	12,9

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ

### 5.1. Измерение состава газов

Средства измерений, применяемые для измерения и анализа состава газов называются газоанализаторами. Они предназначены для измерения концентрации компонентов смеси газа на основе того или иного физико-химического свойства компонента, отличающегося от свойств остальных газов, причем чем сильнее это свойство газа отличается от аналогичного свойства других газов в смеси, тем выше чувствительность газоанализатора.

Средства измерения, предназначенные для количественного определения состава газа, называются газоанализаторами и газовыми хроматографами. Эти технические средства в зависимости от их назначения подразделяются на переносные и стационарные.

Переносные газоанализаторы и хроматографы применяются для количественного определения состава газа при выполнении исследовательских работ в лабораторных условиях, а также при специальных обследованиях, испытаниях и наладке различных промышленных теплотехнических установок.

Стационарные газоанализаторы используются для непрерывного автоматического контроля содержания одного определяемого компонента в газовой смеси. Стационарные газоанализаторы широко применяются для контроля процесса горения в топочных устройствах парогенераторов, печей и других агрегатов, для анализа технологических газовых смесей и т. д.

Классификация газоанализаторов приведена на рис. 5.1.

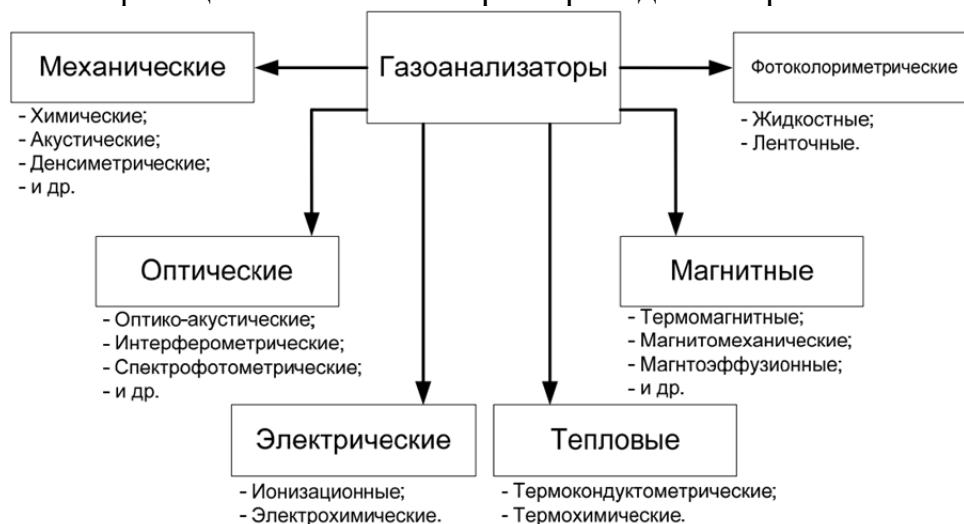


Рис. 5.1. Классификация газоанализаторов

Газоанализаторы обычно градуируются в процентах по объему, так как процентная доля отдельных компонентов в общем объеме остается неизменной при изменении давления и температуры газовой смеси [10].

В механических газоанализаторах измерение содержания определяемых компонентов производится на основании изменения механических параметров состояния или соответствующих свойств газовой смеси. Наиболее распространенным типом механических газоанализаторов является химический газоанализатор. О содержании в них определяемого компонента судят по изменению объема газовой смеси при удалении этого компонента в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания. Непоглощенный остаток анализируемого газа поступает в газоизмерительное устройство, где измеряется уменьшение объема, соответствующее поглощенному объему компонента газа. Химические газоанализаторы получили свое название, поскольку для удаления компонента газа используются химические реакции [1, 10].

Современные электрохимические газоанализаторы, предназначенные для оптимизации и контроля режимов горения в котельных установках, работающих на различных видах топлива, помимо измерения объемных долей (СО, О<sub>2</sub>, NO и др. компонентов), выполняют также вычисление следующих параметров:

- потери тепла с отходящими газами;
- потери тепла вследствие химической неполноты сгорания топлива;
- потери тепла с водяными парами;
- КПД по обратному балансу;
- коэффициент избытка воздуха.

Для оценки концентрации компонента газа в тепловых газоанализаторах измеряются тепловые свойства компонента газа. В зависимости от измеряемой величины тепловые газоанализаторы могут быть кондуктометрические, измеряющие теплопроводность газовой смеси, и термохимические, измеряющие теплоту, которая выделяется при реакции каталитического окисления компонента газа.

Термокондуктометрический газоанализатор представляет собой полый стеклянный цилиндр 1 (рис. 5.2), внутри которого к платиновым токоподводам 2 подпаяна открытая 3 (рис. 5.2, а) или остеклованная 4 (рис. 5.2, б) платиновая спираль.



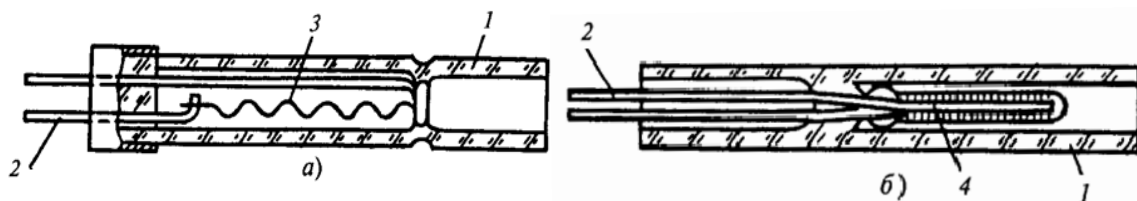


Рис. 5.2. Устройство рабочих чувствительных элементов  
*а* – с открытой платиновой спиралью; *б* – с остеклованной платиновой спиралью;  
 1 – стеклянный корпус; 2 – платиновый токоподвод; 3 – открытая платиновая спираль; 4 – остеклованная платиновая спираль

Теплоотвод от нити длиной  $l$  и диаметром  $d$  к стенкам камеры диаметром  $D$  осуществляется теплопроводностью в соответствии с выражением

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot (t_n - t_c)}{\ln(D/d)}, \quad (5.1)$$

где  $t_n$  – температура платиновой нити;  $t_c$  – температура стенки камеры;  $\lambda$  – теплопроводность смеси при температуре, равной  $(t_n + t_c)/2$ .

Относительные теплопроводности некоторых газов приведены в табл. 5.1.

Теплопроводность смеси газов определяется суммой:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot c_0 + \lambda_n \cdot c_n, \quad (5.2)$$

где  $c_0$  – измеряемая концентрация компонента смеси газа;  $\lambda_0$  – теплопроводность измеряемого компонента смеси газа;  $c_n$  – концентрация неопределяемых компонентов газа;  $\lambda_n$  – теплопроводность неопределяемых компонентов смеси газа.

Так как  $c_0 + c_n = 1$ , концентрация измеряемого компонента находится из соотношения

$$c_0 = \frac{\lambda - \lambda_n}{\lambda_0 - \lambda_n}. \quad (5.3)$$

Концентрация газа в газовой смеси с помощью магнитных газоанализаторов измеряется по изменению магнитных свойств газовой смеси. Газы имеют различную магнитную восприимчивость и делятся на парамагнитные (втягиваются в магнитное поле) и диамагнитные (выталкиваются из магнитного поля) [1].

Практически все газы, кроме кислорода, окиси и диоксида азота, являются практически немагнитными, поскольку их магнитная восприимчивость существенно ниже, чем у кислорода.

Мерой концентрации газа в смеси является сила, действующая на единичный объем газовой смеси, находящейся в неоднородном магнитном поле:

$$F_M = C \cdot \chi_0 \cdot T_0^2 \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \cdot \frac{p}{p_0} \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}, \quad (5.4)$$

где  $C$  – относительная концентрация компонента;  $\chi_0$  – магнитная восприимчивость компонента при нормальном давлении  $p_0 = 760$  мм рт. ст. и нормальной температуре  $T_0 = 273$  К;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $T_1$  – температура газа на входе в измерительную камеру;  $T_2$  – температура газа на выходе из измерительной камеры.

Эта сила определяет интенсивность термомагнитной конвекции, которая, в свою очередь, влияет на отвод теплоты от чувствительного элемента, т. е. его температуру. В реальных условиях интенсивность газовой конвекции определяется не только силой  $F_M$ , но и силой тепловой конвекции. Поэтому изменение показаний прибора при изменении температуры и давления газовой смеси отличается от рассчитанного только по изменению  $F_M$ . [2]

#### Задача 1.5.1

Определить концентрации компонентов в бинарной смеси газов, если теплоотвод от нити диаметром  $d$  (мм) и длиной  $l$  (мм) с температурой  $t_n$  (°C) к стенке камеры диаметров  $D$  (мм) и температурой  $t_c$  (°C) составил  $Q$  (Вт). Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Смесь газов	$Q$ , Вт	$l$ , мм	$D$ , мм	$d$ , мм	$t_c$ , °C	$t_n$ , °C
1	Азот-кислород	1,2	20	5,2	0,02	75	130
2	Азот-воздух	1,3	19	5,3	0,01	78	140
3	Азот-диоксид углерода	0,5	18	5,4	0,03	42	150
4	Метан-азот	1,1	20	5,8	0,02	78	145
5	Воздух-диоксид углерода	0,2	21	6,0	0,01	80	143
6	Гелий-воздух	6,7	22	4,8	0,02	85	144
7	Оксид углерода-воздух	6,8	23	4,9	0,03	82	148
8	Водород-воздух	0,3	24	4,3	0,01	84	152
9	Кислород-воздух	0,2	25	5,0	0,02	83	154
10	Воздух-пары воды	0,7	26	4,8	0,03	170	250
11	Воздух-оксид углерода	0,2	27	4,3	0,05	85	126

Окончание табл. 5.1

12	Воздух-метан	5,3	28	4,5	0,05	80	128
13	Аргон-гелий	5,0	29	4,6	0,05	81	132
14	Кислород-диоксид серы	1,0	30	5,0	0,06	19	134
15	Кислород-аргон	0,2	21	5,2	0,04	18	140
16	Воздух-аргон	0,3	28	5,5	0,03	22	146
17	Воздух-гелий	14,0	26	6,0	0,05	21	148
18	Азот-водород	12,0	20	5,4	0,03	26	150
19	Метан-кислород	2,0	22	5,3	0,02	23	140
20	Диоксид серы-водород	25,0	21	5,5	0,02	24	143

### Задача 1.5.2

Через магнитный газоанализатор кислорода проходит смесь следующего состава:  $\text{CO}_2 - C_1 \%$ ,  $\text{O}_2 - C_2 \%$  и  $\text{N}_2 - C_3 \%$  при расчетной температуре  $t_1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), разрежении  $p_1$  (кПа). Как изменятся показания газоанализатора, если: 1) при неизменной концентрации температура смеси возрастает до  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); 2) при неизменной температуре возрастет разрежение до  $p_2$  (кПа)? Предполагается, что на выходе из измерительной ячейки температура смеси равна  $t_c = 100$   $^{\circ}\text{C}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$C_1, \%$	$C_2, \%$	$C_3, \%$	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	$p_1, \text{кПа}$	$p_2, \text{кПа}$
1	20	56	24	20	45	3,2	10,1
2	19	60	21	19	50	3,3	10,2
3	21	51	28	21	51	1,2	9,8
4	22	64	14	22	52	1,4	9,7
5	23	51	26	23	53	1,5	9,5
6	24	52	24	24	54	2,2	10,0
7	18	53	29	25	55	2,5	10,2
8	19	54	27	26	45	2,6	10,4
9	15	58	27	28	56	2,8	10,5
10	19	59	22	19	58	2,9	10,6
11	21	62	17	18	60	2,3	10,8
12	24	63	13	20	61	2,0	10,2
13	20	64	16	21	62	2,1	10,1

14	18	68	14	22	63	2,2	9,8
15	28	52	20	23	64	2,4	9,6
16	29	54	17	24	68	2,5	9,9
17	25	58	17	25	65	3,0	9,8
18	26	59	15	22	66	3,2	6,8
19	23	60	17	26	68	3,1	6,9
20	24	51	25	18	67	3,5	7,0

## 5.2. Измерение состава жидкостей

К числу наиболее распространенных методов анализа жидкостей, применяемых в промышленных анализаторах, относятся разновидности электрохимического, оптического и теплового методов.

Электродные кондуктометры, реализующие электрохимический метод измерения, применяются для измерения удельной электропроводности жидкостей. Они используются в промышленности для измерения показателей качества жидкостей, например содержания солей в паре, конденсате и питательной воде [1, 3]. В общем случае представляют собой две погруженные в жидкость пластины (электроды). Коэффициент, определяющий связь между удельной электропроводностью  $\chi_0$  раствора и электропроводностью  $\chi$  ячейки или ее сопротивлением  $R_{я}$ , называется постоянной электролитической ячейки:

$$\chi_0 = K \cdot \chi = K \cdot \frac{1}{R_{я}}. \quad (5.5)$$

Сопротивление измерительной электролитической ячейки зависит не только от концентрации раствора, но и от температуры. В узком интервале температур можно считать, что зависимость сопротивления ячейки  $R_{я}$  от температуры имеет вид

$$R_{яt} = \frac{R_{я1}}{1 + \beta(t - t_1)}, \quad (5.6)$$

где  $R_{я1}$  – сопротивление ячейки при температуре  $t_1$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент электропроводности раствора.

Под сопротивлением электродной ячейки подразумевается сопротивление жидкости, заполняющей межэлектродное пространство. Сопротивление измерительной ячейки – это сопротивление, образованное сопротивлением электродной ячейки и сопротивлением шунта [1, 2].

Электропроводность водных растворов находится в сложной зависимости от концентрации раствора. На рис. 5.3 приведены зависимости электропроводности некоторых водных растворов от их концентрации при температуре 18 °С.

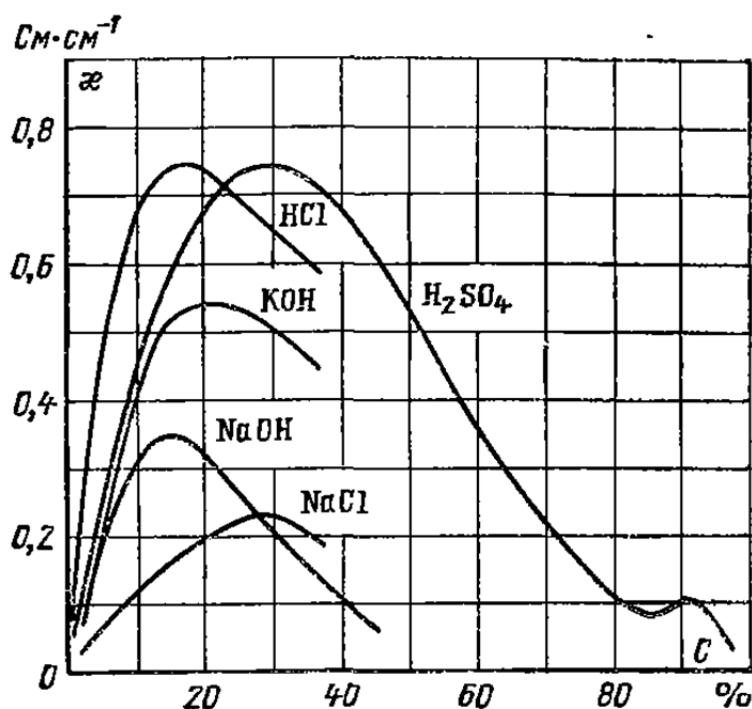


Рис. 5.3. Зависимость электропроводности растворов от концентрации

Из рис. 5.3 видно, что зависимость электропроводности от концентрации однозначна только при небольших значениях концентрации. Следует отметить, что при контроле качества питательной воды, конденсата и пара концентрация растворенных в них веществ не высока и соответствует начальным участкам, приведенным на рис. 5.3.

#### Задача 5.2.1

Ячейка, постоянная которой равна  $K$  ( $\text{м}^{-1}$ ), заполнена раствором, при этом ее сопротивление составляет  $R_{\text{я}}$  (Мом). Определить концентрацию раствора, если известно, что зависимость между концентрацией раствора  $C$  и удельной электропроводностью  $\chi_0$  описывается уравнением  $\chi_0 = a \cdot C$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

#### Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	$K, \text{м}^{-1}$	$R_{\text{я}}, \text{МОм}$	$a \cdot 10^{-8}, (\text{См/м})/(\text{мг/л})$
1	11,2	5,5	1,75
2	10,2	5,4	1,76
3	11,3	5,3	1,77
4	11,2	5,2	1,78
5	11,3	5,0	1,79

6	10,9	5,3	1,80
7	10,8	5,4	1,81
8	10,1	5,9	1,85
9	11,2	5,8	1,74
10	11,3	5,9	1,73
11	10,1	4,0	1,72
12	10,3	4,5	1,77
13	10,2	4,6	1,79
14	10,4	4,8	1,80
15	10,6	4,9	1,81
16	10,5	4,7	1,71
17	10,9	4,5	1,75
18	10,8	4,3	1,72
19	10,2	4,4	1,73
20	11,0	4,2	1,74

## Задача 5.2.2

Электродная ячейка (рис. 5.4) с постоянной  $K$  ( $\text{м}^{-1}$ ) заполнена раствором  $KCl$  концентрацией  $C$  (%), удельная электропроводность раствора при  $20^\circ\text{C}$  равна  $\kappa_0$  ( $\text{См/м}$ ).

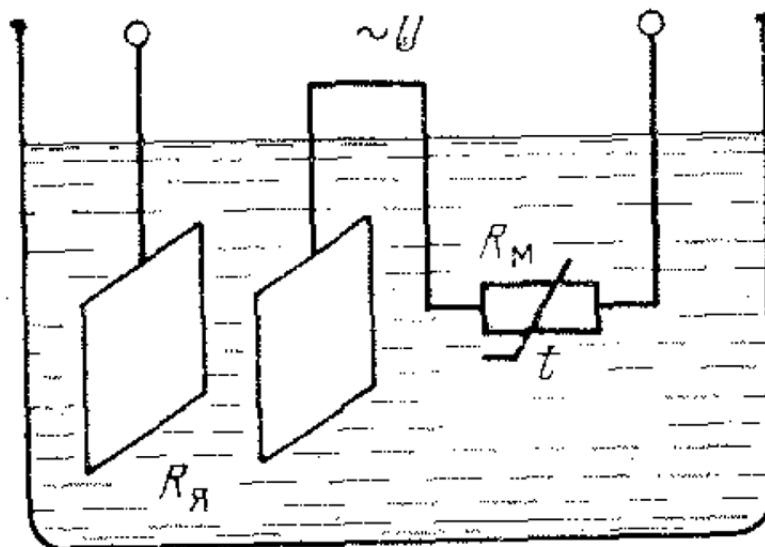


Рис. 5.4. Электродная ячейка

Температура раствора может изменяться в интервале  $20\dots40^\circ\text{C}$ , при этом средний температурный коэффициент электрической проводимости раствора равен  $\beta$  ( $\text{K}^{-1}$ ). Определите сопротивление медного резистора  $R_M$ , обеспечивающего компенсацию изменения сопротивления ячейки в указанном температурном интервале. Сопротивление шунта  $R_{\text{ш}}$  примите равным сопротивлению электродной ячейки  $R_{\text{я}}$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Температурный коэффициент сопротивления меди  $\alpha = 0,00426 \text{ K}^{-1}$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$K, \text{ м}^{-1}$	$C, \%$	$\chi_0, \text{ См/м}$	$\beta, \text{ K}^{-1}$
1	190,1	5,1	7,18	0,0201
2	189,2	5,3	7,24	0,0204
3	188,2	4,9	7,26	0,0206
4	188,3	5,0	7,19	0,0208
5	188,4	4,8	7,25	0,0209
6	188,5	5,2	7,12	0,0195
7	191,2	5,3	7,19	0,0201
8	193,4	5,4	7,23	0,0200
9	194,5	5,5	7,20	0,0197
10	190,5	5,6	7,16	0,0198
11	192,3	4,6	7,14	0,0193
12	194,6	4,7	7,19	0,0194
13	195,6	4,5	7,18	0,0205
14	190,2	4,2	7,23	0,0204
15	190,5	4,3	7,24	0,0202
16	190,4	4,6	7,28	0,0201
17	190,5	4,8	7,20	0,0203
18	190,6	4,9	7,26	0,0204
19	190,7	5,0	7,25	0,0199
20	190,3	5,1	7,21	0,0198

## 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Для измерения количества теплоты используются специальные средства измерений, называемые теплосчетчиками. Количество теплоты обычно выражается в гигаджоулях (ГДж) или гигакалориях (Гкал), причем  $1 \text{ Гкал} = 4,187 \text{ Гдж}$ .

Теплосчетчики получили широкое распространение, поскольку позволяют определить количество потреблённого тепла (в этом случае они устанавливаются на узлах ввода потребителей) и количество отпущенного тепла (в этом случае теплосчетчики устанавливаются на выводах ТЭЦ, котельных и других источниках тепловой энергии). Реализуемые в теплосчетчиках алгоритмы расчета теплоты зависят от вида теплоносителя и структуры системы отпуски и потребления теплоты. Рассмотрим определение теплотопотребления системой, подключенной к тепловой сети по схеме, показанной на рис. 6.1.

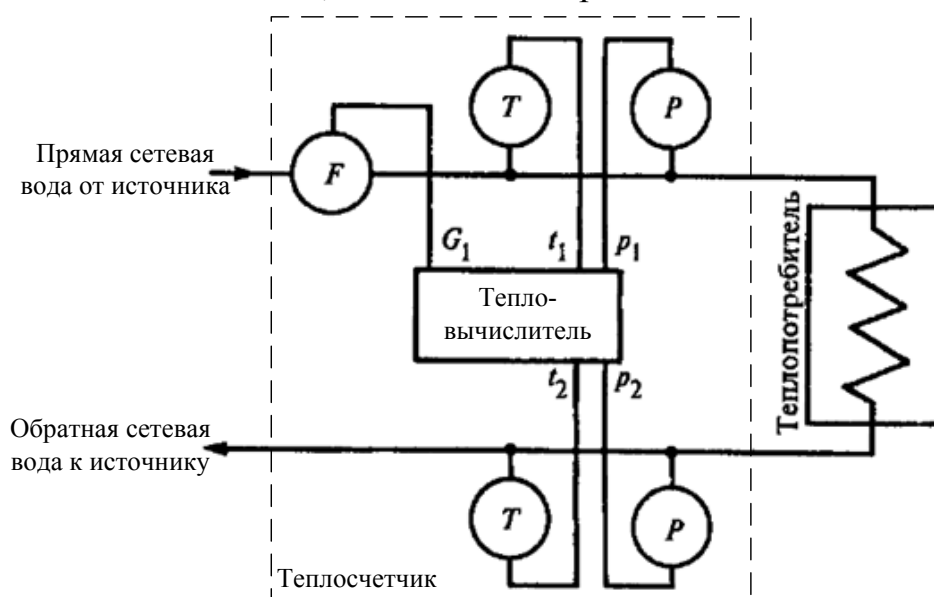


Рис. 6.1. Измерение количества теплоты в закрытой системе отопления

В независимой закрытой системе теплоснабжения количество отданной теплоты  $Q$  за интервал времени  $T_1 \dots T_2$  определяется по формуле

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} G_M (h_1 - h_2) dT, \quad (6.1)$$

где  $G_M$  — массовый расход теплоносителя;  $h_1, h_2$  — энтальпии теплоносителя на входе и выходе системы теплоснабжения;  $T$  — время.



В зависимых открытых системах теплоснабжения количество теплоносителя на входе и выходе системы различно, в связи с чем алгоритм определения количества теплоты в общем виде определяется соотношением

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} [G_1(h_1 - h_2) + (G_{гв} + G_y + G_{по})(h_2 - h_{хв})] dT, \quad (6.2)$$

где  $G_1, G_2$  – расходы воды в подающем и обратном трубопроводах соответственно;  $G_{гв}, G_y, G_{по}$  – расходы теплоносителя, связанные с утечкой теплоносителя;  $h_{хв}$  – энтальпия подпиточной воды теплосети.

На практике разность энтальпий оценивается следующим образом:

$$h_1 - h_2 = C_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (6.3)$$

где  $t_1, t_2$  – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах соответственно;  $C_p$  – изобарная теплоемкость теплоносителя.

В табл. 6.1 приведены значения изобарной теплоемкости воды в зависимости от давления и температуры.

Таблица 6.1

*Изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·К)*

$t, ^\circ\text{C}$	$p = 4 \text{ кгс/см}^2$	$p = 6 \text{ кгс/см}^2$
50	4,179	4,178
55	4,180	4,180
60	4,182	4,182
65	4,185	4,184
70	4,187	4,187
75	4,191	4,190
80	4,195	4,194
85	4,199	4,199
90	4,204	4,204
95	4,210	4,209
100	4,216	4,216
105	4,223	4,222
110	4,230	4,229
115	4,238	4,237
120	4,246	4,245
125	4,255	4,254
130	4,265	4,264
135	4,275	4,274
140	4,286	4,285

Исходя из выражений (6.1) – (6.3), для определения количества теплоты необходимо определить расход теплоносителя, его температу-

ру, а также знать температуру подпитки теплосети (для открытых систем). Исходя из этого, теплосчетчики включают в себя средства измерения температуры, расхода; тепловычислители, иногда – датчики давления. Как правило, в теплосчетчик закладывают различные алгоритмы определения количества теплоты в зависимости от типа теплоносителя, а также схемы присоединения теплового пункта к системе теплоснабжения.

Наиболее часто теплосчетчики включают в себя электромагнитные расходомеры, комплект термопреобразователей сопротивления и тепловычислитель.

Так как при использовании теплосчетчиков измерение количества теплоты производится косвенным методом, погрешность измерения будет зависеть от погрешностей первичных преобразователей температуры и расхода, а также от погрешности тепловычислителя.

Наименьшей погрешностью обладают теплосчетчики, устанавливаемые на закрытых системах присоединения потребителей к системе теплоснабжения, пределы их относительной погрешности для различных классов, в соответствии с [11] приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

*Пределы относительной погрешности теплосчетчиков*

Класс теплосчетчика	Предел относительной погрешности, %
<i>A</i>	$\delta = \pm \left( 2 + 4 \cdot \frac{\Delta t_{\text{н}}}{\Delta t} + 0,01 \cdot \frac{G_{\text{в}}}{G} \right)$
<i>B</i>	$\delta = \pm \left( 3 + 4 \cdot \frac{\Delta t_{\text{н}}}{\Delta t} + 0,02 \cdot \frac{G_{\text{в}}}{G} \right)$
<i>C</i>	$\delta = \pm \left( 4 + 4 \cdot \frac{\Delta t_{\text{н}}}{\Delta t} + 0,05 \cdot \frac{G_{\text{в}}}{G} \right)$

где  $\Delta t_{\text{н}}$  – наименьшее измеряемое значение разности температур; где  $G_{\text{в}}$  – наибольшее измеряемое значение расхода теплоносителя;  $\Delta t$  – измеряемое значение разности температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;  $G$  – измеряемое значение расхода теплоносителя.

Задача 6.1.1

Определить диапазон действительного значения температуры, измеряемой теплосчетчиком, установленным на вводе независимой закрытой системы теплоснабжения потребителя. Минимальное измеряемое значение разности температур равно  $\Delta t_{\text{н}}$  (°C), верхний предел изме-

рения расходомера составляет  $G_B$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Параметры теплоносителя: расход –  $G$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ), температура в подающем трубопроводе  $t_{\text{пс}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), в обратном –  $t_{\text{ос}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), давление теплоносителя в подающем трубопроводе –  $6 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , в обратном –  $4 \text{ кгс}/\text{см}^2$ . Варианты индивидуальных заданий приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

*Варианты индивидуальных заданий*

№ варианта	$G, \text{м}^3/\text{ч}$	$G_B, \text{м}^3/\text{ч}$	$\Delta t_n, ^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{пс}}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{ос}}, ^{\circ}\text{C}$
1	4,5	6	2	70	125
2	8,2	12	2,5	63	94
3	7,9	8	1,5	62	81
4	2,3	10	1,0	57	85
5	2,4	4	3,0	58	84
6	12,5	16	1,7	59	75
7	1,8	4	2,0	62	76
8	8,1	10	2,5	63	78
9	8,2	12	3,0	64	79
10	2,1	4	3,2	65	125
11	3,9	12	1,4	69	132
12	2,1	6	1,5	70	140
13	1,8	4	1,8	62	87
14	1,5	5	2,2	64	88
15	3,4	6	2,0	67	89
16	10,2	12	1,9	57	91
17	14,2	16	1,7	52	94
18	18	20	1,8	59	93
19	15,2	16	2,0	58	85
20	10,2	12	2,1	57	86

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 460 с.
2. Кузнецов Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / Преображенский В.П. – М.: Энергия, 1978. – 703 с.
4. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 15 с.
5. ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 31 с.
6. Мулев Ю.В. Манометры: производственно-практическое издание / Мулев Ю.В. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 277 с.
7. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: учеб. пособие / Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 283 с.
8. Андронов И.В. Измерение расхода жидкостей и газов / Андронов И.В. – М.: Энергоиздат, 1981. – 88 с.
9. Волошенко А.В., Медведев В.В. Технологические измерения и приборы. Курсовое проектирования: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 120 с.
10. Павленко В.А. Газоанализаторы / Павленко В.А. – М.: Машиностроение, 1965. – 296 с.
11. ГОСТ 51649-2000. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 16 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ П1**

*Номинальная статическая характеристика терморпары типа ТМК (Т)*

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-5,603									
-190	-5,439	-5,456	-5,472	-5,489	-5,505	-5,522	-5,538	-5,554	-5,571	-5,587
-180	-5,261	-5,279	-5,297	-5,315	-5,333	-5,351	-5,369	-5,386	-5,404	-5,421
-170	-5,069	-5,089	-5,108	-5,128	-5,147	-5,167	-5,186	-5,205	-5,223	-5,242
-160	-4,865	-4,886	-4,907	-4,927	-4,948	-4,969	-4,989	-5,009	-5,029	-5,049
-150	-4,648	-4,670	-4,692	-4,714	-4,736	-4,758	-4,779	-4,801	-4,822	-4,844
-140	-4,419	-4,442	-4,465	-4,489	-4,512	-4,535	-4,558	-4,580	-4,603	-4,625
-130	-4,177	-4,201	-4,226	-4,250	-4,275	-4,299	-4,323	-4,347	-4,371	-4,395
-120	-3,923	-3,949	-3,974	-4,000	-4,025	-4,051	-4,076	-4,101	-4,127	-4,152
-110	-3,656	-3,683	-3,710	-3,737	-3,764	-3,791	-3,817	-3,844	-3,870	-3,897
-100	-3,378	-3,406	-3,434	-3,463	-3,491	-3,519	-3,546	-3,574	-3,601	-3,629
-90	-3,089	-3,118	-3,147	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,292	-3,321	-3,349
-80	-2,788	-2,818	-2,848	-2,879	-2,909	-2,939	-2,969	-2,999	-3,029	-3,059
-70	-2,475	-2,507	-2,538	-2,570	-2,601	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757
-60	-2,152	-2,185	-1,217	-2,250	-2,282	-2,315	-2,347	-2,379	-2,411	-2,443
-50	-1,819	-1,853	-1,886	-1,920	-1,953	-1,987	-2,020	-2,053	-2,086	-2,119
-40	-1,475	-1,510	-1,544	-1,579	-1,613	-1,648	-1,682	-1,716	-1,751	-1,785
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,263	-1,299	-1,334	-1,369	-1,405	-1,440
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,903	-0,940	-0,976	-1,012	-1,049	-1,085
-10	-0,383	-0,421	-0,458	-0,496	-0,533	-0,571	-0,608	-0,645	-0,683	-0,720
-0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345
+0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,313	0,352
10	0,391	0,431	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	0,789	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,033	1,074	1,114	1,155
30	1,196	1,237	1,279	1,320	1,362	1,403	1,445	1,486	1,528	1,569
40	1,611	1,653	1,695	1,738	1,780	1,822	1,865	1,907	1,950	1,992
50	2,035	2,078	2,121	2,164	2,207	2,250	2,293	2,337	2,380	2,424
60	2,467	2,511	2,555	2,599	2,643	2,687	2,731	2,775	2,820	2,864
70	2,908	2,953	2,997	3,042	3,086	3,131	3,176	3,221	3,267	3,312
80	3,357	3,402	3,448	3,493	3,539	3,584	3,630	3,676	3,721	3,767
90	3,813	3,859	3,905	3,952	3,998	4,044	4,091	4,137	4,184	4,230
100	4,277	4,324	4,371	4,418	4,465	4,512	4,559	4,607	4,654	4,702
110	4,749	4,797	4,844	4,892	4,939	4,987	5,035	5,083	5,131	5,179
120	5,227	5,275	5,324	5,372	5,421	5,469	5,518	5,566	5,615	5,663
130	5,712	5,761	5,810	5,859	5,908	5,957	6,006	6,056	6,105	6,155
140	6,204	6,254	6,303	6,353	6,402	6,452	6,502	6,552	6,602	6,652
150	6,702	6,752	6,803	6,853	6,904	6,954	7,005	7,055	7,106	7,156
160	7,207	7,258	7,309	7,360	7,411	7,462	7,513	7,564	7,616	7,667
170	7,718	7,769	7,821	7,872	7,924	7,975	8,027	8,079	8,131	8,183
180	8,235	8,287	8,339	8,391	8,443	8,495	8,547	8,600	8,652	8,705
190	8,757	8,810	8,863	8,915	8,968	9,021	9,074	9,127	9,180	9,233
200	9,286	9,339	9,393	9,447	9,500	9,553	9,607	9,660	9,714	9,767
210	9,821	9,875	9,929	9,982	10,036	10,090	10,144	10,198	10,252	10,306
220	10,360	10,414	10,469	10,523	10,578	10,632	10,687	10,741	10,796	10,850
230	10,905	10,960	11,015	11,070	11,125	11,180	11,235	11,290	11,346	11,401
240	11,456	11,511	11,567	11,622	11,678	11,733	11,789	11,844	11,900	11,955
250	12,011	12,067	12,123	12,179	12,235	12,291	12,347	12,403	12,460	12,516
260	12,572	12,628	12,685	12,741	12,798	12,854	12,911	12,967	13,024	13,080

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
270	13,137	13,194	13,251	13,307	13,364	13,421	13,478	13,535	13,593	13,650
280	13,707	13,764	13,821	13,879	13,936	13,993	14,051	14,108	14,166	14,223
290	14,281	14,339	14,397	14,454	14,512	14,570	14,628	14,686	14,744	14,802
300	14,860	14,918	14,976	15,035	15,093	15,151	15,209	15,268	15,326	15,385
310	15,443	15,502	15,560	15,619	15,677	15,736	15,795	15,854	15,912	15,971
320	16,030	16,089	16,148	16,207	16,266	16,325	16,384	16,443	16,503	16,562
330	16,621	16,681	16,740	16,800	16,859	16,919	16,979	17,038	17,098	17,157
340	17,217	17,277	17,337	17,396	17,456	17,516	17,576	17,636	17,696	17,756
350	17,816	17,876	17,937	17,997	18,058	18,118	18,187	18,239	18,299	18,360
360	18,420	18,481	18,541	18,602	18,662	18,723	18,784	18,845	18,905	18,996
370	19,027	19,088	19,149	19,210	19,271	19,332	19,393	19,454	19,516	19,577
380	19,638	19,699	19,761	19,822	19,884	19,945	20,006	20,068	20,129	20,191
390	20,252	20,314	20,375	20,437	20,498	20,560	20,622	20,684	20,754	20,807
400	20,869									

## ПРИЛОЖЕНИЕ П2

### Номинальная статическая характеристика терморпары типа ТЖК (J)

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-7,890									
-190	-7,659	-7,683	-7,707	-7,730	-7,754	-7,778	-7,801	-7,823	-7,845	-7,868
-180	-7,402	-7,428	-7,454	-7,481	-7,507	-7,533	-7,558	-7,583	-7,609	-7,634
-170	-7,122	-7,151	-7,179	-7,208	-7,236	-7,265	-7,292	-7,320	-7,347	-7,375
-160	-6,821	-6,852	-6,882	-6,913	-6,943	-6,974	-7,004	-7,033	-7,063	-7,092
-150	-6,499	-6,532	-6,565	-6,597	-6,630	-6,663	-6,695	-6,726	-6,758	-6,789
-140	-6,159	-6,193	-6,228	-6,262	-6,297	-6,331	-6,365	-6,398	-6,432	-6,465
-130	-5,801	-5,837	-5,873	-5,910	-5,946	-5,982	-6,017	-6,053	-6,088	-6,124
-120	-5,426	-5,464	-5,502	-5,539	-5,577	-5,615	-5,652	-5,689	-5,723	-5,764
-110	-5,036	-5,075	-5,115	-5,154	-5,194	-5,233	-5,272	-5,310	-5,349	-5,387
-100	-4,632	-4,673	-4,714	-4,754	-4,795	-4,836	-4,876	-4,916	-4,956	-4,996
-90	-4,215	-4,257	-4,299	-4,341	-4,383	-4,425	-4,466	-4,508	-4,549	-4,591
-80	-3,785	-3,828	-3,871	-3,915	-3,958	-4,001	-4,044	-4,087	-4,129	-4,172
-70	-3,344	-3,388	-3,433	-3,477	-3,522	-3,566	-3,610	-3,654	-3,697	-3,741
-60	-2,892	-2,938	-2,983	-3,029	-3,074	-3,120	-3,165	-3,210	-3,254	-3,299
-50	-2,431	-2,477	-2,524	-2,570	-2,617	-2,663	-2,709	-2,755	-2,800	-2,846
-40	-1,960	-2,007	-2,055	-1,102	-2,150	-2,197	-2,244	-2,291	-2,337	-2,384
-30	-1,481	-1,529	-1,577	-1,626	-1,674	-1,722	-1,770	-1,817	-1,865	-1,912
-20	-0,995	-1,044	-1,093	-1,141	-1,190	-1,239	-1,287	-1,336	-1,384	-1,433
-10	-0,501	-0,550	-0,600	-0,649	-0,699	-0,748	-0,797	-0,847	-0,896	-0,946
0	0,000	-0,500	-0,100	-0,151	-0,201	-0,251	-0,301	-0,351	-0,401	-0,451



Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,510	0,100	0,520	0,202	0,253	0,304	0,355	0,405	0,456
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,813	0,865	0,916	0,968
20	1,019	1,071	1,122	1,174	1,225	1,277	1,329	1,381	1,432	1,484
30	1,536	1,588	1,640	1,693	1,745	1,797	1,849	1,901	1,954	2,006
40	2,058	2,111	2,163	2,216	2,268	2,321	2,374	2,427	2,479	2,532
50	2,585	2,638	2,691	2,743	2,796	2,849	2,902	2,955	3,009	3,062
60	3,115	3,168	3,221	3,275	3,328	3,381	3,435	3,488	3,542	3,595
70	3,649	3,703	3,756	3,810	3,863	3,917	3,971	4,025	4,078	4,132
80	4,186	4,240	4,294	4,347	4,401	4,455	4,509	4,563	4,617	4,671
90	4,725	4,779	4,833	4,888	4,942	4,996	5,050	5,105	5,159	5,214
100	5,268	5,332	5,377	5,431	5,486	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758
110	5,812	5,867	5,921	5,976	6,030	6,085	6,140	6,195	6,249	6,304
120	6,359	6,414	6,469	6,523	6,578	6,633	6,688	6,743	6,797	6,852
130	6,907	6,962	7,017	7,072	7,127	7,182	7,237	7,292	7,347	7,402
140	7,457	7,512	7,567	7,622	7,677	7,732	7,787	7,842	7,898	7,953
150	8,008	8,063	8,118	8,174	8,229	8,284	8,339	8,394	8,450	8,505
160	8,560	8,615	8,671	8,726	8,782	8,837	8,892	8,947	9,003	9,058
170	9,113	9,168	9,224	9,279	9,335	9,390	9,445	9,501	9,556	9,612
180	9,667	9,722	9,778	9,833	9,889	9,944	10,000	10,055	10,110	10,166
190	10,222	10,277	10,333	10,388	10,444	10,499	10,555	10,610	10,666	10,721
200	10,777	10,832	10,888	10,943	10,998	11,054	11,110	11,165	11,221	11,276
210	11,332	11,387	11,443	11,498	11,554	11,609	11,665	11,720	11,776	11,831
220	11,887	11,942	11,998	12,054	12,109	12,165	12,220	12,276	12,331	12,387

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
230	12,442	12,498	12,553	12,609	12,664	12,720	12,776	12,831	12,887	12,942
240	12,998	13,053	13,109	13,164	13,220	13,275	13,331	13,386	13,442	13,497
250	13,553	13,608	13,664	13,719	13,775	13,830	13,886	13,941	13,997	14,052
260	14,108	14,163	14,219	14,274	14,330	14,385	14,441	14,496	14,552	14,607
270	14,663	14,718	14,778	14,829	14,885	14,940	14,995	15,015	15,106	15,162
280	15,217	15,272	15,328	15,383	15,439	15,494	15,549	15,605	15,660	15,716
290	15,771	15,826	15,882	15,937	15,993	16,048	16,103	16,159	16,214	16,270
300	16,325	16,380	16,436	16,491	16,547	16,602	16,657	16,713	16,768	16,824
310	16,879	16,934	16,989	17,045	17,100	17,155	17,210	17,266	17,321	17,377
320	17,432	17,487	17,542	17,598	17,653	17,708	17,763	17,818	17,874	17,929
330	17,984	18,039	18,094	18,150	18,205	18,260	18,315	18,371	18,426	18,482
340	18,537	18,592	18,647	18,703	18,758	18,813	18,868	18,923	18,979	19,034
350	19,089	19,144	19,199	19,254	19,309	19,364	19,419	19,474	19,530	19,585
360	19,640	19,695	19,750	19,806	19,861	19,916	19,971	20,026	20,082	20,137
370	20,192	20,247	20,302	20,357	20,412	20,467	20,522	20,577	20,633	20,688
380	20,743	20,798	20,853	20,909	20,964	21,019	21,074	51,129	21,185	21,240
390	21,295	21,350	21,405	21,460	21,515	21,570	21,625	21,680	21,736	21,791
400	21,846	21,901	21,956	22,012	22,067	22,122	22,177	22,232	22,287	22,342
410	22,397	22,452	22,507	22,563	22,618	22,673	22,728	22,783	22,839	22,894
420	22,949	23,004	23,059	23,115	23,170	23,225	23,280	23,335	23,391	23,446
430	23,501	23,556	23,611	23,667	23,722	23,777	23,832	23,888	23,943	23,999
440	24,054	24,109	24,164	24,220	24,275	24,330	24,385	24,441	24,496	24,552
450	24,607	24,662	24,718	24,773	24,829	24,884	24,939	24,995	25,050	25,106

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
460	25,161	25,216	25,272	25,327	25,383	25,438	25,494	25,549	25,605	25,660
470	25,716	25,772	25,827	25,883	25,938	25,994	26,050	26,105	26,161	26,216
480	26,272	26,328	26,384	26,439	26,495	26,551	26,607	26,662	26,718	26,773
490	26,829	26,885	26,941	26,997	27,053	27,109	27,165	27,220	27,276	27,332
500	27,388	27,444	27,500	27,556	27,612	27,668	27,724	27,780	27,837	27,893
510	27,949	28,005	28,061	28,118	28,174	28,230	28,286	28,342	28,399	28,455
520	28,511	28,567	28,624	28,680	28,734	28,793	28,849	28,906	28,962	29,019
530	29,075	29,132	29,188	29,245	29,301	29,358	29,415	29,472	29,528	29,585
540	29,642	29,699	29,756	29,812	29,869	29,926	29,983	30,040	30,096	30,153
550	30,210	30,267	30,324	30,320	30,439	30,496	30,553	30,610	30,668	30,725
560	30,782	30,839	30,896	30,954	31,011	31,068	31,126	31,183	31,241	31,298
570	31,356	31,414	31,471	31,529	31,586	31,644	31,702	31,760	31,817	31,875
580	31,933	31,991	32,049	32,106	32,164	32,222	32,280	32,338	32,397	32,455
590	32,513	32,571	32,629	32,688	32,746	32,804	32,862	32,921	32,979	33,038
600	33,096	33,155	33,213	33,272	33,330	33,389	33,448	33,507	33,565	33,624
610	33,683	33,742	33,801	33,859	33,918	33,977	34,036	34,095	34,155	34,214
620	34,273	34,332	34,391	34,451	35,510	34,569	34,629	34,688	34,748	34,807
630	34,867	34,927	34,986	35,046	35,105	35,165	35,225	35,285	35,344	35,404
640	35,464	35,524	35,584	35,644	35,704	35,764	35,824	35,885	35,945	36,006
650	36,066	36,126	36,187	36,247	36,308	36,368	36,429	36,489	36,550	36,610
660	36,671	36,732	36,793	36,853	36,914	36,975	37,036	37,097	37,158	37,219
670	37,280	37,341	37,402	37,464	37,525	37,586	37,647	37,709	37,770	37,832
680	37,893	37,955	38,016	38,078	38,139	38,201	38,263	38,325	38,386	38,448

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
690	38,510	38,572	38,634	38,695	38,757	38,819	38,881	38,943	39,006	39,068
700	39,130	39,192	39,255	39,317	39,380	39,442	39,504	39,567	39,629	39,692
710	39,754	39,817	39,880	39,942	40,005	40,068	40,131	40,194	40,256	40,319
720	40,382	40,445	40,508	40,571	40,634	40,697	40,760	40,823	40,887	40,950
730	41,013	41,076	41,139	41,203	41,266	41,329	41,393	41,456	41,520	41,583
740	41,647	41,711	41,774	41,838	41,901	41,965	42,029	42,092	42,156	42,219
750	42,283	42,347	42,411	42,474	42,538	42,602	42,666	42,730	42,794	42,859
760	42,922	42,986	43,050	43,114	43,178	43,242	43,306	43,370	43,435	43,499
770	43,563	43,627	43,692	43,756	43,821	43,885	43,949	44,014	44,078	44,143
780	44,207	44,271	44,336	44,400	44,465	44,529	44,594	44,658	44,723	44,787
790	44,852	44,917	44,981	45,046	45,110	45,175	45,240	45,304	45,369	45,433
800	45,498	45,563	45,627	45,692	45,756	45,821	45,886	45,950	46,015	46,079
810	46,144	46,209	46,273	46,338	46,402	46,467	46,531	46,596	46,660	46,724
820	46,789	46,854	46,918	46,983	47,047	47,112	47,176	47,241	47,305	47,370
830	47,434	47,498	47,562	47,627	47,691	47,755	47,819	47,883	47,948	48,012
840	48,076	48,140	48,204	48,269	48,333	48,397	48,461	48,525	48,588	48,652
850	48,716	48,780	48,844	48,908	48,972	49,036	49,100	49,163	49,227	49,290
860	49,354	49,419	49,484	49,548	49,613	49,678	49,740	49,802	49,865	49,927
870	49,989	50,052	50,115	50,179	50,242	50,305	50,368	50,431	50,495	50,558
880	50,621	50,684	50,747	50,810	50,873	50,936	50,999	51,061	51,124	51,186
890	51,249	51,312	51,374	51,437	51,499	51,562	51,625	51,687	51,750	51,812
900	51,875									

## ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ

### Номинальная статическая характеристика термомпары типа ТХК (L)

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
-200	-9,488												
-190	-9,203	-9,233	-9,262	-9,291	-9,32	-9,349	-9,377	-9,405	-9,433	-9,461			
-180	-8,894	-8,926	-8,958	-8,989	-9,02	-9,051	-9,082	-9,113	-9,143	-9,173			
-170	-8,562	-8,596	-8,63	-8,664	-8,697	-8,731	-8,764	-8,797	-8,829	-8,862			
-160	-8,207	-8,243	-8,28	-8,316	-8,351	-8,387	-8,422	-8,458	-8,492	-8,527			
-150	-7,83	-7,869	-7,907	-7,945	-7,983	-8,021	-8,059	-8,096	-8,133	-8,17			
-140	-7,432	-7,473	-7,513	-7,554	-7,594	-7,634	-7,673	-7,713	-7,752	-7,791			
-130	-7,013	-7,056	-7,099	-7,141	-7,183	-7,225	-7,267	-7,308	-7,35	-7,391			
-120	-6,575	-6,619	-6,664	-6,708	-6,752	-6,796	-6,84	-6,884	-6,927	-6,97			
-110	-6,117	-6,164	-6,21	-6,256	-6,302	-6,348	-6,394	-6,439	-6,485	-6,53			
-100	-5,641	-5,689	-5,737	-5,785	-5,833	-5,881	-5,929	-5,976	-6,023	-6,07			
-90	-5,146	-5,197	-5,247	-5,297	-5,346	-5,396	-5,445	-5,494	-5,543	-5,592			
-80	-4,635	-4,687	-4,739	-4,79	-4,842	-4,893	-4,944	-4,995	-5,046	-5,006			
-70	-4,107	-4,161	-4,214	-4,267	-4,32	-4,373	-4,426	-4,478	-4,531	-4,583			
-60	-3,563	-3,618	-3,673	-3,728	-3,783	-3,837	-3,892	-3,946	-4	-4,054			
-50	-3,004	-3,061	-3,117	-3,174	-3,23	-3,286	-3,342	-3,397	-3,453	-3,508			
-40	-2,431	-2,489	-2,546	-2,604	-2,662	-2,719	-2,777	-2,834	-2,891	-2,948			
-30	-1,843	-1,902	-1,961	-2,021	-2,08	-2,138	-2,197	-2,256	-2,314	-2,372			
-20	-1,241	-1,302	-1,363	-1,423	-1,483	-1,544	-1,604	-1,664	-1,723	-1,783			
-10	-0,627	-0,689	-0,751	-0,813	-0,874	-0,936	-0,997	-1,058	-1,119	-1,18			
0	0	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,378	-0,44	-0,503	-0,565			

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,063	0,127	0,19	0,254	0,318	0,382	0,446	0,51	0,574
10	0,639	0,703	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,158	1,224
20	1,289	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,751	1,818	1,884
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,353	2,42	2,488	2,556
40	2,623	2,691	2,759	2,827	2,895	2,963	3,032	3,1	3,168	3,237
50	3,306	3,375	3,443	3,512	3,582	3,651	3,72	3,789	3,859	3,928
60	3,998	4,068	4,138	4,208	4,278	4,348	4,418	4,489	4,559	4,63
70	4,7	4,771	4,842	4,913	4,984	5,055	5,126	5,197	5,268	5,34
80	5,441	5,483	5,555	5,626	5,698	5,77	5,842	5,914	5,987	6,059
90	6,131	6,204	6,276	6,349	6,422	6,495	6,567	6,64	6,714	6,787
100	6,86	6,933	7,007	7,08	7,154	7,227	7,301	7,375	7,449	7,523
110	7,597	7,671	7,745	7,819	7,894	7,968	8,043	8,117	8,192	8,267
120	8,342	8,417	8,492	8,567	8,642	8,717	8,792	8,868	8,943	9,019
130	9,094	9,17	9,246	9,321	9,397	9,473	9,549	9,625	9,702	9,778
140	9,854	9,931	10,007	10,084	10,16	10,237	10,314	10,391	10,467	10,544
150	10,621	10,699	10,776	10,853	10,93	11,008	11,085	11,163	11,24	11,318
160	11,396	11,473	11,551	11,629	11,707	11,785	11,863	11,942	12,02	12,098
170	12,176	12,255	12,333	12,412	12,491	12,569	12,648	12,727	12,806	12,885
180	12,964	13,043	13,122	13,201	13,281	13,36	13,439	13,519	13,598	13,678
190	13,758	13,837	13,917	13,997	14,077	14,157	14,237	14,317	14,397	14,477
200	14,557	14,638	14,718	14,798	14,879	14,959	15,04	15,121	15,201	15,282
210	15,363	15,444	15,525	15,606	15,687	15,768	15,849	15,93	16,011	16,093
220	16,174	16,255	16,337	16,418	16,5	16,582	16,663	16,745	16,827	16,909
230	16,99	17,072	17,154	17,236	17,319	17,401	17,483	17,565	17,647	17,73

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
240	17,812	17,895	17,977	18,06	18,142	18,225	18,308	18,39	18,473	18,556
250	18,639	18,722	18,805	18,888	18,971	19,054	19,137	19,22	19,304	19,387
260	19,47	19,554	19,637	19,721	19,804	19,888	19,971	20,055	20,139	20,223
270	20,306	20,39	20,474	20,558	20,642	20,726	20,81	20,894	20,978	21,062
280	21,147	21,231	21,315	21,4	21,484	21,568	21,653	21,737	21,822	21,906
290	21,991	22,076	22,16	22,245	22,33	22,415	22,5	22,585	22,669	22,754
300	22,839	22,924	23,01	23,095	23,18	23,265	23,35	23,435	23,521	23,606
310	23,691	23,777	23,802	23,948	24,033	24,119	24,204	24,29	24,375	24,461
320	24,547	24,633	24,718	24,804	24,89	24,976	25,062	25,148	25,234	25,319
330	25,405	25,492	25,578	25,664	25,75	25,836	25,922	26,008	26,095	26,181
340	26,267	26,353	26,44	26,526	26,613	26,699	26,786	26,872	26,958	27,045
350	27,132	27,218	27,305	27,391	27,478	27,565	27,652	27,738	27,825	27,912
360	27,999	28,085	28,172	28,259	28,346	28,433	28,52	28,607	28,694	28,781
370	28,858	28,955	29,042	29,129	29,216	29,303	29,391	29,478	29,565	29,652
380	29,739	29,827	29,914	30,001	30,089	30,176	30,263	30,351	30,438	30,525
390	30,613	30,7	30,788	30,875	30,963	31,05	31,138	31,225	31,313	31,4
400	31,488	31,576	31,663	31,751	31,838	31,926	32,014	32,101	32,189	32,277
410	32,365	32,452	32,54	32,628	32,716	32,803	32,891	32,979	33,067	33,155
420	33,243	33,33	33,418	33,506	33,594	33,682	33,77	33,858	33,946	34,034
430	34,122	34,21	34,297	34,385	34,473	34,561	34,649	34,737	34,825	34,914
440	35,002	35,09	35,178	35,266	35,354	35,442	35,53	35,618	35,706	35,794
450	35,882	35,97	36,058	36,147	36,235	36,323	36,411	36,499	36,587	36,675
460	36,764	36,852	36,94	37,028	37,116	37,204	37,293	37,381	37,469	37,557
470	37,645	37,734	37,822	37,91	37,998	38,086	38,175	38,263	38,351	38,439

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
480	38,527	38,616	38,704	38,792	38,88	38,968	39,057	39,145	39,233	39,321
490	39,41	39,498	39,586	39,674	39,762	39,851	39,939	40,027	40,115	40,204
500	40,292	40,38	40,468	40,556	40,645	40,733	40,821	40,909	40,998	41,086
510	41,174	41,262	41,35	41,439	41,527	41,615	41,703	41,791	41,88	41,968
520	42,056	42,144	42,232	42,32	42,409	42,497	42,585	42,673	42,761	42,85
530	42,938	43,026	43,114	43,202	43,29	43,378	43,467	43,555	43,643	43,731
540	43,819	43,907	43,995	44,083	44,172	44,26	44,348	44,436	44,524	44,612
550	44,7	44,788	44,876	44,964	45,052	45,14	45,228	45,317	45,405	45,493
560	45,581	45,669	45,757	45,845	45,933	46,021	46,109	46,197	46,285	46,373
570	46,461	46,549	46,637	46,725	46,813	46,901	46,98	47,077	47,165	47,253
580	47,34	47,428	47,516	47,604	47,692	47,78	47,868	47,956	48,044	48,132
590	48,22	48,307	48,395	48,483	48,571	48,659	48,747	48,835	48,923	49,01
600	49,098	49,186	49,274	49,362	49,45	49,537	49,625	49,713	49,801	49,889
610	49,976	50,064	50,152	50,24	50,328	50,415	50,503	50,591	50,679	50,766
620	50,854	50,942	51,029	51,117	51,205	51,293	51,38	51,468	51,556	51,643
630	51,731	51,819	51,907	51,994	52,082	52,17	52,257	52,345	52,433	52,52
640	52,608	52,695	52,783	52,871	52,958	53,046	53,134	53,221	53,309	53,396
650	53,484	53,572	53,659	53,747	53,834	53,922	54,009	54,097	54,184	54,272
660	54,36	54,447	54,535	54,622	54,71	54,797	54,885	54,972	55,06	55,147
670	55,235	55,322	55,41	55,497	55,584	55,672	55,759	55,847	55,934	56,022
680	56,109	56,196	56,284	56,371	56,459	56,546	56,633	56,721	56,808	56,895
690	56,983	57,07	57,157	57,245	57,332	57,419	57,507	57,594	57,681	57,768
700	57,856	57,943	58,03	58,117	58,205	58,292	58,379	58,466	58,553	58,64
710	58,728	58,815	58,902	58,989	59,076	59,163	59,25	59,337	59,424	59,511



Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
720	59,598	59,685	59,772	59,859	59,946	60,033	60,12	60,207	60,294	60,381
730	60,468	60,554	60,641	60,728	60,815	60,901	60,988	61,075	61,162	61,248
740	61,335	61,421	61,508	61,595	61,681	61,768	61,854	61,941	62,027	62,114
750	62,2	62,286	62,373	62,459	62,545	62,632	62,718	62,804	62,89	62,976
760	63,062	63,148	63,234	63,32	63,406	63,492	63,578	63,664	63,75	63,835
770	63,921	64,007	64,092	64,178	64,264	64,349	64,435	64,52	64,605	64,691
780	64,776	64,861	64,946	65,031	65,116	65,201	65,286	65,371	65,456	65,541
790	65,626	65,71	65,795	65,879	65,964	66,048	66,133	66,217	66,301	66,385
800	66,469									

## ПРИЛОЖЕНИЕ П4

### Номинальная статическая характеристика терморпары типа ТХКн (Е)

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-8,824									
-190	-8,561	-8,589	-8,627	-8,644	-8,670	-8,696	-8,722	-8,747	-8,773	-8,799
-180	-8,273	-8,302	-8,332	-8,361	-8,391	-8,420	-8,448	-8,476	-8,505	-8,533
-170	-7,963	-7,995	-8,026	-8,058	-8,089	-8,121	-8,151	-8,182	-8,212	-8,243
-160	-7,631	-7,665	-7,699	-7,732	-7,766	-7,800	-7,833	-7,865	-7,898	-7,930
-150	-7,279	-7,315	-7,351	-7,386	-7,422	-7,458	-7,493	-7,527	-7,562	-7,596
-140	-6,907	-6,945	-6,982	-7,020	-7,057	-7,095	-7,132	-7,169	-7,205	-7,242
-130	-6,516	-6,556	-6,595	-6,635	-6,674	-6,714	-6,753	-6,791	-6,830	-6,868
-120	-6,107	-6,148	-6,190	-6,231	-6,273	-6,314	-6,354	-6,395	-6,435	-6,476
-110	-5,680	-5,723	-5,766	-5,810	-5,853	-5,896	-5,938	-5,980	-6,023	-6,065
-100	-5,273	-5,282	-5,326	-5,371	-5,415	-5,460	-5,504	-5,548	-5,592	-5,636
-90	-4,777	-4,823	-4,870	-4,916	-4,963	-5,009	-5,055	-5,100	-5,146	-5,191
-80	-4,301	-4,349	-4,397	-4,445	-4,493	-4,541	-4,588	-4,635	-4,683	-4,730
-70	-3,811	-3,860	-3,910	-3,959	-4,009	-4,058	-4,107	-4,155	-4,204	-4,252
-60	-3,306	-3,357	-3,408	-3,458	-3,509	-3,560	-3,610	-3,660	-3,711	-3,761
-50	-2,787	-2,839	-2,891	-2,944	-2,996	-3,048	-3,100	-3,151	-3,203	-3,254
-40	-2,254	-2,308	-2,361	-2,415	-2,468	-2,522	-2,575	-2,628	-2,681	-2,734
-30	-1,709	-1,764	-1,819	-1,873	-1,928	-1,983	-2,037	-2,091	-2,146	-2,200
-20	-1,151	-1,207	-1,263	-1,320	-1,376	-1,432	-1,487	-1,543	-1,598	-1,654
-10	-0,581	-0,638	-0,696	-0,753	-0,811	-0,868	-0,925	-0,981	-1,038	-1,094
0	0,000	-0,058	-0,117	-0,175	-0,234	-0,292	-0,350	-0,408	-0,465	-0,523
0	0,000	0,059	0,118	0,177	0,236	0,295	0,354	0,413	0,473	0,532

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,591	0,651	0,711	0,770	0,830	0,890	0,950	1,011	1,071	1,132
20	1,192	1,253	1,313	1,374	1,434	1,495	1,556	0,617	1,679	1,740
30	1,801	1,863	1,924	1,986	2,047	2,109	2,171	2,233	2,295	2,357
40	2,419	2,482	2,544	2,607	2,669	2,732	2,795	2,858	2,921	2,984
50	3,047	3,110	3,174	3,273	3,301	3,364	3,428	3,492	3,555	3,619
60	3,683	3,747	3,812	3,876	3,941	4,005	4,070	4,135	4,199	4,264
70	4,329	4,394	4,459	4,525	4,590	4,655	4,721	4,786	4,852	4,917
80	4,983	5,049	5,115	5,182	5,248	5,314	5,380	5,447	5,513	5,580
90	5,646	5,713	5,780	5,847	5,914	5,981	6,048	6,115	6,183	6,250
100	6,317	6,385	6,453	6,520	6,588	6,656	6,724	6,792	6,860	6,928
110	6,996	7,065	7,133	7,202	7,270	7,339	7,408	7,447	7,545	7,614
120	7,683	7,752	7,821	7,891	7,960	8,029	8,099	8,168	8,238	8,307
130	8,377	8,447	8,517	8,587	8,657	8,727	8,797	8,867	8,938	9,008
140	9,078	9,149	9,220	9,290	9,361	9,432	9,503	9,574	9,645	9,716
150	9,787	9,858	9,929	10,001	10,072	10,143	10,215	10,296	10,358	10,429
160	10,501	10,573	10,645	10,717	10,789	10,861	10,933	11,005	11,078	11,150
170	11,222	11,295	11,367	11,440	11,512	11,585	11,658	11,731	11,803	11,876
180	11,949	12,022	12,095	12,168	12,241	12,314	12,387	12,461	12,534	12,608
190	12,681	12,755	12,828	12,902	12,975	13,049	13,123	13,197	13,271	13,345
200	13,419	13,493	13,567	13,641	13,715	13,789	13,863	13,938	14,012	14,087
210	14,161	14,236	14,310	14,385	14,459	14,534	14,609	14,684	14,759	14,834
220	14,909	14,984	15,134	15,134	15,209	15,284	15,359	15,435	15,510	15,586
230	15,661	15,736	15,887	15,887	15,963	16,038	16,114	16,190	16,250	16,341
240	16,417	16,493	16,569	16,645	16,721	16,797	16,873	16,949	17,026	17,102

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
250	17,178	17,254	17,330	17,407	17,483	17,559	17,636	17,712	17,789	17,865
260	17,942	18,019	18,095	18,172	18,248	18,325	18,402	18,479	18,556	18,633
270	18,710	18,787	18,864	18,941	19,018	19,095	19,172	19,249	19,327	19,404
280	19,481	19,558	19,636	19,713	19,791	19,868	19,946	20,023	20,101	20,178
290	20,256	20,334	20,411	20,489	20,566	20,644	20,722	20,800	20,877	20,955
300	21,033	21,111	21,189	21,267	21,345	21,423	21,501	21,579	21,658	21,736
310	21,814	21,892	21,970	22,049	22,127	22,205	22,283	22,362	22,440	22,519
320	22,597	22,675	22,754	22,830	22,911	22,989	23,068	23,147	23,225	23,304
330	23,383	23,462	23,541	23,619	23,698	23,777	23,856	23,935	24,013	24,092
340	24,171	24,250	24,329	24,408	23,487	24,566	24,645	24,724	24,803	24,882
350	24,961	25,040	25,119	25,199	25,278	25,357	25,436	25,516	25,595	25,675
360	25,754	25,833	26,913	25,992	26,072	26,151	26,231	26,310	26,390	26,469
370	26,549	26,629	26,708	26,788	26,867	26,947	27,027	27,106	27,186	27,265
380	27,345	27,426	27,505	27,584	27,664	27,744	27,824	27,904	27,983	28,063
390	28,143	28,223	28,303	28,383	28,463	28,543	28,623	28,703	28,783	28,863
400	28,943	29,023	29,103	29,183	29,263	29,343	29,423	29,503	29,584	29,664
410	29,744	29,824	29,904	29,985	30,065	30,145	30,225	30,305	30,386	30,466
420	30,546	30,626	30,707	30,787	30,868	30,948	31,028	31,109	31,189	31,270
430	31,350	31,430	31,511	31,591	31,672	31,752	31,833	31,913	31,994	32,074
440	32,155	32,235	32,316	32,396	32,477	32,557	32,638	32,718	32,799	32,879
450	32,960	33,041	33,122	33,202	33,283	33,364	33,445	33,525	33,606	33,686
460	33,767	33,848	33,928	34,009	34,089	34,170	34,251	34,332	34,412	34,493
470	34,574	34,655	34,736	34,817	34,898	34,978	35,059	35,140	35,220	35,301
480	35,382	35,463	35,544	35,624	35,705	35,786	35,867	35,948	36,028	36,109

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
490	36,190	36,271	36,352	36,433	36,514	36,595	36,676	36,757	36,837	36,918
500	36,999	37,080	37,161	37,241	37,322	37,403	37,484	37,565	37,646	37,727
510	37,808	37,889	37,970	38,051	38,132	38,213	38,294	38,375	38,455	38,536
520	38,617	38,698	38,779	38,860	38,941	39,022	39,103	39,184	39,264	39,345
530	39,426	39,507	39,588	39,669	39,750	39,831	39,912	39,993	40,073	40,154
540	40,235	40,316	40,397	40,478	40,559	40,640	40,721	40,802	40,883	40,964
550	41,054	41,126	41,207	41,287	41,368	41,449	41,530	41,611	41,691	41,772
560	41,853	41,934	42,015	42,096	42,177	42,258	42,339	42,420	42,500	42,581
570	42,662	42,743	42,824	42,904	42,985	43,066	43,147	43,228	43,308	43,389
580	43,470	43,551	43,632	43,712	43,793	43,874	43,955	44,036	44,116	44,197
590	44,278	44,359	44,439	44,520	44,600	44,681	44,762	44,843	44,923	45,004
600	45,085	45,166	45,246	45,327	45,407	45,488	45,569	45,649	45,730	45,810
610	45,891	45,972	46,052	46,133	46,213	46,294	46,375	46,455	46,536	46,616
620	46,697	46,777	46,858	46,938	47,019	47,099	47,180	47,260	47,341	47,421
630	47,502	47,582	47,663	47,743	47,824	47,904	47,984	48,065	48,145	48,226
640	48,306	48,386	48,467	48,547	48,628	48,708	48,788	48,868	48,949	49,029
650	49,109	49,189	49,269	49,350	49,430	49,510	49,590	49,670	49,751	49,831
660	49,911	49,991	50,071	50,152	50,232	50,312	50,392	50,472	50,553	50,633
670	50,713	50,793	50,873	50,953	51,033	51,113	51,193	51,273	51,353	51,433
680	51,513	51,593	51,673	51,753	51,833	51,913	51,993	52,073	52,152	52,232
690	52,312	52,392	52,472	52,551	52,631	52,711	52,791	52,871	52,950	53,030
700	52,110	53,190	53,270	53,349	53,429	53,509	53,589	53,668	53,748	53,827
710	53,907	53,987	54,066	54,146	54,225	54,305	54,385	54,464	54,544	54,623
720	54,703	54,782	54,862	54,941	55,021	55,100	55,179	55,259	55,338	55,418

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
730	55,497	55,576	55,656	55,735	55,815	55,894	55,973	56,053	56,132	56,212
740	56,291	56,370	56,494	56,529	56,608	56,687	56,766	56,845	56,925	57,004
750	57,083	57,162	57,241	57,320	57,399	57,478	57,557	57,636	57,715	57,794
760	57,873	57,952	58,031	58,110	58,189	58,268	58,347	58,426	58,505	58,584
770	58,663	58,742	58,821	58,899	58,978	59,057	59,136	59,215	59,293	59,372
780	59,451	59,530	59,608	59,687	59,765	59,844	59,923	60,004	60,080	60,458
790	60,273	60,316	60,394	60,473	60,551	60,630	60,708	60,787	60,865	60,944
800	61,022	61,100	61,179	61,257	61,336	61,414	61,492	61,571	61,649	61,728
810	61,806	61,884	61,962	62,041	62,119	62,197	62,275	62,353	62,432	62,510
820	62,588	62,666	62,744	62,822	62,900	62,978	63,056	63,134	63,212	63,290
830	63,386	63,446	63,524	63,602	63,680	63,758	63,836	63,914	63,991	64,069
840	64,147	64,225	64,303	64,380	64,458	64,536	64,614	64,691	64,769	64,846
850	64,924	65,002	65,079	65,157	65,234	65,312	65,389	65,467	65,544	65,622
860	65,699	65,776	65,854	65,931	66,009	66,086	66,163	66,241	66,318	66,396
870	66,473	66,550	66,627	66,705	66,782	66,859	66,936	67,013	67,091	67,168
880	67,245	67,322	67,399	67,476	67,553	67,630	67,707	67,784	67,861	67,938
890	68,015	68,092	68,169	68,245	68,322	68,399	68,476	68,553	68,629	68,706
900	68,783									

## ПРИЛОЖЕНИЕ П5

### Номинальная статическая характеристика термопары типа ТХА (К)

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-250	-6,404									
-240	-6,344	-6,351	-6,358	-6,364	-6,370	-6,377	-6,382	-6,388	-6,393	-6,399
-230	-6,262	-6,271	-6,280	-6,289	-6,297	-6,306	-6,314	-6,322	-6,329	-6,337
-220	-6,158	-6,170	-6,181	-6,192	-6,202	-6,213	-6,223	-6,233	-6,243	-6,252
-210	-6,035	-6,048	-6,061	-6,074	-6,087	-6,099	-6,111	-6,123	-6,135	-6,147
-200	-5,891	-5,907	-5,922	-5,936	-5,951	-5,965	-5,980	-5,994	-6,007	-6,021
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,797	-5,813	-5,829	-5,845	-5,861	-5,876
-180	-5,550	-5,569	-5,588	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5,713
-170	-5,354	-5,374	-5,395	-5,415	-5,435	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,250	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333
-150	-4,913	-4,936	-4,960	-4,983	-5,006	-5,029	-5,052	-5,074	-5,097	-5,119
-140	-4,669	-4,694	-4,719	-4,744	-4,768	-4,793	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889
-130	-4,411	-4,437	-4,463	-4,490	-4,516	-4,542	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644
-120	-4,138	-4,166	-4,194	-4,221	-4,249	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384
-110	-3,852	-3,882	-3,911	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,054	-4,082	-4,110
-100	-3,554	-3,584	-3,614	-3,645	-3,675	-3,705	-3,734	-3,764	-3,794	-3,823
-90	-3,243	-3,274	-3,306	-3,337	-3,368	-3,400	-3,431	-3,462	-3,492	-3,523
-80	-2,920	-2,953	-2,986	-3,018	-3,050	-3,083	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211
-70	-2,587	-2,620	-2,654	-2,688	-2,721	-2,755	-2,788	-2,821	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,278	-2,312	-2,347	-2,382	-2,416	-2,450	-2,485	-2,519	-2,553
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,103	-2,138	-2,173	-2,208
-40	-1,527	-1,564	-1,600	-1,637	-1,673	-1,709	-1,745	-1,782	-1,818	-1,854

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-30	-1,156	-1,194	-1,231	-1,268	-1,305	-1,343	-1,380	-1,417	-1,453	-1,490
-20	-0,778	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,006	-1,043	-1,081	-1,119
-10	-0,392	-0,431	-0,470	-0,508	-0,547	-0,586	-0,624	-0,663	-0,701	-0,739
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,163
30	1,203	1,244	1,285	1,326	1,366	1,407	1,448	1,489	1,530	1,571
40	1,612	1,653	1,694	1,735	1,776	1,817	1,858	1,899	1,941	1,982
50	2,023	2,064	2,106	2,147	2,188	2,230	2,271	2,312	2,354	2,395
60	2,436	2,478	2,519	2,561	2,602	2,644	2,685	2,727	2,768	2,810
70	2,851	2,893	2,934	2,976	3,017	3,059	3,100	3,142	3,184	3,225
80	3,267	3,308	3,350	3,391	3,433	3,474	3,516	3,557	3,599	3,640
90	3,682	3,723	3,765	3,806	3,848	3,889	3,931	3,972	4,013	4,055
100	4,096	4,138	4,179	4,220	4,262	4,303	4,344	4,385	4,427	4,468
110	4,509	4,550	4,591	4,633	4,674	4,715	4,756	4,797	4,838	4,879
120	4,920	4,961	5,002	5,043	5,084	5,124	5,165	5,206	5,247	5,288
130	5,328	5,369	5,410	5,450	5,491	5,532	5,572	5,613	5,653	5,694
140	5,735	5,775	5,815	5,856	5,896	5,937	5,977	6,017	6,058	6,098
150	6,138	6,179	6,219	6,259	6,299	6,339	6,380	6,420	6,460	6,500
160	6,540	6,580	6,620	6,660	6,701	6,741	6,781	6,821	6,861	6,901
170	6,941	6,981	7,021	7,060	7,100	7,140	7,180	7,220	7,260	7,300
180	7,340	7,380	7,420	7,460	7,500	7,540	7,579	7,619	7,659	7,699
190	7,739	7,779	7,819	7,859	7,899	7,939	7,979	8,019	8,059	8,099



Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	8,138	8,178	8,218	8,258	8,298	8,338	8,378	8,418	8,458	8,499
210	8,539	8,579	8,619	8,659	8,699	8,739	8,779	8,819	8,860	8,900
220	8,940	8,980	9,020	9,061	9,101	9,141	9,181	9,222	9,262	9,302
230	9,343	9,383	9,423	9,464	9,504	9,545	9,585	9,626	9,666	9,707
240	9,747	9,788	9,828	9,869	9,909	9,950	9,991	10,031	10,072	10,113
250	10,153	10,194	10,235	10,276	10,316	10,357	10,398	10,439	10,480	10,520
260	10,561	10,602	10,643	10,684	10,725	10,766	10,807	10,848	10,889	10,930
270	10,971	11,012	11,053	11,094	11,135	11,176	11,217	11,259	11,300	11,341
280	11,382	11,423	11,465	11,506	11,547	11,588	11,630	11,671	11,712	11,753
290	11,795	11,836	11,877	11,919	11,960	12,001	12,043	12,084	12,126	12,167
300	12,209	12,250	12,291	12,333	12,374	12,416	12,457	12,499	12,540	12,582
310	12,624	12,665	12,707	12,748	12,790	12,831	12,873	12,915	12,956	12,998
320	13,040	13,081	13,123	13,165	13,206	13,248	13,290	13,331	13,373	13,415
330	13,457	13,498	13,540	13,582	13,624	13,665	13,707	13,749	13,791	13,833
340	13,874	13,916	13,958	14,000	14,042	14,084	14,126	14,167	14,209	14,251
350	14,293	14,335	14,377	14,419	14,461	14,503	14,545	14,587	14,629	14,671
360	14,713	14,755	14,797	14,839	14,881	14,923	14,965	15,007	15,049	15,091
370	15,133	15,175	15,217	15,259	15,301	15,343	15,385	15,427	15,469	15,511
380	15,554	15,596	15,638	15,680	15,722	15,764	15,806	15,849	15,891	15,933
390	15,975	16,017	16,059	16,102	16,144	16,186	16,228	16,270	16,313	16,355
400	16,397	16,439	16,482	16,524	16,566	16,608	16,651	16,693	16,735	16,778
410	16,820	16,862	16,904	16,947	16,989	17,031	17,074	17,116	17,158	17,201
420	17,243	17,285	17,328	17,370	17,413	17,455	17,497	17,540	17,582	17,624
430	17,667	17,709	17,752	17,794	17,837	17,879	17,921	17,964	18,006	18,049

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
440	18,091	18,134	18,176	18,218	18,261	18,303	18,346	18,388	18,431	18,473
450	18,516	18,558	18,601	18,643	18,686	18,728	18,771	18,813	18,856	18,898
460	18,941	18,983	19,026	19,068	19,111	19,154	19,196	19,239	19,281	19,324
470	19,366	19,409	19,451	19,494	19,537	19,579	19,622	19,664	19,707	19,750
480	19,792	19,835	19,877	19,920	19,962	20,005	20,048	20,090	20,133	20,175
490	20,218	20,261	20,303	20,346	20,389	20,431	20,474	20,516	20,559	20,602
500	20,644	20,687	20,730	20,772	20,815	20,857	20,900	20,943	20,985	21,028
510	21,071	21,113	21,156	21,199	21,241	21,284	21,326	21,369	21,412	21,454
520	21,497	21,540	21,582	21,625	21,668	21,710	21,753	21,796	21,838	21,881
530	21,924	21,966	22,009	22,052	22,094	22,137	22,179	22,222	22,265	22,307
540	22,350	22,393	22,435	22,478	22,521	22,563	22,606	22,649	22,691	22,734
550	22,776	22,819	22,862	22,904	22,947	22,990	23,032	23,075	23,117	23,160
560	23,203	23,245	23,288	23,331	23,373	23,416	23,458	23,501	23,544	23,586
570	23,629	23,671	23,714	23,757	23,799	23,842	23,884	23,927	23,970	24,012
580	24,055	24,097	24,140	24,182	24,225	24,267	24,310	24,353	24,395	24,438
590	24,480	24,523	24,565	24,608	24,650	24,693	24,735	24,778	24,820	24,863
600	24,905	24,948	24,990	25,033	25,075	25,118	25,160	25,203	25,245	25,288
610	25,330	25,373	25,415	25,458	25,500	25,543	25,585	25,627	25,670	25,712
620	25,755	25,797	25,840	25,882	25,924	25,967	26,009	26,052	26,094	26,136
630	26,179	26,221	26,263	26,306	26,348	26,390	26,433	26,475	26,517	26,560
640	26,602	26,644	26,687	26,729	26,771	26,814	26,856	26,898	26,940	26,983
650	27,025	27,067	27,109	27,152	27,194	27,236	27,278	27,320	27,363	27,405
660	27,447	27,489	27,531	27,574	27,616	27,658	27,700	27,742	27,784	27,826
670	27,869	27,911	27,953	27,995	28,037	28,079	28,121	28,163	28,205	28,247

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
680	28,289	28,332	28,374	28,416	28,458	28,500	28,542	28,584	28,626	28,668
690	28,710	28,752	28,794	28,835	28,877	28,919	28,961	29,003	29,045	29,087
700	29,129	29,171	29,213	29,255	29,297	29,338	29,380	29,422	29,464	29,506
710	29,548	29,589	29,631	29,673	29,715	29,757	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,090	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,382	30,424	30,466	30,507	30,549	30,590	30,632	30,674	30,715	30,757
740	30,798	30,840	30,881	30,923	30,964	31,006	31,047	31,089	31,130	31,172
750	31,213	31,255	31,296	31,338	31,379	31,421	31,462	31,504	31,545	31,586
760	31,628	31,669	31,710	31,752	31,793	31,834	31,876	31,917	31,958	32,000
770	32,041	32,082	32,124	32,165	32,206	32,247	32,289	32,330	32,371	32,412
780	32,453	32,495	32,536	32,577	32,618	32,659	32,700	32,742	32,783	32,824
790	32,865	32,906	32,947	32,988	33,029	33,070	33,111	33,152	33,193	33,234
800	33,275	33,316	33,357	33,398	33,439	33,480	33,521	33,562	33,603	33,644
810	33,685	33,726	33,767	33,808	33,848	33,889	33,930	33,971	34,012	34,053
820	34,093	34,134	34,175	34,216	34,257	34,297	34,338	34,379	34,420	34,460
830	34,501	34,542	34,582	34,623	34,664	34,704	34,745	34,786	34,826	34,867
840	34,908	34,948	34,989	35,029	35,070	35,110	35,151	35,192	35,232	35,273
850	35,313	35,354	35,394	35,435	35,475	35,516	35,556	35,596	35,637	35,677
860	35,718	35,758	35,798	35,839	35,879	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,484
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,685	36,725	36,765	36,805	36,845	36,885
890	36,925	36,965	37,006	37,046	37,086	37,126	37,166	37,206	37,246	37,286
900	37,326	37,366	37,406	37,446	37,486	37,526	37,566	37,606	37,646	37,686
910	37,725	37,765	37,805	37,845	37,885	37,925	37,965	38,005	38,044	38,084

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
920	38,124	38,164	38,204	38,243	38,283	38,323	38,363	38,402	38,442	38,482
930	38,522	38,561	38,601	38,641	38,680	38,720	38,760	38,799	38,839	38,878
940	38,918	38,958	38,997	39,037	39,076	39,116	39,155	39,195	39,235	39,274
950	39,314	39,353	39,393	39,432	39,471	39,511	39,550	39,590	39,629	39,669
960	39,708	39,747	39,787	39,826	39,866	39,905	39,944	39,984	40,023	40,062
970	40,101	40,141	40,180	40,219	40,259	40,298	40,337	40,376	40,415	40,455
980	40,494	40,533	40,572	40,611	40,651	40,690	40,729	40,768	40,807	40,846
990	40,885	40,924	40,963	41,002	41,042	41,081	41,120	41,159	41,198	41,237
1000	41,276	41,315	41,354	41,393	41,431	41,470	41,509	41,548	41,587	41,626
1010	41,665	41,704	41,743	41,781	41,820	41,859	41,898	41,937	41,976	42,014
1020	42,053	42,092	42,131	42,169	42,208	42,247	42,286	42,324	42,363	42,402
1030	42,440	42,479	42,518	42,556	42,595	42,633	42,672	42,711	42,749	42,788
1040	42,826	42,865	42,903	42,942	42,980	43,019	43,057	43,096	43,134	43,173
1050	43,211	43,250	43,288	43,327	43,365	43,403	43,442	43,480	43,518	43,557
1060	43,595	43,633	43,672	43,710	43,748	43,787	43,825	43,863	43,901	43,940
1070	43,978	44,016	44,054	44,092	44,130	44,169	44,207	44,245	44,283	44,321
1080	44,359	44,397	44,435	44,473	44,512	44,550	44,588	44,626	44,664	44,702
1090	44,740	44,778	44,816	44,853	44,891	44,929	44,967	45,005	45,043	45,081
1100	45,119	45,157	45,194	45,232	45,270	45,308	45,346	45,383	45,421	45,459
1110	45,497	45,534	45,572	45,610	45,647	45,685	45,723	45,760	45,798	45,836
1120	45,873	45,911	45,948	45,986	46,024	46,061	46,099	46,136	46,174	46,211
1130	46,249	46,286	46,324	46,361	46,398	46,436	46,473	46,511	46,548	46,585
1140	46,623	46,660	46,697	46,735	46,772	46,809	46,847	46,884	46,921	46,958
1150	46,995	47,033	47,070	47,107	47,144	47,181	47,218	47,256	47,293	47,330

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1160	47,367	47,404	47,441	47,478	47,515	47,552	47,589	47,626	47,663	47,700
1170	47,737	47,774	47,811	47,848	47,884	47,921	47,958	47,995	48,032	48,069
1180	48,105	48,142	48,179	48,216	48,252	48,289	48,326	48,363	48,399	48,436
1190	48,473	48,509	48,546	48,582	48,619	48,656	48,692	48,729	48,765	48,802
1200	48,838	48,875	48,911	48,948	48,984	49,021	49,057	49,093	49,130	49,166
1210	49,202	49,239	49,275	49,311	49,348	49,384	49,420	49,456	49,493	49,529
1220	49,565	49,601	49,637	49,674	49,710	49,746	49,782	49,818	49,854	49,890
1230	49,926	49,962	49,998	50,034	50,070	50,106	50,142	50,178	50,214	50,250
1240	50,286	50,322	50,358	50,393	50,429	50,465	50,501	50,537	50,572	50,608
1250	50,644	50,680	50,715	50,751	50,787	50,822	50,858	50,894	50,929	50,965
1260	51,000	51,036	51,071	51,107	51,142	51,178	51,213	51,249	51,284	51,320
1270	51,355	51,391	51,426	51,461	51,497	51,532	51,567	51,603	51,638	51,673
1280	51,708	51,744	51,779	51,814	51,849	51,885	51,920	51,955	51,990	52,025
1290	52,060	52,095	52,130	52,165	52,200	52,235	52,270	52,305	52,340	52,375
1300	52,410	52,445	52,480	52,515	52,550	52,585	52,620	52,654	52,689	52,724
1310	52,759	52,794	52,828	52,863	52,898	52,932	52,967	53,002	53,037	53,071
1320	53,106	53,140	53,175	53,210	53,244	53,279	53,313	53,348	53,382	53,417
1330	53,451	53,486	53,520	53,555	53,589	53,623	53,658	53,692	53,727	53,761
1340	53,795	53,830	53,864	53,898	53,932	53,967	54,001	54,035	54,069	54,104
1350	54,138	54,172	54,206	54,240	54,274	54,308	54,343	54,377	54,411	54,445
1360	54,479	54,513	54,547	54,581	54,615	54,649	54,683	54,717	54,751	54,785
1370	54,819									

**ПРИЛОЖЕНИЕ П6**

*Номинальная статическая характеристика термопары типа ТПП (S)*

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-0,236									
-40	-0,194	-0,199	-0,203	-0,207	-0,211	-0,215	-0,219	-0,224	-0,228	-0,232
-30	-0,150	-0,155	-0,159	-0,164	-0,168	-0,173	-0,177	-0,181	-0,186	-0,190
-20	-0,103	-0,108	-0,113	-0,117	-0,122	-0,127	-0,132	-0,136	-0,141	-0,146
-10	-0,053	-0,058	-0,063	-0,068	-0,073	-0,078	-0,083	-0,088	-0,093	-0,098
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,027	-0,032	-0,037	-0,042	-0,048
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,050
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,204	0,210	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,248	0,254	0,260	0,267	0,273	0,280	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,319	0,325	0,332	0,338	0,345	0,352	0,358
60	0,365	0,372	0,378	0,385	0,392	0,399	0,405	0,412	0,419	0,426
70	0,433	0,440	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,538	0,545	0,552	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,588	0,595	0,602	0,609	0,617	0,624	0,631	0,639
100	0,646	0,653	0,661	0,668	0,675	0,683	0,690	0,698	0,705	0,713
110	0,720	0,727	0,735	0,743	0,750	0,758	0,765	0,773	0,780	0,788
120	0,795	0,803	0,811	0,818	0,826	0,834	0,841	0,849	0,857	0,865
130	0,872	0,880	0,888	0,896	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,974	0,982	0,990	0,998	1,006	1,013	1,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,094	1,102

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
160	1,110	1,118	1,126	1,134	1,142	1,150	1,158	1,167	1,175	1,183
170	1,191	1,199	1,207	1,216	1,224	1,232	1,240	1,249	1,257	1,265
180	1,273	1,282	1,290	1,298	1,307	1,315	1,323	1,332	1,340	1,348
190	1,357	1,365	1,373	1,382	1,390	1,399	1,407	1,415	1,424	1,432
200	1,441	1,449	1,458	1,466	1,475	1,483	1,492	1,500	1,509	1,517
210	1,526	1,534	1,543	1,551	1,560	1,569	1,577	1,586	1,594	1,603
220	1,612	1,620	1,629	1,638	1,646	1,655	1,663	1,672	1,681	1,690
230	1,698	1,707	1,716	1,724	1,733	1,742	1,751	1,759	1,768	1,777
240	1,786	1,794	1,803	1,812	1,821	1,829	1,838	1,847	1,856	1,865
250	1,874	1,882	1,891	1,900	1,909	1,918	1,927	1,936	1,944	1,953
260	1,962	1,971	1,980	1,989	1,998	2,007	2,016	2,025	2,034	2,043
270	2,052	2,061	2,070	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132
280	2,141	2,151	2,160	2,169	2,178	2,187	2,196	2,205	2,214	2,223
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,287	2,296	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,360	2,369	2,378	2,387	2,396	2,405
310	2,415	2,424	2,433	2,442	2,451	2,461	2,470	2,479	2,488	2,497
320	2,507	2,516	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,609	2,618	2,627	2,636	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,702	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,776
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,823	2,833	2,842	2,851	2,861	2,870
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,917	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,983	2,993	3,002	3,012	3,021	3,031	3,040	3,050	3,059
380	3,069	3,078	3,088	3,097	3,107	3,116	3,126	3,135	3,145	3,154
390	3,164	3,173	3,183	3,192	3,202	3,212	3,221	3,231	3,240	3,250

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
400	3,259	3,269	3,279	3,288	3,298	3,307	3,317	3,326	3,336	3,346
410	3,355	3,365	3,374	3,384	3,394	3,403	3,413	3,423	3,432	3,442
420	3,451	3,461	3,471	3,480	3,490	3,500	3,509	3,519	3,529	3,538
430	3,548	3,558	3,567	3,577	3,587	3,596	3,606	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,664	3,674	3,684	3,694	3,703	3,713	3,723	3,732
450	3,742	3,752	3,762	3,771	3,781	3,791	3,801	3,810	3,820	3,830
460	3,840	3,850	3,859	3,869	3,879	3,889	3,898	3,908	3,918	3,928
470	3,938	3,947	3,957	3,967	3,977	3,987	3,997	4,006	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,065	4,075	4,085	4,095	4,105	4,115	4,125
490	4,134	4,144	4,154	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,213	4,223
500	4,233	4,243	4,253	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,332	4,342	4,352	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,793	4,803	4,813	4,823
560	4,833	4,843	4,853	4,863	4,873	4,883	4,893	4,904	4,914	4,924
570	4,934	4,944	4,954	4,964	4,974	4,984	4,995	5,005	5,015	5,025
580	5,035	5,045	5,055	5,066	5,076	5,086	5,096	5,106	5,116	5,127
590	5,137	5,147	5,157	5,167	5,178	5,188	5,198	5,208	5,218	5,228
600	5,239	5,249	5,259	5,269	5,280	5,290	5,300	5,310	5,320	5,331
610	5,341	5,351	5,361	5,372	5,382	5,392	5,402	5,413	5,423	5,433
620	5,443	5,454	5,464	5,474	5,485	5,495	5,505	5,515	5,526	5,536
630	5,546	5,557	5,567	5,577	5,588	5,598	5,608	5,618	5,629	5,639



Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
640	5,649	5,660	5,670	5,680	5,691	5,701	5,712	5,722	5,732	5,743
650	5,753	5,763	5,774	5,784	5,794	5,805	5,815	5,826	5,836	5,846
660	5,857	5,867	5,878	5,888	5,898	5,909	5,919	5,930	5,940	5,950
670	5,961	5,971	5,982	5,992	6,003	6,013	6,024	6,034	6,044	6,055
680	6,065	6,076	6,086	6,097	6,107	6,118	6,128	6,139	6,149	6,160
690	6,170	6,181	6,191	6,202	6,212	6,223	6,233	6,244	6,254	6,265
700	6,275	6,286	6,296	6,307	6,317	6,328	6,338	6,349	6,360	6,370
710	6,381	6,391	6,402	6,412	6,423	6,434	6,444	6,455	6,465	6,476
720	6,486	6,497	6,508	6,518	6,529	6,539	6,550	6,561	6,571	6,582
730	6,593	6,603	6,614	6,624	6,635	6,646	6,656	6,667	6,678	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,742	6,752	6,763	6,774	6,784	6,795
750	6,806	6,817	6,827	6,838	6,849	6,859	6,870	6,881	6,892	6,902
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,956	6,967	6,977	6,988	6,999	7,010
770	7,020	7,031	7,042	7,053	7,064	7,074	7,085	7,096	7,107	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,161	7,172	7,182	7,193	7,204	7,215	7,226
790	7,236	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,312	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,378	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,487	7,497	7,508	7,519	7,530	7,541	7,552
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,651	7,662
830	7,673	7,684	7,695	7,706	7,717	7,728	7,739	7,750	7,761	7,772
840	7,783	7,794	7,805	7,816	7,827	7,838	7,849	7,860	7,871	7,882
850	7,893	7,904	7,915	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992
860	8,003	8,014	8,026	8,037	8,048	8,059	8,070	8,081	8,092	8,103
870	8,114	8,125	8,137	8,148	8,159	8,170	8,181	8,192	8,203	8,214

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
880	8,226	8,237	8,248	8,259	8,270	8,281	8,293	8,304	8,315	8,326
890	8,337	8,348	8,360	8,371	8,382	8,393	8,404	8,416	8,427	8,438
900	8,449	8,460	8,472	8,483	8,494	8,505	8,517	8,528	8,539	8,550
910	8,562	8,573	8,584	8,595	8,607	8,618	8,629	8,640	8,652	8,663
920	8,674	8,685	8,697	8,708	8,719	8,731	8,742	8,753	8,765	8,776
930	8,787	8,798	8,810	8,821	8,832	8,844	8,855	8,866	8,878	8,889
940	8,900	8,912	8,923	8,935	8,946	8,957	8,969	8,980	8,991	9,003
950	9,014	9,025	9,037	9,048	9,060	9,071	9,082	9,094	9,105	9,117
960	9,128	9,139	9,151	9,162	9,174	9,185	9,197	9,208	9,219	9,231
970	9,242	9,254	9,265	9,277	9,288	9,300	9,311	9,323	9,334	9,345
980	9,357	9,368	9,380	9,391	9,403	9,414	9,426	9,437	9,449	9,460
990	9,472	9,483	9,495	9,506	9,518	9,529	9,541	9,552	9,564	9,576
1000	9,587	9,599	9,610	9,622	9,633	9,645	9,656	9,668	9,680	9,691
1010	9,703	9,714	9,726	9,737	9,749	9,761	9,772	9,784	9,795	9,807
1020	9,819	9,830	9,842	9,853	9,865	9,877	9,888	9,900	9,911	9,923
1030	9,935	9,946	9,958	9,970	9,981	9,993	10,005	10,016	10,028	10,040
1040	10,051	10,063	10,075	10,086	10,098	10,110	10,121	10,133	10,145	10,156
1050	10,168	10,180	10,191	10,203	10,215	10,227	10,238	10,250	10,262	10,273
1060	10,285	10,297	10,309	10,320	10,332	10,344	10,356	10,367	10,379	10,391
1070	10,403	10,414	10,426	10,438	10,450	10,461	10,473	10,485	10,497	10,509
1080	10,520	10,532	10,544	10,556	10,567	10,579	10,591	10,603	10,615	10,626
1090	10,638	10,650	10,662	10,674	10,686	10,697	10,709	10,721	10,733	10,745
1100	10,757	10,768	10,780	10,792	10,804	10,816	10,828	10,839	10,851	10,863
1110	10,875	10,887	10,899	10,911	10,922	10,934	10,946	10,958	10,970	10,982

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1120	10,994	11,006	11,017	11,029	11,041	11,053	11,065	11,077	11,089	11,101
1130	11,113	11,125	11,136	11,148	11,160	11,172	11,184	11,196	11,208	11,220
1140	11,232	11,244	11,256	11,268	11,280	11,291	11,303	11,315	11,327	11,339
1150	11,351	11,363	11,375	11,387	11,399	11,411	11,423	11,435	11,447	11,459
1160	11,471	11,483	11,495	11,507	11,519	11,531	11,542	11,554	11,566	11,578
1170	11,590	11,602	11,614	11,626	11,638	11,650	11,662	11,674	11,686	11,698
1180	11,710	11,722	11,734	11,746	11,758	11,770	11,782	11,794	11,806	11,818
1190	11,830	11,842	11,854	11,866	11,878	11,890	11,902	11,914	11,926	11,939
1200	11,951	11,963	11,975	11,987	11,999	12,011	12,023	12,035	12,047	12,059
1210	12,071	12,083	12,095	12,107	12,119	12,131	12,143	12,155	12,167	12,179
1220	12,191	12,203	12,216	12,228	12,240	12,252	12,264	12,276	12,288	12,300
1230	12,312	12,324	12,336	12,348	12,360	12,372	12,384	12,397	12,409	12,421
1240	12,433	12,445	12,457	12,469	12,481	12,493	12,505	12,517	12,529	12,542
1250	12,554	12,566	12,578	12,590	12,602	12,614	12,626	12,638	12,650	12,662
1260	12,675	12,687	12,699	12,711	12,723	12,735	12,747	12,759	12,771	12,783
1270	12,796	12,808	12,820	12,832	12,844	12,856	12,868	12,880	12,892	12,905
1280	12,917	12,929	12,941	12,953	12,965	12,977	12,989	13,001	13,014	13,026
1290	13,038	13,050	13,062	13,074	13,086	13,098	13,111	13,123	13,135	13,147
1300	13,159	13,171	13,183	13,195	13,208	13,220	13,232	13,244	13,256	13,268
1310	13,280	13,292	13,305	13,317	13,329	13,341	13,353	13,365	13,377	13,390
1320	13,402	13,414	13,426	13,438	13,450	13,462	13,474	13,487	13,499	13,511
1330	13,523	13,535	13,547	13,559	13,572	13,584	13,596	13,608	13,620	13,632
1340	13,644	13,657	13,669	13,681	13,693	13,705	13,717	13,729	13,742	13,754
1350	13,766	13,778	13,790	13,802	13,814	13,826	13,839	13,851	13,863	13,875

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1360	13,887	13,899	13,911	13,924	13,936	13,948	13,960	13,972	13,984	13,996
1370	14,009	14,021	14,033	14,045	14,057	14,069	14,081	14,094	14,106	14,118
1380	14,130	14,142	14,154	14,166	14,178	14,191	14,203	14,215	14,227	14,239
1390	14,251	14,263	14,276	14,288	14,300	14,312	14,324	14,336	14,348	14,360
1400	14,373	14,385	14,397	14,409	14,421	14,433	14,445	14,457	14,470	14,482
1410	14,494	14,506	14,518	14,530	14,542	14,554	14,567	14,579	14,591	14,603
1420	14,615	14,627	14,639	14,651	14,664	14,676	14,688	14,700	14,712	14,724
1430	14,736	14,748	14,760	14,773	14,785	14,797	14,809	14,821	14,833	14,845
1440	14,857	14,869	14,881	14,894	14,906	14,918	14,930	14,942	14,954	14,966
1450	14,978	14,990	15,002	15,015	15,027	15,039	15,051	15,063	15,075	15,087
1460	15,099	15,111	15,123	15,135	15,148	15,160	15,172	15,184	15,196	15,208
1470	15,220	15,232	15,244	15,256	15,268	15,280	15,292	15,304	15,317	15,329
1480	15,341	15,353	15,365	15,377	15,389	15,401	15,413	15,425	15,437	15,449
1490	15,461	15,473	15,485	15,497	15,509	15,521	15,534	15,546	15,558	15,570
1500	15,582	15,594	15,606	15,618	15,630	15,642	15,654	15,666	15,678	15,690
1510	15,702	15,714	15,726	15,738	15,750	15,762	15,774	15,786	15,798	15,810
1520	15,822	15,834	15,846	15,858	15,870	15,882	15,894	15,906	15,918	15,930
1530	15,942	15,954	15,966	15,978	15,990	16,002	16,014	16,026	16,038	16,050
1540	16,062	16,074	16,086	16,098	16,110	16,122	16,134	16,146	16,158	16,170
1550	16,182	16,194	16,205	16,217	16,229	16,241	16,253	16,265	16,277	16,289
1560	16,301	16,313	16,325	16,337	16,349	16,361	16,373	16,385	16,396	16,408
1570	16,420	16,432	16,444	16,456	16,468	16,480	16,492	16,504	16,516	16,527
1580	16,539	16,551	16,563	16,575	16,587	16,599	16,611	16,623	16,634	16,646
1590	16,658	16,670	16,682	16,694	16,706	16,718	16,729	16,741	16,753	16,765

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1600	16,777	16,789	16,801	16,812	16,824	16,836	16,848	16,860	16,872	16,883
1610	16,895	16,907	16,919	16,931	16,943	16,954	16,966	16,978	16,990	17,002
1620	17,013	17,025	17,037	17,049	17,061	17,072	17,084	17,096	17,108	17,120
1630	17,131	17,143	17,155	17,167	17,178	17,190	17,202	17,214	17,225	17,237
1640	17,249	17,261	17,272	17,284	17,296	17,308	17,319	17,331	17,343	17,355
1650	17,366	17,378	17,390	17,401	17,413	17,425	17,437	17,448	17,460	17,472
1660	17,483	17,495	17,507	17,518	17,530	17,542	17,553	17,565	17,577	17,588

**ПРИЛОЖЕНИЕ П7**

*Номинальная статическая характеристика терморпары типа ТВР (А)*

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,074	0,087	0,099	0,111
10	0,124	0,136	0,149	0,161	0,174	0,186	0,199	0,211	0,224	0,237
20	0,250	0,263	0,275	0,288	0,301	0,314	0,327	0,339	0,352	0,365
30	0,378	0,391	0,404	0,417	0,430	0,443	0,456	0,469	0,482	0,495
40	0,508	0,521	0,534	0,548	0,561	0,574	0,587	0,600	0,613	0,627
50	0,640	0,653	0,666	0,680	0,693	0,707	0,720	0,734	0,747	0,761
60	0,774	0,788	0,801	0,815	0,828	0,842	0,855	0,869	0,882	0,896
70	0,910	0,924	0,938	0,951	0,965	0,979	0,993	1,007	1,020	1,034
80	1,048	1,062	1,076	1,090	1,104	1,118	1,132	1,146	1,160	1,174
90	1,188	1,202	1,216	1,231	1,245	1,259	1,273	1,287	1,302	1,316
100	1,330	1,344	1,359	1,373	1,388	1,402	1,417	1,431	1,446	1,460
110	1,475	1,489	1,504	1,519	1,534	1,548	1,563	1,578	1,593	1,607
120	1,622	1,637	1,652	1,667	1,682	1,697	1,711	1,726	1,741	1,756
130	1,771	1,786	1,801	1,816	1,831	1,846	1,862	1,877	1,892	1,907
140	1,922	1,937	1,953	1,968	1,983	1,998	2,014	2,029	2,044	2,059
150	2,075	2,090	2,106	2,121	2,137	2,152	2,168	2,183	2,199	2,214
160	2,230	2,246	2,261	2,277	2,293	2,308	2,324	2,340	2,355	2,371
170	2,387	2,403	2,419	2,435	2,451	2,466	2,482	2,498	2,514	2,530
180	2,546	2,562	2,588	2,594	2,610	2,626	2,643	2,659	2,675	2,691
190	2,707	2,723	2,739	2,755	2,772	2,788	2,804	2,820	2,836	2,853
200	2,869	2,885	2,901	2,918	2,934	2,950	2,967	2,983	2,999	3,016

210	3,032	3,048	3,065	3,081	3,097	3,114	3,130	3,146	3,163	3,179
220	3,195	3,212	3,228	3,244	3,261	3,277	3,293	3,310	3,326	3,342
230	3,359	3,375	3,391	3,408	3,424	3,441	3,457	3,474	3,490	3,507
240	3,523	3,540	3,556	3,573	3,589	3,606	3,622	3,639	3,655	3,672
250	3,688	3,705	3,721	3,738	3,754	3,771	3,787	3,804	3,820	3,837
260	3,853	3,807	3,886	3,903	3,919	3,936	3,952	3,969	3,985	4,002
270	4,019	4,035	4,052	4,069	4,085	4,102	4,119	4,135	4,152	4,169
280	4,185	4,202	4,219	4,235	4,252	4,269	4,285	4,302	4,319	4,335
290	4,352	4,369	4,385	4,402	4,419	4,435	4,452	4,469	4,485	4,502
300	4,519	4,536	4,553	4,569	4,586	4,603	4,620	4,637	4,653	4,670
310	4,687	4,704	4,721	4,737	4,754	4,771	4,788	4,805	4,821	4,838
320	4,855	4,872	4,889	4,906	4,923	4,939	4,956	4,973	4,990	5,007
330	5,024	5,041	5,058	5,075	5,092	5,108	5,125	5,142	5,159	5,176
340	5,193	5,210	5,227	5,244	5,261	5,277	5,294	5,311	5,328	5,345
350	5,362	5,379	5,396	5,413	5,430	5,446	5,463	5,480	5,497	5,514
360	5,531	5,548	5,565	5,582	5,599	5,615	5,632	5,649	5,666	5,683
370	5,700	5,717	5,734	5,751	5,768	5,784	5,801	5,818	5,835	5,852
380	5,869	5,886	5,903	5,920	5,937	5,954	5,971	5,988	6,005	6,022
390	6,039	6,056	6,073	6,090	6,107	6,124	6,141	6,158	6,175	6,192
400	6,209	6,226	6,243	6,260	6,277	6,194	6,311	6,328	6,345	6,362
410	6,379	6,396	6,413	6,430	6,447	6,464	6,481	6,498	6,515	6,532
420	6,549	6,566	6,583	6,600	6,617	6,634	6,651	6,668	6,685	6,702
430	6,719	6,736	6,753	6,77	6,787	6,804	6,821	6,838	6,885	6,872
440	6,884	6,906	6,923	6,940	6,957	6,974	6,991	7,008	7,025	7,042
450	7,059	7,076	7,093	7,110	7,127	7,144	7,161	7,178	7,195	7,212
460	7,229	7,246	7,263	7,280	7,297	7,314	7,331	7,348	7,365	7,382
470	7,399	7,416	7,433	7,450	7,467	7,484	7,501	7,518	7,535	7,552

480	7,569	7,586	7,603	7,620	7,637	7,654	7,671	7,688	7,705	7,222
490	7,739	7,756	7,773	7,790	7,807	7,824	7,841	7,858	7,875	7,982
500	7,909	7,926	7,943	7,960	7,977	7,994	8,010	8,027	8,044	8,061
510	8,078	8,095	8,112	8,129	8,146	8,163	8,180	8,196	8,213	8,230
520	8,247	8,264	8,281	8,298	8,315	8,332	8,348	8,365	8,382	8,399
530	8,416	8,433	8,450	8,467	8,484	8,501	8,517	8,534	8,551	8,568
540	8,585	8,602	8,619	8,636	8,653	8,670	8,686	8,703	8,720	8,737
550	8,754	8,771	8,788	8,805	8,822	8,839	8,855	8,872	8,889	8,906
560	8,923	8,940	8,957	8,974	8,991	9,008	9,024	9,041	9,058	9,075
570	9,092	9,109	9,126	9,143	9,160	9,177	9,193	9,210	9,227	9,244
580	9,261	9,278	9,295	9,312	9,329	9,346	9,362	9,379	9,396	9,413
590	9,430	9,446	9,463	9,480	9,497	9,514	9,531	9,548	9,565	9,582
600	9,598	9,615	9,632	9,648	9,665	9,682	9,698	9,715	9,732	9,748
610	9,765	9,782	9,799	9,815	9,832	9,849	9,866	9,882	9,899	9,916
620	9,933	9,950	9,966	9,983	10,000	10,017	10,034	10,050	10,067	10,084
630	10,101	10,118	10,134	10,151	10,168	10,185	10,202	10,218	10,235	10,252
640	10,269	10,286	10,302	10,319	10,336	10,353	10,370	10,386	10,403	10,420
650	10,437	10,454	10,470	10,487	10,504	10,521	10,538	10,554	10,571	10,588
660	10,605	10,622	10,638	10,655	10,672	10,688	10,705	10,722	10,738	10,755
670	10,772	10,789	10,805	10,822	10,839	10,855	10,872	10,889	10,905	10,922
680	10,939	10,956	10,972	10,989	11,006	11,022	11,039	11,056	11,072	11,089
690	11,106	11,123	11,139	11,156	11,173	11,189	11,206	11,223	11,239	11,256
700	11,273	11,290	11,306	11,323	11,340	11,356	11,373	11,390	11,406	11,423
710	11,440	11,456	11,473	11,490	11,506	11,523	11,540	11,556	11,573	11,590
720	11,606	11,622	11,639	11,656	11,672	11,689	11,706	11,722	11,739	11,756
730	11,772	11,788	11,805	11,822	11,838	11,855	11,872	11,888	11,905	11,922
740	11,939	11,954	11,971	11,988	12,004	12,021	12,038	12,054	12,071	12,088



750	12,104	12,121	12,137	12,154	12,170	12,187	12,203	12,220	12,236	12,253
760	12,269	12,286	12,302	12,319	12,335	12,352	12,368	12,385	12,401	12,418
770	12,434	12,451	12,467	12,484	12,500	12,517	12,533	12,550	12,566	12,583
780	12,599	12,616	12,632	12,649	12,665	12,682	12,698	12,715	12,731	12,748
790	12,764	12,781	12,797	12,814	12,830	12,847	12,863	12,880	12,896	12,913
800	12,929	12,945	12,962	12,978	12,995	13,011	13,027	13,044	13,060	13,077
810	13,093	13,109	13,126	13,142	13,159	13,175	13,191	13,208	13,224	13,241
820	13,257	13,273	13,290	13,306	13,323	13,339	13,355	13,372	13,388	13,405
830	13,421	13,437	13,453	13,470	13,486	13,502	13,519	13,535	13,551	13,568
840	13,584	13,600	13,616	13,633	13,659	13,665	13,682	13,698	13,714	13,731
850	13,747	13,763	13,779	13,796	13,812	13,828	13,845	13,861	13,877	13,894
860	13,910	13,926	13,942	13,959	13,975	13,991	14,007	14,023	14,040	14,056
870	14,072	14,088	14,104	14,121	14,137	14,153	14,169	14,185	14,202	14,218
880	14,234	14,250	14,266	14,282	14,298	14,314	14,331	14,347	14,363	14,379
890	14,395	14,411	14,427	14,443	14,459	14,475	14,392	14,508	14,524	14,540
900	14,556	14,572	14,588	14,604	14,620	14,636	14,652	14,668	14,684	14,700
910	14,716	14,732	14,748	14,754	14,780	14,796	14,812	14,828	14,844	14,860
920	14,876	14,892	14,908	14,924	14,940	14,956	14,971	14,987	15,003	15,019
930	15,035	15,051	15,067	15,083	15,099	15,115	15,130	15,146	15,162	15,178
940	15,194	15,210	15,226	15,241	15,257	15,273	15,289	15,305	15,320	15,336
950	15,352	15,368	15,384	15,399	15,415	15,431	15,447	15,463	15,478	15,494
960	15,510	15,526	15,542	15,557	15,572	15,588	15,603	15,619	15,635	15,651
970	15,665	15,683	15,698	15,714	15,730	15,745	15,761	15,777	15,792	15,808
980	15,824	15,839	15,855	15,871	15,886	15,902	15,918	15,933	15,949	15,965
990	15,980	15,995	16,011	16,027	16,042	16,058	16,074	16,089	16,105	16,121
1000	16,136	16,152	16,167	16,183	16,198	16,214	16,229	16,245	16,260	16,276
1010	16,291	16,307	16,322	16,338	16,353	16,369	16,384	16,400	16,415	16,431

1020	16,446	16,462	16,477	16,492	16,508	16,523	16,538	16,554	16,569	16,584
1030	16,600	16,616	16,631	16,646	16,662	16,677	16,692	16,708	16,723	16,738
1040	16,754	16,769	16,784	16,800	16,815	16,830	16,846	16,861	16,876	16,892
1050	16,907	16,922	16,938	16,953	10,968	10,984	16,999	17,014	17,030	17,045
1060	17,060	17,075	17,090	17,106	17,121	17,136	17,151	17,166	17,182	17,197
1070	17,212	17,227	17,242	17,258	17,273	17,288	17,303	17,318	17,334	17,349
1080	17,364	17,379	17,394	17,409	17,424	17,439	17,455	17,470	17,485	17,500
1090	17,515	17,530	17,545	17,560	17,575	17,590	17,606	17,621	17,636	17,651
1100	17,666	17,681	17,696	17,711	17,726	17,741	17,756	17,771	17,786	17,801
1110	17,816	17,831	17,846	17,861	17,876	17,891	17,906	17,921	17,936	17,951
1120	17,966	17,981	17,996	18,011	18,026	18,041	18,055	18,070	18,085	18,100
1130	18,115	18,130	18,145	18,160	18,175	18,190	18,204	18,219	18,234	18,249
1140	18,264	18,279	18,294	18,308	18,323	18,338	18,353	18,368	18,382	18,397
1150	18,412	18,427	18,442	18,456	18,471	18,486	18,501	18,516	18,530	18,545
1160	18,560	18,575	18,589	18,604	18,619	18,634	18,648	18,663	18,678	18,693
1170	18,707	18,722	18,737	18,751	18,766	18,781	18,795	18,810	18,825	18,839
1180	18,854	18,869	18,883	18,898	18,913	18,927	18,942	18,957	18,971	18,986
1190	19,000	19,015	19,029	19,044	19,059	19,073	19,088	19,103	19,117	19,132
1200	19,146	19,161	19,175	19,190	19,204	19,219	19,233	19,248	19,262	19,277
1210	19,291	19,306	19,320	19,335	19,349	19,364	19,378	19,393	19,407	19,422
1220	19,436	19,450	19,465	19,479	19,493	19,508	19,522	19,536	19,551	19,565
1230	19,580	19,594	19,609	19,623	19,637	19,652	19,666	19,680	19,695	19,709
1240	19,724	19,738	19,752	19,767	19,781	19,795	19,810	19,824	19,838	19,853
1250	19,867	19,881	19,896	19,910	19,924	19,939	19,953	19,967	19,982	19,996
1260	20,010	20,024	20,038	20,053	20,067	20,081	20,095	20,109	20,124	20,138
1270	20,152	20,166	20,180	20,195	20,209	20,223	20,237	20,251	20,266	20,280
1280	20,294	20,308	20,322	20,336	20,350	20,364	20,379	20,393	20,407	20,421

1290	20,435	20,449	20,463	20,477	20,491	20,505	20,520	20,534	20,548	20,562
1300	20,576	20,590	20,604	20,618	20,632	20,646	20,660	20,674	20,688	20,702
1310	20,716	20,730	20,744	20,758	20,772	20,786	20,800	20,814	20,828	20,842
1320	20,856	20,870	20,884	20,898	20,912	20,926	20,940	20,954	20,968	20,982
1330	20,996	21,010	21,024	21,038	21,052	21,066	21,079	21,093	21,107	21,121
1340	21,135	21,149	21,163	21,177	21,191	21,205	21,218	21,232	21,246	21,260
1350	21,264	21,288	21,302	21,316	21,330	21,344	21,357	21,371	21,385	21,399
1360	21,413	21,427	21,441	21,454	21,468	21,482	21,496	21,510	21,523	21,537
1370	21,551	21,565	21,579	21,592	21,606	21,620	21,634	21,648	21,661	21,675
1380	21,689	21,703	21,716	21,730	21,744	21,757	21,771	21,785	21,798	21,812
1390	21,826	21,840	21,853	21,867	21,881	21,894	21,908	21,922	21,935	21,949
1400	21,963	21,976	21,990	22,004	22,017	22,031	22,045	22,058	22,072	22,086
1410	22,099	22,113	22,127	22,140	22,154	22,168	22,181	22,195	22,208	22,222
1420	22,235	22,249	22,262	22,276	22,289	22,303	22,316	22,330	22,343	22,357
1430	22,370	22,384	22,397	22,411	22,424	22,438	22,451	22,465	22,478	22,492
1440	22,505	22,519	22,532	22,545	22,559	22,572	22,585	22,599	22,612	22,625
1450	22,639	22,653	22,666	22,679	22,693	22,706	22,719	22,733	22,746	22,759
1460	22,773	22,786	22,799	22,813	22,826	22,839	22,853	22,866	22,879	22,893
1470	22,906	22,919	22,933	22,946	22,959	22,973	22,986	22,999	23,013	23,026
1480	23,039	23,052	23,065	23,079	23,092	23,105	23,118	23,131	23,145	23,158
1490	23,171	23,184	23,197	23,211	23,224	23,237	23,250	23,263	23,277	23,290
1500	23,303	23,316	23,329	23,342	23,355	23,368	23,382	23,395	23,408	23,421
1510	23,434	23,447	23,460	23,473	23,486	23,499	23,513	23,526	23,539	23,552
1520	23,565	23,578	23,591	23,604	23,617	23,630	23,643	23,656	23,669	23,682
1530	23,695	23,708	23,721	23,734	23,747	23,760	23,773	23,786	23,799	23,812
1540	23,825	23,838	23,851	23,864	23,877	23,890	23,902	23,915	23,928	23,941
1550	23,954	23,967	23,980	23,993	24,006	24,019	24,031	24,044	24,057	24,070

1560	24,083	24,096	24,109	24,121	24,134	24,147	24,160	24,173	24,185	24,198
1570	24,211	24,224	24,237	24,249	24,262	24,275	24,287	24,300	24,313	24,325
1580	24,338	24,350	24,363	24,376	24,388	24,401	24,414	24,426	24,439	24,452
1590	24,464	24,476	24,489	24,502	24,514	24,527	24,540	24,552	24,565	24,578
1600	24,590	24,603	24,615	24,628	24,640	24,653	24,665	24,678	24,690	24,703
1610	24,715	24,728	24,740	24,753	24,765	24,778	24,790	24,803	24,815	24,828
1620	24,840	24,853	24,865	24,877	24,890	24,902	24,914	24,927	24,939	24,951
1630	24,964	24,977	24,989	25,001	25,014	25,026	25,038	25,051	25,063	25,075
1640	25,088	25,100	25,112	25,125	25,137	25,149	25,162	25,174	25,186	25,199
1650	25,211	25,223	25,235	25,248	25,260	25,272	25,285	25,297	25,309	25,322
1660	25,334	25,346	25,358	25,371	25,383	25,395	25,407	25,419	25,432	25,444
1670	25,456	25,468	25,480	25,493	25,505	25,517	25,529	25,541	25,554	25,566
1680	25,578	25,590	25,602	25,614	25,626	25,638	25,651	25,663	25,675	25,687
1690	25,699	25,711	25,723	25,735	25,747	25,759	25,772	25,784	25,796	25,808
1700	25,820	25,832	25,844	25,856	25,868	25,880	25,892	25,904	25,916	25,928
1710	25,940	25,952	25,964	25,976	25,988	26,000	26,012	26,024	26,036	26,048
1720	26,060	26,072	26,084	26,096	26,108	26,120	26,131	26,143	26,155	26,167
1730	26,179	26,191	26,203	26,215	26,227	26,239	26,250	26,262	26,274	26,286
1740	26,298	26,310	26,322	26,333	26,345	26,357	26,369	26,381	26,392	26,404
1750	26,416	26,428	26,440	26,451	26,463	26,475	26,487	26,499	26,510	26,522
1760	26,534	26,546	26,558	26,569	26,581	26,593	26,604	26,616	26,628	26,639
1770	26,651	26,663	26,674	26,686	26,698	26,709	26,721	26,733	26,744	26,756
1780	26,768	26,779	26,791	26,803	26,814	26,826	26,838	26,849	26,861	26,873
1790	26,884	26,896	26,907	26,919	26,930	26,942	26,953	26,965	26,976	26,988
1800	26,999	27,011	27,022	27,033	27,045	27,056	27,067	27,079	27,090	27,101
1810	27,113	27,124	27,135	27,147	27,158	27,169	27,181	27,192	27,203	27,215
1820	27,226	27,237	27,248	27,260	27,271	27,282	27,294	27,305	27,316	27,328

1830	27,339	27,350	27,361	27,372	27,383	27,395	27,406	27,417	27,428	27,439
1840	27,451	27,462	27,473	27,484	27,495	27,507	27,518	27,529	27,540	27,551
1850	27,563	27,574	27,585	27,596	27,607	27,619	27,630	27,641	27,652	27,663
1860	27,675	27,686	27,697	27,708	27,719	27,730	27,742	27,753	27,764	27,775
1870	27,786	27,797	27,808	27,819	27,830	27,841	27,853	27,864	27,875	27,886
1880	27,897	27,908	27,919	27,930	27,941	27,952	27,963	27,974	27,985	27,996
1890	28,007	28,018	28,029	28,040	28,051	28,062	28,073	28,084	28,095	28,106
1900	28,117	28,128	28,139	28,150	28,161	28,171	28,182	28,193	28,204	28,215
1910	28,226	28,237	28,248	28,259	28,270	28,280	28,291	28,302	28,313	28,324
1920	28,334	28,345	28,356	28,367	28,378	28,388	28,399	28,410	28,421	28,432
1930	28,442	28,453	28,464	28,474	28,485	28,496	28,605	28,517	28,528	28,538
1940	28,549	28,560	28,571	28,581	28,592	28,603	28,613	28,624	28,635	28,645
1950	28,656	28,666	28,677	28,688	28,698	28,709	28,720	28,730	28,741	28,752
1960	28,762	28,773	28,783	28,794	28,804	28,815	28,825	28,836	28,846	28,857
1970	28,867	28,877	28,888	28,898	28,909	28,919	28,930	28,940	28,951	28,961
1980	28,971	28,981	28,991	29,002	29,012	29,022	29,033	29,043	29,053	29,064
1990	29,074	29,084	29,094	29,104	29,114	29,125	29,135	29,145	29,155	29,165
2000	29,177	29,187	29,197	29,207	29,217	29,228	29,238	29,248	29,258	29,268
2010	29,279	29,289	29,299	29,309	29,319	29,330	29,340	29,350	29,360	29,370
2020	29,381	29,391	29,401	29,411	29,421	29,432	29,442	29,452	29,462	29,472
2030	29,483	29,493	29,503	29,513	29,523	29,533	29,544	29,554	29,564	29,574
2040	29,584	29,594	29,604	29,614	29,624	29,634	29,645	29,655	29,665	29,675
2050	29,685	29,695	29,705	29,715	29,725	29,735	29,746	29,756	29,766	29,776
2060	29,786	29,796	29,806	29,816	29,826	29,836	29,846	29,856	29,866	29,876
2070	29,886	29,896	29,906	29,916	29,926	29,936	29,946	29,956	29,966	29,976
2080	29,986	29,996	30,006	30,016	30,026	30,036	30,046	30,056	30,066	30,076
2090	30,086	30,096	30,106	30,116	30,126	30,136	30,145	30,155	30,165	30,175

2100	30,185	30,195	30,205	30,215	30,225	30,234	30,244	30,254	30,264	30,274
2110	30,284	30,294	30,304	30,313	30,323	30,333	30,343	30,353	30,362	30,372
2120	30,382	30,392	30,402	30,411	30,421	30,431	30,441	30,451	30,460	30,469
2130	30,479	30,488	30,498	30,508	30,517	30,527	30,537	30,546	30,556	30,566
2140	30,575	30,585	30,594	30,604	30,613	30,623	30,632	30,642	30,651	30,661
2150	30,670	30,680	30,689	30,699	30,708	30,718	30,727	30,737	30,746	30,756
2160	30,765	30,775	30,784	30,793	30,803	30,812	30,821	30,831	30,840	30,849
2170	30,859	30,868	30,877	30,887	30,896	30,905	30,915	30,924	30,933	30,943
2180	30,952	30,961	30,977	30,979	30,988	30,998	31,007	31,016	31,025	31,034
2190	31,044	31,053	31,062	31,071	31,080	31,090	31,099	31,108	31,117	31,126
2200	31,136	31,145	31,154	31,163	31,172	31,181	31,190	31,200	31,209	31,218
2160	30,765	30,775	30,784	30,793	30,803	30,812	30,821	30,831	30,840	30,849
2210	31,227	31,236	31,245	31,254	31,263	31,272	31,282	31,291	31,300	31,309
2220	31,318	31,327	31,336	31,345	31,354	31,363	31,372	31,381	31,390	31,399
2230	31,408	31,417	31,426	31,435	31,444	31,453	31,462	31,471	31,480	31,489
2240	31,498	31,507	31,516	31,525	31,534	31,542	31,551	31,560	31,569	31,578
2250	31,587	31,596	31,605	31,614	31,623	31,631	31,640	31,649	31,658	31,667
2260	31,676	31,685	31,694	31,702	31,711	31,720	31,729	31,738	31,746	31,755
2270	31,764	31,773	31,782	31,791	31,799	31,808	31,817	31,826	31,834	31,843
2280	31,852	31,861	31,870	31,878	31,887	31,896	31,904	31,913	31,921	31,930
2290	31,939	31,948	31,957	31,965	31,974	31,983	31,991	32,000	32,009	32,017
2300	32,026	32,034	32,043	32,052	32,060	32,069	32,078	32,086	32,095	32,104
2310	32,112	32,121	32,129	32,138	32,146	32,155	32,163	32,172	32,180	32,189
2320	32,197	32,206	32,214	32,222	32,231	32,239	32,247	32,256	32,264	32,272
2330	32,281	32,290	32,298	32,306	32,315	32,323	32,331	32,340	32,348	32,356
2340	32,365	32,374	32,383	32,392	32,400	32,408	32,417	32,425	32,433	32,441
2350	32,448	32,456	32,464	32,473	32,481	32,489	32,498	32,506	32,514	32,523

2360	32,531	32,539	32,547	32,555	32,563	32,572	32,580	32,588	32,596	32,604
2370	32,613	32,621	32,639	32,637	32,645	32,654	32,662	32,670	32,678	32,686
2380	32,695	32,703	32,711	32,719	32,727	32,736	32,744	32,752	32,760	32,768
2390	32,776	32,784	32,792	32,800	32,808	32,817	32,825	32,833	32,841	32,849
2400	32,857	32,865	32,873	32,881	32,889	32,897	32,905	32,913	32,921	32,929
2410	32,937	32,945	32,953	32,961	32,969	32,977	32,985	32,993	33,001	33,009
2420	33,017	33,025	33,033	33,041	33,049	33,056	33,064	33,072	33,080	33,088
2430	33,096	33,104	33,112	33,120	33,128	33,135	33,143	33,151	33,159	33,167
2440	33,175	33,183	33,191	33,199	33,207	33,214	33,222	33,230	33,238	33,246
2450	33,253	33,261	33,269	33,277	33,285	33,292	33,300	33,308	33,316	33,324
2460	33,331	33,339	33,347	33,354	33,362	33,370	33,377	33,385	33,393	33,400
2470	33,408	33,416	33,424	33,431	33,439	33,447	33,454	33,462	33,470	33,477
2480	33,485	33,492	33,500	33,508	33,515	33,523	33,531	33,538	33,546	33,554
2490	33,561	33,569	33,576	33,584	33,591	33,599	33,606	33,614	33,621	33,629
2500	33,636									

## ПРИЛОЖЕНИЕ П8

### *Номинальная статическая характеристика термопреобразователей сопротивления с НСХ 50 П*

Температура, °С	Сопротивление, Ом									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	50	51,98	53,96	55,93	57,895	59,855	61,805	63,755	65,695	67,63
100	69,55	71,48	73,395	75,305	77,21	79,11	81,005	82,84	84,77	86,645
200	88,515	90,38	92,24	94,09	95,935	97,775	99,61	101,44	103,26	105,08
300	106,89	108,7	110,5	112,29	114,08	115,86	117,64	119,41	121,17	122,93
400	124,68	126,43	128,17	129,9	131,63	133,36	133,36	136,78	138,49	140,19
500	141,88									

### *Номинальная статическая характеристика термопреобразователей сопротивления с НСХ 100 П*

Температура, °С	Сопротивление, Ом									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	100	103,96	107,92	111,86	115,79	119,71	123,61	127,51	131,39	135,26
100	139,1	142,96	146,79	150,61	154,42	158,22	162,01	165,68	169,54	173,29
200	177,03	180,76	184,48	188,18	191,87	195,55	199,22	202,88	206,52	210,16
300	213,78	217,39	220,99	224,58	228,15	231,71	235,27	238,81	242,34	245,85
400	249,36	252,85	256,33	259,8	263,26	266,71	266,71	273,56	276,98	280,37
500	283,76									



## ПРИЛОЖЕНИЕ П9

*Номинальная статическая характеристика термопреобразователей сопротивления с НСХ 50 М*

Температура, °С	Сопротивление, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	50,000	50,214	50,428	50,642	50,856	51,070	51,284	51,498	51,712	51,926
10	52,140	52,354	52,569	52,783	52,997	53,211	53,425	53,639	53,853	54,067
20	54,281	54,495	54,709	54,923	55,137	55,351	55,565	55,780	55,994	56,208
30	56,422	56,636	56,850	57,064	57,278	57,492	57,706	57,920	58,134	58,348
40	58,562	58,776	58,990	59,204	59,418	59,632	59,846	60,060	60,274	60,488
50	60,702	60,916	61,130	61,344	61,558	61,772	61,986	62,200	62,414	62,628
60	62,842	63,056	63,270	63,484	63,698	63,912	64,126	64,340	64,553	64,767
70	64,981	65,195	65,409	65,623	65,837	66,051	66,265	66,479	66,693	66,907
80	67,121	67,335	67,549	67,763	67,977	68,191	68,405	68,619	68,833	69,047
90	69,261	69,474	69,688	69,902	70,116	70,330	70,544	70,758	70,972	71,186
100	71,400	71,614	71,828	72,042	72,256	72,470	72,684	72,898	73,112	73,326
110	73,539	73,753	73,967	74,181	74,395	74,609	74,823	75,037	75,251	75,465
120	75,678	75,892	76,106	76,320	76,534	76,748	76,962	77,176	77,390	77,604
130	77,817	78,031	78,245	78,459	78,673	78,887	79,101	79,315	79,529	79,743
140	79,956	80,170	80,384	80,598	80,812	81,026	81,240	81,454	81,668	81,882
150	82,096	82,310	82,524	82,738	82,952	83,165	83,379	83,593	83,807	84,021
160	84,235	84,449	84,663	84,877	85,091	85,305	85,518	85,732	85,946	86,160
170	86,374	86,588	86,802	87,016	87,230	87,444	87,658	87,871	88,085	88,299
180	88,513	88,727	88,941	89,155	89,369	89,583	89,797	90,010	90,225	90,438
190	90,653	90,866	91,080	91,294	91,508	91,722	91,936	92,149	92,363	92,577
200	92,791									

*Номинальная статическая характеристика термопреобразователей сопротивления с НСХ 100 М*

Температура, °С	Сопротивление, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,00	100,43	100,86	101,28	101,71	102,14	102,57	102,99	103,42	103,85
10	104,28	104,71	105,14	105,57	105,99	106,42	106,85	107,28	107,71	108,13
20	108,56	108,99	109,42	109,85	110,27	110,70	110,13	111,56	111,99	112,42
30	112,84	113,27	113,70	114,13	114,55	114,98	115,41	115,84	116,27	116,69
40	117,12	117,55	117,98	118,41	118,84	119,26	119,69	120,12	120,55	120,98
50	121,40	121,83	122,26	122,69	123,12	123,54	123,97	124,40	124,83	125,26
60	125,68	126,11	126,54	126,97	127,39	127,82	128,25	128,68	129,11	129,53
70	129,96	130,39	130,82	131,25	131,67	132,10	132,53	132,96	133,39	133,81
80	134,24	134,67	135,09	135,53	135,95	136,38	136,81	137,24	137,67	138,09
90	138,52	138,95	139,38	139,81	140,23	140,66	141,09	141,52	141,94	142,37
100	142,80	143,23	143,66	144,08	144,51	144,94	145,37	145,79	146,22	146,65
110	147,08	147,51	147,93	148,36	148,79	149,22	149,65	150,07	150,50	150,93
120	151,36	151,78	152,21	152,64	153,07	153,49	153,92	154,35	154,78	155,21
130	155,63	156,06	156,49	156,92	157,34	157,77	158,20	158,63	159,06	159,49
140	159,91	160,34	160,77	161,19	161,62	162,05	162,48	162,94	163,34	163,76
150	164,19	164,62	165,05	165,48	165,90	166,33	166,76	167,19	167,61	168,04
160	168,47	168,89	169,33	169,75	170,18	170,61	171,04	171,46	171,89	172,32
170	172,75	173,18	173,60	174,03	174,46	174,89	175,32	175,74	176,17	176,59
180	177,02	177,45	177,88	178,31	178,74	179,17	179,59	180,02	180,45	180,88
190	181,30	181,73	182,16	182,59	183,02	183,44	183,87	184,29	184,73	185,15
200	185,58									

ПРИЛОЖЕНИЕ П10

Плотность воды при температуре  $t$  °C и давлении  $p$  кгс/см<sup>2</sup>

Температура, °C	Давление насы- щения, кгс/см <sup>2</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>			
		100 кгс/см <sup>2</sup>	130 кгс/см <sup>2</sup>	160 кгс/см <sup>2</sup>	200 кгс/см <sup>2</sup>
200	15,9	870,9	873,1	875,2	878,0
202	16,5	868,6	870,8	872,9	875,8
204	17,2	866,3	868,5	870,6	873,5
206	17,9	863,9	866,5	868,4	871,3
208	18,7	861,6	863,9	866,1	869,0
210	19,5	859,2	861,5	863,8	866,7
212	20,2	856,8	859,1	861,4	864,4
214	21,1	854,4	856,7	859,0	862,0
216	21,9	852,0	854,3	856,6	859,7
218	22,8	849,5	851,9	854,2	857,3
220	23,7	847,0	849,4	851,8	854,9
222	24,6	844,5	846,9	849,3	852,5
224	25,5	841,9	844,4	846,8	850,1
226	26,5	839,3	841,9	844,3	847,6
228	27,5	836,7	839,3	841,8	845,1
230	28,5	834,0	836,7	839,3	842,6
232	29,6	831,3	834,1	836,7	840,1
234	30,7	828,6	831,4	834,1	837,5
236	31,8	825,9	828,7	831,4	834,9
238	33,0	823,1	825,9	828,7	832,3
240	34,1	820,3	823,2	826,0	829,7

Температура, °С	Давление насы- щения, кгс/см <sup>2</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>			
		100 кгс/см <sup>2</sup>	130 кгс/см <sup>2</sup>	160 кгс/см <sup>2</sup>	200 кгс/см <sup>2</sup>
242	35,4	817,5	820,5	823,3	827,0
244	36,6	814,7	817,7	820,5	824,3
246	37,9	811,8	814,9	817,8	821,6
248	39,2	808,9	812,0	815,0	818,9
250	40,6	805,9	809,1	812,1	816,1
252	41,9	802,9	806,2	809,2	813,3
254	43,4	799,8	803,2	806,3	810,5
256	44,8	796,7	800,2	803,4	807,6
258	46,3	793,6	797,1	800,4	804,7
260	47,9	790,4	794,0	797,4	801,8
262	49,4	787,2	790,9	794,3	798,8
264	51,0	784,0	787,7	791,2	795,8
266	52,7	780,7	784,5	788,1	792,8
268	54,4	777,3	781,2	784,9	789,7
270	56,1	773,9	777,9	781,7	786,6
272	57,9	770,5	774,6	778,4	783,4
274	59,7	767,0	771,2	775,1	780,2
276	61,6	763,4	767,7	771,8	777,0
278	63,5	759,8	764,2	768,4	773,7
280	65,4	756,1	760,6	764,9	770,4
282	67,4	752,4	757,0	761,4	767,1
284	69,5	748,6	753,3	757,8	763,7
286	71,6	744,7	749,5	754,2	760,2

Температура, °С	Давление насы- щения, кгс/см <sup>2</sup>	Плотность, кг/м <sup>3</sup>			
		100 кгс/см <sup>2</sup>	130 кгс/см <sup>2</sup>	160 кгс/см <sup>2</sup>	200 кгс/см <sup>2</sup>
288	73,7	740,7	745,7	750,5	756,7
290	75,9	736,6	741,8	746,8	753,1
292	78,1	732,4	737,9	743,0	749,5
294	80,4	728,2	733,8	739,2	745,8
296	82,8	723,8	729,7	735,2	742,0
298	85,2	719,4	725,5	731,2	738,2
300	87,6	714,9	721,2	727,1	734,3
302	90,1	–	716,9	722,9	730,4
304	92,6	–	712,4	718,7	726,4
306	95,2	–	707,8	714,3	722,3
308	97,9	–	703,1	709,8	718,1
310	100,6	–	698,2	705,2	713,8
312	103,4	–	693,2	700,6	709,5
314	106,2	–	688,0	695,8	705,0
316	109,1	–	682,7	690,9	700,5
318	112,1	–	677,3	685,8	695,8
320	115,1	–	671,7	680,6	691,0

**ПРИЛОЖЕНИЕ П11***Относительные теплопроводности газов*

Газ	100 °С	500 °С
Воздух	1,00	1,00
Азот	0,98	0,97
Водород	6,84	6,77
Диоксид углерода	0,71	0,96
Оксид углерода	0,94	0,93
Метан	1,45	2,13
Диоксид серы	0,38	0,53
Кислород	1,02	1,07
Аргон	0,66	0,66
Гелий	5,56	5,32
Пары воды	0,78	1,116

**ПРИЛОЖЕНИЕ П12***Относительная магнитная восприимчивость газов*

Газ	$\chi$
Кислород	1,0000
Азот	0,0040
Аммиак	0,0057
Аргон	0,0059
Ацетилен	0,0068
Воздух	0,2100
Водород	0,0011
Водяной пар	0,0040
Гелий	0,0006
Двуокись азота	0,0616
Двуокись углерода	0,0057
Закись азота	0,0205
Метан	0,0068
Неон	0,0022
Окись азота	0,3620
Хлор	0,0041

Учебное издание

АТРОШЕНКО Юлиана Константиновна  
ИВАНОВА Евгения Владимировна

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебное пособие

Научный редактор *кандидат технических наук,  
доцент И.П. Озерова*


Корректурa *Н.Т. Синельникова*  
Компьютерная верстка *В.В. Михалев*  
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 23.06.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л 8,78. Уч.-изд. л. 7,94.  
Заказ 761-14. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Издательства Томского политехнического университета  
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)