

Н.Д.Кузнецов  
В.С.Чистяков

# СБОРНИК ЗАДАЧ И ВОПРОСОВ ПО ТЕПЛО- ТЕХНИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ПРИБОРАМ

---

Для студентов вузов

---



621

К 83

Н. Д. Кузнецов,  
В. С. Чистяков

# СБОРНИК ЗАДАЧ И ВОПРОСОВ ПО ТЕПЛО- ТЕХНИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ПРИБОРАМ

Второе издание, дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов»

— 247544 —



МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1985

ББК 31.32  
К 89  
УДК 536.5(075.8)

Рецензент: Киевский политехнический институт

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность функционирования АСУ ТП во многом определяется достоверностью измерительной информации и надежностью работы средств измерения. Поэтому вопросам получения достоверной информации о значениях параметров технологических процессов с каждым годом уделяется все большее внимание.

При оценке точности измерения теплотехнических параметров в теплоэнергетике и других отраслях техники должен осуществляться комплексный анализ условий измерения и особенностей работы первичных и других преобразователей и средств измерения. Сочетание такого комплексного анализа и вероятностно-статистического метода нормирования метрологических характеристик средств измерения позволяет получать более достоверные данные о значениях технологических параметров.

Естественно, что настоящий задачник не может охватить все разнообразие случаев, встречающихся на практике. Но методика подхода к решению задач может быть распространена и на другие, не рассмотренные в задачнике случаи. Методология решения задач и анализа точности измерения тех или иных параметров имеет большое значение и по той причине, что в настоящее время число задачников и другой литературы по теплотехническим и технологическим измерениям крайне незначительно.

Расположение материала в задачнике соответствует структуре читаемого на тепловых факультетах вузов курса по теплотехническим измерениям и приборам. Все задачи имеют ответы, а для большинства задач приведены подробные решения. Решения и ответы сосредоточены во второй части книги. Задачи и рисунки имеют нумерацию по главам. К номеру ответа или решения, соответствующему номеру условия задачи, впереди добавляется буква О. Формулы снабжены порядковыми номерами в пределах каждой главы.

Предлагаемые задачи предусматривают знание основных принципов, методов и наиболее распространенных средств, применяемых для измерения теплотехнических и технологических параметров; кроме то-

К  $\frac{2303010000-019}{051(01)-85}$  155-85

© Издательство «Энергия», 1978  
© Энергоатомиздат, 1985, с изменениями

го, необходимо знание ряда государственных стандартов СССР. При решении задач обращается внимание не только на получение численного результата, но и на анализ физических особенностей данного прибора или метода измерения.

Опыт использования первого издания задачника 1978 г. показал на необходимость включения в него справочных данных, используемых для решения часто встречающихся на практике задач, что было учтено авторами при работе над вторым изданием. По сравнению с первым изданием изменены также методики решения некоторых задач с целью согласования их с вновь изданными учебниками и нормативными документами.

Авторы выражают глубокую благодарность доцентам Д. В. Радуну и Г. М. Ивановой, а также другим преподавателям кафедры АСУ ТП Московского ордена Ленина и ордена Октябрьской революции энергетического института за ценные замечания и советы.

Авторы признательны за рецензирование рукописи и высказанные при этом замечания и советы проф. В. В. Ажогину и кафедре АТП Киевского политехнического института и выражают глубокую благодарность Н. И. Смирнову за внимательное редактирование рукописи.

*Авторы*

## Часть первая ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

### Глава первая МЕТРОЛОГИЯ

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В настоящей главе приводятся задачи, связанные с основными метрологическими терминами и определениями [1] применительно к техническим измерениям и приборам, приводятся задачи по оценке погрешностей прямых и косвенных измерений, а также задачи по оценке метрологических характеристик средств измерений [2, 3] и статистической обработке результатов измерений [4—7].

*Истинное значение физической величины* — значение, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта.

*Действительное значение физической величины* — значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него.

*Сигнал измерительной информации* — сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной.

*Цена деления шкалы* — разность значений, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

*Диапазон показаний* — область, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

*Влияющая физическая величина* — физическая величина, не являющаяся измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений этим средством.

*Нормальная область значений влияющей величины* — область значений, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида в качестве нормальной.

*Рабочая область значений влияющей величины* — область значений, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства

измерений данного вида, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность этих средств измерений.

*Коэффициент преобразования измерительного преобразователя* — отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отображающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя.

*Чувствительность измерительного прибора* — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

*Абсолютная погрешность измерительного прибора* — разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины.

*Относительная погрешность измерительного прибора* — отношение абсолютной погрешности прибора к действительному значению измеряемой величины (допускается погрешность относить к показаниям прибора).

*Приведенная погрешность измерительного прибора* — отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению. Обычно за нормирующее значение принимают диапазон показаний. Приведенная погрешность выражается в процентах.

*Систематическая погрешность средства измерений* — составляющая погрешности, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся.

*Случайная погрешность средства измерений* — составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом.

*Основная погрешность средства измерений* — погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях.

*Изменение показаний измерительного прибора под действием влияющей величины* (ранее называемое дополнительной погрешностью) — изменение погрешности измерительного прибора, вызванное отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом ее за пределы нормальной области значений.

*Предел допускаемой погрешности средства измерений* — наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению.

*Класс точности средства измерений* — обобщенная характеристика средства измерений, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей (изменением показаний для измерительных приборов), а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах.

Следует подчеркнуть, что класс точности только характеризует точность средств измерений, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих средств.

Погрешности измерений аналогично рассмотренным выше погрешностям средств измерений подразделяются на абсолютные, относительные, систематические, случайные и грубые.

*Погрешность метода измерений* — составляющая погрешности измерения, вызванная несовершенством метода.

*Поправка* — значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности.

В гл. 1 имеется ряд задач, связанных с оценкой погрешности при косвенных измерениях.

*Косвенным измерением* называется измерение, при котором искомое значение величины  $y$  находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами  $x_i$ , подвергаемыми прямым измерениям:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n).$$

Если величины  $x_i$  независимы, то зависимость погрешности  $\delta_y$  от погрешностей исходных величин  $\delta_{x_i}$  выражается формулой [2, 3]

$$\Delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_{x_i} \right)^2}. \quad (1.1)$$

Выражение для погрешности сохраняет свой вид независимо от того, является ли  $\delta_{x_i}$  средней квадратической или предельной погрешностью, только результат будет представлять соответственно среднюю квадратическую или предельную погрешность.

При решении задач по статистической обработке результатов измерений следует пользоваться основными сведениями по теории вероятностей, излагаемыми, например, в [4, 5]. Основными понятиями при статистических оценках являются понятия доверительного интервала и доверительной вероятности. Действительное значение параметра  $x$  неизвестно, и в реальных условиях производится замена этого значения его оценкой  $\tilde{x}$ . Доверительный интервал и доверительная вероятность дают представление о точности и надежности оценки  $\tilde{x}$ , о том, с какой степенью уверенности можно ожидать, что ошибка, связанная с заменой  $x$  на  $\tilde{x}$ , не выйдет за заданные пределы.

Для данной вероятности  $p_1$  по конечной совокупности значений измеряемой величины может быть найдено случайное значение  $x_n$ , такое, что интервал от  $x_n$  до  $+\infty$  покрывает действительное значение с вероятностью  $p_1$ :

$$\text{Вер} \{ \tilde{x} \geq x_n \} = p_1.$$

Значение  $x_H$  называется нижней доверительной границей для значения  $\tilde{x}$  при односторонней доверительной вероятности  $p_1$ .

Аналогично значение  $x_B$ , образующее интервал от  $-\infty$  до  $x_B$ , который с вероятностью  $p_2$  покрывает значение  $\tilde{x}$ , называется верхней доверительной границей при односторонней доверительной вероятности  $p_2$ :

$$\text{Вер} \{ \tilde{x} \leq x_B \} = p_2.$$

Нижняя  $x_H$  и верхняя  $x_B$  границы образуют доверительный интервал, который с доверительной вероятностью  $p$  покрывает неизвестное действительное значение измеряемой величины:

$$\text{Вер} \{ x_H \leq \tilde{x} \leq x_B \} = p. \quad (1.2)$$

Если  $p_1 > 0,5$  и  $p_2 > 0,5$ , то  $p = p_1 + p_2 - 1$ . Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения регламентированы [5]. Аналогичные правила имеются и для других законов распределения.

Оценкой  $\tilde{x}$  действительного значения является значение, определяемое по формуле

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.3)$$

В задачах рассматриваются доверительные интервалы, симметричные относительно  $\tilde{x}$ , с двусторонней доверительной вероятностью  $p$ . Тогда при полуширине интервала  $\varepsilon$  очевидны зависимости

$$x_H = \tilde{x} - \varepsilon; \quad x_B = \tilde{x} + \varepsilon. \quad (1.4)$$

Значение  $\varepsilon$  для ряда измерений (отдельных значений ряда) определяется из выражения

$$\varepsilon = t_p \tilde{\sigma}, \quad (1.5)$$

где  $\tilde{\sigma}$  — оценка средней квадратической погрешности ряда измерений,

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}; \quad (1.6)$$

$n$  — число наблюдений;  $t_p$  — коэффициент, определяемый характером распределения результатов наблюдений для заданной вероятности  $p$  (значения  $t_p$  могут быть определены из табл. П.1 приложения).

Для ограниченного числа измерений (как правило, менее 100) характер распределения часто может быть описан законом распределения

Стьюдента. Тогда  $t_p$  — коэффициент распределения Стьюдента для числа измерений  $n$  и вероятности  $p$ .

В большинстве случаев при решении задач приходится определять доверительные интервалы для результата измерений. В этом случае значение  $\varepsilon_p$  определяется из выражения

$$\varepsilon_p = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (1.7)$$

Значения  $t_p$  и  $t_p/\sqrt{n}$  приведены в табл. П.2 приложения, а также в [2, 4, 5]. При использовании таблиц из [5] следует иметь в виду, что они приняты для односторонней доверительной вероятности  $p_1$ , а не для двусторонней вероятности  $p$ , как это сделано в [2, 4]. Поэтому для использования таблиц [5] следует предварительно по значению  $p$  вычислить  $p_1$  по формуле

$$p_1 = (1 + p)/2,$$

а затем по  $k = n - 1$  и  $p_1$  определить  $t_p$ .

При решении задач на проверку согласия опытного распределения с теоретическим следует руководствоваться правилами, изложенными в [6]. В задачах в качестве критериев согласия приняты критерии Колмогорова,  $\chi^2$  и  $\omega^2$ .

При использовании критерия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями рассматривается максимальное значение модуля разности  $K$  между статистической функцией распределения  $F_n(x)$  и соответствующей теоретической функцией распределения  $F(x)$

$$K = \max |F_n(x) - F(x)|.$$

Значение  $F_n(x)$  на границе какого-либо интервала определяется как сумма частот всех интервалов, лежащих левее этой границы. Значения  $F(x)$  определяются из таблиц [4]. Максимальная разность  $K$  определяется путем либо построения графиков  $F_n(x)$  и  $F(x)$  [4, 6], либо составления таблиц. По найденному значению  $K$  вычисляют вспомогательную величину  $\lambda = K\sqrt{n}$  и задаются доверительной вероятностью

$$p = \text{Вер} \{ \lambda \leq \lambda^* \},$$

при которой отклонение функции опытного распределения от теоретического будет меньше  $\lambda^*$ , установленной для доверительной вероятности  $p$ .

По табл. П.3 или [6] находят  $\lambda^*$ , соответствующее этой доверительной вероятности.

При выполнении соотношения  $\lambda \leq \lambda^*$  гипотеза о согласии теоретического и опытного распределений принимается, в противном случае — отвергается.

При проверке согласия по критерию  $\chi^2$  вычисляется значение

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^h \frac{(n_i - np'_i)^2}{np'_i}, \quad (1.8)$$

где  $h$  — число интервалов;  $n_i$  — число наблюдений в  $i$ -м интервале;  $n$  — общее число наблюдений;  $p'_i$  — теоретическая (т. е. в соответствии с выбранным теоретическим законом распределения) вероятность попадания в  $i$ -й интервал.

Затем следует задаться доверительной вероятностью

$$p = \text{Вер} \{ \chi^2 \leq (\chi^*)^2 \},$$

при которой  $\chi^2$ , полученное вследствие случайных отклонений частот опытного распределения от соответствующих вероятностей теоретического распределения, будет меньше значения  $(\chi^*)^2$ , установленного для доверительной вероятности  $p$ . По табл. П.4 или [5] в зависимости от  $p$  и числа степеней свободы (равно числу интервалов минус число наложенных связей) определяют  $(\chi^*)^2$ . При выполнении условия  $\chi^2 \leq (\chi^*)^2$  гипотеза о согласии опытного и теоретического распределений принимается, в противном случае — отвергается.

Для упрощения решения в условиях задач приведены необходимые для решения значения  $p$  и  $(\chi^*)^2$ .

При решении задач на вычисление параметров погрешностей средств измерений следует руководствоваться стандартом [7], который устанавливает номенклатуру нормируемых метрологических характеристик средств измерений, дает их определения и способы представления.

В задачах требуется вычислить только некоторые метрологические характеристики из всего комплекса характеристик, устанавливаемого стандартом.

Систематическая составляющая  $\Delta_0$  погрешности в точке  $x$  диапазона измерений для конкретного экземпляра средства измерений вычисляется по формуле

$$\Delta_0 = \frac{\bar{\Delta}_M + \bar{\Delta}_B}{2}, \quad (1.9)$$

где

$$\bar{\Delta}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{Mi}}{n}; \quad \bar{\Delta}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{Bi}}{n};$$

$n$  — количество опытов при определении  $\Delta_M$  и  $\Delta_B$ ;  $\Delta_{Mi}$ ,  $\Delta_{Bi}$  —  $i$ -е реализации погрешности средства измерений соответственно при изменении

входного сигнала со стороны меньших и больших значений до значения  $x$ .

Оценка среднего квадратического отклонения  $\sigma(\Delta)$  случайной составляющей погрешности конкретного экземпляра средств измерений должна вычисляться по формуле

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{Mi} - \bar{\Delta}_M)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta_{Bi} - \bar{\Delta}_B)^2}{2n - 1}}. \quad (1.10)$$

Наибольшая суммарная погрешность определяется как наибольшая по абсолютному значению из полученных значений  $\Delta_{Mi}$  и  $\Delta_{Bi}$ .

Вариация определяется как абсолютное значение разности между  $\bar{\Delta}_M$  и  $\bar{\Delta}_B$ :

$$b = |\bar{\Delta}_M - \bar{\Delta}_B|. \quad (1.11)$$

1.1. Температура в термостате измерялась техническим термометром со шкалой 0—500 °С, имеющим пределы допускаемой основной погрешности  $\pm 4$  °С. Показания термометра составили 346 °С. Одновременно с техническим термометром в термостат был погружен лабораторный термометр, имеющий свидетельство о поверке. Показания лабораторного термометра составили 352 °С, поправка по свидетельству составляет  $-1$  °С, поправка на выступающий столбик равна  $+0,5$  °С.

Определите, выходит ли за пределы допускаемой основной погрешности действительное значение погрешности показаний технического термометра.

1.2. Милливольтметр имеет равномерную шкалу, разделенную на 50 интервалов. Нижний предел измерения  $U_n = -10$  мВ, верхний  $U_k = +10$  мВ.

Определите цену деления шкалы и чувствительность милливольтметра.

1.3. Зависят ли коэффициенты преобразования медного и платинового термометров сопротивления от температуры, если известно, что сопротивления связаны с температурой выражениями  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$  для медного термометра,  $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$  для платинового термометра.

1.4. При проверке автоматического потенциометра со шкалой 0—500 °С для градуировки типа К (никельхром — никель-алюминий, хромель-алюмель) выяснилось, что стрелка и перо прибора смещены относительно нулевой отметки на 10 °С в сторону завышения.

Как должна быть учтена эта систематическая погрешность измерения температуры при обработке диаграммной бумаги, например на отметке 430 °С?

1.5. При испытании измерительной системы дифманометр — вторичный прибор в нормальных условиях эксплуатации прибор устанавливал-

ся в конечной точке шкалы при следующих значениях перепада давления  $\Delta p_i$  на входе в дифманометр:

$i$ . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta p_i$ , кПа . .	84,15	84,06	83,80	83,90	83,94	84,10	84,02	84,03

Затем было изменено напряжение питания измерительной системы на +10%  $U_{ном}$ . При этом прибор устанавливался в конечной точке шкалы при следующих значениях перепада давления  $\Delta p_i^*$  на входе:

$i$ . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta p_i^*$ , кПа . .	83,85	83,75	83,82	83,76	83,84	83,82	83,83	83,75

Оцените погрешность показаний измерительной системы, вызванную отклонением напряжения питания. Как называется эта погрешность?

1.6. Определите абсолютное и относительное изменение показаний газового манометрического термометра, вызванное изменением барометрического давления от 100,45 до 96,45 кПа. Шкала прибора 0—100 °С, что соответствует изменению давления от 0,67 до 0,92 МПа. Прибор показывает температуру 80 °С. Шкала прибора равномерная.

1.7. Для технического манометра класса 1,5 нормальная температура окружающей среды  $20 \pm 5$  °С, рабочая температура  $+5 \div +50$  °С.

Одинаковыми ли погрешностями будут характеризоваться показания прибора при температуре окружающей среды  $t=24$ ,  $t=10$  и  $t=55$  °С при условии, что остальные влияющие величины имеют нормальные значения?

1.8. Одинаков ли предел допускаемой относительной погрешности измерения во всех точках шкалы автоматического потенциометра?

1.9. Было проведено однократное измерение термо-ЭДС автоматическим потенциометром класса 0,5 градуировки ХК со шкалой 200—600 °С. Указатель стоит на отметке 550 °С.

Оцените максимальную относительную погрешность измерения термо-ЭДС потенциометром на отметке 550 °С. Зависит ли относительная погрешность от показаний прибора? Условия работы нормальные.

1.10. При градуировке расходомера в конечной точке шкалы объемным методом были получены следующие значения времени наполнения бака  $\tau$ :

$i$ . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau_i$ , с . . . . .	97,5	94,8	94,7	95,2	94,9	95,3	91,1	95,2	95,3

Предполагается, что эти значения времени распределены по закону Стьюдента. Объем бака  $V=507 \pm 0,1$  л.

Каким образом оценить значение расхода в конечной точке шкалы расходомера и как определить погрешность этой оценки, если систематическая погрешность измерения времени отсутствует?

1.11. Сопротивление термометра градуировки 10 П измеряется потенциометрическим методом. Оцените погрешность измерения температуры термопреобразователя сопротивления, если известно, что допустимое отклонение от градуировочных значений не должно превышать 0,3 °С. Термопреобразователь II класса, измеряемая температура  $t=100$  °С.

Сопротивление образцовой катушки составляет  $R_k=10 \pm 0,01$  Ом. Измерение падения напряжения осуществляется лабораторным потенциометром типа ПП-63 класса 0,05. Допустимое значение его основной погрешности, мВ, не превышает:

$$\Delta e \leq \pm (5 \cdot 10^{-4} U + 0,5 U_p),$$

где  $U$  — показание потенциометра, мВ;  $U_p$  — цена деления шкалы реохорда, мВ.

Значение тока, протекающего через сопротивление, равно 3 мА.

1.12. Каким образом оценить погрешность измерения температуры, если известно, что для медного термометра сопротивления  $R_0^* = 49,95$  Ом и  $\alpha^* = 4,25 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Градуировочные таблицы составлены для  $R_0 = 50$  Ом и  $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>.

1.13. При измерении расхода калориметрическим расходомером измерение мощности нагревателя производилось по показаниям амперметра и вольтметра. Оба эти прибора имели класс точности 0,5, работали в нормальных условиях и имели соответственно шкалы 0—5 А и 0—30 В. Номинальные значения силы тока 3,5 А и напряжения 24 В.

Оцените погрешность, с которой производится измерение мощности.

1.14. Сопротивление медного термометра связано с температурой зависимостью

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Оцените возможные погрешности измерения температуры термопреобразователем сопротивления III класса градуировки 50 М за счет отклонения  $\Delta R_0$  и  $\Delta \alpha$  при 100 и 150 °С.

1.15. При исследовании теплоотдачи от трубы к воздуху коэффициент теплоотдачи подсчитывался из выражения

$$\alpha_k = \frac{Q}{F (t_c - t_b)}$$

Количество теплоты  $Q$ , передаваемой трубкой путем конвекции, определялось по мощности, потребляемой электронагревателем, как произведение сопротивления трубки  $R$  на квадрат силы тока  $I$ . Сила тока измерялась амперметром со шкалой 0—50 А класса 0,1, номинальное значение тока 42 А. Зависимость сопротивления трубки от температуры была найдена в специальных опытах и описывается выражением  $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$ . При  $t=0$  значение сопротивления  $R_0 = 0,5$  Ом,  $\alpha =$

$=4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Погрешность измерения сопротивления не превышает  $\pm 0,2\%$ . Поверхность трубки  $F$  определялась по длине  $l$  рабочего участка и его диаметру  $d$ . Значение длины  $l=100 \pm 0,5$  мм, диаметра  $d=10 \pm 0,01$  мм. Температура стенки  $t_0$  измерялась стандартным термоэлектрическим термометром градуировки ХК. Термометр через сосуд свободных концов подсоединяется к лабораторному потенциометру ПП-63 класса 0,05. Номинальное значение температуры стенки  $200^\circ\text{C}$ . Предел допускаемой погрешности, мВ, потенциометра ПП-63 определяется по формуле [8]

$$\Delta e_{\text{П}} = \pm (5 \cdot 10^{-4} U + 0,5 U_{\text{P}}),$$

где  $U$  — показания потенциометра, мВ;  $U_{\text{P}}$  — цена деления шкалы, мВ ( $U_{\text{P}}=0,05$  мВ).

Температура воздуха  $t_{\text{в}}$  измерялась вдали от трубки ртутным термометром повышенной точности со шкалой  $100\text{--}150^\circ\text{C}$  и ценой деления  $0,2^\circ\text{C}$ . Номинальное значение температуры воздуха составляет  $120^\circ\text{C}$ .

Оцените погрешность измерения коэффициента теплоотдачи на лабораторной установке и наметьте возможные пути ее уменьшения. Погрешностями, связанными с методами измерения, пренебрегаем.

1.16. В результате проведенных измерений оказалось, что наиболее вероятное содержание кислорода в газовой смеси составляет  $11,75\%$ . Доверительный интервал погрешности измерения определялся для доверительной вероятности  $0,683$  и составил  $\pm 0,5\%$   $\text{O}_2$ .

Определите границы доверительного интервала при доверительной вероятности  $0,95$ , если известно, что закон распределения погрешностей нормальный.

1.17. Погрешность измерения давления пара распределена по нормальному закону и состоит из систематической и случайной составляющих. Систематическая погрешность вызвана давлением столба жидкости в импульсной линии и завывает показания на  $0,12$  МПа. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей равно  $\pm 0,08$  МПа.

Найдите вероятность того, что отклонение измеренного значения от действительного не превышает по абсолютному значению  $0,15$  МПа.

1.18. Определите для задачи 1.17 вероятность того, что погрешность не превышает по абсолютному значению  $0,15$  МПа, полагая, что систематическая составляющая погрешности отсутствует.

1.19. Допустимое отклонение температуры стали на выпуске из печи не должно превышать  $\pm 10^\circ\text{C}$  от заданного значения. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности  $\sigma=8^\circ\text{C}$ . Кроме того, имеет место систематическая погрешность  $-6^\circ\text{C}$ , вызванная сдвигом стрелки прибора в сторону занижения.

Определите вероятность, с которой результат измерения температуры уложится в заданный интервал  $\pm 10^\circ\text{C}$ . Случайная погрешность распределена по нормальному закону.

1.20. Были произведены многократные измерения термо-ЭДС с целью определения закона распределения погрешности. Все результаты были разбиты на 10 интервалов, границы которых и число приходящихся на каждый из них значений измеряемой величины приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

$i$	$e_i$ , мВ	$n_i$	$i$	$e_i$ , мВ	$n_i$
1	9,69—9,85	20	6	10—10,01	18
2	9,85—9,93	22	7	10,01—10,03	21
3	9,93—9,97	18	8	10,03—10,07	19
4	9,97—9,99	20	9	10,07—10,15	17
5	9,99—10	22	10	10,15—10,31	23

Постройте гистограмму статистического ряда и определите, соответствует ли она закону равномерной плотности.

1.21. Было произведено 844 измерения значения силы тока на выходе одного из нормирующих преобразователей. Результаты были разбиты на 18 интервалов шириной  $\Delta=0,003$  мА и приведены в табл. 1.2. Там же указаны число измерений  $n_i$  в каждом интервале и границы интервалов в миллиамперах.

Таблица 1.2

$i$	$I_i$ , мА	$n_i$	$i$	$I_i$ , мА	$n_i$	$i$	$I_i$ , мА	$n_i$
1	4,983—4,986	5	7	5,001—5,004	77	13	5,019—5,022	55
2	4,986—4,989	8	8	5,004—5,007	92	14	5,022—5,025	42
3	4,989—4,992	16	9	5,007—5,010	98	15	5,025—5,028	25
4	4,992—4,995	27	10	5,010—5,013	100	16	5,028—5,031	15
5	4,995—4,998	40	11	5,013—5,016	90	17	5,031—5,034	10
6	4,998—5,001	59	12	5,016—5,019	80	18	5,034—5,037	5

Постройте гистограмму приведенного статистического ряда и произведите его выравнивание нормальным законом распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x - \tilde{x})^2}{2\sigma^2} \right].$$

1.22. Проверьте с помощью критерия согласия Колмогорова соответствие теоретического распределения опытному в задаче 1.21.

1.23. С целью исследования закона распределения ошибки измерения концентрации кислорода газоанализатором было выполнено 315 измерений. Совокупность погрешностей представлена в виде статистического ряда (табл. 1.3).

Таблица 1.3

$\Delta C, \%$	$\tilde{x}_i$	$n_i$	$p_i$	$\Delta C, \%$	$\tilde{x}_i$	$n_i$	$p_i$
-0,50 ÷ -0,45	-0,475	12	0,0381	0—0,05	0,025	18	0,05714
-0,45 ÷ -0,40	-0,425	19	0,06032	0,05—0,10	0,075	19	0,06032
-0,40 ÷ -0,35	-0,375	17	0,05397	0,10—0,15	0,125	15	0,04762
-0,35 ÷ -0,30	-0,325	15	0,04762	0,15—0,20	0,175	16	0,05079
-0,30 ÷ -0,25	-0,275	16	0,05079	0,20—0,25	0,225	13	0,04127
-0,25 ÷ -0,20	-0,225	14	0,04444	0,25—0,30	0,275	17	0,05397
-0,20 ÷ -0,15	-0,175	18	0,05714	0,30—0,35	0,325	16	0,05079
-0,15 ÷ -0,10	-0,125	12	0,0381	0,35—0,40	0,375	16	0,05079
-0,10 ÷ -0,05	-0,075	16	0,05079	0,40—0,45	0,425	14	0,04444
-0,05 ÷ 0	-0,025	13	0,04127	0,45—0,50	0,475	19	0,06032

Произведите выравнивание статистического ряда с помощью закона равномерной плотности и проверьте согласованность теоретического и статистического распределений с помощью критерия  $\chi^2$ .

Доверительную вероятность того, что значение  $\chi^2$ , полученное по опытным данным, будет меньше соответствующего значения  $(\chi^*)^2$  теоретического распределения, принять равной  $p=0,05$ . Для этой вероятности при  $k=17$   $(\chi^*)^2/k=0,51$ , при  $k=18$   $(\chi^*)^2/k=0,522$  и при  $k=19$   $(\chi^*)^2/k=0,532$ , где  $k$  — число степеней свободы.

1.24. Проведен ряд измерений температуры кипения воды в барометрическом термостате, при этом получены следующие результаты (табл. 1.4).

Таблица 1.4

$i$	$t_i, ^\circ\text{C}$						
1	98,6	4	97,8	7	97,9	10	98,2
2	97,8	5	98,4	8	98,0	11	98,3
3	98,1	6	98,3	9	98,1	12	98,3

Измерение барометрического давления не проводилось, предполагалось, что оно составляет 760 мм рт. ст., а температура кипения при этом равна 100 °С.

По полученным результатам дайте заключение, какая погрешность — систематическая или случайная — является определяющей и как ее уменьшить.

1.25. Определите границы доверительного интервала погрешности измерения температуры с вероятностью 0,95, если при большом числе измерений было получено, что  $\tilde{x}=1072$  °С, а дисперсия  $\tilde{D}=64$  (°С)<sup>2</sup>. Предполагается нормальный закон распределения погрешности.

1.26. В результате большого числа измерений термо-ЭДС был определен доверительный интервал  $(16,73 \leq \tilde{x} \leq 17,27)$ , мВ, с доверительной вероятностью 0,997.

Определите среднюю квадратическую погрешность измерения термо-ЭДС в предположении нормального закона распределения погрешности.

1.27. Определите 99 %-ный доверительный интервал для температуры термоэлектрического термометра типа К (никельхром — никель-алюминиевый, хромель — алюмелевый), если при измерении были получены следующие результаты: 31,56; 31,82; 31,73; 31,68; 31,49; 31,73; 31,74 и 31,72 мВ. Предполагается, что термо-ЭДС — случайная величина, распределенная по закону Стьюдента.

1.28. Яркостная температура слитка металла, измеренная квази-монохроматическим пирометром в пяти различных точках, оказалась следующей: 975, 1005, 945, 950, 987 °С. Полагаем, что действительная температура во всех точках одинакова. Разница в яркостных температурах вызвана систематической погрешностью за счет окислов на поверхности.

Оцените наиболее вероятное значение температуры слитка, а также доверительный интервал систематической погрешности, соответствующий доверительной вероятности  $p=0,9$ , предполагая, что погрешности распределены по закону Стьюдента.

1.29. Для задачи 1.28 определите доверительный интервал для  $p=0,9$ , если было произведено 10 измерений температуры слитка:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_i, ^\circ\text{C}$	975	1005	945	950	987	967	953	980	980	990

1.30. По результатам 25 наблюдений был определен доверительный интервал отклонений измеряемого давления от наиболее вероятного его значения с доверительной вероятностью  $p=0,7$ ;  $I_{0,7}=23,84 \div 24,37$  МПа. Определите доверительный интервал с доверительной вероятностью 0,95, полагая, что отклонения давления распределены по закону Стьюдента.

1.31. При испытании потенциометра КСП-4 градуировки ХК со шкалой 0—600 °С, класса 0,25 в точке 500 °С были получены следующие результаты (табл. 1.5).

Таблица 1.5

$i$	$x_{M_i}, \text{мВ}$	$x_{G_i}, \text{мВ}$	$i$	$x_{M_i}, \text{мВ}$	$x_{G_i}, \text{мВ}$	$i$	$x_{M_i}, \text{мВ}$	$x_{G_i}, \text{мВ}$
1	40,16	40,12	5	40,24	40,18	9	40,18	40,07
2	40,20	40,10	6	40,15	40,08	10	40,18	40,09
3	40,17	40,14	7	40,20	40,12	11	40,15	40,20
4	40,26	40,14	8	40,22	40,10	12	40,17	40,10

$x_{mi}$  — значение термо-ЭДС при подходе к отметке со стороны меньших значений;  $x_{bi}$  — значение термо-ЭДС при подходе к отметке со стороны больших значений.

Определите систематическую составляющую  $\Delta_c$  погрешности потенциометра в точке 500 °С, оцените среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности  $\sigma(\Delta)$  в той же точке шкалы потенциометра, а также наибольшее значение суммарной погрешности и вариацию.

1.32. Манометр со шкалой 0—16 МПа проходил испытания для проверки соответствия его метрологических характеристик технологическим условиям. При оценке погрешности в точке 10 МПа с помощью образцового манометра регистрировались значения давления при подходе со стороны меньших значений  $p_m$  и со стороны больших значений  $p_b$ :

$p_{mi}$ , МПа . . . . .	10,08	9,97	10,06	9,98	9,95	10,08
$p_{bi}$ , МПа . . . . .	10,12	10,05	10,06	10,09	10,03	10,10

Определите оценки систематических и случайных составляющих погрешности в соответствии с [7].

## Глава вторая

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измерение температуры может осуществляться различными методами. Каждый метод 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.

Контактные термопреобразователи находятся в непосредственном контакте со средой, температуру которой они измеряют. Часто собственная температура контактного термопреобразователя (или его части) даже в статическом режиме отличается от температуры измеряемой среды. Это отличие определяется особенностями теплообмена между термопреобразователем и измеряемой средой, конструктивными и теплофизическими характеристиками самого термопреобразователя и отдельных частей его арматуры, а также условиями теплообмена термопреобразователя с окружающей средой.

Показания жидкостных и манометрических термометров расширения определяются температурой не только рабочего вещества, находящегося в непосредственном контакте с измеряемой средой, но и выступающей, неконтактирующей части рабочего вещества, которая находится в теплообмене с окружающей средой. Если конструкцией или

условиями эксплуатации предусмотрено наличие неконтактирующей с измеряемой средой (выступающей) части, то градуировка такого термометра должна производиться при определенной температуре выступающей части. Изменение температуры выступающей части относительно градуировочного значения вызовет изменение показаний термометра.

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. Изменение показаний возникает при изменении барометрического давления, так как манометр, используемый в манометрических термометрах, измеряет избыточное давление.

При измерении термо-ЭДС могут иметь место ошибки в оценке действительного значения термо-ЭДС термоэлектрического термометра, которые вызываются учетом некоторых свойств термоэлектрических цепей, а также неправильной оценкой температуры свободных концов или учетом свойств удлиняющих термоэлектродных проводов. Напомним некоторые из этих свойств. Термо-ЭДС цепи не изменится при включении в нее проводника из любого материала, если температура мест подключения одинакова. Удлиняющие термоэлектродные провода служат для удлинения термометра без искажения развиваемой им термо-ЭДС.

Свободными называются те концы термоэлектрического термометра, которые включаются в измерительную цепь. Если термоэлектрический термометр удлинен термоэлектродными проводами, то свободными концами термометра будут концы термоэлектродных проводов.

Удлиняющие термоэлектродные провода вносят свою долю в общую погрешность измерения. Например, предел основной допускаемой погрешности удлиняющих проводов для термоэлектрических термометров типа К равен  $\pm 0,16$  мВ.

Допускаемые отклонения для удлиняющих проводов различных типов приведены в [27].

В соответствии со стандартом СЭВ 1059-78 [11], по которому будут скорректированы государственные стандарты СССР, будут применяться девять типов термоэлектрических преобразователей. Типы этих термоэлектрических преобразователей и их обозначения приведены в табл. 2.1. Для одних типов термопар (медь — копелевая, хромель — копелевая, вольфрамрений — вольфрамренийевый ВР 5/20-1) остались прежние названия и градуировочные характеристики, никаких обозначений для этих термопар стандарт СЭВ не устанавливает. Для других типов введены новые названия и обозначения: никель-хром — никель-алюминиевая термопара, тип К, прежнее название хромель — алюмелевая и обозначение ХА, градуировочная характеристика осталась неизмен-

Таблица 2.1. Термоэлектрические преобразователи

Тип термопары (обозначение)	Рабочий диапазон, °С	a, °С	b · 10 <sup>6</sup>	c, °С	
Медькопелевая	-200—0 0—100	1,3	-1,1 0	0 0	
Медь — медноникелевая Т	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400	3	-20 0	-100 0	
Железо—медноникелевая	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400 400—900	3	-20 0 7,5	-100 0 400	
Хромель — копелевая (ранее ХК)	-50 ÷ 300 300—800	2,5	0 6	0 300	
Никельхром — медноникелевая Е	-100 ÷ 400 400—900	4	7,5	0 400	
Никельхром — никель-алюминиевая К (ранее хромель-алюмелевая ХА)	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400 400—1300	4	-10 0 7,5	-100 0 400	
Платинородий (10 %) — платиновая S	1-й класс точности	0—300 300—1600	1,5	0 2	0 300
	2-й класс точности	0—600 600—1600	3	0 5	0 600
Платинородий (30 %) — платинородиевая (6 %) В	300—600 600—1800	3	0 5	0 600	
Вольфрамрений (5 %) — вольфрам-ренийевая (20 %), ранее ВР 5/20	0—1000 1000—1800	5	0 6	0 1000	
	1800—2500	10	11,5	1000	

ной. Для термопар платинородий—платиновых и платинородий—платинородиевых изменяются обозначения (вместо ПП вводится S, а вместо ПР—В) и изменяются градуировочные характеристики. Кроме того, вводится ряд новых термопар, ранее в СССР серийно не выпускавшихся:

медь — медноникелевая (близкая к термопаре медь — константан), тип Т, железо — медноникелевая (близкая к термопаре железо — константан), тип J, и никельхром — медноникелевая, тип Е.

Допускаемые отклонения измеряемых значений термоэлектродвижущей силы, мВ, от градуировочных характеристик, приведенных в приложении (табл. П.6—П.14), определяются из выражения

$$\Delta e = \pm [a + b(t - c)] S_T, \quad (2.1)$$

где  $t$  — температура рабочего конца термометра, °С;  $S_T = (de/dt)_T$  — коэффициент преобразования термометра, определяемый на основе его градуировочной характеристики;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты, определяемые из табл. 2.1.

Допускаемые отклонения, выраженные в градусах, определяются частью выражения (2.1), заключенного в квадратные скобки.

В задачах по расчету характеристик милливольтметров следует обратить внимание на связь угла поворота рамки с параметрами магнитного поля и размерами рамки. Следует иметь в виду, что вращающий момент рамки при заданных ее размерах зависит не только от значения индукции магнитного поля в зазоре, но и от направления вектора индукции относительно плоскости рамки.

В принципе милливольтметр измеряет напряжение на собственных зажимах и его класс характеризует предел основной погрешности измерения именно этого напряжения (поэтому погрешность выражается в милливольттах даже при градусной шкале). Шкала его может быть отградуирована в градусах при определенной зависимости между напряжением на зажимах милливольтметра и термо-ЭДС термоэлектрического термометра, которые различаются на значение падения напряжения во внешней цепи прибора. Поэтому сопротивление внешней цепи должно иметь определенное значение. Изменение его вызовет изменение показаний прибора.

Изменение тока, протекающего через рамку, может быть вызвано также изменением внутреннего сопротивления милливольтметра, образованного сопротивлением рамки и включенного последовательно с ней манганинового резистора. При изменении температуры изменится сопротивление медного провода, из которого изготовлена рамка, что и вызывает изменение тока, а следовательно, и показаний прибора.

В задачах по потенциометрическим схемам в первую очередь следует четко понять физический смысл компенсационного метода измерений: термо-ЭДС термоэлектрического термометра равна по значению и противоположна по знаку разности потенциалов на компенсирующем участке измерительной схемы потенциометра. Математическое выражение равновесия потенциометрической схемы измерения легко получить, используя второй закон Кирхгофа для замкнутого участка измерительной схемы, включающего термометр и усилитель.

При решении задач на расчет компенсации температурной погрешности следует иметь в виду, что значение вводимой поправки должно быть численно равно изменению термо-ЭДС термоэлектрического термометра при изменении температуры свободных концов. При расчете изменения показаний с изменением температуры свободных концов необходимо пользоваться выражением равновесия потенциометрической схемы в общем виде, когда движок реохорда занимает произвольное положение.

Перед решением задач по разделу потенциометров рекомендуется ознакомиться с [12], в которой производится детальное рассмотрение принципа действия схем и расчета их элементов.

В задачах по электрическим термометрам сопротивления следует обратить внимание на все особенности, связанные с работой термометров сопротивления и измерительных схем. Так как значение температуры определяется по значению сопротивления чувствительного элемента термометра, то могут иметь место ошибки в определении этого сопротивления. Эти ошибки вызываются изменением сопротивления либо линий связи, либо чувствительного элемента за счет самогрева, либо другими причинами, которые изменяют сопротивление термометра независимо от значения температуры измеряемой среды.

Типы термопреобразователей сопротивления, обозначения их градуировочных характеристик и диапазоны измеряемых температур приведены в табл. П.15. Градуировочные характеристики термопреобразователей сопротивления приведены в табл. П.18—П.23. Для медных термопреобразователей эта зависимость в интервале температур  $-50 \div +200$  °C может быть выражена как

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.2)$$

где  $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

Для платиновых термопреобразователей эта зависимость достаточно сложная и на различных интервалах аппроксимируется разными выражениями.

Допускаемые отклонения сопротивления  $R_0$  термопреобразователей при 0 °C от номинального значения приведены в приложении (табл. П.16). В табл. П.17 приведены номинальные значения отношения сопротивления  $R_{100}$  термопреобразователя при 100 °C к сопротивлению  $R_0$ , а также допускаемые отклонения этого отношения.

Зависимость сопротивления полупроводниковых термометров от температуры имеет вид

$$R_t = R_0 \exp \left[ \frac{B(293 - T)}{293T} \right], \quad (2.3)$$

где  $T$  — текущее значение температуры, К;  $R_0$  — значение сопротивления при температуре  $T = 293$  К;  $B$  — коэффициент, зависящий от свойств полупроводникового материала.

Сопротивление термометров в промышленных условиях измеряется мостами либо логометрами. Неуравновешенные мосты используются редко из-за двух основных недостатков: нелинейности градуировочной характеристики и зависимости их показаний от значения напряжения питания. Наибольшее распространение получили уравновешенные мосты. При решении задач по мостовым схемам основным уравнением является математическое выражение условия равновесия мостовой схемы (произведения значений сопротивлений противолежащих плеч должны быть равны).

При рассмотрении схем логометров следует иметь в виду, что логометры не имеют противодействующих пружин и движение рамок прекращается при равенстве момента, развиваемого рабочей рамкой, в цепь которой включен термометр сопротивления  $R_t$ , и противоположно направленного момента компенсирующей рамки. Следует отметить, что даже при противоположном направлении этих моментов направление каждого из них должно быть строго определенным. Момент рабочей рамки может быть направлен по или против часовой стрелки, компенсирующий момент — соответственно против или по часовой стрелке, но логометр будет работоспособным только при одном из этих двух возможных направлений. Чтобы определить это направление, нужно помнить, что подвижная система логометра должна поворачиваться таким образом, чтобы больший момент, действующий на одну из рамок, уменьшался, второй, наоборот, увеличивался.

При измерении температуры контактными термопреобразователями могут возникнуть значительные погрешности, обусловленные отводом теплоты от чувствительного элемента за счет теплоотдачи по чехлу и теплоотвода излучением.

Погрешность  $\Delta t$  измерения температуры газа, вызванная лучистым теплообменом между чехлом термопреобразователя и стенкой трубы, определяется из выражения

$$\Delta t = T_T - T_c = - \frac{C_0 \epsilon_{пр}}{\alpha_k} \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

где  $T_c$ ,  $T_T$ ,  $T_{ст}$  — соответственно температура измеряемой среды, термопреобразователя и стенки, К;  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи конвекцией между термопреобразователем и измеряемой средой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\epsilon_{пр}$  — приведенный коэффициент теплового излучения, характеризующий теплообмен между термопреобразователем и стенкой.

Когда поверхность стенки значительно больше поверхности термопреобразователя ( $F_{ст} \gg F_T$ ), можно считать, что приведенный коэффициент теплового излучения практически равен коэффициенту теплового излучения термопреобразователя ( $\epsilon_{пр} = \epsilon_T$ ).

Погрешность  $\Delta t$  измерения температуры за счет теплоотвода по чехлу определяется по формуле

$$\Delta t = t_T - t_c = - \frac{t_c - t_{cT}}{\operatorname{ch} l \sqrt{\frac{P\alpha}{\lambda S}}}, \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи между термопреобразователем и измеряемой средой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $P$  и  $S$  — периметр, м, и площадь, м<sup>2</sup>, поперечного сечения чехла термопреобразователя;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала термопреобразователя, Вт/(м·К);  $l$  — глубина погружения чехла в измеряемую среду, м.

При измерении температуры высокоскоростных газовых потоков возникает погрешность, вызванная торможением потока.

Связь между статической (или термодинамической) температурой потока  $T_c$  и температурой торможения  $T^*$ , которую принимает поток при полном его адиабатном торможении, выражается формулой

$$T^* - T_c = v^2/2c_p, \quad (2.6)$$

где  $v$  — скорость движения потока, м/с;  $c_p$  — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К).

В задачах, связанных с тепловой инерцией термопреобразователей, коэффициент теплоотдачи за время переходного процесса считается неизменным, а сам процесс описывается уравнением первого порядка

$$T_d \frac{dt_T}{d\tau} + t_T = t_c, \quad (2.7)$$

где  $t_T$  — текущее значение температуры термопреобразователя, соответствующее времени  $\tau$  после скачкообразного изменения температуры среды до значения  $t_c$ ;  $T_d$  — постоянная времени, с.

Тепловая инерция вызывает появление динамической погрешности, которая представляет собой разность текущего значения температуры термопреобразователя  $t_T$  и температуры среды  $t_c$ .

При решении задач по пирометрам излучения следует руководствоваться математическим выражением физических законов, составляющих основу принципа действия пирометра. Одним из основных законов является закон Планка, устанавливающий зависимость спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела от его температуры [2]:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.8)$$

где  $\lambda$  — длина волны, м;  $T$  — температура тела, К;  $C_1 = 1,191 \times 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>/ср;  $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$  м·К.

Для видимого участка спектра и  $t < 3000$  К можно вместо закона Планка использовать формулу Вина

$$B_{0\lambda T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (2.9)$$

Интегральная энергетическая яркость определяется законом Стефана — Больцмана, который для абсолютно черного тела имеет вид

$$B_{0T} = \sigma T^4, \quad (2.10)$$

где  $\sigma$  — постоянная, равная  $1,805 \cdot 10^{-8}$  Вт/(ср·м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Энергетическая яркость реальных физических тел меньше яркости абсолютно черного тела. Спектральная энергетическая яркость реального тела связана с яркостью абсолютно черного тела выражением

$$B_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} B_{0\lambda T}, \quad (2.11)$$

где  $\varepsilon_{\lambda T}$  — монохроматический коэффициент теплового излучения при температуре  $T$ .

Интегральную энергетическую яркость реального тела можно определить из выражения

$$B_T = \varepsilon_T B_{0T}, \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon_T$  — интегральный коэффициент теплового излучения при температуре  $T$ .

На законах излучения основывается ряд бесконтактных методов измерения температуры. Наибольшее распространение получили следующие методы измерения температуры по излучению:

квазимонохроматической (яркостный) метод, использующий зависимость спектральной энергетической яркости тела от температуры;

метод спектрального отношения (цветовой), основанный на перераспределении с температурой спектральных энергетических яркостей внутри данного участка спектра (отношения двух спектральных энергетических яркостей);

метод полного излучения (радиационный), основанный на зависимости энергетической яркости тела от температуры в широком спектральном интервале.

В связи с чрезвычайным разнообразием излучательных свойств реальных тел пирометры излучения градуируются по излучению абсолютно черного тела. Поэтому значения температуры реальных тел, отсчитанные по пирометрам излучения, являются не действительными температурами тела, а псевдотемпературами. Эти псевдотемпературы носят соответствующие названия: яркостная, цветовая и радиационная температура тела. Например, яркостной температурой  $T_{\lambda}$  реального физического тела называется такая температура абсолютно черного тела, при которой спектральная энергетическая яркость абсолютно чер-

ного тела  $V_{\text{оЛТ}}$  равна спектральной энергетической яркости реального физического тела  $V_{\text{ЛТ}}$  при его действительной температуре  $T$ .

Аналогично можно дать определения для цветовой и радиационной температур исходя из зависимостей, положенных в основу этих методов. В том, что пирометры излучения позволяют измерять только псевдотемпературы реальных тел, заключается принципиальный недостаток этих методов измерения температуры.

Для решения задач по нормирующим преобразователям для термоэлектрических термометров необходимо понимание принципа действия преобразователей с отрицательной обратной связью [4]. Следует заметить, что градуировки и пределы преобразования нормирующих преобразователей для термоэлектрических термометров совпадают с аналогичными характеристиками потенциометров. Интервал изменения выходного тока у преобразователей всех градуировок и пределов преобразования составляет 0—5 или 4—20 мА.

2.1. Для какого температурного диапазона устанавливается Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68)?

2.2. Каким образом осуществляется практическое воспроизведение МПТШ-68?

2.3. Можно ли ртутным стеклянным термометром измерить температуру 500 °С, если температура кипения ртути 356,6 °С? Каким образом можно повысить верхний предел измерения ртутных термометров?

2.4. Лабораторный стеклянный термометр, заполненный пентаном, показывает по шкале —40 °С. Термометр погружен в измеряемую среду до отметки —100 °С. Температура выступающего столбика составляет 20 °С. Коэффициент видимого объемного теплового расширения пентана в стекле  $\gamma = 0,0012 \text{ K}^{-1}$ .

Определите действительное значение температуры.

2.5. Совпадают ли значения коэффициентов объемного теплового расширения и видимого объемного теплового расширения термометрического вещества?

2.6. Определите изменение показаний манометрического ртутного термометра, если при градуировке термобаллон и показывающий прибор находились на одном уровне, а в реальных условиях показывающий прибор расположен на 7,37 м выше, чем термобаллон. Шкала термометра 0—500 °С. При изменении температуры от 0 до 500 °С давление в системе изменяется от 4,47 до 14,28 МПа. Плотность ртути  $\rho = 13\,595 \text{ кг/м}^3$ .

2.7. Определите изменение показаний манометрического газового термометра, вызванное увеличением температуры капилляра на 40 и температуры пружины на 10 °С относительно градуировочного значения 20 °С при следующих условиях: объем капилляра  $V_k = 1,9 \text{ см}^3$ , объем манометрической пружины  $V_n = 1,5 \text{ см}^3$ , объем термобаллона  $V_б = 140 \text{ см}^3$ .

2.8. Оцените изменение показаний манометрического газового термометра за счет изменения температуры внешней среды на 30 °С, если известно соотношение объемов капилляра  $V_k$ , пружины  $V_n$  и баллона  $V_б$ :

$$\frac{V_k + V_n}{V_б} = 0,01.$$

2.9. Определите, какое начальное давление должно быть создано в системе манометрического газового термометра при 0 °С, чтобы при изменении температуры от 0 до 500 °С давление в системе изменялось на 10 МПа. Термический коэффициент расширения газа  $\beta = 0,00366 \text{ K}^{-1}$ .

2.10. По условиям задачи 2.9 определите, какое относительное изменение показаний вызовет изменение барометрического давления  $p_б$  на 0,005 МПа на отметках шкалы 0 и 500 °С.

2.11. Будет ли изменяться термо-ЭДС термоэлектрического термометра типа ХК при изменении температуры рабочего конца, но при сохранении разности температур рабочего конца и свободных концов, например  $E(300, 50 \text{ °С})$  и  $E(600, 350 \text{ °С})$ ?

2.12. На рис. 2.1 изображена характеристика термоэлектрического термометра при температуре свободных концов, равной 0 °С.

Как изменится его характеристика, если температура свободных концов увеличится?

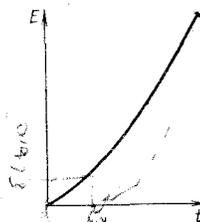


Рис. 2.1

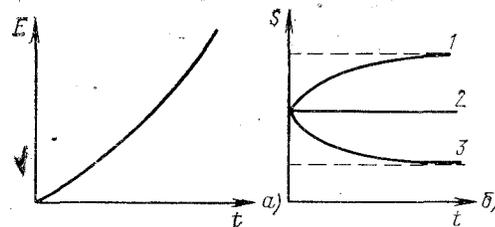


Рис. 2.2

2.13. Характеристика термоэлектрического термометра представлена на рис. 2.2, а.

Какая зависимость из изображенных на рис. 2.2, б будет характеризовать коэффициент преобразования термометра? Изменится ли его коэффициент преобразования при изменении температуры свободных концов?

2.14. В печь для поверки помещено несколько термоэлектрических термометров, о которых известно, что они стандартные, но их тип неизвестен. Свободные концы термометров помещены в термостат, темпе-

ратура в котором поддерживается постоянной, но ее значение также неизвестно.

Можно ли определить тип термоэлектрических термометров, если температура в печи известна и может изменяться в интервале от 300 до 600 °С, а термо-ЭДС измеряется лабораторным потенциометром?

2.15. На рис. 2.3 даны схемы измерения температуры поверхности медной пластины. В случае *a* электроды термоэлектрического термометра сварены вместе и затем приварены к пластине, в случае *б* каж-

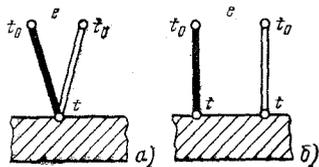


Рис. 2.3

дый из электродов приваривался к пластине отдельно и между электродами нет непосредственного контакта. Учитывая большую теплопроводность меди и полагая плохой теплообмен пластины с окружающей средой, можно считать, что температура медной пластины во всех точках подсоединения к ней термоэлектродов одинакова.

Будет ли термо-ЭДС обоих термометров одинакова при одинаковой температуре свободных концов?

2.16. Введите поправку в показания термоэлектрического термометра и определите температуру рабочего конца, если известно, что термо-ЭДС термометра типа S (платинородий—платиновый) равна 3,75 мВ, а температура свободных концов 32 °С.

2.17. Термоэлектрический термометр типа S (платинородий—платиновый) подсоединен к измерительному прибору ИП медными проводами (рис. 2.4).

Изменится ли термо-ЭДС, если вместо медных проводов подсоединение будет осуществлено алюминиевыми проводами? Значения температур концов термометра остались прежними.

2.18. Термоэлектрический термометр типа S (платинородий—платиновый) подключен к измерительному прибору медными проводами. Температура рабочего конца 700, свободных концов 20 °С.

Изменится ли термо-ЭДС, если температура места подключения медного провода к платинородиевому термоэлектроду увеличилась до

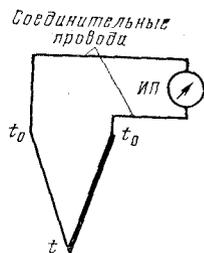


Рис. 2.4

100 °С, а температура места подключения медного провода к платинородиевому термоэлектроду осталась равной 20 °С.

Градуировочная характеристика термоэлектрического термометра типа S приведена в табл. П.12. Термо-ЭДС пары платинородий—медь при температурах спаев 100 и 20 °С  $E(100\text{ °С}, 20\text{ °С}) = -0,077\text{ мВ}$ .

2.19. Подключение термоэлектрического термометра к измерительному прибору осуществляется удлиняющими термоэлектродными проводами (рис. 2.5).

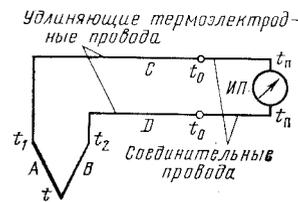


Рис. 2.5

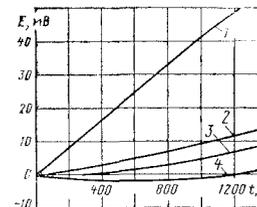


Рис. 2.6

Обязательным ли является требование равенства температур мест соединения  $t_1$  и  $t_2$ ?

2.20. На рис. 2.6 представлены характеристики различных термоэлектрических термометров.

Укажите, какие из них можно подключить к измерительному прибору без удлиняющих термоэлектродных проводов обычными медными и при этом не будет возникать искажение термо-ЭДС.

2.21. Определите температуру рабочего конца термоэлектрического термометра для измерительной цепи, представленной на рис. 2.5. Известно, что  $t_1 = t_2 = 70\text{ °С}$ ;  $t_0 = 28\text{ °С}$ ;  $t_n = 18\text{ °С}$ . Термо-ЭДС, измеряемая лабораторным потенциометром, равна  $E = 23,52\text{ мВ}$ , тип термометра К (никельхром—никельалюминиевый, хромель—алюмелевый).

2.22. Градуировочные таблицы стандартных термоэлектрических термометров составлены при температуре свободных концов 0 °С. Поэтому в термо-ЭДС, развиваемую термометрами, необходимо вводить поправку на температуру свободных концов, если эта температура не равна 0 °С.

Каковы принципиальные основы введения поправки на температуру свободных концов и какой сигнал должно вырабатывать устройство для автоматического введения поправки?

2.23. В мостовой схеме компенсатора термо-ЭДС с КТ-54 для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра (рис. 2.7) имеются резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , выполненные из манганина, и  $R_m$ , выполненный из меди. В мос-

тах, используемых со всеми типами термоэлектрических термометров, эти резисторы имеют одни и те же значения. Одинаково также значение напряжения питания  $U$ .

Одинаково ли значение сопротивления  $R_0$  в мостах, используемых для термоэлектрических термометров типов S (платинородий — платиновый), К (никельхром — никель алюминевый, хромель — алюмелевый) и ХК (хромель — копелевый).

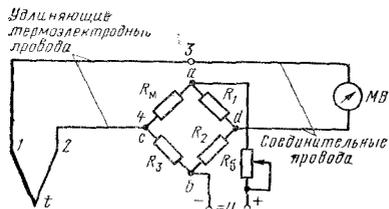


Рис. 2.7

Как изменятся показания милливольтметра, если удлиняющие термоэлектродные провода заменить на медные с тем же суммарным сопротивлением? Характеристику термоэлектрического термометра считаем линейной. Входное сопротивление измерительного прибора полагаем бесконечно большим.

2.25. Для условия задачи 2.23 предположим, что температура точек 1—4 всегда одинакова, но может изменяться во времени.

Изменятся ли в этом случае показания прибора, если удлиняющие термоэлектродные провода заменить медными?

2.26. Для условия задачи 2.23 изменятся ли показания милливольтметра, если медные провода, идущие от компенсатора КТ-54 к милливольтметру (рис. 2.7), заменить на алюминиевые с тем же сопротивлением?

2.27. Для условия задачи 2.23 при всех ли температурах свободных концов термоэлектрического термометра в диапазоне допустимого их изменения будет происходить полная компенсация изменения термо-ЭДС?

2.28. Изменится ли чувствительность милливольтметра, если увеличить число витков рамки при неизменной жесткости пружины?

2.29. Полагаем, что в начале и конце шкалы милливольтметра рамка находится в магнитном поле с большей индукцией, чем в середине шкалы.

Будет ли чувствительность такого милливольтметра постоянной в пределах шкалы? Будет ли шкала милливольтметра равномерной?

2.30. Оцените значение погрешности измерения температуры пара термоэлектрическим термометром типа К в комплекте с милливольтметром. Милливольтметр находится в помещении блочного щита, температура в котором  $20 \pm 1$  °С. Термоэлектрический термометр подключен к милливольтметру с помощью удлиняющих термоэлектродных

проводов. Шкала милливольтметра 200—600 °С, класс 1,0. Показания милливольтметра 540 °С.

Пределы допускаемых значений погрешностей термометра и удлиняющих термоэлектродных проводов приведены в начале гл. 2 [формула (2.1) и табл. 2.1] и в [27].

2.31. Температура пара измеряется термоэлектрическим термометром типа К, который с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов подключен к милливольтметру. Милливольтметр установлен в помещении блочного щита, имеющего температуру 20 °С. Сопротивление милливольтметра 323, термометра в рабочих условиях 0,35 Ом. Подгонка сопротивления внешней линии до значения 5 Ом осуществляется при температуре 20 °С. Сопротивление удлиняющих термоэлектродных проводов 3,47 Ом при общей длине 150 м (в том числе 3 м внутри блочного щита).

Оцените относительное изменение показаний милливольтметра, вызванное изменением температуры проводов от 20 до 65 °С. Температурный коэффициент электрического сопротивления проводов  $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

2.32. Термоэлектрический термометр типа S (длина термоэлектродов 2 м, диаметр 0,5 мм) подключен к пирометрическому милливольтметру, отградуированному на внешнее сопротивление 5 Ом, при глубине погружения термометра 0,5 м в среду с температурой 1000 °С. Остальная часть термометра находилась при температуре 40 °С.

Изменятся ли показания милливольтметра, если глубину погружения увеличить до 1,5 м. Внутреннее сопротивление милливольтметра 195 Ом. Сопротивление 1 м платинового термоэлектрода при 40 °С  $R_1 = 0,579$  Ом, при 1000 °С  $R_2 = 2,199$  Ом. Соответственно для платинородиевого термоэлектрода  $R'_1 = 1,033$  Ом и  $R'_2 = 2,394$  Ом.

2.33. Определите изменение показаний милливольтметра градуировки К, вызванное изменением температуры помещения, в котором находится милливольтметр, от 20 до 40 °С. Сопротивление внешней цепи 5 Ом, сопротивление милливольтметра при 20 °С  $R_{МВ} = 302$  Ом, сопротивление рамки, выполненной из меди,  $R_p = 65$  Ом, показание прибора 540 °С. Измерительная схема милливольтметра состоит из рамки и последовательно включенного марганцевого резистора. Температурный коэффициент электрического сопротивления меди  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

2.34. Известно, что температурный коэффициент милливольтметра уменьшается с уменьшением отношения сопротивления рамки к общему сопротивлению милливольтметра. Однако это отношение обычно бывает не менее  $1/3$ .

Почему не рекомендуется выбирать его меньшим при неизменном общем сопротивлении милливольтметра?

2.35. Принципиальная схема лабораторного потенциометра представлена на рис. 2.8. Известно, что ЭДС насыщенного нормального элемента зависит от температуры, в то время как рабочий ток потенциометра должен быть неизменным.

Каким образом это достигается в схеме потенциометра, например, при увеличении температуры от 20 до 50 °С?

2.36. Предположим, что в задаче 2.35 после увеличения температуры окружающей среды до 50 °С вновь была произведена установка рабочего тока, однако движок резистора  $R'_{НЭ}$  остался в том же положении, в котором он находился при температуре 20 °С.

Изменятся ли при этом показания потенциометра?

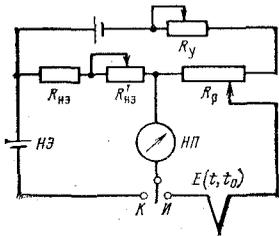


Рис. 2.8

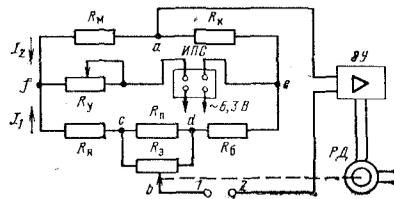


Рис. 2.9

2.37. Влияет ли на погрешность потенциометра класс применяемого нормального элемента?

2.38. Термо-ЭДС термоэлектрического термометра сопротивлением 50 Ом измеряется потенциометром с внутренним сопротивлением 200 Ом.

Останется ли точность измерения прежней, если внутреннее сопротивление потенциометра станет равным 20 кОм при неизменной чувствительности нуль-индикатора по току?

2.39. Нужно измерить ЭДС источника с очень высоким внутренним сопротивлением, например ЭДС электродной системы рН-метра.

Какой потенциометр, низкоомный или высокоомный, и почему следует использовать для этой цели?

2.40. Измерительная схема автоматического потенциометра типа КСП-4 (рис. 2.9) градуировки ХК со шкалой 0—400 °С характеризуется следующими значениями сопротивлений и токов:  $R_{Н}=509,5$  Ом;  $R_{6}=330$  Ом;  $R_{П}=12$  Ом;  $R_{3}=90$  Ом;  $I_1=3$  мА;  $I_2=2$  мА.

Определите, какая точка реохорда,  $c$  или  $d$ , соответствует верхнему пределу измерения?

2.41. Для условий задачи 2.40 определите, к какому из выводов, 1 или 2, следует подключать плюсовой электрод термоэлектрического термометра?

2.42. Какими будут показания потенциометра со шкалой  $-10 \div +10$  мВ при обратной полярности подключения источника измеряемого напряжения с ЭДС  $-3$  мВ?  $+5$  мВ?

2.43. Что будут показывать автоматические потенциометры с диапазонами измерения 0—400 °С градуировки ХК и 0—50 мВ при закорачивании их входных зажимов?

2.44. Для всех потенциометров сопротивление резисторов  $R_{Н}=509,5$  Ом (рис. 2.9).

Чем обусловлен выбор такого значения сопротивления?

2.45. Имеются два потенциометра градуировок К и ХК со шкалой 0—600 °С.

У которого из них резистор  $R_{П}$  (рис. 2.9) больше? Предполагается, что токи в ветвях схемы у обоих потенциометров одинаковы и соответственно равны  $I_1=3$  мА и  $I_2=2$  мА. Эквивалентное сопротивление реохордов  $R_{Н}=90$  Ом. Нерабочие участки реохорда также одинаковы и равны  $0,032R_{Н}$ .

2.46. Будут ли одинаковыми значения сопротивления  $R_{П}$  (рис. 2.9) у потенциометров с диапазонами измерения  $-50 \div +150$  °С, 0—200 °С одной и той же градуировки ХК?

2.47. Напишите уравнение равновесия потенциметрической схемы при значении измеряемой температуры  $t_{н}$ , равной нижнему пределу измерения, и на его основании определите сопротивление  $R_{6}$  (рис. 2.9) для потенциометра 0—600 °С градуировки ХК. Расчетное значение температуры свободных концов  $t_0=20$  °С.

2.48. Одинаковы ли значения сопротивления медного резистора  $R_{Н}$  у потенциометров КСП-4 с диапазоном измерения  $-50 \div +100$  °С градуировки ХК, 0—600 °С градуировки ХК, 0—600 °С градуировки К? Токи схемы для всех потенциометров одинаковы.

2.49. Был произведен расчет схемы потенциометра с диапазоном измерения 0—600 °С градуировки ХК исходя из принятой расчетной температуры свободных концов 20 °С.

Во всех ли точках шкалы будет производиться полная температурная компенсация температуры свободных концов, если она отличается от расчетного значения. Ток  $I_2$  (рис. 2.9) не зависит от температуры свободных концов и равен 2 мА.

2.50. Для рассчитанной измерительной схемы потенциометра  $0 \div -60$  °С градуировки ХК определите температурную погрешность в конце шкалы при  $t'_0=50$  °С и  $t'_0=0$  °С.

2.51. Будет ли зависеть значение температурной погрешности от значения выбранной расчетной температуры свободных концов?

2.52. Определите критическое значение порога чувствительности по напряжению для электронного усилителя автоматического потенциометра градуировки ХК с диапазоном шкалы 0—600 °С. Число витков реохорда  $n=1400$ .

2.53. Медный термометр сопротивления имеет сопротивление при  $20^\circ\text{C}$   $R_{20}=1,75\ \text{Ом}$ .

Определите его сопротивление при  $100$  и  $150^\circ\text{C}$ . Температурный коэффициент  $\alpha=4,26 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$ .

2.54. Определите сопротивление платинового термометра, изготовленного из платины марки Пл-2, при температуре  $-200^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$ . Сопротивление термометра при  $0^\circ\text{C}$  составляет  $7,45\ \text{Ом}$ .

2.55. Какими параметрами могут различаться термометры сопротивления различных классов, изготовленные из одного материала.

2.56. Определите предел допускаемой относительной погрешности термометра сопротивления I класса при измерении температуры  $300^\circ\text{C}$ .

2.57. Одинаковы ли значения коэффициентов преобразования у медных термометров сопротивления градуировок  $50\ \text{М}$  и  $100\ \text{М}$  в интервале  $0-150^\circ\text{C}$ ?

2.58. Определите среднее значение коэффициента преобразования для платиновых термометров градуировки  $10\ \text{П}$  и  $100\ \text{П}$  в интервалах  $400-500$ ,  $300-400^\circ\text{C}$  и сопоставьте результаты.

2.59. Оцените значение дополнительной погрешности, возникающей за счет самонагрева чувствительного элемента термометра сопротивления, выполненного в виде платиновой нити диаметром  $0,05$  и длиной  $10\ \text{мм}$ , измеряющего температуру воздушного потока. Коэффициент теплоотдачи от нити к воздуху  $\alpha_n=400\ \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ , ток, протекающий по нити,  $I=100\ \text{мА}$  сопротивление термометра при рабочей температуре  $R_t=0,54\ \text{Ом}$ .

2.60. Какой из термометров сопротивления — градуировки  $100\ \text{П}$ ,  $100\ \text{М}$  или полупроводниковый с параметрами  $R_0=10,6\ \text{кОм}$ ,  $B=2500\ \text{K}$  имеет наибольший коэффициент преобразования при температуре  $60^\circ\text{C}$ ?

2.61. Оцените дополнительную абсолютную погрешность измерения температуры термометром сопротивления градуировки  $50\ \text{М}$ , включенным по двухпроводной схеме, если значение сопротивления соединительных проводов равно  $4,5$  вместо градуировочного значения  $5\ \text{Ом}$ .

Как изменится эта погрешность, если действительное сопротивление соединительных проводов будет  $0,1$ , а градуировочное значение  $0,6\ \text{Ом}$ ?

2.62. Для условия задачи 2.61 определите, будет ли дополнительная погрешность, вызванная изменением сопротивления линии, зависеть от градуировки термометра?

2.63. Каким образом оценить дополнительную погрешность измерения температуры медным термометром сопротивления, вызванную отклонением действительных значений  $R'_0$  и  $\alpha'$  от номинальных.

Действительные значения:  $R'_0=49,90\ \text{Ом}$ ,  $\alpha'=4,25 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$ . Номинальные значения:  $R_0=50\ \text{Ом}$ ;  $\alpha=4,28 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$ . Текущее значение сопротивления термометра  $R_t=75,58\ \text{Ом}$ .

2.64. Сопротивление термометра градуировки  $10\ \text{П}$  измеряется потенциометрическим методом.

Оцените погрешность измерения температуры  $t=100^\circ\text{C}$ , если известно, что допустимое отклонение от градуировки для термометров класса III определяется значением (табл. П.16)

$$\Delta t \leq 0,2^\circ\text{C}.$$

Текущее сопротивление термометра  $R_t=13,9113\ \text{Ом}$ . Сопротивление образцовый катушки  $10 \pm 0,01\ \text{Ом}$ . Измерение падения напряжения осуществляется лабораторным потенциометром типа ПП-63 класса 0,05, предел допускаемой основной погрешности которого, мВ, равен

$$\Delta e = \pm (5 \cdot 10^{-4} U + 0,5 U_p),$$

где  $U$  — показание потенциометра мВ;  $U_p$  — цена деления шкалы реохорда, мВ. Ток, протекающий через сопротивление, равен  $3\ \text{мА}$ .

2.65. Равномерна ли шкала неуравновешенного моста (рис. 2.10) при условии, что сопротивление источников питания равно нулю, а входное сопротивление измерительного прибора ИП бесконечно большое.  $R_t$  — термометр сопротивления градуировки  $50\ \text{М}$ .

2.66. Одинаков ли коэффициент преобразования  $S=dU_{\text{вых}}/dR_t$  для трех мостовых схем, изображенных на рис. 2.11, если внутреннее сопротивление источника равно нулю и  $R_1=R_2=R_3=R$ .

2.67. Сопротивление термометра измеряется уравновешенным мостом по схеме, изображенной на рис. 2.12. Термометр сопротивления градуировки  $50\ \text{П}$ , измеряемая температура  $200$ , шкала моста  $0-300^\circ\text{C}$ .

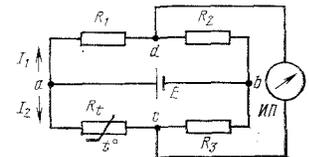


Рис. 2.10

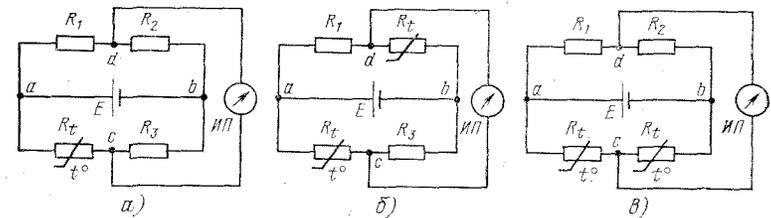


Рис. 2.11

Определите изменение показаний прибора, возникающее за счет увеличения сопротивления переходного контакта реохорда  $R_3$  на  $0,2\ \text{Ом}$ , при условии, что  $R_1=R_2$ , а  $R_t=R_{\text{из}}$ .

2.68. Зависит ли изменение показаний моста для условий 2.67 от соотношения  $R_2/R_1$  (например,  $R_2/R_1=0,1$  и  $R_2/R_1=10$ )?

2.69. Какое положение движка реохорда (в точке *a* или в точке *b*) соответствует нижнему пределу измерения уравновешенного моста градуировки 50 М в схемах рис. 2.13, *a* и *б*?

2.70. Выведите уравнение градуировочной характеристики для измерительных уравновешенных мостов, представленных на рис. 2.13.

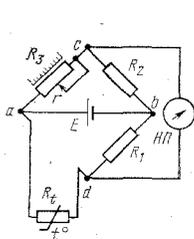


Рис. 2.12

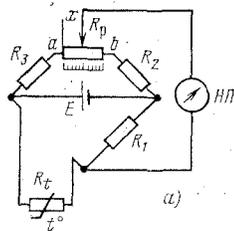


Рис. 2.13

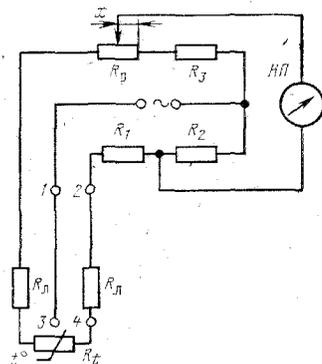
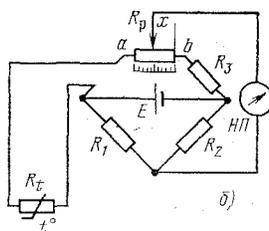


Рис. 2.14

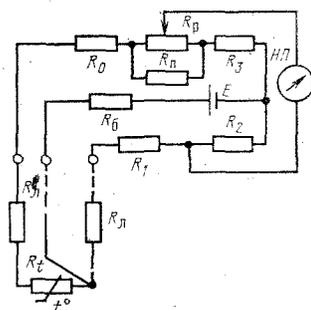


Рис. 2.15

2.71. Оцените изменение показаний уравновешенного моста (рис. 2.13, *a*), вызванное изменением переходного сопротивления движка реохорда на 0,2 Ом. Шкала моста 0—150 °С, градуировка 50 М  $R_2=R_3=100$  Ом.

2.72. Термометр сопротивления  $R_t$  подключается к уравновешенному мосту (рис. 2.14) с помощью соединительных проводов. Сопротивление  $R_{л}$  каждого из этих соединительных проводов при градуировке было равно 2,5 Ом.

Оцените изменение показаний моста, вызванное увеличением сопротивления каждого из соединительных проводов на 0,5 Ом, при двухпроводной схеме подключения термометра. Сопротивления резисторов

схемы имеют следующие значения:  $R_1=80$  Ом;  $R_2=80$  Ом;  $R_3=40$  Ом;  $R_p=40$  Ом;  $R_t=15$  Ом.

2.73. Останется ли прежним изменение показаний моста (см. задачу 2.72), если термометр сопротивления подключить по трехпроводной схеме?

2.74. Будет ли зависеть изменение показаний уравновешенного моста, вызванное изменением сопротивления соединительных проводов, подключающих термометр по трехпроводной схеме, от соотношения сопротивлений резисторов схемы? Для схемы (рис. 2.14) принимаются следующие сопротивления резисторов, Ом:  $R_1=35$ ;  $R_2=60$ ;  $R_3=50$ ;  $R_p=30$ ;  $R_t=15$ ;  $R_{л}=2,5$ ;  $\Delta R_{л}=0,5$ .

2.75. Рассчитайте сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_{л}$  уравновешенного моста, предназначенного для работы с медным термометром сопротивления типа ТСМ градуировки 50 М со шкалой 0—150 °С (рис. 2.15). Для расчета примите следующие сопротивления:  $R_p=90$  Ом;  $R_0=5$  Ом;  $R_{л}=2,5$  Ом;  $R_2=R_3=200$  Ом. Не рабочие участки реохорда не учитывать

2.76. При всех ли измеряемых температурах будет отсутствовать влияние изменения сопротивления линии на показания моста при условии, что сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  одинаковы?

2.77. Оцените изменение показаний моста (задача 2.75), вызванное увеличением сопротивления каждого соединительного провода на 0,1 Ом при измеряемой температуре  $t=120$  °С, градуировка термометра 50 М.

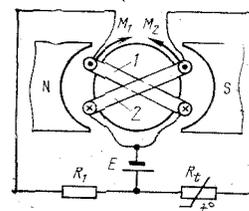


Рис. 2.16

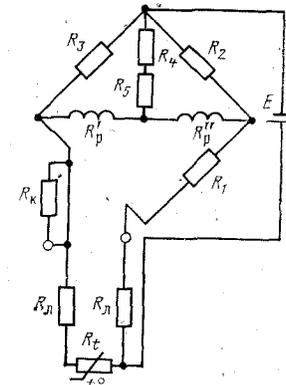


Рис. 2.17

2.78. Токи в рамках 1 и 2 логометра (рис. 2.16) имеют указанное на схеме направление. Индукция поля в центре слабее, чем у краев зазора.

Определите, будет ли при таком направлении токов логометр работоспособным.

2.79. Условиями эксплуатации логометров допускается изменение напряжения питания  $\pm 20\%$  номинального (4 В), так как при этом точность существенно не ухудшается.

Почему изменение напряжения питания мало сказывается на показаниях логометра?

2.80. Выше указывалось, что теоретически показания логометра не зависят от напряжения питания. Номинальное напряжение питания логометров  $U_{пит}=4$  В.

Изменяются ли какие-либо метрологические характеристики логометра, если напряжение питания уменьшить до 0,4 В?

2.81. Возможно ли питание логометра пульсирующим напряжением (например, от двухполупериодного выпрямителя без фильтра)?

2.82. Определите значение сопротивления  $R_k$  логометра, которое служит для контроля работы и подгонки сопротивления соединительных проводов. Логометр градуировки 100 П имеет шкалу 0—600 °С, красная черта нанесена на отметке шкалы 350 °С. Схема логометра приведена на рис. 2.17.

2.83. Оцените погрешность измерения температуры измерительной системой термометр сопротивлений — логометр. Термометр сопротивления градуировки 50 М. Логометр типа Л-64 со шкалой 0—150 °С, класса I. Стрелка прибора стоит на отметке 120 °С. Сопротивление соединительных проводов подогнано с точностью  $\pm 0,05$  Ом. Допускаемая основная погрешность термометра 1 °С.

2.84. Металлический термопреобразователь стоит в газоходе, футерованном огнеупорным кирпичом. Температура термопреобразователя  $t_T=1420$  °С, температура стенки газохода  $t_{ст}=1100$  °С, коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю  $\alpha_k=485$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), коэффициент излучения чехла термопреобразователя  $\epsilon_T=0,92$ .

Определите действительную температуру газа  $t_c$ , если считать, что погрешность измерения вызвана лучистым теплообменом между термопреобразователем и стенкой.

2.85. Для условия задачи 2.84 оцените погрешность, если абсолютные значения температуры уменьшились на 300 °С, т. е.  $t_T=1120$  ° и  $t_{ст}=800$  °.

2.86. Термопреобразователь стоит в газоходе (аналогично задачам 2.84 и 2.85), но вокруг термопреобразователя установлен экран. Температура стенки  $t_{ст}=1100$  °С, коэффициент теплоотдачи от газового потока к экрану  $\alpha_{к1}=485$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), температура экрана  $t_a=1420$  °С, приведенный коэффициент теплового излучения системы термопреобразователь — экран  $\epsilon_{пр}=0,92$ , коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю  $\alpha_{к2}=500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), температура газа  $t_c=1903$  °С.

Оцените погрешность измерения температуры газа, вызванную лучистым теплообменом.

2.87. Для условия задачи 2.84 оцените погрешность измерения температуры газа, если температура стенки за счет изоляции повысилась до 1300 °С.

2.88. Термопреобразователь, измеряющий температуру воздуха, стоит в воздухопроводе. Температура термопреобразователя  $t_T=356$  °С, температура стенки воздухопровода  $t_{ст}=270$  °С, термопреобразователь погружен в воздухопровод на глубину  $l=100$  мм, защитный чехол термопреобразователя выполнен из стали с теплопроводностью  $\lambda=18$  Вт/(м·К), наружный диаметр чехла  $d_n=24$  мм, внутренний диаметр чехла  $d_b=16$  мм, коэффициент теплоотдачи от воздуха к термопреобразователю  $\alpha_k=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определите действительную температуру воздуха и погрешность, вызванную отводом теплоты по чехлу термопреобразователя. Погрешность, обусловленную лучистым теплообменом между термопреобразователем и стенкой воздухопровода, во внимание не принимать.

2.89. Для условия задачи 2.88 определите действительное значение температуры воздуха, если теплопроводность  $\lambda=45$  Вт/(м·К).

2.90. Для условия задачи 2.88 определите действительную температуру воздуха, если глубина погружения термопреобразователя  $l=50$  мм.

2.91. Для условия задачи 2.88 определите действительную температуру воздуха, если коэффициент теплоотдачи от воздуха к термопреобразователю  $\alpha_k=200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

2.92. Для условия задачи 2.88 определите действительное значение температуры воздуха, если температура стенки воздухопровода 350 °С.

2.93. Термопреобразователь, измеряющий температуру газа, стоит в газопроводе. Температура термопреобразователя  $t_T=820$  °С, температура стенки газохода  $t_{ст}=630$  °С, длина погруженной части термопреобразователя  $l=100$  мм, наружный диаметр чехла термопреобразователя  $d_n=24$  мм, внутренний диаметр чехла  $d_b=16$  мм, коэффициент теплопроводности чехла термопреобразователя  $\lambda=18$  Вт/(м·К), коэффициент теплового излучения термопреобразователя  $\epsilon_T=0,8$ , коэффициент теплоотдачи между газом и термопреобразователем  $\alpha_k=90$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определите температуру газа  $t_c$ , считая, что температура термопреобразователя отличается от температуры газа за счет отвода теплоты по чехлу к стенке и за счет лучистого теплообмена между термопреобразователем и стенкой.

2.94. Для условия задачи 2.93 определите погрешность измерения температуры газа, если пренебречь отводом теплоты по чехлу за счет теплопроводности.

2.95. Для условия задачи 2.93 определите погрешность измерения температуры газа, если пренебречь отводом теплоты за счет излучения.

2.96. В газовом потоке, движущемся со скоростью 350 м/с, стоит термопреобразователь, который имеет температуру  $t_T=560$  °С. Удельная

теплоемкость газа  $c_p = 1500$  Дж/(кг·К). Коэффициент восстановления термопреобразователя  $r = 0,91$ .

Определите термодинамическую температуру газового потока  $T_c$  и температуру торможения  $T^*$ .

2.97. В общем виде уравнение, связывающее температуру термопреобразователя  $t_\tau$  и температуру измеряемой среды  $t_c$ , имеет вид

$$T_d \frac{dt_\tau}{d\tau} + t_\tau = t_c,$$

где  $T_d$  — постоянная времени термопреобразователя, с;  $\tau$  — время, с.

Выведите зависимость  $t_\tau = f(\tau)$  при скачкообразном изменении температуры среды  $t_c$  от 20 до 300 °С и определите значение динамической погрешности через 300 с после изменения  $t_c$ . Постоянная времени  $T_d = 120$  с.

2.98. Определите постоянную времени термопреобразователя, если известно, что через 10 с после скачкообразного изменения температуры среды температура термопреобразователя составляла  $t_\tau(\tau) = 43$  °С. Температура среды до изменения была  $t_{c.н} = 0$  °С, температура среды после изменения  $t_{c.к} = 100$  °С. Теплообмен между термопреобразователем и средой описывается дифференциальным уравнением первого порядка.

2.99. Определите температуру расплавленного металла, если известно, что температура термоэлектрического термометра через 0,5 с после погружения в металл составляла  $t_1 = 608$  °С, через 1 с после погружения  $t_2 = 980$  °С и через 1,5 с  $t_3 = 1202$  °С. Регулярный тепловой режим нагрева термометра наступает через 0,3 с после погружения его в металл, и коэффициенты уравнения не зависят от температуры среды.

2.100. Температура газового потока постоянна и имеет значение свыше 2500 °С. Контактный малоинерционный термоэлектрический термометр на долю секунды был погружен в газовый поток и немедленно удален из него, не нагревшись до температуры потока.

Во время нахождения термометра в газовом потоке было измерено значение его температуры и были определены первая и вторая производные для этого же момента времени  $\tau_1$ .

Дифференциальное уравнение термометра имеет вид

$$T_d \frac{dt_\tau}{d\tau} + t_\tau = t_c,$$

где  $t_\tau$  — температура термометра;  $t_c$  — температура среды;  $T_d$  — постоянная времени термометра.

Определите температуру среды, если известно, что в момент времени  $\tau = \tau_1$

$$t_\tau(\tau_1) = 657 \text{ °С}; \quad \left[ \frac{dt_\tau}{d\tau} \right]_{\tau=\tau_1} = 669 \text{ °С/с}; \quad \left[ \frac{d^2 t_\tau}{d\tau^2} \right]_{\tau=\tau_1} = -200 \text{ (°С/с)}^2.$$

2.101. Для условия задачи 2.100 оцените погрешность определения температуры газового потока, если известно, что температура термометра определена с погрешностью  $\delta t = \pm 0,5 \%$ , первая производная — с погрешностью  $\delta t' = \pm 2 \%$  и вторая производная — с погрешностью  $\delta t'' = \pm 10 \%$ .

2.102. Определите, какую постоянную времени должен иметь термопреобразователь, чтобы он мог регистрировать синусоидальные колебания температуры среды с погрешностью, не превышающей 5 % диапазона изменения температуры среды. Максимальная частота колебаний составляет 8 Гц. Термопреобразователь описывается дифференциальным уравнением первого порядка (см. задачу 2.100).

2.103. Для измерения температуры  $t_c$  жидкой стали применяется термоэлектрический термометр однократного действия, который расплавляется через 3 с после погружения в металл.

Определите, какую постоянную времени должен иметь термометр, чтобы через  $\tau = 2$  с после погружения в металл его температура  $t_\tau$  отличалась от температуры металла не более чем на 0,5 %. Термометр погружается в металл из воздуха, имеющего температуру  $t_\tau(0) = 40$  °С.

2.104. Проанализируйте, какой из методов измерения температуры по излучению (квазимонохроматический, полного излучения или спектрального отношения) является более чувствительным в интервале температур 1000—4000 К при длинах волн  $\lambda_1 = 0,65$  мкм и  $\lambda_2 = 0,45$  мкм.

2.105. Зависит ли чувствительность квазимонохроматического метода от значения эффективной длины волны спектральной энергетической яркости (например, при  $\lambda_1 = 0,65$  мкм и  $\lambda_2 = 0,45$  мкм).

2.106. Почему в квазимонохроматических (оптических) пирометрах ОППИР-017 используется красный светофильтр ( $\lambda_a = 0,65$  мкм), а не синий (т. е. с меньшей эффективной длиной волны, при которой чувствительность выше).

2.107. Сохраняется ли работоспособность квазимонохроматического (оптического) пирометра, если в его оптической схеме поменять места красный светофильтр и поглощающее стекло?

2.108. Температура газохода измеряется квазимонохроматическим (оптическим) пирометром. Стрелка пирометра показывает температуру 1100 °С.

Определите действительную температуру газохода и систематическую погрешность измерения температуры стенки, если коэффициент теплового излучения ее составляет  $\epsilon_\lambda = 0,75$ . Эффективная длина волны пирометра  $\lambda_a = 0,65$  мкм.

2.109. Предположим, что коэффициент теплового излучения тела не зависит от температуры.

Будет ли при этом погрешность показаний квазимонохроматического пирометра от неполноты излучения (т. е. разность между яркостной и истинной температурами) зависеть от температуры тела?

2.110. Определите коэффициент пиromетрического ослабления поглощающего стекла квазимонохроматического пиromетра, если известно, что температура, отсчитанная по одной и той же шкале пиromетра без поглощающего стекла, составила 1103, а с поглощающим стеклом 806 °С.

2.111. При измерении температуры стального слитка квазимонохроматическим пиromетром эффективная длина волны составляет  $\lambda_0 = 0,66 \pm 0,01$  мкм, монохроматический коэффициент теплового излучения  $\epsilon_{\lambda} = 0,65 \pm 0,05$ . Температура, отсчитанная по пиromетру, равна 1100 °С.

Определите систематическую погрешность метода измерения, вызванную «нечернотой» слитка, а также границы этой погрешности, обусловленные погрешностями определения  $\lambda_0$  и  $\epsilon_{\lambda}$ . Погрешности пиromетра и погрешности отсчета температуры наблюдателем во внимание не принимать.

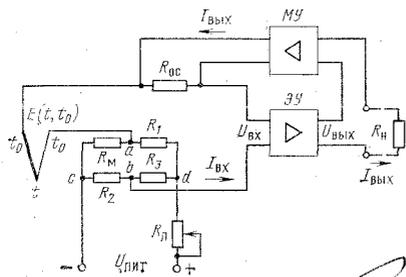


Рис. 2.18

2.112. Пиromетр полного излучения (радиационный) имеет показатель визирования  $n = 1/7$ . Диаметр калильной трубки, на которую визируется пиromетр, 30 мм.

Определите максимальное расстояние  $l$  между отверстием калильной трубки и термоприемником пиromетра.

2.113. Можно ли пиromетром полного излучения измерить температуру слитка в нагревательном колодце, если сторона слитка имеет размеры  $1800 \times 400$  мм, расстояние от слитка до пиromетра 1400 мм, показатель визирования  $n = 1/7$ .

2.114. Оцените систематическую погрешность измерения температуры радиационным методом. Радиационная температура  $t_p = 1627$  °С, коэффициент теплового излучения  $\epsilon = 0,38$ .

2.115. Оцените систематическую погрешность измерения температуры методом спектрального отношения, если цветовая температура  $t_d = 1247$  °С, коэффициент теплового излучения  $\epsilon_{\lambda 1} = 0,358$  (при  $\lambda_1 = 0,65$  мкм) и  $\epsilon_{\lambda 2} = 0,390$  (при  $\lambda_2 = 0,45$  мкм).

2.116. Определите значение  $R_{00}$  (рис. 2.18) нормирующего преобразователя градуировки К 0—800 °С в предположении, что корректирующий мост сбалансирован при 0 °С и осуществляет полную компенсацию во всем диапазоне изменения температуры свободных концов термоэлектрического термометра. Известны следующие параметры преобразователя:

Входное сопротивление усилителя  $r_{вх} \dots \dots \dots 70$  Ом  
 Номинальное сопротивление внешней цепи термоэлектрического термометра вместе с сопротивлением корректирующего моста  $R_T \dots \dots \dots 30$  Ом  
 Номинальное сопротивление нагрузки усилителя с учетом сопротивления гальванического разделителя  $R_H \dots \dots \dots 20\ 000$  Ом  
 Выходное сопротивление усилителя  $r_{вых} \dots \dots \dots 35\ 000$  Ом

Коэффициент усиления усилителя по току  $K_i \dots \dots \dots 2500$

2.117. Для нормирующего преобразователя (рис. 2.18), исходя из условия 2.116, оцените дополнительную погрешность в конце диапазона преобразования, вызванную уменьшением коэффициента усиления на 10 % первоначального значения.

2.118. Какие элементы и каким образом следует изменить в измерительной схеме нормирующего преобразователя с диапазоном преобразования 0—600 °С, если градуировку К заменить на градуировку ХК. Корректирующий мост (рис. 2.18) сбалансирован при температуре  $t = 0$  °С;  $R_1$  и  $R_3$  неизменны.

2.119. Произведите расчет медного сопротивления  $R_m$  для преобразователя 0—800 °С градуировки К для расчетной температуры свободных концов  $t_0 = 25$  °С при условии  $R_1 = R_3 = 2$  кОм,  $U_{пит} = 5,5$  В; сопротивление источника питания считать равным нулю.

Сопротивление нагрузки моста считается бесконечно большим, мост сбалансирован при 0 °С. Температурный коэффициент меди  $\alpha = 4,26 \times 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Предполагается, что  $R_1 = R_3 \gg R_m$  и  $R_2$ .

## Глава третья

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Единицей измерения давления в Международной системе единиц (СИ) является паскаль (Па). Однако до настоящего времени применяются также приборы, отградуированные в кгс/см<sup>2</sup>, мм вод. ст., мм рт. ст. и барах. Между этими единицами и паскалем имеют место следующие соотношения: 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98066,5 Па; 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па; 1 мм рт. ст. = 133,322 Па; 1 бар = 10<sup>5</sup> Па.

Для измерения давления и разности давлений наибольшее распространение получили различные виды жидкостных и пружинных (с упругим чувствительным элементом) приборов.

В жидкостных приборах измеряемое давление (разность давлений) уравновешивается давлением столба жидкости (разностью давлений столбов жидкости). Давление столба жидкости определяется высотой столба, плотностью и ускорением свободного падения, поэтому погрешности измерения давления жидкостными манометрами связаны с погрешностями измерения высоты столба жидкости, точностью определе-

ния плотности, которая зависит от температуры, и ускорения свободного падения, определяемого географической широтой и высотой над уровнем моря.

Для решения задач, связанных с измерением давления, достаточно сведений в объеме [2]. Основной формулой для жидкостных приборов давления является формула, устанавливающая зависимость между измеряемым избыточным давлением или перепадом давлений  $\Delta p$ , плотностью заполняющей жидкости  $\rho$  и разностью ее уровней  $h$  в обоих сосудах прибора:

$$\Delta p = h\rho g.$$

Из этой формулы легко могут быть получены выражения для погрешностей измерения, вызванных ошибками отсчета  $h$  или отклонением  $\rho$  и  $g$  от значений, принятых при градуировке. При решении задач следует внимательно следить за единицами получающихся величин, например, если в вышеприведенную формулу подставить  $h$  в м,  $\rho$  в  $\text{кг/м}^3$ ,  $g$  в  $\text{м/с}^2$ , то  $\Delta p$  будет в Па.

В пружинных приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или развиваемой ими силе. На показания пружинных приборов может оказывать влияние температура окружающей среды, которая вызывает изменение свойств чувствительного элемента и передаточного механизма. Большое распространение получили приборы для измерения давления с унифицированным выходным сигналом, работающие по принципу компенсации усилий. Приборы этого типа применяются для измерения давления, разрежения, вакуума и разности давлений в широком диапазоне значений измеряемого параметра.

При решении задач по приборам с силовой компенсацией следует четко представлять, что в статическом режиме в кинематической схеме этих приборов происходит уравнивание усилия, развиваемого чувствительным элементом, усилием, действующим на этот элемент со стороны устройства обратной связи (электрического или пневматического). Эти усилия легко могут быть рассчитаны по известным усилиям, развиваемым отдельными элементами, и соотношению плеч. В настоящее время практически все выпускаемые приборы с силовой компенсацией имеют унифицированный выходной сигнал (электрический или пневматический).

3.1. Можно ли при использовании U-образного манометра делать отсчет отклонения уровня от исходного только в одной трубке с последующим удвоением?

3.2. В U-образном манометре с водяным заполнением внутренние диаметры трубок соответственно равны 8 и 8,3 мм. При измерении давления уровень в первой трубке переместился на 204 мм. Измеряемое давление считалось равным 4 кПа.

Оцените погрешность, вызванную неучетом реального уровня во второй трубке.

3.3. Как изменятся показания ртутного U-образного манометра, если барометрическое давление уменьшилось на 7 кПа при неизменном абсолютном измеряемом давлении? Температура окружающей среды и ускорение свободного падения остаются нормальными.

3.4. Ртутный барометр с латунной шкалой в Ленинграде показывает  $p_0 = 98,658$  кПа при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$ .

Приведите показания барометра к нормальным условиям. Географическая широта Ленинграда  $60^\circ$ , он расположен на уровне моря.

3.5. Определите цену деления чашечного манометра в единицах давления; если он заполнен ртутью.

Диаметр минусовой трубки 6, диаметр плюсового сосуда 60 мм. Деления на шкале нанесены через 1 мм. Условия измерения:  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $g = 980,665$   $\text{м/с}^2$ .

3.6. Рассчитайте, каким должно быть соотношение между диаметрами плюсового и минусового сосудов чашечного манометра, чтобы при отсчете уровня жидкости только в минусовом сосуде погрешность измерения разности давления не превосходила 0,1 %.

3.7. Изменится ли цена деления чашечного манометра (см. задачу 3.5), если все пространство над ртутью в трубке и сосуде залито водой (рис. 3.1)? Температура дифманометра и измеряемой среды равна  $30^\circ\text{C}$ .  $\Delta p = h\rho g(\rho_r/\rho_w)(1 + \beta/F)$

3.8. Изменяется ли чувствительность микроманометра при изменении угла наклона измерительной трубки?  $g_c \quad S = \Delta l \cdot t / \Delta p \cdot P$

3.9. Длина столбика жидкости в трубке микроманометра составляла 95 делений при постоянной шкалы прибора  $K = 0,6$ .

Изменится ли относительная погрешность измерения давления, если трубку установить в положение, при котором постоянная шкалы прибора  $K = 0,3$ ?  $g_c \quad \downarrow$

3.10. Определите цену деления спиртового микроманометра с наклонной трубкой, если диаметр трубки 4 мм, диаметр плюсового сосуда 70 мм, угол наклона трубки микроманометра  $48^\circ 23'$ , плотность спирта (концентрация 96 %) в условиях градуировки при  $20^\circ\text{C}$   $\rho_{20} = 808$   $\text{кг/м}^3$ .

Расстояние между отметками шкалы равно 1 мм. Ускорение свободного падения — нормальное.

Определите поправочный множитель на изменение плотности спирта, если микроманометр работает при температуре  $35^\circ\text{C}$  ( $\rho_{35} = 793$   $\text{кг/м}^3$ ).

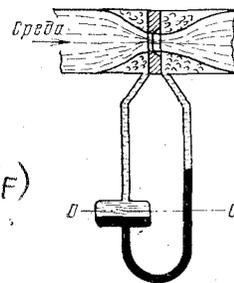


Рис. 3.1

3.11. Давление отсчитано по шкале спиртового микроманометра при рабочих условиях  $t=40\text{ }^\circ\text{C}$  и  $g=9,8156\text{ м/с}^2$ .

Определите действительное измеряемое давление, если градуировка производилась при  $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $g=9,80665\text{ м/с}^2$ . Отсчет по шкале  $n=195$ ;  $K=0,8$ . Плотность спирта  $\rho_{20}=808\text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{40}=790\text{ кг/м}^3$ .

3.12. Чувствительным элементом тягомеров является мембранная коробка, составленная из двух гофрированных мембран (рис. 3.2).

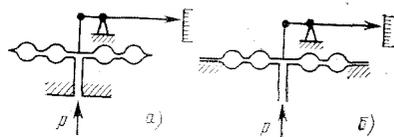


Рис. 3.2

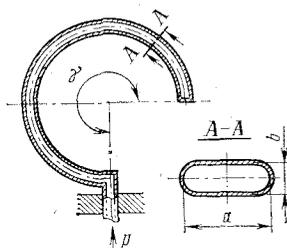


Рис. 3.3

В одном случае коробка прикреплена к корпусу штуцером (рис. 3.2, а), в другом — к корпусу в месте соединения мембран (рис. 3.2, б).

Одинаковы ли в этих случаях коэффициенты преобразования мембранных коробок?

3.13. Манометрические трубчатые пружины изготовлены из одинакового материала, имеют одинаковую толщину стенок, одинаковый радиус и размер  $a$  (рис. 3.3).

Коэффициент преобразования какой из трубчатых пружин будет наибольшим и как он зависит от центрального угла  $\gamma$  и размера  $b$ ?

3.14. Чувствительным элементом манометра является сильфон. Уравновешивание давления (разности давлений) осуществляется за счет упругого противодействия сильфона и пружины, эффективная площадь сильфона  $S_{\text{эф}}=31,5\text{ мм}^2$ , жесткость пружин  $K_{\text{п}}=9,20\text{ Н/мм}$ , жесткость одного гофра сильфона к воздействию осевого усилия  $K_{\text{с}}=0,25\text{ Н/мм}$ , число гофр 8. При перемещении стрелки манометра от начала до конца шкалы доньшко сильфона перемещается на  $h=4,5\text{ мм}$ .

Определите пределы измерения манометра.

3.15. Определите погрешность манометра с токовым выходным сигналом (0—5 мА) с пределами измерения 0—4 МПа, если при измерении давления 3,2 МПа выходной сигнал составил  $I=3,93\text{ мА}$ .

3.16. Определите погрешность манометра с пневматическим выходным сигналом (0,02—0,1 МПа) и пределом измерения 0—0,6 МПа, если при давлении 0,45 МПа значение выходного сигнала составило 0,084 МПа.

3.17. Выберите шкалу манометра (определите верхний предел измерения) для измерения постоянного давления: а) 0,3 МПа; б) 26 МПа.

3.18. Три манометра различным образом установлены на трубопроводе с водой (рис. 3.4), имеющей давление 0,8 МПа.

Одинаковыми ли будут их показания (собственными погрешностями манометров можно пренебречь)?

3.19. Манометр, измеряющий давление пара, установлен на 5 м ниже точки отбора. Манометр показывает  $p=5\text{ МПа}$ , среднее значение температуры конденсата в импульсной линии  $t=60\text{ }^\circ\text{C}$ .

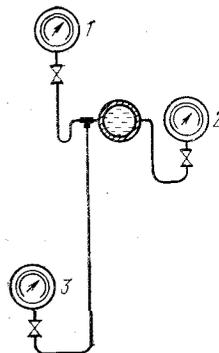


Рис. 3.4

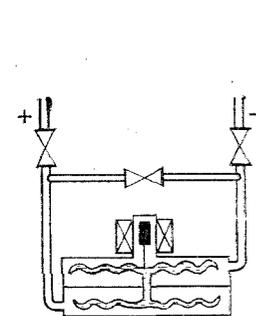


Рис. 3.5

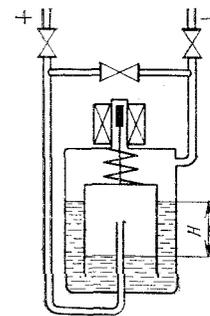


Рис. 3.6

Определите действительное значение давления в паропроводе.

3.20. В мембранном дифференциальном манометре (рис. 3.5) для уменьшения температурной погрешности одна из коробок делается меньшей жесткости, чем другая.

В какой камере (плюсовой или минусовой) должна располагаться эта коробка?

3.21. В колокольном дифманометре (рис. 3.6) с тонкими стенками уравновешивание колокола осуществляется за счет деформации пружины (выталкивающей силой жидкости можно пренебречь).

Изменится ли коэффициент преобразования дифманометра, если утяжелить колокол при неизменной линейной характеристике пружины?

3.22. Какой должна быть жесткость пружины в колокольном дифманометре с пружинным уравновешиванием, чтобы изменение перепада давления от 0 до 1,6 кПа вызвало перемещение колокола на 4 мм? Диаметр колокола 50 мм.

3.23. Влияет ли плотность жидкости, заполняющей колокольный дифманометр, на его диапазон измерения?

3.24. Рассчитайте вес уравновешивающего груза кольцевого дифманометра с диапазоном измерения 0—4 кПа.

Средний диаметр кольца 100 мм, сечение кольца 12,8 см<sup>2</sup>, расстояние от оси вращения кольца до центра тяжести грузов 65 мм. Максимальный угол поворота 50°.

3.25. Измерение давления осуществляется манометром с дифференциально-трансформаторной системой дистанционной передачи показаний (рис. 3.7). ДТП-1 — преобразователь манометра, ДТП-2 — преобразователь вторичного прибора. Диапазон измерения прибора 0—16 МПа.

Изменяются ли показания вторичного прибора, если при неизменном положении плунжера ДТП-1 поменять фазу питания обмотки возбуждения ДТП-1 (зажим 1 соединить с 2', зажим 2 соединить с 1')?

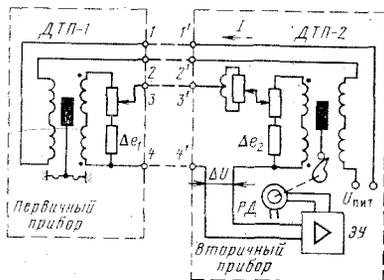


Рис. 3.7

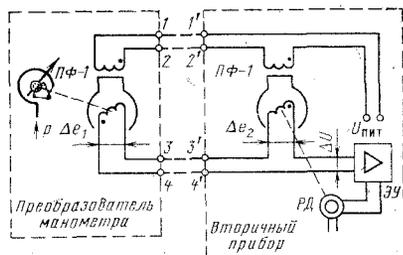


Рис. 3.8

3.26. Преобразователь манометра ферродинамической системы с диапазоном измерения 0—4 МПа имеет тип ПФ-1. Вторичный прибор имеет шкалу 0—4 МПа и также преобразователь типа ПФ-1. Измеряемое давление  $p=3$  МПа.

Каковы будут показания прибора (рис. 3.8), если изменить фазу питания ПФ-1 первичного преобразователя (соединить провода 1 и 2' и 2 и 1')?

3.27. Для условий задачи 3.26 определите показание вторичного прибора, если в его схеме преобразователь ПФ-1 заменить на ПФ-3. Первичный прибор по-прежнему имеет преобразователь ПФ-1.

3.28. В схеме напоромера с унифицированным токовым выходным сигналом (рис. 3.9) при  $p=0$   $I=0$  и катушка обратной связи находится в каком-то начальном положении.

Определите, должна ли катушка втягиваться в магнитопровод при увеличении  $I$  или, наоборот, выталкиваться для обеспечения компенсации усилий.

3.29. Возможно ли использование в схеме напоромера (рис. 3.9) в качестве обратной связи устройства, катушка которого втягивается под действием выходного тока?

3.30. При  $p=0$  у напоромера (рис. 3.9)  $I>0$ .

Каким образом следует изменить степень натяжения пружины корректора, чтобы скорректировать нуль?

3.31. Положение каких органов настройки в напоромере (рис. 3.9) и каким образом следует изменить для увеличения диапазона измерения напоромера?

3.32. У электросиловых преобразователей устройства обратной связи могут быть двух разновидностей: магнитоэлектрической системы, у которой развиваемое усилие  $q$  пропорционально выходному току,  $q=kI$ , и электромагнитной системы, у которой усилие пропорционально квадрату тока,  $q=kI^2$ .

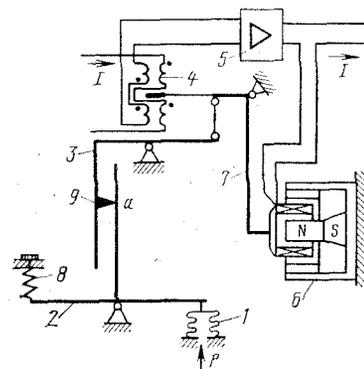


Рис. 3.9

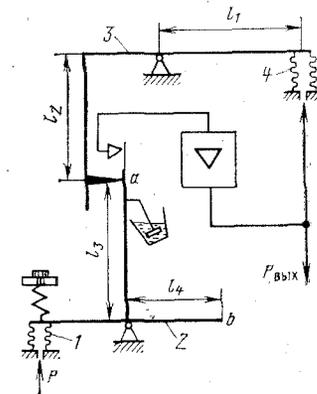


Рис. 3.10

Определите зависимость  $I=f(p)$  для преобразователя, изображенного на рис. 3.9, при использовании каждого из этих устройств обратной связи. Все элементы преобразователя линейны, коэффициент усиления усилителя  $k_y=\infty$ .

3.33. Определите, для измерения напора или разрежения предназначен прибор, схема которого изображена на рис. 3.10.

3.34. В схеме напоромера с унифицированным пневматическим выходным сигналом (рис. 3.10) точка присоединения сиффона 1 к рычагу 2 перенесена в точку  $b$ . В качестве чувствительного элемента используется сиффон с эффективной площадью  $S_{\text{и}}=10$  см<sup>2</sup>;  $l_1=40$  мм;  $l_2=56$  мм;  $l_3=38$  мм;  $l_2+l_3=115$  мм. Эффективная площадь сиффона обратной связи  $S_0=2$  см<sup>2</sup>.

Определите, какому входному давлению будет соответствовать выходное давление 0,1 МПа.

3.35. Для напоромера (см. условие 3.34) определите значение  $l_3$  для диапазона измерения 0—25 кПа;  $l_1=40$  мм;  $l_4=38$  мм;  $l_2+l_3=115$  мм. Размеры сифонов  $S_{II}=10$  см<sup>2</sup> и  $S_0=2$  см<sup>2</sup>.

3.36. У напоромера диапазону изменения входного давления 0—16 кПа соответствовало изменение  $p_{вых}=0,02\div 0,1$  МПа. При этом размеры элементов кинематической схемы имели значения, указанные в условии 3.34. С целью увеличения верхнего предела измерения до 25 кПа размер  $l_3$  был увеличен до 68,7 мм (см. задачу 3.35) без изменения положения корректора нуля.

Определите выходное давление в такой схеме при  $p_{вых}=0$ .

## Глава четвертая

### ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

В настоящее время существует большое число методов измерения уровня жидкостей и сыпучих тел. Одним из наиболее распространенных методов измерения уровня жидкостей является измерение гидростатического давления столба жидкости, осуществляемое водомерными стеклами и их разновидностями, а также манометрическими или пневмометрическими устройствами. Во всех этих методах, как правило, главной является погрешность за счет изменения плотности измеряемой жидкости от температуры. Для исключения или уменьшения этой погрешности создаются сложные измерительные системы, одновременно измеряющие гидростатическое давление жидкости и ее плотность и корректирующие затем показания уровнемера в соответствии с плотностью. Естественно, что усложнение измерительной системы уменьшает ее надежность.

Все системы измерения уровня жидкостей гидростатическим методом требуют тщательного анализа измерительной системы, соединительных линий, их температурного режима, особенностей работы измерительных преобразователей системы. Например, для одной и той же схемы измерения уровня в барабане парогенератора гидростатическим методом применение мембранных дифманометров вместо поплавковых существенно уменьшает возможные погрешности измерения уровня. Это объясняется тем, что объем жидкости, перемещающейся в мембранных дифманометрах при изменении измеряемого уровня, значительно меньше, чем в поплавковых.

Пневмометрический метод измерения уровня основан на измерении давления воздуха (инертного газа), уравновешивающего гидростатическое давление столба жидкости. Поэтому кроме недостатков и особенностей гидростатического метода измерения здесь добавляется специфика пневмометрической системы.

Одними из наиболее простых и надежных являются поплавковые

уровнемеры. Однако они практически не могут применяться при высоких давлениях. Некоторый прогресс в этом отношении представляют буйковые уровнемеры, которые могут работать и при значительных давлениях. Но применение как поплавковых, так и буйковых уровнемеров затруднено в агрессивных жидкостях и в средах с выпадающими осадками.

Емкостные уровнемеры могут применяться для измерения как непроводящих, так и проводящих жидкостей. Они пригодны для измерения уровня в широком диапазоне давлений и температур измеряемых сред, как агрессивных, так и неагрессивных. Показания их зависят от диэлектрической проницаемости среды, которая может изменяться с температурой. Применение компенсационных емкостей позволяет существенно уменьшить это влияние, но не исключает его полностью. Схемное исполнение электронной части емкостных уровнемеров достаточно сложно, что ограничивает их широкое распространение.

Радиоизотопные уровнемеры, как правило, применяются в тех случаях, когда непосредственный контакт с измеряемой средой по каким-либо причинам нежелателен (например, уровень жидкого хлора, шихты в доменной печи и т. д.). Следует иметь в виду, что на показания радиоизотопных уровнемеров практически не влияет изменение плотности измеряемой среды (для принципиальных схем, принятых в серийных приборах).

4.1. Уровень воды в барабане парогенератора измеряется водомерным стеклом (рис. 4.1). Давление пара в барабане 10 МПа, вода в барабане находится при температуре насыщения. Действительное значение уровня  $H=0,5$  м.

Определите уровень в водомерном стекле  $h$ , если температура воды в водомерном стекле 150 °С.

4.2. Для условия задачи 4.1 определите, как изменится погрешность измерения уровня, если перед измерением водомерное стекло было продуто и температура воды в стекле стала  $t=300$  °С.

4.3. Изменение уровня воды в открытом резервуаре  $H_{макс}$  (рис. 4.2) может достигать 3 м.

Можно ли для измерения уровня гидростатическим методом использовать мембранный дифманометр с предельным номинальным перепадом  $\Delta p_n=40$  кПа, если он будет расположен ниже минимального уровня на  $h=3$  м. Минусовая камера дифманометра соединена с атмосферой.

4.4. Уровень воды в емкости измеряется гидростатическим способом по схеме, изображенной на рис. 4.3. Максимальный уровень  $H_{макс}=400$  мм.

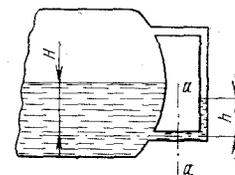


Рис. 4.1

Оцените относительную погрешность измерения максимального уровня, вызванную изменением уровня воды в минусовой импульсной трубке мембранного дифманометра. Внутренний диаметр импульсных трубок  $d=10$  мм. При изменении уровня от 0 до  $H_{\text{макс}}$  происходит изменение объема минусовой камеры дифманометра на  $\Delta V=4$  см<sup>3</sup>.

При  $H=0$  уровни воды в обеих импульсных трубках равны. Температура окружающей среды и воды в емкости и трубках  $t=20$  °С.

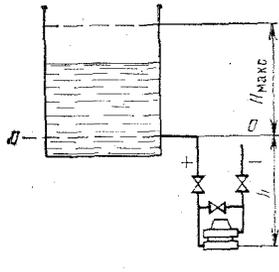


Рис. 4.2

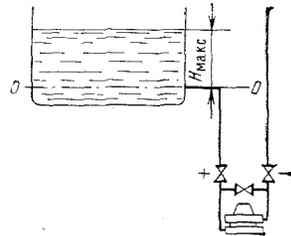


Рис. 4.3

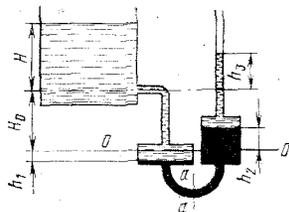


Рис. 4.4

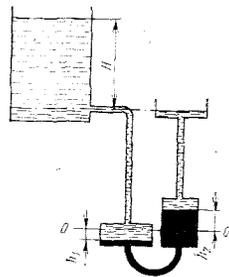


Рис. 4.5

4.5. Для условия задачи 4.4 оцените погрешность, если измерение уровня осуществляется поплавковым дифманометром (рис. 4.4) с диаметром поплавкового сосуда  $D_{\text{п}}=77$  мм и диаметром сменного сосуда  $D_{\text{с}}=64,6$  мм. Плотность ртути в дифманометре при  $t=20$  °С  $\rho_{\text{рт}}=13\,546$  кг/м<sup>3</sup>, плотность воды  $\rho_{\text{в}}=998,2$  кг/м<sup>3</sup>.

4.6. Для условия задачи 4.5 оцените погрешность, если на минусовой импульсной линии установлен уравнивающий сосуд диаметром  $d_{\text{с}}=100$  мм (рис. 4.5).

4.7. Уровень воды в открытой емкости измеряется дифманометром-уровнеммером. Уровнеммер градуировался при температуре воды в емкости и импульсных трубках 30 °С.

Изменяются ли показания уровнемера, если температура воды в емкости увеличилась до 90 °С, а температура воды в импульсных линиях осталась 30 °С.

4.8. Измерение уровня воды в барабане котла производится с помощью двухкамерного уравнивающего сосуда (рис. 4.6). Температура воды в сосуде равна температуре воды в емкости.

Будет ли в этом случае изменение плотности воды влиять на показания уровнемера? Давление в барабане 0,1 МПа.

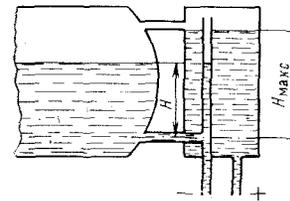


Рис. 4.6

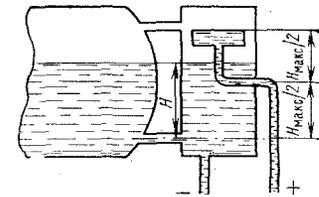


Рис. 4.7

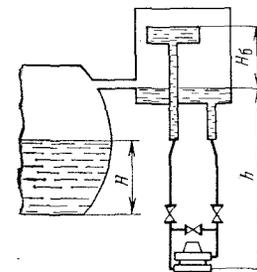


Рис. 4.8

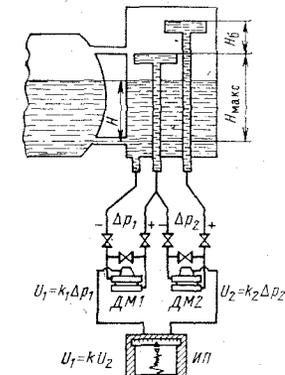


Рис. 4.9

4.9. Как изменятся показания уровнемера, отградуированного при давлении 0,1 МПа (условие задачи 4.8), если давление насыщения в барабане поднимается до 10 МПа?

4.10. Давление в барабане котла при неизменном уровне изменилось от 10 до 20 МПа, что вызвало соответствующее изменение температуры насыщения.

Будет ли погрешность измерения уровня, вызванная изменением параметров, в схемах рис. 4.6 и 4.7 одинаковой? Температура воды в импульсных трубках равна 30 °С,  $H_{\text{макс}}=500$  мм.

Температура воды в барабане и сосуде одинаковы.

4.11. Определите зависимость перепада, действующего на дифманометр (рис. 4.8), от уровня и плотностей воды и пара в барабане.

Вода и пар в барабане находятся на линии насыщения при  $p = 10$  МПа. Температура воды в импульсных линиях  $30^\circ\text{C}$ .

4.12. Схема трехкамерного устройства для измерения уровня с введением поправки на изменение плотности воды и пара представлена на рис. 4.9.

Составьте уравнение, устанавливающее связь между показаниями измерительного прибора (ИП) и уровнем воды в барабане. Определите, как будут изменяться показания прибора при изменении плотности воды и пара в барабане.

Выходные сигналы дифманометров пропорциональны действующим перепадам давления. Измерительный прибор представляет собой следящую систему, в которой путем изменения коэффициента преобразования  $k$  всегда устанавливается равенство напряжений  $U_1 = kU_2$ .

4.13. Предположим, что ДМ1 и ДМ2 представляют собой дифманометры с токовым выходным сигналом. Нагрузочные резисторы  $R_1$  и  $R_2$  включены в схему следящей системы, изображенной на рис. 4.10.

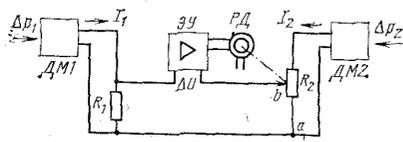


Рис. 4.10

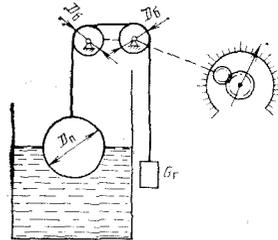


Рис. 4.11

Будет ли положение движка реохорда  $R_2$  пропорционально измеряемому уровню? Какое положение движка (верхнее или нижнее) соответствует максимальному уровню?

4.14. В цилиндрическом вертикальном стальном резервуаре-хранилище диаметром 12 и высотой 10 м находится керосин. При температуре  $30^\circ\text{C}$  высота уровня керосина составляет 8,5 м.

Изменяются ли показания гидростатического уровнемера и изменится ли действительный уровень керосина, если температура окружающего воздуха и резервуара вместе с керосином будет  $0^\circ\text{C}$ ?

4.15. Определите вес груза и передаточное число измерительного преобразователя поплавкового механического уровнемера (рис. 4.11), измеряющего уровень кислоты в емкости в интервале от 0 до 500 мм. Плотность кислоты  $\rho_k = 1230$  кг/м<sup>3</sup>, диаметр шарового поплавка  $D_n = 100$  мм, материал поплавка — пластмасса плотностью  $\rho_n = 1500$  кг/м<sup>3</sup>, толщина стенок поплавка  $b = 5$  мм, вес троса 3 Н, сила трения в пере-

даточном механизме не превышает 0,5 Н, угол поворота стрелки по шкале  $\alpha = 270^\circ$ , диаметр барабана, через который перекинут трос,  $D_6 = 50$  мм.

4.16. Пьезометрический уровнемер измеряет уровень щелочи в выпарном аппарате (рис. 4.12).

Определите давление воздуха в источнике питания и примерный часовой расход воздуха при максимальном уровне. Максимальная плот-

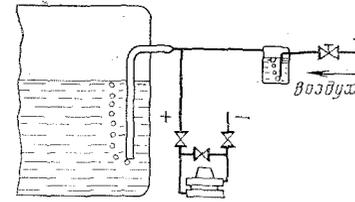


Рис. 4.12

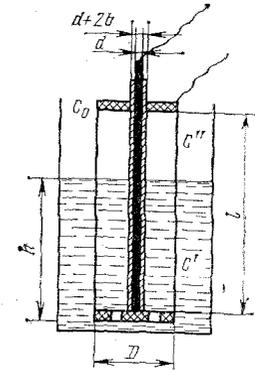


Рис. 4.13

ность раствора щелочи  $\rho_{ш} = 1280$  кг/м<sup>3</sup>. Диапазон изменения уровня 0—400 мм, внутренний диаметр пневмометрической трубки  $d = 6$  мм, температура жидкости в аппарате  $80^\circ\text{C}$ , абсолютное давление в аппарате 16 кПа.

4.17. Рассчитайте емкость и коэффициент преобразования измерительного преобразователя емкостного уровнемера, предназначенного для измерения уровня в баках-хранилищах керосина, от нулевого до максимального значения  $H_{\text{макс}} = 8$  м.

Емкостный преобразователь, представленный на рис. 4.13, состоит из полого металлического цилиндра диаметром  $D = 60$  мм (внешний электрод), внутри которого коаксиально расположен металлический тросик диаметром  $d = 1,5$  мм, покрытый слоем изоляции толщиной  $b = 1$  мм (внутренний электрод). Длина преобразователя  $l = 8$  м, емкость конструктивных элементов  $C_0 = 75$  пФ. Относительная диэлектрическая проницаемость паров керосина  $\epsilon_n = 1$ , керосина  $\epsilon_k = 2,1$ , изоляционного покрытия тросика  $\epsilon_{из} = 4,2$ .

4.18. Зависит ли коэффициент преобразования емкостного преобразователя уровнемера от соотношения диэлектрических проницаемостей жидкости  $\epsilon_k$  и ее паров  $\epsilon_n$ ? Жидкость неэлектропроводна. Преобразователь представляет собой металлический цилиндр диаметром  $D$  и длиной  $l$ , внутри которого коаксиально расположен металлический неизолированный трос диаметром  $d$ .

4.19. Оцените погрешность емкостного уровнемера (рис. 4.13), вызванную изменением температуры проводящей жидкости на  $25^\circ\text{C}$ , для измерительной схемы без автоматического введения поправки на изменение диэлектрической проницаемости. Емкость конструктивных элементов измерительного преобразователя  $C_0=82$  пФ, погонная геометрическая емкость системы в воздухе  $C_{\text{н}}=240$  пФ/м, диэлектрическая проницаемость жидкости  $\epsilon_{\text{ж}}=18$ , изменение  $\epsilon_{\text{ж}}$  с изменением температуры составляет  $0,2\%/K$ , интервал изменения уровня  $h$  от 0 до 2 м, длина измерительного преобразователя  $l=2$  м.

4.20. Можно ли применить емкостный преобразователь (задача 4.19) без переградуировки для измерения жидкости с  $\epsilon_{\text{ж}}=20$ ?

4.21. Измерительный преобразователь емкостного уровнемера, представленный на рис. 4.14, состоит из измерительной и компенсационной

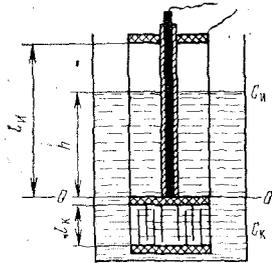


Рис. 4.14

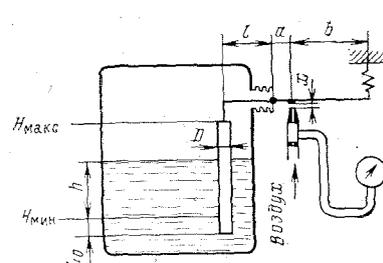


Рис. 4.15

частей. Интервал изменения уровня  $h$  от 0 до 2 м, длина измерительной части преобразователя  $l_{\text{н}}=2$  м. Емкость конструктивных элементов компенсационной части  $C_{\text{к0}}=30$  пФ, длина ее  $l_{\text{к}}=10$  см. Емкость в воздухе 1 м измерительной части уровнемера  $C_{\text{н.л}}=240$  пФ; емкость 1 м компенсационной части  $C_{\text{к.л}}=860$  пФ. Показания вторичного прибора пропорциональны отношению  $C_{\text{н}}/C_{\text{к}}$ , где  $C_{\text{н}}$  — емкость измерительной части преобразователя,  $C_{\text{к}}$  — емкость компенсационной части. Диэлектрическая проницаемость изменяется с изменением температуры на  $0,2\%/K$ .

Оцените относительное изменение показаний прибора, вызванное увеличением температуры жидкости на  $25^\circ\text{C}$  при максимальном уровне.

4.22. Следует ли производить переградуировку следящего радиоизотопного уровнемера, если он был отградуирован на воде, а затем возникла необходимость измерять уровень жидкого хлора?

4.23. На рис. 4.15 представлена схема буйкового уровнемера.

Рассчитайте плечо  $l$  подвеса буйка уровнемера, предназначенного для измерения уровня в сосуде под давлением в интервале  $-250 \div +250$  мм относительно номинального значения. Плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}=1300$  кг/м<sup>3</sup>, средняя объемная плотность буйка  $\rho_{\text{б}}=2000$  кг/м<sup>3</sup>, диа-

метр буйка  $D=20$  мм, максимальное перемещение заслонки относительно сопла  $x=0,1$  мм, расстояние от сопла до точки опоры  $a=20$  мм, расстояние от точки опоры до уравнивающей пружины  $b=100$  мм, упругость пружины  $W=20$  Н/мм, начальная сила натяжения пружины  $F_0=10$  Н. Расстояние от точки опоры до места подвеса буйка  $l$  может устанавливаться в пределах от 0,2 до 1,5 м.

## Глава пятая

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

Расход жидкостей, газов и пара является одним из важных показателей многих технологических процессов. Практически все методы измерения расхода, применяемые в промышленных и лабораторных установках, достаточно подробно рассмотрены в [15]. Отметим некоторые особенности наиболее распространенных методов измерения расхода.

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

$$v = k_T \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где  $k_T$  — коэффициент трубки (для правильно изготовленных трубок близок к единице).

Напорные трубки измеряют скорость в конкретной точке сечения потока. Поэтому для определения расхода необходимо знать соотношение между местной скоростью  $v$  и средней скоростью  $v_c$ , которое определяется распределением скоростей по сечению трубопровода. При осесимметричном потоке распределение скоростей определяется числом Рейнольдса  $Re$  и степенью шероховатости трубы. Установлено [15], что в широком диапазоне чисел  $Re$  от  $4 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^6$   $v/v_c=1 \pm 0,005$  на расстоянии  $0,762R$  от центра трубы. При ламинарном режиме это отношение имеет место на расстоянии  $0,707R$  от центра трубы, где  $R$  — радиус трубы.

В настоящее время наиболее распространенным в промышленности методом является измерение расхода с помощью сужающих устройств. Правила применения и расчета сужающих устройств регламентированы [16].

Взаимосвязь между объемным  $Q_0$  или массовым  $Q_m$  расходом и перепадом  $\Delta p$  на сужающем устройстве определяется уравнениями расхода:

$$Q_0 = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p};$$

$$Q_M = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2\rho\Delta p},$$

где  $F_0$  — площадь отверстия сужающего устройства, м<sup>2</sup>;  $\rho$  — плотность измеряемой среды перед сужающим устройством, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  — коэффициент расхода;  $\varepsilon$  — поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

Коэффициент расхода  $\alpha$  зависит от относительной площади (модуля) сужающего устройства  $m$  и числа Рейнольдса  $Re$ . При  $Re > Re_{гр}$   $\alpha$  слабо зависит от  $Re$  и в основном определяется значением  $m$ . Действительный коэффициент расхода  $\alpha$  определяется через исходный  $\alpha_H$  по формуле (для промышленных расходомеров)

$$\alpha = \alpha_H k_{ш} k_{п},$$

где  $k_{ш}$  — поправочный множитель на шероховатость трубопровода;  $k_{п}$  — поправочный множитель на притупление входной кромки диафрагмы (для сопла  $k_{п}=0$ ).

При использовании этого метода измерения часто имеют место погрешности, вызванные несоответствием расчетных и действительных значений параметров в уравнении расхода. Например, при отклонении температуры среды  $t$  от расчетной  $t_p$  изменяется плотность среды, что вызывает изменение показаний расходомера. Для сухого газа новое значение плотности  $\rho$  определяется через плотность  $\rho_H$  при нормальных условиях по формуле

$$\rho = \rho_H \frac{p T_H}{p_H T k},$$

где  $p$  и  $T$  — действительное давление и абсолютная температура среды;  $p_H$  и  $T_H$  — параметры среды при нормальных условиях;  $k$  — коэффициент сжимаемости среды, определяемый по [16].

Для жидкости плотность  $\rho$  при температуре  $t$  может вычисляться по формуле

$$\rho = \rho_p [1 - \beta(t - t_p)],$$

где  $\rho_p$  — плотность жидкости при расчетной температуре  $t_p$ ;  $\beta$  — средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в интервале температур от  $t_p$  до  $t$ .

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром определяется по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_p^2/4 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2}.$$

Составляющие подкоренного выражения определяются по [16].

Электромагнитные расходомеры применимы для измерения расхода электропроводящих сред. Поэтому они не могут быть использованы для измерения расхода газов, нефтепродуктов, масел и других непроводящих сред. Конструкция измерительного преобразователя расходомера практически не изменяет форму и сечение трубопровода и поэтому может широко использоваться для измерения загрязненных жидкостей и пульп. Это один из немногих методов, позволяющих измерять расходы жидких металлов.

Ультразвуковые расходомеры позволяют измерять расход без непосредственного контакта с измеряемой средой. Этот метод пока применяется только для измерения расхода жидкостей. Схема ультразвукового расходомера достаточно сложна. Поэтому они пока не нашли широкого применения в промышленности.

Некоторое распространение получили тепловые расходомеры (калориметрические, термоанемометрические), работа которых основана на зависимости теплообмена между нагреваемым элементом и потоком от скорости (расхода) измеряемой среды.

5.1. Какие единицы измерения приняты для расхода в системе СИ и как они связаны между собой?

5.2. По трубе диаметром  $D=100$  мм движется поток жидкости со средней скоростью  $v_c=1,5$  м/с.

Определите массовый расход жидкости, если ее плотность  $\rho=990$  кг/м<sup>3</sup>.

5.3. В трубе с движущимся потоком установлены две напорные трубки (рис. 5.1).

Какое давление (статическое, динамическое или полное) установится в каждой из этих трубок и чему будет равна разность этих давлений?

5.4. Для условия задачи 5.3 определите, как будет изменяться давление в напорных трубках при изменении скорости потока при неизменном статическом давлении?

5.5. Определите перепад давления, создаваемый напорными трубками, если поток воды движется со скоростью  $0,1$  м/с, плотность воды  $\rho=985$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент трубки  $k_T=0,97$ .

5.6. Определите расход дымовых газов через цилиндрический трубопровод, если перепад давления на напорной трубке  $\Delta p=50$  кгс/м<sup>2</sup>.

Диаметр трубопровода  $D=200$  мм, коэффициент трубки  $k_T=0,98$ , плотность газов  $\rho=0,405$  кг/м<sup>3</sup>. Трубка установлена на расстоянии  $23,8$  мм от стенки трубопровода. Кинематическая вязкость газов  $\nu=93,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

5.7. Какие сужающие устройства называются стандартными и при каких условиях возможно их применение для измерения расхода?

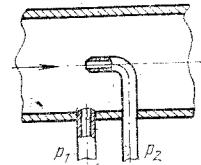


Рис. 5.1

5.8. Возможно ли измерение расхода воды в трубопроводе диаметром 30 мм с помощью диафрагм?

5.9. Чем определяются значения коэффициентов расхода и могут ли они изменяться в процессе эксплуатации?

5.10. При установке диафрагмы в трубопроводе предполагалось, что номинальный расход среды составляет 230 т/ч, диафрагма была рассчитана на  $Q_{\max} = 250$  т/ч, а дифманометр — на  $\Delta p_{\max} = 4$  кПа. Однако в процессе эксплуатации выяснилось, что расход среды будет равен 380 т/ч. Сменить диафрагму не представляется возможным.

Подберите дифманометр, с помощью которого можно было бы измерить расход 380 т/ч.

5.11. Расход воды в трубопроводе диаметром  $D = 80$  мм измеряется бронзовой диафрагмой с отверстием диаметром  $d = 58$  мм. Температура воды  $150^\circ\text{C}$ , давление воды 2 МПа, перепад давления на диафрагме 0,04 МПа.

Определите, как изменится действительное значение расхода, если температура воды станет  $20^\circ\text{C}$ . Диаметр трубопровода, коэффициент расхода и перепад давления на диафрагме считаем неизменными  $k_t = 1,0023$ .

5.12. Сопло Вентури (длинное) используется на насосной станции в схеме регулирования расхода воды. Относительная площадь сопла  $m = 0,25$ . Автоматический регулятор поддерживает постоянным перепад давления на сопле, равный 35 кПа. Расчетная температура воды  $20^\circ\text{C}$ , однако в дневное время температура воды поднимается до  $27^\circ\text{C}$ , а в ночное время опускается до  $10^\circ\text{C}$ .

Определите, на сколько процентов будет увеличиваться или уменьшаться действительное значение расхода в дневное и ночное время. Давление воды 0,6 МПа.

5.13. Через диафрагму, установленную в трубопроводе, протекает сернистый газ, расходные характеристики для которого были получены при нормальных условиях:  $t_n = 20^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 101,322$  кПа и влажности  $\varphi_n = 0$ . Однако в реальных условиях  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $P = 0,13$  МПа и  $\varphi = 30\%$ .

Определите поправочный коэффициент для пересчета показаний расходомера на нормальные условия.

5.14. Через трубопровод поступает газовая смесь с содержанием влаги  $\varphi = 80\%$ . Измерение объемного расхода газа осуществляется сужающим устройством.

Определите допускаемые колебания влажности газа, при которых погрешность измерения расхода, вызванная изменением влажности, не превышала бы  $\pm 1\%$ .

Температура газа  $t = 30^\circ\text{C}$ , абсолютное давление газа  $p = 0,2$  МПа. Состав газовой смеси принять следующим:  $\text{CO} - 6,8\%$ ;  $\text{H}_2 - 57\%$ ;  $\text{CH}_4 - 22,3\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4 - 0,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 - 0,9\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,9\%$ ;  $\text{H}_2\text{S} - 0,4\%$ ;  $\text{CO}_2 - 2,3\%$ ;  $\text{O}_2 - 0,8\%$  и  $\text{N}_2 - 7,7\%$ .

5.15. Расход воды, протекающей по трубопроводу  $D = 200$  мм, составляет  $Q_m = 100$  т/ч. Относительная площадь диафрагмы  $m = 0,5$ , давление воды  $p = 10$  МПа, температура  $t = 200^\circ\text{C}$ .

Определите значение перепада давления на сужающем устройстве.

5.16. Для условия задачи 5.15 определите потерю давления на сужающем устройстве.

5.17. Изменится ли потеря давления, если для условий задачи (5.15) вместо диафрагмы использовать сопло с тем же значением  $m$ .

5.18. По трубопроводу протекает вода при  $p = 100$  кгс/см<sup>2</sup> и  $t = 200^\circ\text{C}$ . Предельный расход воды  $Q_{\text{пл}} = 100$  т/ч. Диаметр трубопровода при  $t = 20^\circ\text{C}$   $D_{20} = 200$  мм. В трубопроводе установлены диафрагма и сопло. Относительные площади их таковы, что при указанном расходе перепад давления на обоих сужающих устройствах одинаков и равен 400 кгс/м<sup>2</sup>.

Имеет ли в этом случае какое-либо из указанных сужающих устройств преимущество (на трубопроводе перед сужающими устройствами установлены колена)?

5.19. Определите массовый расход воды через трубопровод  $D = 100$  мм с учетом коэффициента коррекции на число Рейнольдса, если расход измеряется диафрагмой с  $m = 0,6$ . Верхний предел измерения расходомера 10 т/ч, показание расходомера 4 т/ч, параметры воды:  $p = 5$  МПа;  $t = 100^\circ\text{C}$ .

5.20. Изменится ли для условий задачи 5.19 коэффициент коррекции, если для измерения использовать диафрагму с  $m = 0,3$ .

5.21. Определите поправочный множитель на расширение измеряемой среды  $\epsilon$  и погрешность измерения расхода газа за счет отклонения поправочного множителя от расчетного значения  $\epsilon_p$ , если расход изменится от  $Q_{\max}$  до  $0,4Q_{\max}$  при абсолютном давлении  $p = 2$  МПа и  $p = 0,08$  МПа.

Сужающее устройство — диафрагма рассчитывалась для обоих случаев в предположении, что  $Q_{\text{ср}} = Q_{\max}$ . Перепад  $\Delta p_{\max} = 40$  кПа. Относительная площадь сужающего устройства  $m = 0,3$ . Показатель адиабаты  $\kappa = 1,4$ .

5.22. Определите длины прямых участков трубопровода до и после сужающего устройства, если перед сужающим устройством стоит тройник, а после него — группа колен в разных плоскостях: для диафрагмы и для сопла.

Диаметр трубопровода  $D = 200$  мм, у обоих сужающих устройств  $m = 0,5$ .

5.23. На трубопроводе  $D = 200$  мм перед сужающим устройством с  $m = 0,6$  необходимо установить регулирующий вентиль.

Определите необходимую длину прямого участка, а также возможное уменьшение необходимой длины за счет уменьшения относительной площади сужающего устройства до  $m = 0,45$ .

5.24. Предположим, что для измерения расхода воды один дифманометр-расходомер располагается ниже диафрагмы, а другой — выше (рис. 5.2).

Будут ли показания расходомеров одинаковы при одном и том же расходе или будут различаться за счет гидростатического давления столбов жидкости в импульсных трубках?

5.25. Трубопровод заполнен неконденсирующимся газом. Импульсные трубки к мембранному дифманометру частично заполнены водой

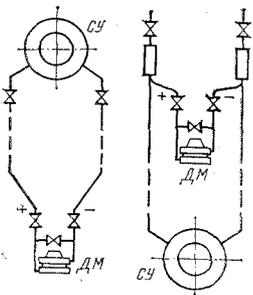


Рис. 5.2

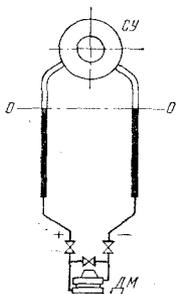


Рис. 5.3

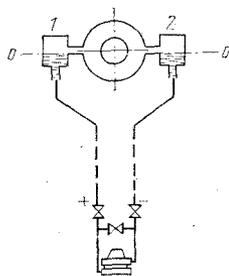


Рис. 5.4

(рис. 5.3), причем при нулевом расходе уровень в этих трубках одинаков.

Будет ли изменяться уровень в них при изменении расхода газа?

5.26. Для условия задачи 5.25 примем внутренний диаметр импульсных трубок  $d=10$  мм. Действительный расход газа  $Q_0=10$  м<sup>3</sup>/ч, при этом перепад давления на диафрагме  $\Delta p=10$  кПа, изменение объема камер дифманометра  $\Delta V=4$  см<sup>3</sup>. Плотность воды в импульсных трубках  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Какой расход будет показывать дифманометр-расходомер?

5.27. Рассмотрим схему измерения расхода перегретого пара (рис. 5.4). Сосуд 1 внутренним диаметром  $d_1=100$  мм подключен к месту отбора давления перед соплом, такой же сосуд 2 служит для отбора давления после сужающего устройства. Сосуды подключены к мембранному дифманометру импульсными трубками внутренним диаметром  $d_2=10$  мм. При нулевом расходе обе импульсные трубки и сосуды заполнены конденсатом до одинакового уровня, обозначенного на рисунке линией 0—0. Предположим, что расход увеличился от нуля до  $Q_{\max}=10$  т/ч, при этом перепад давления на сопле составляет  $\Delta p_{\max}=10$  кПа, изменение объема камер дифманометра, соответствующее этому перепаду,  $\Delta V=4$  см<sup>3</sup>. Плотность конденсата в импульсных трубках  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Определите погрешность показаний расходомера, вызванную разницей уровней в импульсных трубках.

5.28. Определите размеры разделительных сосудов для поплавкового дифманометра.

Диаметры поплавкового и сменного сосудов соответственно равны  $D_{\text{п}}=78$  мм и  $D_{\text{см}}=13,83$  мм. Измеряемая среда — соляная кислота ( $p=108$  кПа;  $t=20$  °С и  $\rho_c=1560$  кг/м<sup>3</sup>). Разделительная жидкость — трансформаторное масло ( $\rho_{\text{р.с}}=880,3$  кг/м<sup>3</sup>). Температура разделительных сосудов и дифманометра 20 °С. Уравновешивающая жидкость — ртуть. При температуре 20 °С плотность ртути  $\rho_{\text{г}}=13\,546$  кг/м<sup>3</sup>.

5.29. При оценке погрешности измерения расхода применяется закон сложения средних погрешностей.

Какие допущения принимаются при использовании этого закона?

5.30. Оцените максимальное и минимальное значения средней квадратической погрешности коэффициента расхода для диафрагмы и сопла. Погрешности установки отсутствуют;  $Re=10^6$ .

5.31. Перепад давления на сужающем устройстве измеряется дифманометром типа ДМ-3573 класса I, работающим с вторичным прибором типа КСД-2 класса I, с квадратичным кулачком.

Определите значение средней квадратической относительной погрешности  $\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$  измерения перепада давления на сужающем устройстве при расходе  $Q_{\text{м}}$ , равном верхнему пределу измерения.

5.32. Оцените максимальную среднюю квадратическую погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды для диафрагмы и сопла при максимальных значениях  $m$  сужающих устройств и максимальном расходе. Измеряемая среда — азот, его  $t=20$  °С и  $p=1$  МПа при максимальном расходе  $\Delta p/p=0,25$ . Расход измеряется комплектом ДМ+КСД-2 (см. задачу 5.31). Давление измеряется манометром класса 1,5 с диапазоном 0—1,6 МПа.

5.33. Плотность азота  $\rho$  в формуле расхода для конкретных значений  $p$  и  $T$  подсчитывается по формуле [16]

$$\rho = \rho_{\text{н}} \frac{p T_{\text{н}}}{p_{\text{н}} T k},$$

где  $T_{\text{н}}=293$  К;  $p_{\text{н}}=1,0332$  кг/см<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{н}}=1,166$  кг/м<sup>3</sup>.

Максимальная абсолютная погрешность показаний барометра  $\Delta p_{\text{б}}=0,1$  мм рт. ст. Давление измеряется манометром со шкалой 0—1 МПа класса точности 1,5, показание манометра  $p=0,8$  МПа. Температура измеряется термометром с погрешностью  $\Delta t=\pm 2$  °С. Текущее значение температуры  $t=100$  °С, барометрическое давление 101,3 кПа.

Оцените среднюю квадратическую погрешность определения плотности азота  $\sigma_{\rho}$ .

5.34. Оцените среднюю квадратическую погрешность определения значения плотности воды.

Значение плотности воды определялось при  $p=13$  МПа и  $t=210$  °С по табличным данным и составило  $\rho=861$ , 2 кг/м<sup>3</sup>. Измерение давления воды производилось манометром класса 1,5 со шкалой 0—16 МПа. Температура воды измерялась с погрешностью  $\Delta t=\pm 5$  °С.

5.35. Произведите оценку максимального значения средней квадратической погрешности измерения расхода азота диафрагмой при  $D=50$  мм,  $m=0,64$  и предельном расходе. Параметры среды: избыточное давление  $p=0,8$  МПа,  $t=100$  °С; при предельном расходе  $\Delta p/p=0,25$ . При оценке можно учесть результаты задач 05.30—05.33.

5.36. Измеряемая среда — перегретый пар (избыточное давление  $p=10$  МПа;  $t=510$  °С) Предельный массовый расход  $Q_{м.пр}=250\,000$  кг/ч, диаметр трубопровода  $D_{20}=217$  мм, сужающее устройство — сопло,  $m=0,568$ . Дифманометр поплавковый, ртутный, показывающий класса 1,5 на перепад давления  $\Delta p_H=160$  кПа. Давление измеряется манометром со шкалой 0—16 МПа класса 1,5, погрешность измерения температуры  $\Delta t=\pm 5$  °С. Плотность пара в рабочих условиях определяется по таблицам по  $p$  и  $t$  и равна  $\rho=29,35$  кг/м<sup>3</sup>. Перед соплом находится полностью открытый запорный вентиль на расстоянии 4,4 м, за соплом имеется колено на расстоянии 2 м. Отбор давления осуществляется с помощью кольцевых камер.

Определите предельную погрешность измерения предельного расхода.

5.37. Определите угол конусности  $\phi$  трубки ротаметра (рис. 5.5), который применяется для измерения расхода воды в диапазоне от 10 до 500 л/ч.

Расчетная плотность воды  $\rho_w=998,2$  кг/м<sup>3</sup>, длина шкалы  $H=160$  мм, сечение поплавка  $f=78,6$  мм<sup>2</sup>, объем поплавка  $V=600$  мм<sup>3</sup>, плотность материала поплавка  $\rho_d=7870$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент расхода ротаметра постоянен и равен  $\alpha=0,98$ .

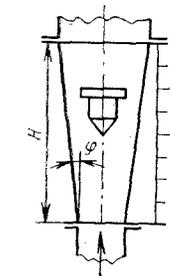


Рис. 5.5

5.38. Применим ли электромагнитный метод измерения расхода для неэлектропроводных жидкостей? Какие жидкости относятся к электропроводным и неэлектропроводным?

5.39. Через один и тот же электромагнитный расходомер пропустили вначале раствор HCl проводимостью 80 См/м со средней скоростью 10 м/с, а затем раствор КОН проводимостью 40 См/м со скоростью 20 м/с.

Одинаковая ли ЭДС будет наводиться между электродами расходомера в этих случаях?

5.40. Определите значение ЭДС, индуцируемой в электромагнитном расходомере с диаметром проходного отверстия  $d=100$  мм, при расходе воды  $Q=200$  м<sup>3</sup>/ч. Индукция магнитного поля  $B=0,01$  Тл.

5.41. Для измерения ЭДС электромагнитного расходомера предполагается использовать милливольтметр со шкалой 0—20 мВ и входным сопротивлением  $R_{мв}=200$  Ом; ЭДС расходомера 15 мВ, измеряемая среда — вода, сопротивление воды между электродами преобразователя  $R=10$  МОм.

Определите погрешность измерения ЭДС (погрешностью самого милливольтметра пренебрегаем).

5.42. Какие требования предъявляются к конструкции первичных преобразователей электромагнитных расходомеров для измерения расхода сред с невысокой проводимостью?

5.43. Какой тип электромагнитного расходомера (с переменным или постоянным магнитным полем) следует применять для измерения расхода раствора щелочи?

5.44. Каким образом в электромагнитном расходомере с переменным магнитным полем можно выделить и оценить значение паразитной трансформаторной ЭДС?

5.45. В трубопроводе диаметром 100 мм 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 300 мм.

Определите время прохождения ультразвуковых колебаний при распространении их «по потоку» и «против потока». Скорость распространения звуковых колебаний в воде  $c=1500$  м/с.

5.46. Для условия задачи (5.45) определите разность времени прохождения звука «по потоку» и «против потока» и разность фазовых углов ультразвуковых колебаний, вызванных разностью скоростей прохождения звука. Частота ультразвука 20 кГц.

5.47. Выведите уравнение, связывающее фазовый сдвиг ультразвуковых колебаний со скоростью потока воды, и оцените влияние температуры на показания осевого ультразвукового фазового расходомера, если известно, что изменение температуры воды от 8 до 25 °С вызывает изменение скорости звука от 1435 до 1475 м/с. Частота ультразвуковых колебаний 25 кГц, скорость потока 10 м/с, расстояние между пьезоэлементами расходомера 250 мм.

5.48. Калориметрический расходомер состоит из нагревателя мощностью 200 Вт, выполненного из проволоки диаметром 0,5 мм; диаметр трубопровода 100 мм.

Определите разность температур измеряемой среды до и после нагревателя при расходе  $Q_0=50$  м<sup>3</sup>/ч. Измеряемая среда — вода или воздух. Исходная температура измеряемой среды 20 °С.

5.49. Платиновый термоанемометр с диаметром проволоки  $d=0,05$  мм предназначен для измерения скорости воздуха от 2 до 30 м/с. Температура воздуха 20 °С.

Определите, какую температуру будет иметь нить термоанемометра, если мощность, выделяемая на нити,  $W=8$  Вт/м.

5.50. Определите уравнение расхода для щелевого расходомера с прямоугольным отверстием истечения (рис. 5.6).

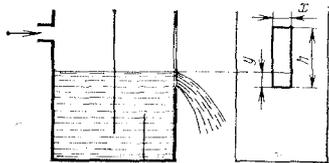


Рис. 5.6

5.51. Определите форму и необходимые размеры щелевого отверстия для расходомера с равномерной шкалой.

Максимальный расход воды  $Q_{0, \max} = 520$  м<sup>3</sup>/ч, максимальная высота уровня над краем отверстия истечения  $h_{\max} = 0,5$  м, ширина отверстия истечения на уровне  $h_{\max}$  от нижнего края  $x_{\max} = 0,15$  м.

## Глава шестая

### АНАЛИЗ СОСТАВА СРЕД

Под анализом состава сред понимается измерение концентрации растворов, концентрации водородных ионов по водородному показателю рН, содержания отдельных компонентов в газовых смесях, влажности газов и ряда других показателей. Основными пособиями, в которых изложены эти вопросы, являются [2, 8, 9, 20—23, 26]. Рассмотрим некоторые понятия и формулы, необходимые для решения задач.

Постоянная электролитической ячейки  $K$  — это коэффициент, определяющий соотношение между удельной электропроводностью  $\kappa_0$  раствора и электропроводностью  $\kappa$  ячейки или ее сопротивлением  $R_{Я}$ :

$$\kappa_0 = K\kappa = K(1/R_{Я}).$$

Сопротивление измерительной электролитической ячейки зависит не только от концентрации раствора, но и от температуры. В узком температурном интервале, например 5—10 °С, можно считать, что зависимость сопротивления ячейки  $R_{Яt}$  от температуры имеет вид

$$R_{Яt} = \frac{R_{Я1}}{1 + \beta(t - t_1)},$$

где  $R_{Я1}$  — сопротивление ячейки при температуре  $t_1$ ;  $\beta$  — температурный коэффициент электропроводности раствора.

Следует отметить, что в ряде задач и решений рассматриваются два понятия: сопротивление электродной ячейки и сопротивление измерительной ячейки. Под сопротивлением электродной ячейки подразумевается сопротивление только жидкости, заполняющей межэлектродное пространство. Сопротивление измерительной ячейки — это сопротивление, образованное сопротивлением электродной ячейки и сопротивлением шунта.

В задачах на измерение рН растворов следует прежде всего помнить общую зависимость между потенциалом  $E$  измерительного электрода и концентрацией  $C$  ионов в растворе — уравнение Нернста

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln f_{H^+} [H^+],$$

где  $R=8,317$  Дж/(К·г·моль) — газовая постоянная;  $T$  — температура, К;  $n$  — валентность иона;  $F=96\,522$  Кл/г-экв — число Фарадея (заряд грамм-эквивалента ионов);  $f_{H^+}$  — коэффициент активности ионов водорода;  $[H^+]$  — концентрация водородных ионов, г-ион/л;  $E_0$  — нормальный электродный потенциал (потенциал, который имеет электрод при погружении в раствор с нормальной концентрацией  $[H^+]=1$  г-ион/л), мВ. Следует отметить, что фактически измеряется не концентрация водородных ионов по  $pH = -\lg[H^+]$ , а активность ионов водорода в растворе  $pH = -\lg f_{H^+} [H^+]$  [20]. Во многих случаях  $\lg[H^+] \approx \lg f_{H^+} [H^+]$ , поэтому в задачах часто говорится об измерении концентрации водородных ионов по рН. Для водородного электрода  $E_0=1$  и  $n=1$ , поэтому уравнение  $E=f(pH)$  принимает вид

$$E = -\frac{2,303RT}{F} pH = -0,1984T pH.$$

В общем виде разность потенциалов  $E$ , мВ, между измерительным электродом (чаще всего одной из разновидностей стеклянного электрода) и сравнительным электродом можно записать следующим образом:

$$E = E_{и} - (54,16 + 0,1984t)(pH - pH_{и}),$$

где  $t$  — температура раствора, °С;  $E_{и}$  и  $pH_{и}$  — координаты изопотенциальной точки.

Из этой формулы легко могут быть получены выражения для коэффициентов преобразования  $\Delta E/\Delta pH$  и  $\Delta E/\Delta t$ .

При решении задач по газовому анализу следует обратить внимание на физические основы работы различных газоанализаторов, их устройство и электрические схемы.

В задачах по термокондуктометрическим газоанализаторам предполагается, что измерительная камера представляет собой полый цилиндр, внутри которого коаксиально расположена платиновая нить (чувствительный элемент). Теплоотвод от единицы поверхности нити к стенкам осуществляется в основном теплопроводностью в соответствии с выражением

$$Q = \lambda(t_{н} - t_{с}),$$

где  $t_{н}$  и  $t_{с}$  — температура соответственно нити и стенки камеры, °С;  $\lambda$  — теплопроводность смеси при температуре, равной  $(t_{н} + t_{с})/2$ , Вт/(м·К).

Теплопроводность смеси следующим образом связана с теплопроводностью компонентов  $\lambda_i$  и их объемной концентрацией  $C_i$

$$\lambda_{см} = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i.$$

В задачах по термомагнитным газоанализаторам основным является выражение для силы, действующей на единичный объем парамагнитной смеси, находящейся в неоднородном магнитном поле [22]:

$$F_M = C \chi_0 T_0^2 \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \frac{\rho}{\rho_0} H \frac{dH}{dx},$$

где  $C$  — относительная концентрация компонента (например, кислорода);  $\chi_0$  — объемная 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 измерительные камеры, К;  $T_2$  — температура газа после обогрева нитью, К.

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  $t$  и давления  $p$  газовой смеси отличается от рассчитанного только по изменению  $F_M$ .

Принцип действия оптико-акустических газоанализаторов основан на явлении избирательного поглощения анализируемым компонентом энергии излучения определенной длины волны, причем интенсивность этого поглощения зависит от концентрации анализируемого компонента в газовой смеси. Эта зависимость описывается выражением

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\epsilon_\lambda Cl),$$

где  $I_{0\lambda}$  — интенсивность излучения на входе в поглощающий слой газа;  $I_\lambda$  — то же после прохождения слоя газа;  $\epsilon_\lambda$  — коэффициент поглощения, характерный для анализируемого компонента газовой смеси и длины волны  $\lambda$ ;  $C$  — концентрация анализируемого компонента в газовой смеси;  $l$  — толщина поглощающего слоя.

Наибольшее распространение при измерении влажности воздуха получили различные варианты психрометров и определение влажности по точке росы. Психрометрический метод основан на зависимости между влажностью воздуха и показаниями сухого  $t_c$  и мокрого  $t_m$  термометров. При использовании психрометра «психрометрическая разность»  $t_c - t_m$  зависит не только от относительной влажности воздуха, но и от конструкции психрометра, определяющей интенсивность охлаждения

мокрого термометра за счет испарения влаги. Поэтому психрометрические таблицы могут составляться только для конкретных типов психрометров.

Измерение влажности по методу точки росы является одним из точных методов, получивших широкое распространение в промышленности. Эти гигрометры имеют широкие пределы применения по температуре, давлению и влажности воздуха. Однако они отличаются некоторой сложностью конструкции, а также влиянием на результат измерения состояния поверхности зеркала.

При решении задач настоящей главы могут потребоваться данные о самых различных физических, химических и других свойствах веществ. Эти данные можно взять в П-32—П-53, в [2], а также в соответствующих справочных изданиях [18, 19, 25].

6.1. Двухэлектродная электролитическая ячейка была заполнена раствором с удельной электропроводностью  $\chi_0 = 12,1$  См/м.

Определите постоянную ячейки, если ее сопротивление оказалось равным  $R_L = 13,7$  Ом.

6.2. Постоянная ячейки  $K = 11,2$  м<sup>-1</sup>. Ячейка заполнена раствором, и ее сопротивление при этом составляет 5 МОм.

Определите концентрацию раствора, если известно, что зависимость между концентрацией  $C$  и удельной электропроводностью  $\chi_0$  описывается уравнением  $\chi_0 = aC$ , где  $a = 1,75 \cdot 10^{-8}$  (См/м)/(мг/л).

6.3. Возможна ли компенсация температурной погрешности концентратомера, если в качестве компенсатора использовать только медное сопротивление  $R_M$ .

Электроды электродной ячейки (рис. 6.1) не зашунтированы. Ячейка заполнена 5 %-ным раствором KCl, удельная электропроводность при 20 °С составляет 7,18 См/м, температурный коэффициент  $\beta = 0,020$  К<sup>-1</sup>. Постоянная ячейки  $K = 190$  м<sup>-1</sup>. Температурную компенсацию необходимо осуществить при температурах 20 и 40 °С.

6.4. Электродная ячейка (рис. 6.1) с постоянной  $K = 190$  м<sup>-1</sup> заполнена раствором KCl концентрацией 5 %, удельная электропроводность раствора при 20 °С  $\chi_0 = 7,18$  См/м. Температура раствора может изменяться в интервале 20—40 °С, при этом средний температурный коэффициент электрической проводимости раствора равен  $\beta = 0,0201$  К<sup>-1</sup>.

Определите сопротивление медного резистора  $R_M$ , обеспечивающего компенсацию изменения сопротивления ячейки в указанном температурном интервале.

Сопротивление шунта  $R_{ш}$  примите равным сопротивлению элект-

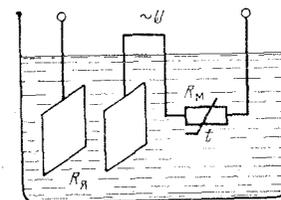


Рис. 6.1

тродной ячейки  $R_n$  при  $t=20^\circ\text{C}$ . Температурный коэффициент сопротивления меди  $\alpha=0,00426\text{ K}^{-1}$ .

6.5. Для условия задачи 6.4 определите температуру, при которой будет иметь место наибольшая погрешность за счет неполной компенсации изменения сопротивления ячейки изменением сопротивления медного резистора.

Оцените эту погрешность, предполагая, что зависимость удельной электропроводности  $\kappa_0$  от концентрации  $C$  (при концентрации 5—10 %) имеет вид  $\kappa_0=7,18+1,38(C-5)$ , См/м.

6.6. Ячейка концентромера состоит из электродов, расположенных по торцам цилиндрического канала, по которому протекает раствор. Расстояние между электродами  $l=70$  мм, диаметр, определяющий эффективную площадь сечения,  $d_{\text{эф}}=1,1$  мм. Ячейка предназначена для измерения концентрации NaCl в диапазоне от 5 до 50 мг/л. Удельная электропроводность раствора в этом диапазоне  $\kappa_0=191 C$  мкСм/м, где  $C$  — концентрация NaCl, мг/л.

Определите шунтирующее  $R_{\text{ш}}$  и медное  $R_m$  сопротивления для диапазона температур 20—40 °C ( $\beta=0,0229\text{ K}^{-1}$ ;  $\alpha=0,00426\text{ K}^{-1}$ ) и оцените абсолютную погрешность компенсации при номинальной концентрации  $C=40$  мг/л.

6.7. Концентромер, отградуированный в процентах по массе NaCl, имеет шкалу 5—10 %. Постоянная электродной ячейки  $500\text{ м}^{-1}$ . В интервале 5—10 % зависимость удельной электропроводности  $\kappa_0$  раствора NaCl от концентрации  $C$  приближенно можно описать уравнением

$$\kappa_0 = 7,01 + 1,104(C - 5).$$

Определите показания концентромера при пропускании через него 6 %-ного раствора KCl (удельная электропроводность  $\kappa'_0 = 8,564$  См/м).

6.8. Концентрация раствора NaCl измеряется электродным концентромером. Номинальное значение концентрации раствора 100 мг/л.

Оцените изменение показаний прибора, вызванное случайным попаданием в раствор щелочи NaOH, концентрация которой в измеряемом растворе составляет 5 мг/л. Проводимость раствора NaOH, превышает проводимость раствора NaCl той же концентрации в 2,8 раза.

6.9. Будет ли осуществляться компенсация температурной погрешности в схеме безэлектродного кондуктометра (рис. 6.2) с помощью полупроводникового терморезистора  $R_t$  и марганциновых резисторов  $R_1$  и  $R_{\text{ш}}$ ?

Сопротивление полупроводникового терморезистора изменяется по закону  $R_t = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$ . Температурный коэффициент электропро-

водности раствора  $\beta$  остается постоянным при температуре от  $t_1$  до  $t_2$ . Каков порядок расчета термокомпенсирующей цепочки?

6.10. Рассчитайте значения  $R_1$  и  $R_{\text{ш}}$  безэлектродного кондуктометра (рис. 6.2) для введения коррекции в показания на интервале температур от  $t_1=20^\circ\text{C}$  до  $t_2=50^\circ\text{C}$ . Диапазон измерения концентромера 5—15 % KCl. Оцените погрешность, которая может иметь место при концентрации 5 % KCl и  $t_1=20^\circ\text{C}$ , а также при концентрации 15 % KCl и  $t_2=50^\circ\text{C}$ . Расчет ведется на номинальное значение температуры раствора  $t_n=35^\circ\text{C}$ . Постоянная жидкостного контура  $K=700\text{ м}^{-1}$ . Удельные электропроводности раствора при  $t_1=20^\circ\text{C}$  и температурные коэффициенты имеют следующие значения:

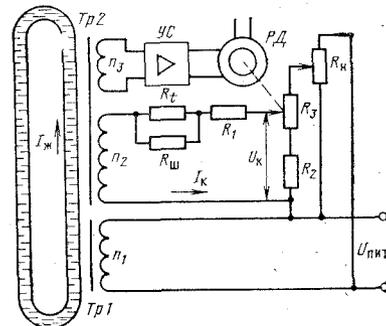


Рис. 6.2

$$\begin{aligned} C_1 &= 5\% \text{ KCl,} \\ \kappa_{01} &= 7,177 \text{ См/м,} \\ \beta_1 &= 0,0201 \text{ K}^{-1}; \\ C_2 &= 10\% \text{ KCl,} \quad \kappa_{02} = 14,1 \text{ См/м,} \quad \beta_2 = 0,0188 \text{ K}^{-1}; \\ C_3 &= 15\% \text{ KCl,} \quad \kappa_{03} = 20,9 \text{ См/м,} \quad \beta_3 = 0,0179 \text{ K}^{-1}. \end{aligned}$$

При температуре раствора  $t_n=35^\circ\text{C}$  зависимость удельной электропроводности, См/м, от процентной концентрации описывается выражением

$$\kappa_0 = 0,2472 + 1,715C - 0,004072C^2.$$

Напряжение питания  $U_{\text{пит}}=127\text{ В}$ . Обмоточные данные схемы:  $n_1=127$  витков;  $n_2=10$  витков;  $n_3=1$  виток. Максимальный компенсационный сигнал  $U_{\text{к, макс}}=10\text{ В}$ . Начальное сопротивление терморезистора  $R_0=5\text{ кОм}$ , коэффициент  $B=2300$ .

6.11. С помощью каких резисторов (рис. 6.2) возможна подгонка начала и конца шкалы при заданных  $R_t$ ,  $R_{\text{ш}}$ ,  $R_1$  и  $R_2$ ?

6.12. Определите коэффициент преобразования водородного электрода и его зависимость от pH при  $t=25^\circ\text{C}$  при следующих значениях постоянных, входящих в формулу Нернста: универсальная газовая постоянная  $R=8,317\text{ Дж/(K}\cdot\text{г}\cdot\text{моль)}$ , число Фарадея  $F=96\,522\text{ Кл/г}\cdot\text{экв}$ .

6.13. Электродвижущая сила, мВ, электродной системы, состоящей из измерительного стеклянного электрода и хлорсеребряного электрода сравнения, зависит от значения pH и температуры раствора:  $E = -203 - (54,16 + 0,198t)$  (pH—4,13).

Определите координаты изопотенциальной точки, а также коэффициент преобразования системы.

6.14. Определите в общем виде зависимость абсолютной погрешности электродной системы рН-метра (в единицах рН) от температуры раствора. Уравнение электродной системы имеет вид:  $E = E_n - (54,16 + 0,198t)(\text{pH} - \text{pH}_n)$ ;  $E_n = -203$  мВ;  $\text{pH}_n = 4,13$ .

Определите погрешность при отсутствии температурной компенсации, если градуировка производилась при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а действительная температура  $t_2 = 35^\circ\text{C}$ . Действительное значение  $\text{pH} = 9$ .

6.15. Градуировка электродной системы производилась по стандартным буферным растворам. Электродвижущая сила электродной системы имела следующие значения:

$\text{pH}_1 = 1,67$ и $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . . . . .	$E_1 = +1,27$ мВ
$\text{pH}_2 = 1,77$ и $t_2 = 80^\circ\text{C}$ . . . . .	$E_2 = +4,27$ мВ
$\text{pH}_3 = 9,27$ и $t_1 = 15^\circ\text{C}$ . . . . .	$E_3 = -432,69$ мВ
$\text{pH}_4 = 8,88$ и $t_2 = 80^\circ\text{C}$ . . . . .	$E_4 = -494,14$ мВ

Определите коэффициенты уравнения электродной системы.

6.16. Измерительный электрод имеет внутреннее сопротивление  $R_n = 50$  МОм, электрод сравнения  $R_c = 20$  кОм. Электродвижущая сила, развиваемая системой, 500 мВ. Для измерения ЭДС используется милливольтметр с диапазоном 0—0,5 В и входным сопротивлением  $R_{вх} = 0,5$  кОм.

Какими будут его показания при названных условиях?

6.17. Определите концентрацию  $\text{CO}_2$  в продуктах горения, если анализ содержания  $\text{CO}_2$  производился объемно-абсорбционным газоанализатором.

Объем смеси в измерительной бюретке до поглощения  $V_0 = 100$  мл, объем после поглощения  $V_n = 94$  мл. Объем вредного пространства вне измерительной бюретки (объем распределительной гребенки и других соединительных частей)  $V_{в.п} = 2,5$  мл. Коэффициент  $K_p$ , характеризующий отношение объема компонента, поглощенного в газоанализаторе, к объему этого компонента до поглощения, равен 0,95.

6.18. Определите концентрацию кислорода в дымовых газах, если анализ производился объемно-абсорбционным газоанализатором и объем смеси после поглощения составил  $V_n = 95$  мл;  $V_0 = 100$  мл;  $V_{в.п} = 2,5$  мл;  $K_p = 0,95$  (см. задачу 6.17). Температура газа перед отбором пробы в газоанализатор  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ . Во время анализа температура газа снизилась до  $t_2 = 30^\circ\text{C}$ .

6.19. Анализ содержания углекислого газа в продуктах горения осуществляется термокондуктометрическим газоанализатором.

Определите, как изменится температура чувствительного элемента (нити) газоанализатора, если через него первоначально пропускался воздух (температура нити  $80^\circ\text{C}$ ), а затем стали пропускаться продукты горения со следующим содержанием компонентов: кислород — 4 %, углекислый газ — 15 %, азот — 63 %, водяные пары — 18 %.

Предполагается, что количество теплоты, передаваемой от чувствительного элемента к стенке, одинаково при любой газовой смеси. Предполагается также, что передача теплоты осуществляется только за счет теплопроводности, а температура стенок постоянна и равна  $t_{ст} = 20^\circ\text{C}$ .

6.20. Для условия задачи 6.19 определите, как изменятся показания газоанализатора, если печь для дожигания водорода в газоанализаторе не работает, а в продуктах горения содержится 0,2 %  $\text{H}_2$  и состав смеси будет следующим:  $\text{C}_{\text{CO}_2} = 15$  %;  $\text{C}_{\text{O}_2} = 4$  %;  $\text{C}_{\text{N}_2} = 62,8$  %;  $\text{C}_{\text{H}_2} = 0,2$  % и  $\text{C}_{\text{H}_2\text{O}} = 18$  %.

6.21. Оцените погрешность, которая может иметь место при эксплуатации термокондуктометрического газоанализатора, если его градуировка на  $\text{CO}_2$  осуществлялась на синтетических смесях (например, 10 %  $\text{CO}_2 + 90$  % воздуха или 10 %  $\text{CO}_2 + 90$  %  $\text{N}_2$ ), а средний состав продуктов горения природного газа следующий:  $\text{CO}_2 = 10$  %;  $\text{O}_2 = 2$  %;  $\text{N}_2 = 70$  % и  $\text{H}_2\text{O} = 18$  %. При заполнении всех камер газоанализатора воздухом температура чувствительного элемента  $t_{н0} = 80^\circ\text{C}$ . Температура стенки  $t_{ст} = 20^\circ\text{C}$ .

6.22. Газоанализатор, определяющий состав смеси по теплопроводности, градуировался по синтетической смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ . Измерительная схема газоанализатора (рис. 6.3) представляет собой неуравновешенный мост, образованный четырьмя одинаковыми чувствительными элементами из платиновой проволоки с сопротивлением при  $0^\circ\text{C}$   $R_0 = 1$  Ом. Полагаем, что зависимость сопротивления от температуры имеет вид  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ , где  $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Мост питается стабилизированным током  $I = 350$  мА, при этом температура элементов  $R_1$  и  $R_3$ , находящихся в азоте, равна  $80^\circ\text{C}$ . Разность потенциалов в измерительной диагонали измеряется милливольтметром с бесконечно большим входным сопротивлением. Внутренний диаметр измерительной камеры  $D = 6,6$  мм, диаметр чувствительного элемента, расположенного по оси камеры,  $d = 0,05$  мм, его длина  $l = 20$  мм, температура стенок камеры  $t_c = 20^\circ\text{C}$ .

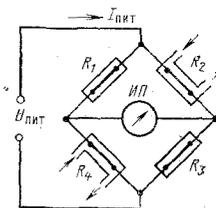


Рис. 6.3

Определите уравнение шкалы газоанализатора, если диапазон его измерения 0—20 %  $\text{CO}_2$ , и рассчитайте напряжение на измерительной диагонали моста при  $C = 0; 5; 10; 15; 20$  %  $\text{CO}_2$ .

6.23. Содержание водорода  $\text{H}_2$  в электролитическом кислороде  $\text{O}_2$  в интервале от 0 до 10 % измеряется термокондуктометрическим газоанализатором.

Установите связь между содержанием водорода и температурой платиновой нити чувствительного элемента газоанализатора.

Коэффициент теплового излучения нити  $\epsilon = 0,2$ , диаметр нити  $d =$

$=0,02$  мм, длина нити  $l=20$  мм, диаметр камеры  $D=5$  мм, ток, протекающий по нити,  $I=51$  мА, температура стенок камеры  $t_{ст}=20^\circ\text{C}$ , а температура нити  $t_n=80^\circ\text{C}$ .

Сопротивление нити изменяется по закону  $R_t=R_0(1+\alpha t)$ , где  $\alpha=-3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Удельное сопротивление платины при  $t=20^\circ\text{C}$   $\rho=0,0981 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . В решении следует учесть все виды теплообмена между нитью и стенкой.

6.24. Дымовые газы имеют следующий состав: кислород — 4 %, углекислый газ — 15 %, азот — 63 %, водяные пары — 18 %.

Определите, как изменится относительная магнитная восприимчивость газов

1) если содержание  $\text{O}_2$  увеличится на 1 %, а содержание  $\text{N}_2$  уменьшится на 1 % при неизменной концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;

2) если содержание  $\text{CO}_2$  увеличится на 1 %, а содержание  $\text{N}_2$  уменьшится на 1 % при неизменной концентрации  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;

Относительные объемные магнитные восприимчивости компонентов газовой смеси имеют следующие значения [22]:

$$\chi_{\text{O}_2} = 1; \quad \chi_{\text{N}_2} = -0,004; \quad \chi_{\text{CO}_2} = -0,0057; \quad \chi_{\text{H}_2\text{O}} = -0,004.$$

6.25. Через магнитный газоанализатор проходит смесь следующего состава:  $\text{CO}_2$ —20 %,  $\text{O}_2$ —5 % и  $\text{N}_2$ —75 % при расчетной температуре  $t_1=20^\circ\text{C}$ , разрежении  $p_1=3$  кПа.

Изменится ли показание газоанализатора, если: 1) при неизменной концентрации температура смеси возрастет до  $t_2=50^\circ\text{C}$ ; 2) при

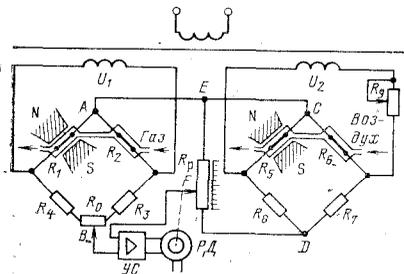


Рис. 6.4

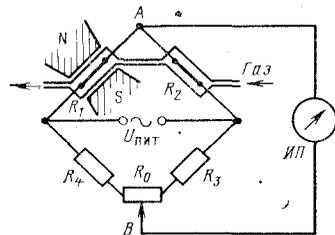


Рис. 6.5

неизменной температуре возрастет разрежение до  $p_2=10$  кПа? Предполагается, что на выходе из измерительной ячейки температура смеси равна  $t_c=100^\circ\text{C}$ .

6.26. Какое положение движка реохорда  $R_p$  в схеме магнитного газоанализатора (рис. 6.4) соответствует концу шкалы прибора?

6.27. Будет ли работоспособной схема (рис. 6.4), если газ пропускать через камеры  $R_5$  и  $R_6$ , а воздух — через камеры  $R_1$  и  $R_2$ ?

6.28. Какая камера,  $R_1$  или  $R_5$  (рис. 6.4), должна иметь магнитный шунт для проверки нуля прибора?

6.29. Оцените погрешность газоанализаторов, работающих по схеме неравновешенного моста (рис. 6.5) и по схеме компаратора напряжения (рис. 6.4), вызванную уменьшением напряжения питания  $U_{пит}$  на 10 %. Сопротивление нагрузки измерительного моста предполагается большим.

6.30. Оптико-акустический газоанализатор ОА 2209 предназначен для измерения содержания  $\text{CO}_2$  в многокомпонентных газовых смесях. На рис. 6.6 приведены спектры поглощения некоторых газов в инфракрасной области.

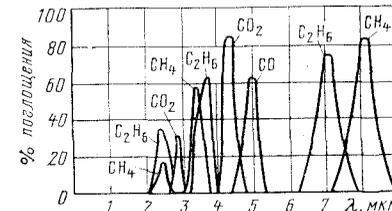


Рис. 6.6

Определите, какие газы должны быть в фильтровых камерах, если в состав контролируемой газовой смеси входят метан  $\text{CH}_4$ , окись углерода  $\text{CO}$ , азот  $\text{N}_2$ , водород  $\text{H}_2$  и этан  $\text{C}_2\text{H}_6$ .

6.31. Рассмотрим вариант двухканальной схемы оптико-акустического газоанализатора (рис. 6.7). В этой схеме потоки лучистой энергии от источников инфракрасного излучения  $I$  проходят через фильтро-

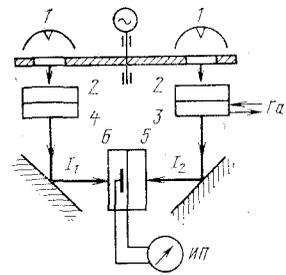


Рис. 6.7

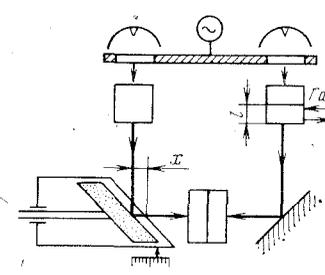


Рис. 6.8

вые камеры 2 и затем поступают в измерительную 3 и сравнительную 4 камеры, а затем в лучеприемники 5 и 6. Определите зависимости между концентрацией анализируемого компонента в смеси и отношением потоков энергий, поступающих в лучеприемники 5 и 6.

6.32. Определите зависимость между положением отражающего поршня  $x$  и концентрацией анализируемого компонента  $C$  в оптико-акустическом газоанализаторе с газовой компенсацией (рис. 6.8).

Известны длина измерительной камеры  $l$  и концентрация  $C_k$  анализируемого компонента в компенсационной камере. Предполагается, что потоки излучения после фильтровых камер равны. Поршень имеет скос под углом  $45^\circ$ .

6.33. Изменится ли диапазон измерения оптико-акустического газоанализатора с газовой компенсацией (рис. 6.8), если уменьшить концентрацию анализируемого компонента в компенсационной камере?

6.34. Для определения влажности воздуха в цехе завода применяется аспирационный психрометр.

Определите относительную влажность воздуха  $\varphi$ , если сухой термометр показывает  $t_c = 22,5^\circ\text{C}$ , а мокрый  $t_m = 18,5^\circ\text{C}$ . Давление воздуха  $760$  мм рт. ст. Сопоставьте значения с показаниями простого психрометра.

6.35. Абсолютная влажность воздуха, поступающего в нагревательную печь,  $f_n = 30$  г/м<sup>3</sup> сухого воздуха.

Определите относительную влажность дутья при температуре  $t = 300^\circ\text{C}$ . Избыточное давление воздуха  $p_n = 0,2$  МПа.

6.36. Определите абсолютную влажность доменного газа, если известно, что измеритель влажности, работающий по методу точки росы, показывает температуру  $t_{тр} = 32,5^\circ\text{C}$  при нормальном давлении.

6.37. При измерении влажности воздуха в цехе производства приборов номинальное значение точки росы составляет  $10^\circ\text{C}$ . Однако после протирки зеркала замасленной тряпкой температура точки росы понизилась до  $0^\circ\text{C}$ .

Какова погрешность, возникающая при измерении относительной влажности воздуха ( $t = 20^\circ\text{C}$ ) при таком изменении точки росы, и какая причина изменения показаний влагомера?

## Часть вторая РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ

### Глава первая МЕТРОЛОГИЯ

01.1. Для технического термометра можно определить только интервал, в котором находится действительное значение температуры:  $(346 \pm 4)^\circ\text{C}$  или  $342\text{--}350^\circ\text{C}$ . Для лабораторного термометра известны значения поправок, поэтому по его показаниям может быть определена действительная температура

$$t_d = 352 + (-1) + (+0,5) = 351,5^\circ\text{C}.$$

Отсюда легко заметить, что действительная погрешность технического термометра выходит за допускаемые пределы.

01.2. В рассматриваемом случае стрелка переместится с одной отметки шкалы на соседнюю при изменении входного напряжения на  $\Delta U$ :

$$\Delta U = \frac{U_R - H_H}{N} = \frac{10 - (-10)}{50} = 0,4 \text{ мВ};$$

следовательно, цена деления  $K = 0,4$  мВ.

Если за изменение выходной величины прибора принять перемещение стрелки на один интервал, то легко заметить, что чувствительность  $S$  и цена деления  $K$  являются обратными величинами:

$$S = 1/K = 1/0,4 = 2,5 \text{ 1/мВ}.$$

01.3. Коэффициент преобразования  $S$  подобен чувствительности, но чувствительность — это характеристика измерительного прибора, а коэффициент преобразования — характеристика измерительного преобразователя.

Входным сигналом термометра является температура, а выходным сигналом — электрическое сопротивление термометра. Коэффициент преобразования для медного термометра

$$S_M = dR/dt = R_0 \alpha;$$

для платинового термометра

$$S_{II} = dR/dt = R_0 (A + Bt).$$

Следовательно, для медного термометра коэффициент преобразования не зависит от температуры, а для платинового — изменяется с изменением температуры.

01.4. Для учета систематической погрешности все результаты, считанные с диаграммной бумаги в градусах, необходимо перевести по градуировочным таблицам [1] в милливольты, прибавить поправку в милливольтках, а затем результат снова перевести в градусы.

Смещение стрелки и пера от 0 до 10 °С соответствует для градуировки ХК изменению термо-ЭДС на 0,65 мВ. По диаграммной бумаге отсчитано 430 °С, термо-ЭДС для 430 °С градуировки ХК составляет 34,12 мВ, с учетом поправки

$$34,12 + (-0,65) = 33,47 \text{ мВ.}$$

Определяем значение температуры  $t = 422,75$  °С.

01.5. Определим оценку наиболее вероятного значения перепада давления, соответствующего конечной точке шкалы прибора, при нормальных условиях [формула (1.3)]:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{p} &= \frac{84,15 + 84,06 + 83,80 + 83,90 + 83,94 + 84,10 + 84,02 + 84,03}{8} = \\ &= \frac{672}{8} = 84 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

Найдем оценку наиболее вероятного значения перепада давления при напряжении питания, составляющем 110 %  $U_{ном}$ :

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{p}^* &= \frac{83,85 + 83,73 + 83,82 + 83,76 + 83,84 + 83,82 + 83,83 + 83,75}{8} = \\ &= \frac{670,4}{8} = 83,8 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

Таким образом, можно найти оценку наиболее вероятного значения погрешности в конечной точке шкалы, вызванной изменением напряжения питания измерительной системы:

$$\tilde{\Delta} = \Delta \tilde{p}^* - \Delta \tilde{p} = 83,8 - 84 = -0,2 \text{ кПа.}$$

Эта погрешность называется дополнительной, так как она вызвана отклонением одной из влияющих величин (напряжения питания) от нормального значения.

01.6. Изменение барометрического давления составляет 4 кПа. Так как измерительные приборы манометрических термометров измеряют избыточное давление, то показания прибора будут завышены на 4 кПа. Шкала газового термометра равномерная, и по давлению диа-

пазон шкалы составляет 250 кПа. Таким образом, показания термометра будут завышены на  $100 \cdot \frac{4}{250} = 1,6$  °С. Абсолютная погрешность на отметке 80 °С

$$\delta = \frac{+1,6}{80} 100 = +2\%.$$

01.7. При температуре 24 °С будет иметь место основная погрешность, так как нормальные условия работы прибора  $20 \pm 5$  °С. При температуре 10 °С кроме основной погрешности будет иметь место дополнительное изменение показаний прибора от изменения температуры. Погрешность при температуре 55 °С не нормируется, так как она выходит за пределы рабочей области температур.

01.8. Нет. Для всех точек шкалы одинаков предел допускаемой абсолютной погрешности  $\Delta_0$ , определяемый классом точности средств измерений и диапазоном измерения. Предел допускаемой относительной погрешности  $\delta_0 = \Delta_0/x_i$  зависит от отметки шкалы  $x_i$ . Чем меньше показание прибора по шкале, тем больше относительная погрешность. Поэтому диапазон измерения прибора нужно выбирать таким образом, чтобы измеряемая величина находилась в конце шкалы.

01.9. Если кроме класса потенциометра нет никаких других метрологических характеристик, то можно оценить только пределы допускаемой погрешности. Предел допускаемой погрешности в нашем случае определяется через класс  $K$  и диапазон измерения  $x_R - x_H$  потенциометра:

$$\Delta_0 = \frac{x_R - x_H}{100} K.$$

Для потенциометров погрешность выражается в милливольтках [2]:

$$x_R = E(600 \text{ °С}, 0 \text{ °С}) = 49,11 \text{ мВ};$$

$$x_H = E(200 \text{ °С}, 0 \text{ °С}) = 14,59 \text{ мВ};$$

$$\Delta_0 = \frac{49,11 - 14,59}{100} 0,5 = 0,1726 \text{ мВ.}$$

Предел относительной погрешности на отметке 550 °С

$$\delta_0 = \frac{\Delta_0}{E(550 \text{ °С}, 0 \text{ °С})} 100 = \frac{0,1726}{44,71} 100 = 0,386\%.$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности одинаков для всех отметок шкалы, тогда как предел относительной погрешности увеличивается к началу шкалы. Например, на отметке 300 °С

$$\delta_0 = \frac{0,1726}{22,88} 100 = 0,754\%.$$

Поэтому диапазон измерения прибора нужно выбирать таким образом, чтобы измеряемая величина находилась в конечной части шкалы.

01.10. Найдем оценку наиболее вероятного значения времени на заполнения бака [формула (1.3)]

$$\tau = \frac{94,5 + 94,8 + 94,7 + 95,2 + 94,9 + 95,3 + 95,1 + 95,2 + 95,3}{9} = 95 \text{ с.}$$

Половина ширины доверительного интервала  $\epsilon_p$  для распределения Стьюдента определяется по формуле (1.7)

$$\epsilon_p = 3,36 \sqrt{\frac{0,0825}{9}} = 0,32 \text{ с.}$$

Расход определяется по формуле  $Q = V/\tau$ . Измерения объема  $V$  и времени  $\tau$  являются взаимонезависимыми, поэтому погрешность градуировки расходомера вычисляется как результат косвенного измерения по формуле (1.1)

$$\Delta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \Delta \tau\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{0,1}{95}\right)^2 + \left(\frac{507}{95 \cdot 2} \cdot 0,32\right)^2} = \pm 0,018 \text{ л/с.}$$

01.11. Сопротивление термопреобразователя  $R_t = R_k(U_t/U_k)$ . Падение напряжения на образцовой катушке  $U_k = 10 \cdot 3 = 30$  мВ. Сопротивление термопреобразователя при  $t = 100^\circ\text{C}$  (табл. П.18)  $R_{100} = 13,9113$  Ом. Падение напряжения на термопреобразователе  $U_t = 13,9113 \cdot 3 = 41,73$  мВ.

Оценим предел допускаемой погрешности определения сопротивления термопреобразователя по формуле (1.1)

$$\Delta R_t/R_t \leq \sqrt{(\Delta R_k/R_k)^2 + (\Delta U_t/U_t)^2 + (\Delta U_k/U_k)^2}.$$

Тогда  $\Delta R_k/R_k \leq 0,01/10 = 0,001$  (по условию).  $\Delta U_t$  подсчитывается по формуле  $\Delta U_t = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 41,73 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,0459$  мВ; отношение  $\Delta U_t/U_t \leq \pm 0,0011$ , или  $\pm 0,11\%$ . Величина  $\Delta U_k \leq \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,04$  мВ; отношение  $\Delta U_k/U_k \leq \pm 0,0013$ , или  $\pm 0,13\%$ . Значение  $\Delta R_t/R_t \leq \pm \sqrt{(0,001)^2 + (0,0011)^2 + (0,0013)^2} = 0,00197$ , откуда  $\Delta R_t \leq 0,0274$  Ом.

Точность измерения сопротивления достаточно высока, однако изменение сопротивления термопреобразователя при изменении температуры от 0 до  $100^\circ\text{C}$  также невелико и составляет 3,9113 Ом, поэтому относительная погрешность измерения сопротивления уже составляет  $\delta = \Delta R_t/(R_{100} - R_0) \cdot 100 = 0,0274/3,9113 \cdot 100 = 0,7\%$ , что соответствует

$$\Delta t_R < 0,712^\circ\text{C}$$

Оценим предел допускаемой суммарной погрешности определения температуры с учетом погрешности термопреобразователя  $\Delta t_T = 0,3^\circ\text{C}$  (по условию);  $\Delta t_\Sigma \leq \sqrt{\Delta t_T^2 + \Delta t_R^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,712^2} = \pm 0,773^\circ\text{C}$ .

Таким образом, суммарная погрешность измерения температуры  $\Delta t_\Sigma \leq \pm 0,773^\circ\text{C}$ .

01.12. Погрешность, возникающая в результате того, что  $R_0^* = 49,95$  Ом и  $\alpha^* = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , будет систематической. Температура, определенная по градуировочным таблицам,  $t^* = (R_t^* - R_0)/R_0 \alpha$ .

Действительная температура

$$t = (R_t^* - R_0^*)/(R_0^* \alpha^*).$$

Поправка к показаниям, определенным по градуировочным таблицам,

$$t - t^* = \frac{R_t^* - R_0^*}{R_0^* \alpha^*} - \frac{R_t^* - R_0}{R_0 \alpha}.$$

Для  $R_t^* = 71,4$  Ом и  $t^* = 100^\circ\text{C}$

$$t = 100 + \frac{71,40 - 49,95}{49,95 \cdot 4,25 \cdot 10^{-3}} - \frac{71,40 - 50,00}{50,00 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3}} = 101,04^\circ\text{C}.$$

Погрешность имеет постоянный знак, и поэтому мы ее учитываем, введя поправку в измеренное значение температуры. В предыдущей задаче можно было определить интервал, в котором находится действительная температура, но вводить поправку было нельзя, поскольку знак и значение погрешности были неизвестны.

01.13. Погрешность измерения мощности  $\Delta W$  оценивается как погрешность косвенного измерения [формула (1.1)]:

$$\Delta W = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial I} \Delta I\right)^2}.$$

В связи с отсутствием каких-либо других метрологических характеристик средств измерения, кроме класса точности, мы можем оценить только пределы допускаемых значений погрешности в соответствии с классом и шкалой прибора

$$\Delta U_0 = \frac{U_k - U_n}{100} K = \frac{30 - 0}{100} 0,5 = \pm 0,15 \text{ В;}$$

$$\Delta I_0 = \frac{I_k - I_n}{100} K = \frac{5 - 0}{100} 0,5 = \pm 0,025 \text{ А.}$$

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения мощности

$$\Delta W = \sqrt{(3,5 \cdot 0,15)^2 + (24 \cdot 0,025)^2} = \pm 0,795 \text{ Вт.}$$

Предел допускаемой относительной погрешности измерения мощности

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{0,795}{24 \cdot 3,5} 100 = \pm 0,95\%$$

О1.14. Определим коэффициент преобразования термопреобразователя:

$$S = \Delta R_t / \Delta t = R_0 \alpha = 50 \cdot (4,28 \cdot 10^{-3}) = 0,214 \text{ Ом/К.}$$

Возможную погрешность измерения температуры оцениваем как погрешность косвенного измерения по формуле (1.1):

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= \sqrt{\left(\frac{\partial R_t}{\partial R_0} \Delta R_0\right)^2 + \left(\frac{\partial R_t}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2} = \\ &= \sqrt{(1 + \alpha t)^2 \Delta R_0^2 + (R_0 t \Delta \alpha)^2}. \end{aligned}$$

Погрешность в градусах определяется как

$$\Delta t = \Delta R_t / S.$$

При 100 °С

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= \sqrt{(1 + 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot 100)^2 (0,1)^2 + (50 \cdot 100 \cdot 0,02 \cdot (10^{-3}))^2} = \pm 0,174 \text{ Ом;} \\ \Delta t &= \pm 0,813 \text{ °С.} \end{aligned}$$

При 150 °С

$$\begin{aligned} \Delta R_t &= \sqrt{(1 + 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot 150)^2 (0,1)^2 + (50 \cdot 150 \cdot 0,02 \cdot (10^{-3}))^2} = \\ &= \pm 0,197 \text{ Ом;} \\ \Delta t &= \pm 0,922 \text{ °С} \end{aligned}$$

Таким образом, пределы допускаемых значений погрешности медного термопреобразователя сопротивления, обусловленные отклонениями  $R_0$  и  $\alpha$  от номинальных значений, составляют: при  $t=100$  °С  $\Delta t = \pm 0,813$  °С; при  $t=150$  °С  $\Delta t = \pm 0,922$  °С.

О1.15. В связи с тем что все измеряемые параметры определяются с допускаемыми отклонениями, которые можно считать предельными значениями погрешности, и сам коэффициент теплоотдачи может быть оценен с каким-то пределом допускаемой погрешности. Коэффициент теплоотдачи определяется как результат косвенных измерений параметров  $Q$ ,  $F$ ,  $t_c$  и  $t_b$ . Поэтому предел допускаемой абсолютной погрешности определения коэффициента теплоотдачи может быть подсчитан из выражения [формула (1.1)]

$$\Delta \alpha_K = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha_K}{\partial Q} \Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_K}{\partial F} \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_c} \Delta t_c\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_b} \Delta t_b\right)^2}.$$

Количество теплоты  $Q$  определяется по мощности электронагревателя  $Q = I^2 R$ . Таким образом,  $Q$  в свою очередь является результатом косвенных измерений  $I$  и  $R$ . Ток измерялся амперметром класса 0,1 со шкалой 0—50 А. Основная погрешность измерения силы тока не должна превышать  $\pm 0,05$  А. Температура трубки измерялась стандартным термоэлектрическим термометром градуировки ХК в комплекте с потенциометром ПП-63 класса 0,05. Допускаемое отклонение термо-ЭДС термоэлектрического термометра ТХК от градуировочных значений при  $t \leq 300$  °С составляет  $\Delta e_T = \pm 0,2$  мВ. Предел допускаемой погрешности потенциометра ПП-63

$$\begin{aligned} \Delta e_{\Pi} &= \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 14,66 + 0,5 \cdot 0,05) = 0,032 \text{ мВ;} \\ U &= E(200 \text{ °С}, 0 \text{ °С}) = 14,66 \text{ мВ.} \end{aligned}$$

Оценим предел суммарной погрешности  $\Delta e_{\Sigma}$  измерения температуры в предположении, что погрешности термометра и потенциометра являются независимыми величинами. Тогда

$$\Delta e_{\Sigma} = \sqrt{\Delta e_T^2 + \Delta e_{\Pi}^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,032^2} = \pm 0,203 \text{ мВ,}$$

что соответствует  $\Delta t = \pm 2,9$  °С или  $\Delta t / \Delta t_0 = \pm 0,0145$ . Сопротивление трубки  $R$  определялось по измеренной температуре в соответствии с выражением

$$R = R_0 (1 + \alpha t).$$

Погрешность определения значения  $R$  обусловлена погрешностью прибора, измеряющего сопротивление, и погрешностью измерения температуры. Составляющая погрешности, обусловленная погрешностью прибора, не превышает

$$\Delta R_{\Pi} = \pm 0,002 R_0 (1 + \alpha t);$$

при  $R_0 = 0,5$  Ом,  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup> и  $t = 200$  °С

$$\Delta R_{\Pi} = \pm 0,0018 \text{ Ом.}$$

Составляющая погрешности, обусловленная погрешностью измерения температуры, не превышает

$$\Delta R_t = \pm R_0 \alpha \Delta t = \pm 0,5 \cdot 0,004 \cdot 2,9 = \pm 0,0058 \text{ Ом.}$$

Оценим предел суммарной погрешности определения сопротивления нагреваемой трубки по ее температуре, полагая, что погрешность градуировки трубки и погрешность измерения температуры — независимые величины:

$$\Delta R_{\Sigma} = \sqrt{\Delta R_{\Pi}^2 + \Delta R_t^2} = \pm \sqrt{0,0018^2 + 0,0058^2} = \pm 0,00606 \text{ Ом}$$

или в относительных величинах  $\Delta R_{\Sigma} / R = \pm 0,00673$ .

Теперь можно оценить погрешность определения количества теплоты, передаваемой от трубки к воздуху,

$$Q = I^2 R = 42^2 \cdot 0,9 = 1588 \text{ Вт},$$

откуда

$$\Delta Q = \left( \frac{\partial Q}{\partial I} \Delta I \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial R} \Delta R \right)^2 = \pm \sqrt{(2 \cdot 0,9 \cdot 42 \cdot 0,05)^2 + (42^2 \cdot 0,00606)^2} = \pm 11,34 \text{ Вт}.$$

Оценим предел погрешности определения поверхности теплообмена  $F$ :

$$F = \pi dl = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,1 = 0,00314 \text{ м}^2;$$

$$\Delta F = \sqrt{\left( \frac{\partial F}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial l} \Delta l \right)^2} = \pm \sqrt{(3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,0001)^2 + (3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,0005)^2} = \pm 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Оценим погрешность измерения температуры воздуха по характеристикам стеклянного термометра. Термометр с ценой деления 0,2 и шкалой 100—150 °С имеет предел допускаемой погрешности  $\pm 0,5$  °С. Таким образом,  $\Delta t_b = \pm 0,5$  °С или  $\Delta t_b/t_b = \pm 0,00416$ . Для оценки предела погрешности определения коэффициента теплоотдачи воспользуемся формулой для определения абсолютной погрешности. Для дальнейших вычислений определим производные:

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial Q} = \frac{1}{F(t_c - t_b)} = \frac{1}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 80} = 3,98 \text{ 1/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial F} = \frac{Q}{F^2(t_c - t_b)} = \frac{1588}{(3,14 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 80} = 2,013 \cdot 10^6 \text{ Вт/(м}^4 \cdot \text{К)};$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_g} = \frac{Q}{F(t_c - t_b)^2} = \frac{1588}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 80^2} = 79,02 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^2);$$

$$\frac{\partial \alpha_K}{\partial t_b} = \frac{Q}{F(t_c - t_b)^2} = 79,02 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^2);$$

$$\Delta \alpha_K = \pm \sqrt{(3,98 \cdot 11,34)^2 + (2,013 \cdot 16)^2 + (79,02 \cdot 2,9)^2 + (79,02 \cdot 0,5)^2} = \pm 239,06 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Расчетный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_K = \frac{Q}{F(t_c - t_b)} = \frac{1588}{0,00314(200 - 120)} = 6321,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Предел допускаемой относительной погрешности

$$\delta_0 = \frac{\Delta \alpha_K}{\alpha_K} = \pm \frac{239,06}{6321,7} 100 = \pm 3,78\%.$$

Из решения видно, что наибольшая составляющая погрешности приходится на погрешность измерения температуры поверхности трубки. В самой погрешности измерения температуры определяющее значение принадлежит погрешности термоэлектрического термометра. Если предположить, что в результате индивидуальной градуировки погрешность измерительного комплекта для измерения температуры удалось бы довести до значения, не превышающего  $\pm 0,5$  °С, то предел допускаемой абсолютной погрешности измерения коэффициента теплоотдачи уменьшился бы до

$$\Delta \alpha_K = \pm \sqrt{2037 + 1037 + 1561 + 1561} = \pm 78,72 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

или

$$\delta_0 = \pm \frac{78,72}{6321,7} 100 = \pm 1,24\%.$$

В результате расчетов получен предел допускаемой погрешности измерения коэффициента теплоотдачи. Однако мы не знаем значения погрешности. Известно, что каждая из составляющих погрешности не выходит за пределы допускаемых, но равна ли погрешность пределу или в несколько раз меньше его, неизвестно. Для оценки погрешности необходимо знать для каждой ее составляющей наиболее вероятные значения с соответствующими доверительными интервалами. Эти значения могут быть получены путем многократных измерений и дальнейшей статистической обработки результатов. Повышение точности определения коэффициента теплоотдачи возможно за счет использования средств измерения более высокого класса. В этом случае мы оценим значение предела допускаемой погрешности, которое для средств измерения более высокого класса естественно будет меньше, а соответственно и погрешность будет лежать в более узком интервале. Следует отметить, что в расчете не учтен ряд факторов, влияющих на погрешности, поэтому реальные погрешности (пределы допускаемых значений) будут больше.

01.16. При нормальном законе распределения при доверительной вероятности 0,683 доверительный интервал  $\epsilon = \pm \sigma$ . При доверительной вероятности 0,95 доверительный интервал  $\epsilon = \pm 2\sigma$ . Таким образом, числовое значение доверительного интервала для доверительной вероятности 0,95 составит  $2 \cdot 0,5 = \pm 1\%$   $O_2$ . Границы доверительного интервала соответственно будут

$$I = (11,75 \pm 1,0) \% O_2, \text{ или } (10,75 \div 12,75) \% O_2.$$

01.17. Для решения задачи удобнее представить суммарную погрешность в виде случайной величины, распределенной по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 0,08$  МПа и математическим ожиданием  $x_0$ , равным систематической погрешности  $x_0 = 0,12$  МПа. Вероятность нахождения погрешности в интервале

Таблица О.1.1

$i$	$\Delta_i$ , мВ	$p_i$	$l_i$	$i$	$\Delta_i$ , мВ	$p_i$	$l_i$
1	0,16	0,1	0,625	6	0,01	0,09	9,0
2	0,08	0,11	1,375	7	0,02	0,105	5,25
3	0,04	0,09	2,25	8	0,04	0,095	2,375
4	0,02	0,1	5,0	9	0,08	0,085	1,0625
5	0,01	0,11	11,0	10	0,16	0,115	0,7188

$\Delta_n < \Delta < \Delta_b$  можно оценить с помощью нормальной функции распределения (табл. П.1) или [4]:

$$\text{Вер}(\Delta_n < \Delta < \Delta_b) = \Phi^* \left( \frac{\Delta_b - x_0}{\sigma} \right) - \Phi^* \left( \frac{\Delta_n - x_0}{\sigma} \right);$$

$$\text{Вер}(-0,15 < \Delta < +0,15) = \Phi^* \left( \frac{0,15 - 0,12}{0,08} \right) - \Phi^* \left( \frac{-0,15 - 0,12}{0,08} \right) = 0,64615 - 0,00035 = 0,6458.$$

Таким образом, вероятность того, что отклонение измеренного значения от действительного не превышает 0,15 МПа, составляет 64,58%.

О1.18. Ход решения аналогичен О1.17:

$$\text{Вер}(-0,15 < \Delta < +0,15) = \Phi^* \left( \frac{0,15 - 0}{0,08} \right) - \Phi^* \left( \frac{-0,15 - 0}{0,08} \right) = 0,9696 - 0,0304 = 0,9392,$$

т. е. вероятность того, что измеренное значение не будет отличаться от действительного более чем на 0,15 МПа, составляет 93,9%.

Рассмотренная задача показывает, целесообразность устранения систематической погрешности.

О1.19. По условию погрешность измерения температуры распределена по нормальному закону с параметрами  $x_0 = -6^\circ\text{C}$  и  $\sigma = 8^\circ\text{C}$ . Заданный интервал  $-10 < \Delta < +10$ . Для определения вероятности используем нормальную функцию распределения

$$\text{Вер}(-10 < \Delta < +10) = \Phi^* \left( \frac{10 - 6}{8} \right) - \Phi^* \left( \frac{-10 - 6}{8} \right) = 0,9772 - 0,3085 = 0,6687, \text{ или } 66,87\%.$$

Такая вероятность может оказаться недостаточной. Для ее повышения необходимо устранить смещение стрелки, после чего вероятность будет

$$\text{Вер}(-10 < \Delta < +10) = \Phi^* \left( \frac{10 - 0}{8} \right) - \Phi^* \left( \frac{-10 - 0}{8} \right) = 0,8944 - 0,1056 = 0,7888, \text{ или } 78,88\%.$$

О1.20. Не соответствует. На первый взгляд, по табл. 1.1 может показаться, что статистический ряд действительно выравнивается законом равномерной плотности, поскольку число значений во всех интервалах примерно одинаково. Однако при построении гистограмм следует учитывать не только число значений в каждом интервале, но и ши-

рину их, а в предложенной задаче ширина различная. Для построения гистограммы по оси абсцисс откладываются интервалы и на каждом интервале как на основании строится прямоугольник. Площадь каждого прямоугольника равна частоте  $p_i$  данного интервала (частота  $p_i$  равна отношению количества значений в интервале  $n_i$  к общему числу значений  $n$  в выборке  $p_i = n_i/n$ ). Следовательно, для построения гистограммы нужно частоту  $p_i$  каждого интервала разделить на его ширину  $\Delta_i$  и полученное число взять в качестве высоты прямоугольника  $l_i$ . В табл. О1.1 приведены значения высот. Общее число наблюдений  $n = 200$ .

Вид гистограммы (рис. О1.1) показывает, что предложенное экспериментальное распределение не может описываться законом равномерной плотности.

О1.21. Задача выравнивания заключается в том, чтобы подобрать теоретическую кривую распределения, наилучшим образом описывающую экспериментальное статистическое распределение. Например, метод моментов заключается в подборе нескольких важнейших числовых характеристик (моментов) теоретического распределения, равных соответствующим моментам экспериментального распределения. Если для выравнивания используется нормальный закон, то такими числовыми характеристиками являются математическое ожидание  $x_0$  и дисперсия  $D$ , которые должны быть равны соответствующим статистическим характеристикам  $\tilde{x}$  и  $\tilde{D}$ . При большом числе измерений среднее значение можно вычислить по приближенной формуле [4]

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^k x_i p_i,$$

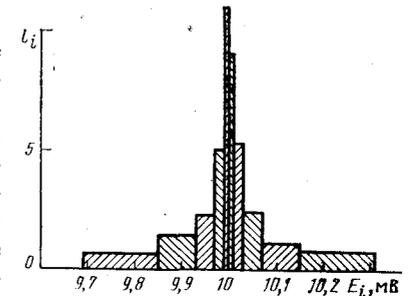


Рис. О1.1

где  $k$  — число разрядов (в нашем случае  $k=18$ );  $p_i$  — частота  $i$ -го разряда, представляющая отношение числа измерений  $n_i$  в данном интервале к общему числу измерений  $n$  (в нашем случае  $n=844$ );  $x_i$  — представитель  $i$ -го разряда (обычно принимается значение, соответствующее середине интервала). Для нашего случая получаем  $\tilde{x}=5,01$  МА.

Статистическую дисперсию  $\tilde{D}$  вычисляем по формуле

$$\tilde{D} = \sum_{i=1}^{k'} (x_i - \tilde{x})^2 p_i.$$

После вычисления получаем  $\tilde{D}=0,0001016$  (МА)<sup>2</sup>.

Таким образом, параметры нормального закона будут

$$x_0 = 5,01 \text{ МА и } \sigma = \sqrt{\tilde{D}} = 0,01008 \text{ МА,}$$

а уравнение нормального закона примет вид

$$f(x) = \frac{1}{0,01008 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x_i - 5,01)^2}{2 \cdot 0,01008^2} \right].$$

Гистограмма и выравнивающая ее кривая распределения представлены на рис. О1.2. При построении гистограммы следует иметь в виду, что составляющие ее прямоугольники имеют основанием интервал  $\Delta_i$ , а площадь их равна частоте разряда  $p_i$ , т. е. высота  $i$ -го прямоугольника  $l_i = p_i / \Delta_i$ . Теоретическую кривую распределения удобно строить путем вычисления значений на границах интервалов. Определяются значения аргумента  $x'_i$ , для границ интервалов

$$x'_i = \frac{x_i - x_0}{\sigma} = \frac{x_i - 5,01}{0,01008}.$$

По таблицам [4] определяются значения функции для соответствующих значений  $x'_i$

$$f^*(x'_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x'_i)^2}{2} \right],$$

после чего определяются значения плотности распределения  $x_i$  на границах интервалов

$$f(x_i) = \frac{f^*(x'_i)}{\sigma}.$$

Все результаты вычислений сведены в табл. О1.2 и О1.3.

Таблица О1.2

$I_i$ , МА	$p_i$	$l_i$	$I_i$ , МА	$p_i$	$l_i$
4,983—4,986	0,0059	1,97	5,010—5,013	0,1185	39,07
4,986—4,989	0,0095	3,17	5,013—5,016	0,1066	35,53
4,989—4,992	0,0190	6,33	5,016—5,019	0,0948	31,60
4,992—4,995	0,0320	10,67	5,019—5,022	0,0651	21,70
4,995—4,998	0,0474	15,80	5,022—5,025	0,0498	16,60
4,998—5,001	0,0699	23,30	5,025—5,028	0,0296	9,87
5,001—5,004	0,0912	30,40	5,028—5,031	0,0178	5,93
5,004—5,007	0,1090	36,33	5,031—5,034	0,0118	3,93
5,007—5,010	0,1161	38,70	5,034—5,037	0,0059	1,97

Таблица О1.3

$x_i$	$x'_i$	$f^*(x'_i)$	$\frac{f^*(x'_i)}{\sigma}$	$x_i$	$x'_i$	$f^*(x'_i)$	$\frac{f^*(x'_i)}{\sigma}$
4,983	-2,68	0,0110	1,09	5,013	0,298	0,3816	37,9
4,986	-2,38	0,0235	2,33	5,016	0,596	0,3340	33,2
4,989	-2,08	0,0459	4,55	5,019	0,89	0,2685	26,7
4,992	-1,79	0,0804	7,98	5,022	1,19	0,1965	19,5
4,995	-1,49	0,1315	13,05	5,025	1,49	0,1315	13,05
4,998	-1,19	0,1965	19,5	5,028	1,79	0,0804	7,98
5,001	-0,89	0,2685	26,7	5,031	2,08	0,0459	4,55
5,004	-0,596	0,3340	33,2	5,034	2,38	0,0235	2,33
5,007	-0,298	0,3816	37,9	5,037	2,68	0,0110	1,09
5,010	0	0,3989	39,6				

Из рис. О1.2 видно, что теоретическая кривая распределения сохраняет в основном особенности статистического распределения. Количественная оценка соответствия теоретического распределения экспериментальному производится с помощью специальных критериев согласия.

О1.22. Как указывалось выше, правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим регламентированы [6]. При использовании критерия Колмогорова задача решается следующим образом.

Таблица О1.4

$x_i$	$F_n(x_i)$	$F(x_i)$	$K_i$	$x_i$	$F_n(x_i)$	$F(x_i)$	$K_i$
4,983	0	0,0037	0,0037	5,013	0,6186	0,6171	0,0014
4,986	0,0058	0,0087	0,0028	5,016	0,7251	0,7244	0,0007
4,989	0,0154	0,0189	0,0035	5,019	0,8199	0,8133	0,0063
4,992	0,0344	0,0367	0,0023	5,022	0,8850	0,8830	0,0020
4,995	0,0664	0,0681	0,0017	5,025	0,9348	0,9319	0,0029
4,998	0,1138	0,1170	0,0032	5,028	0,9644	0,9633	0,0011
5,001	0,1837	0,1867	0,0030	5,031	0,9822	0,9812	0,0010
5,004	0,2749	0,2756	0,0007	5,034	0,9940	0,9913	0,0027
5,007	0,3839	0,3827	0,0012	5,037	0,9999	0,9963	0,0036
5,010	0,5000	0,5000	0,0000				

Функцию  $F_n(x_i)$  на границе интервала определяют как накопленную сумму частот всех интервалов, стоящих на гистограмме левее этой границы:

$$F_n(x_i) = \sum_1^i p_i.$$

Значения  $F_n(x_i)$  на границах интервалов приведены в табл. О1.4.

Значения теоретической функции распределения  $F(x)$  определяются с помощью нормальной функции распределения

$$F(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - x_0}{\sigma}\right).$$

Пользуясь значениями  $x_i^*$  (см. О1.21), определяют  $F(x_i)$  и  $K_i = |F_n(x_i) - F(x_i)|$  на границах интервалов. Все эти значения приведены в табл. О1.4. Максимальный  $K = 0,0063$ , откуда

$$\lambda = K\sqrt{n} = 0,0063\sqrt{844} = 0,183.$$

Величина  $\lambda = 0,183$  вписывается в любые границы для доверительной вероятности, большей 0,01. Поэтому согласие опытного и теоретического распределения считается хорошим. При использовании таблиц [6] следует помнить, что чем меньше  $\lambda^*$ , при которой выполняется неравенство  $\lambda \leq \lambda^*$ , тем лучше совпадение теоретического и опытного распределения.

О1.23. Закон равномерной плотности определяется выражением [4]

$$f(x) = \begin{cases} c & \text{при } \alpha < x < \beta; \\ 0 & \text{при } x < \alpha \text{ или } x > \beta, \end{cases}$$

$$\text{где } c = \frac{1}{\beta - \alpha}.$$

Математическое ожидание и дисперсия подсчитываются по формулам

$$x_0 = \frac{\alpha + \beta}{2}; \quad D = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12}.$$

При выравнивании следует выбрать  $\alpha$  и  $\beta$  таким образом, чтобы  $x_0$  и  $D$  были равны статистическому среднему  $\tilde{x}$  и статистической дисперсии  $\tilde{D}$ . В нашем случае

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^{20} x_i p_i = 0,00500;$$

$$\tilde{D} = \sum_{i=1}^{20} (x_i - \tilde{x})^2 p_i = 0,09957.$$

$$\text{Следовательно, } \frac{\alpha + \beta}{2} = 0,005; \quad \frac{(\beta - \alpha)^2}{12} = 0,09957,$$

откуда  $\alpha = -0,5415$  и  $\beta = 0,5515$ .

$$\text{Таким образом, } f(x) = \frac{1}{\beta - \alpha} = \frac{1}{1,093} = 0,915.$$

На рис. О1.3 представлены гистограмма и выравнивающий ее закон равномерной плотности  $f(x)$ . Для проверки соответствия опытного распределения теоретическому используем критерий  $\chi^2$ . Для этого вычисляем значение критерия  $\chi^2$  [формула (1.8)]. Для закона равномерной плотности при одинаковых интервалах вероятность попадания  $p_i$  будет одинакова для всех интервалов:

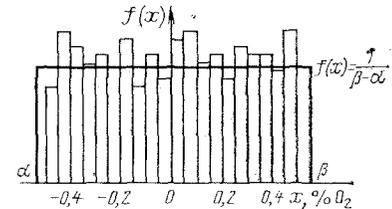


Рис. О1.3

$$np_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\beta - \alpha} n = \frac{0,05}{1,093} \times$$

$$\times 315 = 14,41;$$

$$\chi^2 = 2 \frac{(12 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(13 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(14 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(15 - 14,41)^2}{14,41} + 5 \frac{(16 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(17 - 14,41)^2}{14,41} + 2 \frac{(18 - 14,41)^2}{14,41} + 3 \frac{(19 - 14,41)^2}{14,41} = 7,1485.$$

Определим число степеней свободы  $s$ . Оно определяется как число интервалов минус число наложенных связей. В нашем случае число наложенных связей равно трем.

Первая — сумма частот равна единице:

$$\sum_{i=1}^k p_i = 1;$$

вторая — теоретическое и статистическое (экспериментальное) среднее значения должны быть равны:

$$\sum_{i=1}^k x_i p_i = x_0;$$

третья — теоретическая и статистическая дисперсия должны быть равны:

$$D = \sum_{i=1}^k (x_i - \tilde{x})^2 p_i.$$

Следовательно, в нашем случае число степеней свободы  $s=20-3=17$ .

Вычисляем  $(\chi^*)^2 = 0,51 \cdot 17 = 8,67$ . Так как  $\chi^2 < (\chi^*)^2$ , то гипотеза о согласовании теоретического и экспериментального распределений считается правдоподобной.

О1.24. Проведем оценку наиболее вероятного значения измеряемой величины и дисперсии [формулы (1.3) и (1.6)]:

$$x_0 = \frac{98,6 + 97,8 + 98,1 + 97,8 + 98,4 + 98,3 + 97,9 + 98,0 + 98,1 + 98,2 + 98,3 + 98,3}{12} = 98,15 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tilde{D} = \frac{0,45^2 + 0,35^2 + 0,05^2 + 0,35^2 + 0,25^2 + 0,15^2 + 0,25^2 + 0,15^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,15^2 + 0,15^2}{11} = 0,061 \text{ } (^{\circ}\text{C})^2.$$

Определим среднюю квадратическую погрешность единичного результата измерения

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = 0,247 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Очевидно, что определяющей является систематическая погрешность

$$\Delta_c = 100 - 98,15 = 1,85 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По-видимому, отклонение температуры кипения от  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  вызвано отклонением барометрического давления от  $760 \text{ мм рт. ст.}$  Случайная составляющая погрешности на порядок меньше систематической.

О1.25. Среднее квадратическое отклонение  $\tilde{\sigma} = \sqrt{\tilde{D}} = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Для ве-

роятности  $0,95$  половина ширины доверительного интервала  $\epsilon = 2\tilde{\sigma} = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Следовательно, границы доверительного интервала  $I_{0,95} = [(x_0 - \epsilon); (x_0 + \epsilon)] = (1056; 1088) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

О1.26. Доверительной вероятности  $0,997$  при нормальном законе распределения погрешности соответствует ширина интервала  $(-3\tilde{\sigma}; +3\tilde{\sigma})$ . Отсюда легко определить

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{6} (17,27 - 16,73) = 0,09 \text{ мВ}.$$

О1.27. Для оценки погрешности при небольшом числе измерений можно воспользоваться распределением Стьюдента.

Для рассматриваемого примера

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i = 31,684 \text{ мВ};$$

$$\tilde{D} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - x_0)^2 = 0,01146 \text{ (мВ)}^2.$$

По табл. П.2 для  $p=0,99$  и  $(n-1)=7$  определяем  $t_p=3,5$ . Таким образом, полуширина интервала [формула (1.7)]

$$\epsilon_p = t_p \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} = 3,5 \sqrt{\frac{0,01146}{8}} = 0,132 \text{ мВ}.$$

Действительная температура с вероятностью  $0,99$  находится в интервале  $757,3 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 763,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Оценку доверительного интервала можно производить также по [5], результат будет аналогичным.

О1.28. По своей природе погрешность за счет неполноты излучения является систематической, однако значения ее изменяются случайным образом, в связи с этим численная оценка должна производиться статистическими методами. Поскольку число измерений небольшое, то обработку результатов следует производить по формулам распределения Стьюдента. Наиболее вероятное значение температуры слитка  $x_0 = 972,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Дисперсия  $\tilde{D} = 633,8 \text{ } (^{\circ}\text{C})^2$ , коэффициент  $t_p = 2,13$ , полуширина доверительного интервала  $\epsilon_p = 23,98 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Следовательно, для  $p=0,9$  доверительный интервал  $948,42 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 996,38 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Как видно, ширина доверительного интервала достаточно велика, а для ее уменьшения необходимо увеличить число измерений.

01.29. Ход решения аналогичен ходу решения 01.28:

$$x_0 = 973,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \bar{D} = 373,33 \text{ (} ^\circ\text{C)}^2;$$

$$t_p = 1,833; \quad \varepsilon_p = 11,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, при  $p=0,9$  доверительный интервал  $962 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 984,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Ширина доверительного интервала уменьшилась более чем

в 2 раза.

01.30. Определим оценку математического ожидания:

$$x = \frac{\left(x - t_p \sqrt{\frac{D}{n}}\right) + \left(x + t_p \sqrt{\frac{D}{n}}\right)}{2} = \frac{23,84 + 24,37}{2} = 24,105 \text{ МПа, откуда } t_p \sqrt{\frac{D}{n}} = 24,105 - 23,84 = 0,265 \text{ МПа.}$$

По доверительной вероятности 0,7 и числу наблюдений 25 определим по табл. П.2 коэффициент Стьюдента. При  $n-1=24$   $t_{0,7}=1,06$ , откуда  $\sqrt{D/n}=0,265/1,06=0,25$  МПа. Найдем коэффициент Стьюдента для вероятности 0,95: при  $n-1=24$   $t_{0,95}=2,07$ . Тогда доверительный интервал отклонений наиболее вероятного измеряемого давления с вероятностью 0,95 составит

$$I_{0,95} = (24,105 - 2,07 \cdot 0,25; 24,105 + 2,07 \cdot 0,25) = (23,59; 24,62) \text{ МПа.}$$

01.31. Определим значения  $\Delta_{M_i}$  и  $\Delta_{\sigma_i}$  для каждой реализации как  $\Delta_{M_i} = 40,16 - x_{M_i}$  и  $\Delta_{\sigma_i} = 40,16 - x_{\sigma_i}$  (табл. 01.5).

Т а б л и ц а 01.5

$i$	$\Delta_{M_i}$ , мВ	$\Delta_{\sigma_i}$ , мВ	$i$	$\Delta_{M_i}$ , мВ	$\Delta_{\sigma_i}$ , мВ	$i$	$\Delta_{M_i}$ , мВ	$\Delta_{\sigma_i}$ , мВ
1	0	+0,04	5	-0,08	-0,02	9	-0,02	+0,09
2	-0,04	+0,06	6	+0,01	+0,08	10	-0,02	+0,07
3	-0,01	+0,02	7	-0,04	+0,04	11	+0,01	-0,04
4	-0,10	+0,02	8	-0,06	+0,06	12	-0,01	+0,06

$$\bar{\Delta}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{M_i}}{n} = -0,03 \text{ мВ};$$

$$\bar{\Delta}_\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{\sigma_i}}{n} = 0,04 \text{ мВ},$$

после чего определяем систематическую составляющую погрешности

$$\Delta_c = \frac{\bar{\Delta}_M + \bar{\Delta}_\sigma}{2} = \frac{-0,03 + 0,04}{2} = +0,005 \text{ мВ.}$$

Вычисляем оценку среднего квадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности потенциометра по формуле (1.10):

$$\sum_{i=1}^n (\Delta_{M_i} - \bar{\Delta}_M)^2 = 0,03^2 + 0,01^2 + 0,02^2 + 0,07^2 + 0,05^2 + 0,04^2 + 0,01^2 + 0,03^2 + 0,01^2 + 0,01^2 + 0,04^2 + 0,02^2 = 0,0136 \text{ (мВ)}^2;$$

$$\sum_{i=1}^n (\Delta_{\sigma_i} - \bar{\Delta}_\sigma)^2 = 0^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,02^2 + 0,06^2 + 0,04^2 + 0^2 + 0,02^2 + 0,05^2 + 0,03^2 + 0,08^2 + 0,02^2 = 0,0170 \text{ (мВ)}^2;$$

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{\frac{0,0136 + 0,0170}{23}} = 0,0365 \text{ мВ.}$$

Наибольшую основную погрешность  $\Delta_{\max}$  следует определять как наибольшую по абсолютному значению из полученных экспериментально значений  $\Delta_{M_i}$  и  $\Delta_{\sigma_i}$ , следовательно,  $\Delta_{\max} = 0,10$  мВ. Вариация  $b$  определяется как абсолютное значение разности между  $\bar{\Delta}_M$  и  $\bar{\Delta}_\sigma$ :

$$b = |\bar{\Delta}_M - \bar{\Delta}_\sigma| = |-0,03 - 0,04| = 0,07 \text{ мВ.}$$

01.32. Систематическая составляющая  $\Delta_c$  погрешности конкретного экземпляра средств измерений в точке 10 МПа диапазона измерения вычисляется по аналогии с 01.31. Погрешности  $\Delta_{M_i}$  и  $\Delta_{\sigma_i}$ , МПа, вычисляются по формулам:

$$\Delta_{M_i} = (10 - p_{M_i});$$

$$\Delta_{\sigma_i} = (10 - p_{\sigma_i}),$$

после чего

$$\bar{\Delta}_M = \frac{-0,08 + 0,03 - 0,06 + 0,02 + 0,05 - 0,08}{6} = -0,020 \text{ МПа};$$

$$\bar{\Delta}_\sigma = \frac{-0,12 - 0,05 - 0,06 - 0,09 - 0,03 - 0,10}{6} = -0,075 \text{ МПа.}$$

Следовательно,

$$\Delta_c = \frac{-0,020 + (-0,075)}{2} = -0,0475 \text{ МПа.}$$

Вариация определяется по формуле (1.11)

$$b = |\bar{\Delta}_M - \bar{\Delta}_\sigma| = |-0,02 - (-0,075)| = 0,055 \text{ МПа.}$$

Оценка среднего квадратического отклонения вычисляется по формуле (1.10)

$$\sigma (\Delta) = \sqrt{\frac{0,06^2 + 0,05^2 + 0,04^2 + 0,07^2 + 0,06^2 + 0,045^2 + \dots + 0,025^2 + 0,015^2 + 0,015^2 + 0,045^2 + 0,025^2}{11}} = \pm 0,0463 \text{ МПа.}$$

## Глава вторая

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

02.1. В соответствии с ГОСТ 8.157-75 [8] МПТШ-68 устанавливается для диапазона температур от 13,81 до 6300 К. Для других диапазонов температур устанавливаются другие температурные шкалы, совокупность которых образует единую систему температурных шкал, непрерывную от 0,01 до 100 000 К. Различные практические температурные шкалы реализуются различными методами.

02.2. МПТШ-68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температур — основных реперных точек, и на эталонных приборах, градуированных по этим температурам. В интервалах между температурами реперных точек интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями температуры. Основные реперные точки реализуются как определенные состояния фазовых равновесий некоторых чистых веществ.

В качестве эталонного прибора для температур от 13,81 до 903,89 К применяют платиновый термометр сопротивления. В качестве эталонного прибора для температур от 630,74 до 1064,43 °С применяют термоэлектрический термометр с электродами из плагинородия (10 % родия) и платины. Для температур выше 1064,43 °С температуру определяют в соответствии с законом излучения Планка.

02.3. Пределы применения ртутных стеклянных термометров определяются температурными пределами жидкого состояния ртути и допустимыми температурами нагрева стекла. Температура затвердевания ртути составляет —38,9, а температура кипения 356,6 °С. Поэтому нижний предел применения ртутных термометров составляет —35 °С. Температура кипения ртути может быть повышена за счет повышения давления в капилляре термометра путем его заполнения инертным газом. Поэтому верхний предел измерения для ртутных термометров превышает температуру кипения ртути и при использовании стеклянного

капилляра составляет 600 °С. При этом давление инертного газа в капилляре превышает 2,0 МПа (около 20 кг/см<sup>2</sup>). При использовании кварцевых капилляров верхний предел измерения ртутных термометров может быть несколько увеличен.

02.4. Показания термометра отличаются от действительной температуры за счет выступающего столбика. Поправка на выступающий столбик подсчитывается по формуле [2,27]

$$\Delta t = \gamma (t - t_{в.с}) n,$$

где  $\gamma$  — коэффициент видимого расширения термометрической жидкости в стекле;  $t$  — температура, показываемая термометром, °С;  $t_{в.с}$  — температура выступающего столбика, °С;  $n$  — число градусов в выступающем столбике, °С.

Следовательно,

$$\Delta t = 0,0012 (-40 - 20)[-40 - 100] = -4,32^\circ.$$

Определим действительную температуру

$$t_d = -40 - 4,32 = -44,32^\circ \text{С.}$$

02.5. Нет. Коэффициент видимого расширения меньше. Эту разницу можно пояснить на следующем примере. Предположим, что некоторое количество ртути заполняет капилляр, диаметр которого не изменяется при нагреве, и такое же количество ртути заполняет стеклянный капилляр таких же размеров, но диаметр которого увеличивается при нагреве. Если оба капилляра нагреть до одной и той же температуры, то объемы ртути в обоих капиллярах увеличатся на одинаковое значение. Но длина ртутного столбика в стеклянном капилляре будет меньше, чем в другом капилляре, так как одновременно с увеличением объема ртути увеличился объем стеклянного капилляра.

Коэффициент расширения, который учитывает одновременное увеличение объема ртути и увеличение диаметра стеклянного капилляра, называется коэффициентом видимого объемного теплового расширения ртути в стекле.

02.6. Давление, подводимое к показывающему прибору, будет определяться как давление в термобаллоне минус давление столба жидкости, определяемое разностью уровней расположения термобаллона и показывающего прибора:

$$\Delta p = \Delta H \rho g = 7,37 \cdot 13\,595 \cdot 9,81 = 0,98 \text{ МПа.}$$

Таким образом, показания прибора будут занижены на 0,98 МПа относительно действительного давления в термобаллоне. Определим чувствительность манометрического термометра

$$S = \frac{p_K - p_H}{t_K - t_H} = \frac{14,28 - 4,47}{500 - 0} = 0,0196 \text{ МПа/}^\circ\text{С.}$$

Определим изменение показаний термометра, вызванное различием во взаимном расположении термобаллона и измерительного прибора:

$$\Delta t = \Delta p / S = 0,98 / 0,0196 = 50^\circ\text{C}.$$

Значит, показания манометрического термометра будут занижены на  $50^\circ\text{C}$ .

О2.7 Изменение показаний манометрического термометра будет определяться относительным изменением давления в системе, вызванным расширением газа в капилляре и пружине. Принимая во внимание закон Шарля, согласно которому  $p_t = p_0(1 + \beta t)$ , изменение показаний можно подсчитать по формуле

$$\Delta t = \frac{V_K \Delta t_K + V_{II} \Delta t_{II}}{V_0 + V_K + V_{II}},$$

где  $\Delta t_K$  и  $\Delta t_{II}$  — соответственно отклонение температуры капилляра и пружины от градуировочной.

Таким образом,

$$\Delta t = \frac{1,9 \cdot 40 + 1,5 \cdot 10}{140 + 1,9 + 1,5} = 0,63^\circ\text{C}.$$

Этот приближенный расчет не учитывает расширения капилляра и пружины. Действительное изменение показаний будет несколько меньше.

О2.8. Как и в предыдущем ответе О2.7, изменение показаний подсчитывается по формуле

$$\Delta t = \frac{(V_K + V_{II}) \Delta t_{II}}{V_0 + V_K + V_{II}},$$

где  $\Delta t_{II}$  — изменение температуры капилляра и пружины.

Следовательно,

$$\Delta t = \frac{0,01 \cdot 30}{1,01} = 0,297^\circ\text{C},$$

О2.9. Изменение давления в системе происходит по закону

$$p_t = p_0 [1 + \beta (t - t_0)],$$

где  $\beta$  — термический коэффициент расширения газа;  $t_0$  и  $t$  — соответственно начальная и текущая температуры;  $p_0$  — давление рабочего вещества при температуре  $t_0$ .

Следовательно, изменение давления

$$\Delta p = p_0 \beta \Delta t.$$

Отсюда определяем начальное давление

$$p_0 = \frac{\Delta p}{\beta \Delta t} = \frac{10}{0,00366 \cdot 500} = 5,46 \text{ МПа}.$$

О2.10. Для решения задачи определим относительное изменение показаний при  $0^\circ\text{C}$

$$\delta = \frac{0,005}{5,46} \cdot 100 = 0,092\%.$$

Аналогично на отметке  $500^\circ\text{C}$

$$\delta = \frac{0,005}{15,46} \cdot 100 = 0,032\%.$$

О2.11. При одинаковой разности температур рабочего и свободных концов термо-ЭДС, развиваемая термоэлектрическим термометром, будет одинаковой, если характеристика термометра линейная. Характеристика термоэлектрического термометра типа ТХК нелинейна, в силу

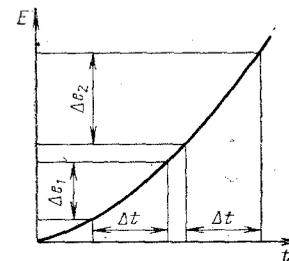


Рис. О2.1

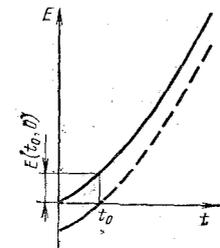


Рис. О2.2.

чего и термо-ЭДС будут различными. Это легко пояснить с помощью табл. П.9 или рис. О2.1:

$$\begin{aligned} E(300^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}) &= E(300^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) - E(50^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = \\ &= 22,88 - 3,35 = 19,53 \text{ мВ}; \\ E(600^\circ\text{C}, 350^\circ\text{C}) &= 21,97 \text{ мВ}. \end{aligned}$$

О2.12. Термо-ЭДС, развиваемая термоэлектрическим термометром, уменьшится на  $E(t_0, 0)$ . Это соответствует смещению всей его характеристики вниз по оси  $E$  на  $E(t_0, 0)$  (рис. О2.2).

О2.13. Коэффициент преобразования термоэлектрического термометра  $S = dE/dt$  изменяется в зависимости от температуры, так как  $E = f(t)$  нелинейна. Очевидно, что в начале характеристики с увеличением температуры рабочего конца коэффициент преобразования растет, а затем вследствие выравнивания темпа роста термо-ЭДС коэффициент преобразования стремится к постоянному значению. Следовательно, зависимость коэффициента преобразования от температуры будет соответствовать штриховой линии на рис. О2.2. Как следует из решения О2.12, при изменении  $t_0$  характеристика термоэлектрического термомет-

ра смешается так, что изменение  $t_0$  не вызовет изменения зависимости коэффициента преобразования от температуры.

О2.14. Градуировку стандартных термоэлектрических термометров определить можно. Для этого следует измерить термо-ЭДС. По этим значениям нужно определить средний коэффициент преобразования исследуемых термометров на данном температурном интервале и сравнить с коэффициентами преобразования стандартных термоэлектрических термометров по табличным данным на том же интервале температур.

О2.15. Термо-ЭДС, развиваемая обоими термоэлектрическими термометрами, будет одинакова. Из основных положений теории термоэлектрических термометров известно, что включение третьего проводника в цепь термометра не изменяет термо-ЭДС, если температура мест подсоединения этого проводника одинакова.

О2.16. Определим по табл. П.12.

$$E(32^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 0,185 \text{ мВ.}$$

Определяем термо-ЭДС термометра с учетом поправки

$$E(t, 0) = E(t^\circ\text{C}, 32^\circ\text{C}) + E(32^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 3,75 + 0,185 = 3,935 \text{ мВ.}$$

По табл. П.12 определяем соответствующую температуру  $t = 469,7^\circ\text{C}$ .

О2.17. В соответствии с теоремой о третьем проводнике [2, 9] термо-ЭДС термоэлектрического термометра не зависит от материала проводника, подключенного к свободным концам, если температура свободных концов одинакова.

О2.18. Термо-ЭДС  $E''$ , действующая в цепи, изменится на  $E'$

$$E'' = E(700^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}) - E'(100^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}) = 6,274 - 0,113 + 0,077 = 6,238 \text{ мВ.}$$

О2.19. Температуры  $t_1$  и  $t_2$  могут быть различными, если удлиняющие термоэлектродные провода термоэлектродентичны соответствующим электродам. Под этим подразумевается отсутствие термо-ЭДС в термоэлектрическом термометре, составленном из электрода термометра и соответствующего удлиняющего термоэлектродного провода:

$$E_{AC}(t, t_0) = 0; \quad E_{BD}(t, t_0) = 0.$$

В общем случае удлиняющие провода не термоэлектродентичны электродам термометра, поэтому для исключения возникновения паразитной термо-ЭДС в цепи прибора должны быть выполнены следующие условия: 1) термо-ЭДС, развиваемая термометром и удлиняющими проводами в интервале температур  $0-100^\circ\text{C}$ , должна быть одинаковой; 2) подключение удлиняющих проводов к термометру должно осуществляться с соблюдением полярности; 3) места соединения удлиняющих проводов с электродами термометра должны иметь одинаковую температуру.

О2.20. Термоэлектрический термометр 3 (см. рис. 2.6) на большом интервале температур не развивает никакой термо-ЭДС, поэтому он может подключаться к измерительному прибору медными проводами. Термометр 4 на этом же интервале температур развивает незначительную термо-ЭДС, он тоже может подключаться без удлиняющих термоэлектродных проводов, если возникающие при этом погрешности укладываются в допустимые значения. Все остальные типы термометров должны подключаться к измерительному прибору с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов.

О2.21. Удлиняющие термоэлектродные провода (см. рис. 2.5) служат для вынесения свободных концов термоэлектрического термометра без образования в цепи паразитных термо-ЭДС (необходимым условием этого является равенство температур мест подключения обоих термоэлектродов к удлиняющим термоэлектродным проводам). Если бы термометр был подключен к потенциометру только медными проводами, то свободные концы его имели бы температуру  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ . В предложенной схеме свободные концы вынесены удлиняющими проводами в точку  $t_0 = 28^\circ\text{C}$ . Медные провода можно рассматривать как третий проводник, который не изменяет термо-ЭДС, действующую в цепи, если температура мест подключения к удлиняющим термоэлектродным проводам одинакова. Может возникнуть погрешность за счет разности температур выводов измерительного прибора ИП, но, как правило, этим можно пренебречь, и, следовательно, искажения термо-ЭДС не будет. Таким образом,

$$E(t, 28^\circ\text{C}) = 23,52 \text{ мВ;}$$

$$E(t, 0^\circ\text{C}) = E(t, 28^\circ\text{C}) + E(28^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 23,52 + 1,12 = 24,64 \text{ мВ,}$$

откуда  $t = 593,5^\circ\text{C}$ .

О2.22. Введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра сводится всегда к сложению этой поправки, численно равной  $E(t_0, 0)$ , с термо-ЭДС, развиваемой термометром.

Таким образом, схема автоматическим введением поправки должна вырабатывать сигнал  $U = f(t_0) = E(t_0, 0)$ , причем для каждой градуировки термопар будет своя функция  $f(t_0)$ . Это сигнал должен складываться с термо-ЭДС термометра. Значения  $t_0$  в функции  $f(t_0)$  и  $t_0$  (температура свободных концов) должны быть равны (рис. О2.3).

О2.23. Принцип введения поправки на изменение температуры сво-

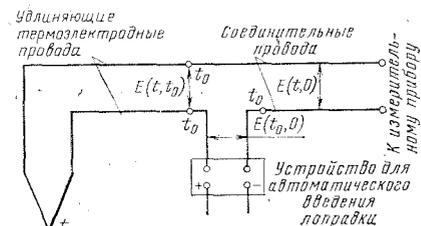


Рис. О2.3

бодных концов с помощью компенсатора КТ-54 заключается в том, что изменение термо-ЭДС термоэлектрического термометра за счет изменения температуры свободных концов  $t_0$  должно компенсироваться противоположным по знаку изменением напряжения на диагонали  $cd$  моста (см. рис. 2.7). При одинаковом изменении  $t_0$  наибольшее изменение термо-ЭДС будет у термоэлектрического термометра типа ХК, так как он имеет наибольший коэффициент преобразования, а наименьшее — у термоэлектрического термометра типа S. Следовательно, и изменение напряжения на диагонали  $cd$  для термометра типа ХК должно быть наибольшим, а это возможно, если напряжение на диагонали  $ab$  будет также наибольшим. Это означает, что при одинаковом для всех мостов напряжении питания  $U$  в мостах для термоэлектрических термометров типа ХК сопротивление  $R_6$  должно быть наименьшим, а для типа S — наибольшим.

О2.24. Входное сопротивление измерительного прибора ИП велико, поэтому потерей напряжения во внешней линии можно пренебречь. При этом напряжение на входе измерительного прибора

$$U_{\text{п}} = E(t, t_0) + U_{cd}(t''),$$

где  $E(t, t_0)$  — термо-ЭДС, развиваемая термоэлектрическим термометром при температурах рабочего и свободного концов соответственно  $t$  и  $t_0$ ;  $U_{cd}$  — напряжение на диагонали  $cd$  компенсатора при температуре его медного сопротивления  $t''$ . Сопротивление резистора  $R_6$  (см. рис. 2.7) подбирается таким образом, чтобы при  $t_0 = t''$  (мост считается сбалансированным при  $0^\circ\text{C}$ )

$$E(t_0, 0) = U_{cd}(t_0).$$

Следовательно, для правильного введения поправки необходимо соблюдение равенства температур свободных концов термометра и медного резистора моста. Для обеспечения этого свободные концы с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов расположены около медного резистора моста. При этом напряжение на входе измерительного прибора

$$U_{\text{п}} = E(t, t_0) + U_{cd}(t_0) = E(t, 0)$$

и не зависит от  $t_0$ .

При замене удлиняющих термоэлектродных проводов на медные свободные концы термометра окажутся в точках 1 и 2, т. е.  $t_0 = t' = 40^\circ\text{C}$  при  $t'' = 20^\circ\text{C}$ . Следовательно, в этом случае  $U'_{\text{п}} = E(t, t') + U_{cd}(t'')$ , причем  $U'_{\text{п}} < U_{\text{п}}$ , так как  $E(t', 0) > U_{cd}(t'')$ . Иначе говоря, мост должен ввести поправку на увеличение температуры свободных концов на  $40^\circ\text{C}$ , а он вводит только на  $20^\circ\text{C}$ . При линейной характеристике термоэлектрического термометра это эквивалентно уменьшению показаний прибора на  $20^\circ\text{C}$ .

О2.25. На основании О2.24 легко заключить, что в данном случае замена проводов на показаниях прибора не отразится.

О2.26. Показания милливольтметра не изменятся, так как включение в цепь термоэлектрического термометра любого проводника не изменит термо-ЭДС, если температура мест подсоединения этого проводника будет одинаковой.

О2.27. Компенсатор изменения термо-ЭДС представляет собой уравновешенный мост, который имеет нелинейную зависимость напряжения  $U$  на измерительной диагонали  $cd$  от сопротивления плеча  $R_m$  (см. рис. 2.7).

Характеристики всех стандартных термоэлектрических термометров в той или иной степени также нелинейны. Но степень нелинейностей моста и термометров различна. Поэтому полная компенсация изменения термо-ЭДС возможна не более чем при двух температурах свободных концов.

О2.28. Вращающий момент рамки милливольтметра

$$M_1 = 2rlnBI,$$

где  $r$  — радиус рамки;  $l$  — активная длина рамки;  $n$  — число витков рамки;  $B$  — магнитная индукция в зазоре;  $I$  — сила тока в рамке.

Противодействующий момент, создаваемый пружинами.

$$M_2 = c\varphi,$$

где  $c$  — коэффициент, учитывающий упругость противодействующей пружины;  $\varphi$  — угол поворота рамки (закручивания пружины).

В положении равновесия  $M_1 = M_2$  и угол поворота рамки

$$\varphi = \frac{2rlnBI}{c}.$$

Чувствительность  $S$  определяется выражением [1]

$$S = \Delta\varphi/\Delta I.$$

Так как зависимость  $\varphi = f(I)$  для милливольтметра линейна, то можно записать

$$S = 2rlnB/c.$$

Таким образом, с увеличением числа витков  $n$  увеличивается чувствительность  $S$  при условии, что коэффициент  $c$  остается неизменным.

О2.29. На основании О2.28 легко заключить, что увеличение индукции вызывает увеличение чувствительности. Поэтому наибольшая чувствительность будет в начале и конце шкалы, в середине чувствительность будет наименьшей.

Шкала милливольтметра не будет равномерной, а при одинаковой цене деления окажется растянутой по краям и сжатой в середине.

О2.30. Предел допускаемой погрешности термоэлектрического тер-

мометра типа К определяется в соответствии с формулой (2.1) и табл. 2.1

$$\Delta e_T = \pm [4 + 7,5 \cdot 10^{-4} (540 - 300)] 0,0427 = \pm 0,216 \text{ мВ.}$$

Предел допускаемой погрешности удлиняющих термоэлектродных проводов типа К

$$\Delta e_{к.п} = \pm 0,16 \text{ мВ.}$$

Предел допускаемой основной погрешности милливольтметра оценивается по диапазону шкалы и классу точности

$$\Delta e_{п} = \pm \frac{e_K - e_H}{100} K = \pm \frac{24,91 - 8,13}{100} 1,0 = 0,168 \text{ мВ.}$$

При отсутствии для средств измерений статистических метрологических характеристик по пределам допускаемых погрешностей можно определить только оценку погрешности измерения  $\Delta e_0$  в соответствии с формулой (1.1), если погрешности отдельных элементов системы являются независимыми:

$$\Delta e_0 = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta e_i^2},$$

где  $\Delta e_i$  — предел допускаемой погрешности элементов, составляющих измерительную систему.

Для нашего случая погрешность измерительной системы

$$\Delta e_0 = \pm \sqrt{\Delta e_T^2 + \Delta e_{к.п}^2 + \Delta e_{п}^2} = \pm \sqrt{0,216^2 + 0,16^2 + 0,168^2} = \pm 0,317 \text{ мВ.}$$

При температуре 540 °С это соответствует погрешности  $\Delta t = \pm 7,4$  °С.

При оценке погрешности в реальных условиях следует учитывать дополнительные источники погрешностей, например теплоотвод от термопреобразователя по чехлу, излучение и т. д.

02.31. При температуре удлиняющих термоэлектродных проводов 20 °С сопротивление внешней линии составляет 5 Ом, а общее сопротивление всей измерительной цепи  $R_0 = 328$  Ом.

При температуре  $t_1 = 20$  °С сопротивление части удлиняющих термоэлектродных проводов, находящихся вне блочного щита.

$$R'_y = 3,47 \cdot \frac{147}{150} = 3,4 \text{ Ом.}$$

При температуре  $t_2 = 65$  °С сопротивление этой части

$$R''_y = R'_y \frac{1 + \alpha t''}{1 + \alpha t'} = 3,40 \frac{1 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 65}{1 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 20} = 3,75 \text{ Ом.}$$

Следовательно, общее сопротивление цепи увеличилось на  $\Delta R_0 = 3,75 - 3,40 = 0,35$  Ом и стало равным  $R'_1 = 328,35$  Ом.

Относительное изменение показаний милливольтметра определяется по формуле [2]

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = \frac{R_0 - R'_0}{R'_0} 100 = \frac{328 - 328,35}{328,35} 100 = -0,11 \%.$$

В абсолютных единицах для термоэлектрического термометра типа К при  $t = 540$  °С погрешность равна  $\Delta t = -0,6$  °С.

Незначительная погрешность объясняется тем, что сопротивление удлиняющих термоэлектродных проводов на два порядка меньше сопротивления милливольтметра и измерительной цепи в целом.

02.32. Показания милливольтметра уменьшаются вследствие увеличения сопротивления термометра при неизменной термо-ЭДС. Сопротивление термоэлектрического термометра в условиях эксплуатации складывается из сопротивлений нагретого и холодного участков.

Сопротивление термометра при градуировке

$$R_0 = 0,5 (R_2 + R'_1) + 1,5 (R_1 + R'_1) = 4,715 \text{ Ом.}$$

Сопротивление термометра при новом погружении

$$R'_0 = 1,5 (R_2 + R'_2) + 0,5 (R_1 + R'_1) = 7,696 \text{ Ом.}$$

Сопротивление измерительной цепи изменилось от 200 до 202,981 Ом. Это приведет к относительному уменьшению показаний

$$\delta = \frac{200 - 202,981}{202,981} 100 = -1,47 \%,$$

что по абсолютному значению соответствует (при 1000 °С)  $\Delta t = -12,3$  °С.

Как видно из примера, изменение показаний милливольтметра может быть значительным. Поэтому шкалы милливольтметров градуировки S наносятся для определенной глубины погружения термоэлектрического термометра и с учетом его сопротивления при измеряемой температуре.

У стандартных неблагородных термометров диаметр электродов выбирается большим, чтобы их сопротивление, а следовательно, и изменение его при нагреве было пренебрежимо малым.

02.33. Определим сопротивление милливольтметра при 0 °С

$$R_{мв0} = R_{мв} - R_p \frac{\alpha 20}{1 + \alpha 20} = 302 - 65 \frac{0,00426 \cdot 20}{1 + 0,00426 \cdot 20} = 296,9 \text{ Ом.}$$

Определим сопротивление милливольтметра при 40 °С

$$R'_{мв} = R_{мв0} + R_p \frac{\alpha 40}{1 + \alpha 20} = 296,9 + 65 \frac{0,00426 \cdot 40}{1 + 0,00426 \cdot 20} = 307,1 \text{ Ом.}$$

Относительное изменение показаний, вызванное изменением температуры милливольтметра,

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{R_{\text{МВ}} - R'_{\text{МВ}}}{R'_{\text{МВ}}} 100 = \frac{302 - 307,10}{307,10} 100 = -1,66\%$$

что в абсолютных единицах составляет

$$E(540^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) 0,0166 = 0,371 \text{ мВ, или } 8,8^\circ\text{C}.$$

Таким образом, хотя температурный коэффициент прибора и невелик, изменение показаний, вызванное изменением температуры милливольтметра, оказывается значительным, что обусловлено довольно большим сопротивлением рамки.

02.34. При заданных параметрах магнитной системы милливольтметра (индукция в зазоре, размер рамки) уменьшение сопротивления рамки приведет к необходимости уменьшения числа ее витков, что вызовет уменьшение чувствительности милливольтметра. Для сохранения прежней чувствительности следует либо увеличивать индукцию в зазоре, либо уменьшать жесткость пружины, что не всегда целесообразно. Поэтому оптимальным отношением сопротивления рамки к общему сопротивлению милливольтметра считается  $1/3$ .

02.35. Коррекция на изменение ЭДС нормального элемента производится перестановкой движка  $R'_{\text{нз}}$ . При увеличении температуры от 20 до 50°C ЭДС нормального элемента уменьшается. Следовательно, перед установкой рабочего тока движок  $R'_{\text{нз}}$  должен быть смещен вправо таким образом, чтобы падение напряжения на  $R_{\text{нз}} + R'_{\text{нз}}$ , создаваемое нормальным рабочим током, было бы равно новому значению ЭДС нормального элемента.

02.36. Изменяется. Потенциометр будет показывать завышенное значение измеряемого напряжения. Так как ЭДС нормального элемента уменьшилась, вновь установленное значение рабочего тока будет меньше нормального. Следовательно, цена деления потенциометра уменьшится, что приведет к завышенным показаниям.

02.37. Влияет. Класс нормального элемента определяет точность установки рабочего тока, что в свою очередь определяет погрешность измерения.

02.38. Точность измерения уменьшится. Предположим, что первоначально термо-ЭДС термоэлектрического термометра  $E(t, t_0)$  уравновешивалась напряжением на части реохорда  $U_p$ . При этом ток через нуль-индикатор  $I=0$ . Если затем  $E(t, t_0)$  начала возрастать, то через нуль-индикатор пойдет ток

$$I = \frac{E(t, t_0) - U_p}{R_{\text{п}} + R_{\text{т}} + R_{\text{л}}}$$

где  $R_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{т}}$  и  $R_{\text{л}}$  — соответственно сопротивления потенциометра, термометра и соединительной линии.

Стрелка нуль-индикатора начнет отклоняться, если протекающий через него ток превысит порог чувствительности  $\Delta I$ . Таким образом, потенциометр нечувствителен к изменению термо-ЭДС

$$\Delta E = \Delta I (R_{\text{п}} + R_{\text{т}} + R_{\text{л}}).$$

Легко заметить, что в случае высокоомного потенциометра  $\Delta E$  больше, следовательно, и погрешность измерения также больше. Отсюда можно сделать вывод о предпочтительности использования низкоомных потенциометров для измерения термо-ЭДС термоэлектрических термометров. По этой же причине не допускается чрезмерное увеличение сопротивления внешней линии автоматического потенциометров.

02.39. Для измерения ЭДС источника с большим внутренним сопротивлением следует использовать высокоомный потенциометр.

Если к источнику ЭДС с большим внутренним сопротивлением подключить низкоомный измерительный прибор, то этот прибор как бы закоротит источник ЭДС, что приведет к падению разности потенциалов на зажимах источника ЭДС и искажению измеряемой ЭДС. Поэтому при измерении ЭДС сопротивление измерительного прибора должно быть значительно больше (в сотни раз и более) внутреннего сопротивления источника ЭДС.

02.40. В потенциометрах компенсирующее напряжение должно быть равно измеряемому. Вычислим разности потенциалов между точками  $c$  и  $a$ , а также  $d$  и  $a$  (см. рис. 2.9). Разность потенциалов между  $c$  и  $a$

$$U_{ca} = -I_1 (R_6 + R_{\text{пр}}) + I_2 R_R = -3(330 + 10,59) + 2 \cdot 509,5 = -2,77 \text{ мВ,}$$

где

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{п}} R_9}{R_{\text{п}} + R_9}$$

Разность потенциалов между точками  $d$  и  $a$

$$U_{da} = -I_1 R_6 + I_2 R_R = -3 \cdot 330 + 2 \cdot 509,5 = 29 \text{ мВ.}$$

Расчет измерительной схемы потенциометра КСП4 производится исходя из принятой температуры свободных концов термоэлектрического термометра 30°C, т.е. начальной отметке шкалы соответствует входное напряжение  $E(0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}) = -1,98 \text{ мВ}$ , а конечной  $E(400^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}) = 29,51 \text{ мВ}$ . Сравнивая напряжения, легко установить, что точка  $d$  соответствует концу шкалы.

В реальных условиях должны быть соблюдены равенства  $U_{ca} = E(0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$  и  $U_{da} = E(400^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$ . Полученное расхождение обусловлено неучетом нерабочих участков реохорда.

02.41. Для решения задачи нужно определить потенциалы точек  $a$  и  $b$  относительно какой-либо одной точки, например  $e$  (см. рис. 2.9).

Потенциал точки  $a$  будет меньше потенциала точки  $e$  на значение падения напряжения на сопротивлении  $R_k$ :

$$U_k = I_2 R_k = 2 \cdot 509,5 = 1019 \text{ мВ.}$$

При нулевом входном напряжении движок реохорда стоит в положении  $c$ , при максимальном — в положении  $d$ . Потенциал точки  $d$  меньше потенциала точки  $e$  на значение падения напряжения на  $R_6$ :

$$U_6 = I_1 R_6 = 3 \cdot 300 = 990 \text{ мВ.}$$

Из сопоставления  $U_k$  и  $U_6$  можно установить, что потенциал точки  $d$  выше потенциала точки  $a$ .

Измеряемое напряжение включается встречно компенсирующему, поэтому плюс измеряемого напряжения должен подключиться к выводу  $I$ .

02.42. При напряжении  $-3$  мВ потенциометр будет показывать  $+3$  мВ, и при  $+5$  мВ будет показывать  $-5$  мВ. Для пояснения рассмотрим схему, представленную на рис. 2.9. При нулевом входном напряжении разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$  равна нулю. При этом стрелка стоит в середине шкалы на нулевой отметке. При смещении движка реохорда вправо (т. е. при движении стрелки к отметке  $+10$  мВ) вырабатывается положительный компенсирующий сигнал (плюс на зажиме  $I$ ). Легко заметить, что при обратной полярности подключения и при сигнале источника  $-3$  мВ на вывод  $I$  подается плюсовой сигнал. Следовательно, движок остановится на отметке  $+3$  мВ.

02.43. Стрелка потенциометра устанавливается на отметку, соответствующую температуре рабочего спая, независимо от текущего значения температуры свободных концов (так как поправка на изменение температуры свободных концов вводится автоматически). Так, при температуре рабочего конца  $50^\circ\text{C}$  и температуре свободных концов  $50^\circ\text{C}$  стрелка устанавливается на отметке  $50^\circ\text{C}$ . В то же время при этих температурах ЭДС термометра  $E(t, t_0) = E(50^\circ\text{C}, 50^\circ\text{C}) = 0$ , т. е. режим работы измерительной схемы в этом случае аналогичен режиму работы при закорачивании входных зажимов. Таким образом, при закорачивании входных зажимов стрелка потенциометра устанавливается на отметке, соответствующей температуре свободных концов ТЭГ.

В потенциометрах со шкалой в милливольтх медное сопротивление отсутствует. В этом случае при закорачивании входных зажимов стрелка будет устанавливаться на нуль.

02.44. Ток  $I_2$  во вспомогательной ветви измерительной схемы потенциометра, проходящий через  $R_k$ , принимается равным  $2$  мА. Проверка рабочего тока производится путем сравнения падения напряже-

ния  $U_k$  на  $R_k$  и ЭДС нормального элемента класса  $0,02$   $E_{нэ} = 1019,00 \pm \pm 0,04$  мВ. При правильно установленном рабочем токе

$$U_k = I_2 R_k = E_{нэ},$$

отсюда

$$R_k = \frac{E_{нэ}}{I_2} = 509,5 \text{ Ом.}$$

02.45. Падение напряжения на приведенном сопротивлении реохорда (суммарное сопротивление параллельно включенных резисторов  $R_n$  и  $R_3$ ) должно быть равно диапазону измерения  $E_d$ :

$$E_d = I_1 \frac{R_3 R_n}{R_3 + R_n} (1 - 2\lambda),$$

где  $\lambda$  — нерабочие участки реохорда в долях единицы. Отсюда

$$R_n = \frac{R_3 E_d}{(1 - 2\lambda) R_3 I_1 - E_d}.$$

Для потенциометра  $0-600^\circ\text{C}$  градуировки ХК  $E_d = 49,11$  мВ;  $R_n = 21,17$  Ом. Для потенциометра  $0-600^\circ\text{C}$  градуировки К  $E_d = 24,902$  мВ;  $R_n = 9,83$  Ом.

02.46. Сопротивление  $R_n$  определяется диапазоном измерения для потенциометра со шкалой  $-50 \div +150^\circ\text{C}$

$$E_d = E_k - E_n = 10,62 - (-3,11) = 13,73 \text{ мВ.}$$

Для потенциометра со шкалой  $0-200^\circ\text{C}$

$$E_d = E_k - E_n = 14,59 - 0 = 14,59 \text{ мВ.}$$

Поэтому сопротивление  $R_n$  будет больше для потенциометра со шкалой  $0-200^\circ\text{C}$ . Разница диапазонов измерения в милливольтх при одном и том же диапазоне измерения по температуре объясняется нелинейностью градуировочной характеристики термоэлектрического термометра.

02.47. Условие равновесия записывается в следующем виде:

$$-R_k I_2 + I_1 R_6 + I_1 R_{np} (1 - \lambda) + E(t_n, t_0) = 0.$$

Отсюда легко определить  $R_6$ :

$$R_6 = \frac{I_2 R_k - I_1 R_{np} (1 - \lambda) - E(t_n, t_0)}{I_1}. \quad (02.1)$$

На основании 02.45 для потенциометра  $0-600^\circ\text{C}$  градуировки ХК имеем  $R_{np} = 17,5$  Ом. По табл. П.9 определяем  $E(t_n, t_0) = -1,31$  мВ. Из (02.44)  $R_k = 509,5$  Ом;

$$R_6 = \frac{2 \cdot 509,5 - 3 \cdot 17,5 \cdot 0,968 - (-1,31)}{3} = 323,174 \text{ Ом.}$$

02.48. Медный резистор предназначен для введения поправки на изменение температуры свободных концов термоэлектрического термометра. Если считать токи в обеих ветвях потенциометра неизменными, то изменение термо-ЭДС термометра  $\Delta E$  при изменении температуры его свободных концов должно быть равно изменению падения напряжения  $\Delta U_m$  на медном резисторе

$$E(t'_0, t_0) = I_2 \Delta R_m,$$

где  $t'_0$  — текущее значение температуры свободных концов, °С;  $t_0$  — расчетная температура свободных концов, °С.

Очевидно, что  $E(t'_0, t_0)$  определяется только коэффициентом преобразования термоэлектрического термометра и текущим значением  $t'_0$ . Отсюда легко установить, что для потенциометров одной градуировки  $R_m$  одинаково. Для потенциометров различных градуировок  $R_m$  различны. Наибольшее значение  $R_m$  имеют потенциометры градуировки ХК, наименьшее — градуировки S.

02.49. Используем общепринятое допущение независимости  $I_2$  от  $R_m$ . При изменении температуры свободных концов от  $t_0$  до  $t'_0$  изменится ток  $I_1$ :

$$I_1' = I_2 \frac{R_K + R_{M0} \frac{1 + \alpha t'_0}{1 + \alpha t_0}}{R_H + R_{np} + R_B}, \quad (02.2)$$

где  $R_{M0}$  — значение медного сопротивления при температуре свободных концов  $t_0$ ;  $t'_0$  — текущее значение температуры свободных концов;  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  — температурный коэффициент электрического сопротивления меди.

При произвольном значении измеряемой температуры и температуре свободных концов  $t_0$  условие равновесия потенциметрической схемы

$$I_2 R_{M0} - I_1 R_H - I_1 \lambda R_{np} - I_1 R_{np} (1 - 2\lambda) m + E(t, t_0) = 0, \quad (02.3)$$

где  $m$  — смещение реохорда от начального положения в долях его длины.

При новом значении температуры свободных концов  $t'_0$  условие равновесия будет иметь вид

$$I_2 R_{M0} \frac{1 + \alpha t'_0}{1 + \alpha t_0} - R_H (I_1 + \Delta I) - \lambda R_{np} (I_1 + \Delta I) - m (1 - 2\lambda) R_{np} (I_1 + \Delta I) + E(t, t'_0) = 0, \quad (02.4)$$

где  $\Delta I = I_1' - I_1$ .

Вычитая из (02.4) выражение (02.3), получаем

$$R_{M0} = \frac{E(t'_0, t_0) + \frac{\Delta I}{I_1} E(t, t_0)}{I_2 \left[ \frac{\alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0} - \frac{\Delta I}{I_1} \right]}. \quad (02.5)$$

В этом выражении неизвестно значение  $\Delta I/I_1$ . Для определения его запишем условие равновесия в начале шкалы при  $t_0$

$$I_2 R_{M0} - I_1 R_{np} \lambda - I_1 R_H + E(t_H, t_0) = 0,$$

отсюда

$$R_H = \frac{I_2 R_{M0} - I_1 R_{np} \lambda + E(t_H, t_0)}{I_1}. \quad (02.6)$$

С учетом (02.2) и (02.6) получим

$$\frac{\Delta I}{I_1} = \frac{R_{M0} \frac{\alpha (t'_0 - t_0)}{1 + \alpha t_0}}{R_{M0} + R_K}. \quad (02.7)$$

На основании (02.5) и (02.7) находим

$$R_{M0} = \frac{R_K \frac{E(t'_0, t_0)}{(t'_0 - t_0)}}{I_2 R_K \frac{\alpha}{(1 + \alpha t_0)} - \frac{E(t'_0, t_0)}{(t'_0 - t_0)} - \frac{\alpha}{(1 + \alpha t_0)} E(t, t_0)}. \quad (02.8)$$

Из выражения следует, что даже для термоэлектрических термометров с линейной характеристикой  $R_{M0}$  зависит от измеряемой термо-ЭДС; иными словами, чтобы производилась полная температурная компенсация при любой  $t'_0$ , для каждой отметки шкалы сопротивление  $R_{M0}$  должно изменять свое значение.

На практике для расчета  $R_{M0}$  обычно принимается среднее по шкале значение термо-ЭДС

$$E_c = \frac{E(t_B, t_0) + E(t_H, t_0)}{2}$$

Поэтому естественной является неполная компенсация температурной погрешности во всех других точках. Для рассматриваемого прибора

$$E_c = 49,11/2 = 24,555 \text{ мВ}; \quad E(t'_0, t_0) = E(50^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}) = 2,04 \text{ мВ};$$

$$R_{M0} = \frac{509,5 \frac{2,04}{30}}{1019 \frac{4,26 \cdot 10^{-3}}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20} - \frac{2,04}{30} - \frac{4,26 \cdot 10^{-3}}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20} 24,555} = 9,052 \text{ Ом.}$$

После подсчета  $R_{M0}$  из (O2.5) легко определить

$$R_H = \frac{2 \cdot 9,052 - 3 \cdot 0,032 \cdot 17,5 + (-1,31) \cdot 3}{3} = 5,038 \text{ Ом.}$$

Задачи (2.43)—(2.49) охватывают все формулы, необходимые для расчета приведенной потенциметрической схемы. Дополнительно могут рассчитываться сопротивления в диагонали питания (исходя из известного сопротивления нагрузки источника питания), а также может производиться учет сопротивления соединительных проводов в измерительной схеме.

O2.50. Из формулы (O2.3) получаем уравнение шкалы потенциометра при расчетной температуре  $t_0$

$$m = \frac{I_2 R_{M0} - I_1 R_H + E(t, t_0)}{I_1 R_{np} (1 - 2\lambda)} - \frac{\lambda}{1 - 2\lambda}.$$

При текущей температуре свободных концов  $t'_0$  уравнение имеет вид

$$m' = \frac{I_2 R_{M0} \frac{1 + \alpha t'_0}{1 + \alpha t_0} - I_1 R_H + E(t, t'_0)}{I_1 R_{np} (1 - 2\lambda)} - \frac{\lambda}{1 - 2\lambda}.$$

Погрешность  $\Delta = m' - m$ .

Ток  $I'_1$  подсчитывается по формуле (O2.2) (см. O2.49). При  $t'_0 = 50^\circ\text{C}$

$$I'_1 = I_2 \frac{R_H + R_{M0} \frac{1 + \alpha t_0}{1 + \alpha t'_0}}{R_H + R_{np} + R_6} =$$

$$= 2 \frac{509,5 + 9,052 \frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20}}{5,038 + 17,5 + 323,174} = 3,00615 \text{ мА.}$$

Следовательно, погрешность в конце шкалы при  $t'_0 = 50^\circ\text{C}$

$$\Delta = m' - m = \frac{2 \cdot 9,052 \frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20} - 3,00615 \cdot 5,038 + 45,76}{3,00615 \cdot 17,5 \cdot 0,936} -$$

$$- \frac{9,052 \cdot 2 - 3 \cdot 5,038 + 47,80}{3 \cdot 17,5 \cdot 0,936} = -0,000985 \text{ или } \delta \approx 0,1\%.$$

Определим  $I'_1$  для  $t'_0 = 0^\circ\text{C}$ :

$$I'_1 = 2 \frac{509,5 + 9,052 \frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 0}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20}}{5,038 + 17,5 + 323,174} = 2,9959 \text{ мА.}$$

Определим температурную погрешность в конце шкалы при  $t'_0 = 0^\circ\text{C}$ :

$$\Delta = \frac{2 \cdot 9,052 \frac{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 0}{1 + 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 20} - 2,9959 \cdot 5,038 + 49,11}{2,9959 \cdot 17,5 \cdot 0,936} -$$

$$- \frac{9,052 \cdot 2 - 3 \cdot 5,038 + 47,8}{3 \cdot 17,5 \cdot 0,936} = 0,000088 \text{ или } \delta \approx 0,01\%.$$

O2.51. Такая зависимость существует. Действительно, при полной компенсации  $m' = m$ . Если бы при любом  $t_0$  ток  $I_1$  оставался неизменным, то для полной компенсации было бы достаточным соблюдение равенства

$$\Delta R_M I_2 = E(t'_0, t_0),$$

что легко достижимо при линейной характеристике термоэлектрического термометра. Однако в действительности ток  $I_1$  изменяется при изменении  $R_M$ , причем это изменение тем больше, чем больше  $\Delta R_M$ . Если задаются расчетной температурой свободных концов  $t_0$ , это значит, что именно при этой температуре

$$I_1 = 3 \text{ мА и } I_2 = 2 \text{ мА,}$$

а следовательно, чем меньше  $t'_0 - t_0$ , тем меньше  $\Delta I$  и тем меньше погрешность. Например, диапазон изменения температуры свободных концов принимается равным  $0 - 50^\circ\text{C}$ . Если принять расчетное значение  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  (т.е.  $I_1 = 3 \text{ мА}$  и  $I_2 = 2 \text{ мА}$  при  $0^\circ\text{C}$ ), то максимальное  $\Delta t = t'_0 - t_0 = 50^\circ\text{C}$ . Если принять  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  (т.е.  $I_1 = 3 \text{ мА}$  и  $I_2 = 2 \text{ мА}$  при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ), то  $\Delta t = 50 - 20 = 30^\circ\text{C}$ .

Очевидно, что во втором случае  $\Delta I$  будет меньше. Обычно за  $t_0$  принимается наиболее вероятная температура, при которой находится медный резистор.

Для примера примем  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  и рассчитаем температурную погрешность потенциометра  $0 - 600^\circ\text{C}$  градуировки ХК в конце шкалы при  $t'_0 = 50^\circ\text{C}$ . Для этого нужно подсчитать новые значения  $R_{M0}$ ,  $R_H$ ,  $I'_1$  [по формулам (O2.8), (O2.6), (O2.2)] и  $R_6$  [по формуле (O2.1)]:  $R_{M0} = 8,4183 \text{ Ом}$ ;  $R_H = 5,0526 \text{ Ом}$ ;  $I'_1 = 3,013266 \text{ мА}$ ;  $R_6 = 322,4 \text{ Ом}$ .

Погрешность в конце шкалы  $\Delta = 1,0342031 - 1,0329089 = 0,0012942$  или  $\delta \approx 0,129\%$ , т.е. больше, чем в ранее рассмотренном примере, где  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

O2.52. Разность потенциалов, соответствующая перемещению движка реохорда с одного витка на соседний,

$$\Delta U_b = \frac{E_K - E_H}{n} = \frac{49,11 - 0}{1400} = 0,035 \text{ мВ.}$$

Если порог чувствительности усилителя будет меньше, чем 0,035 мВ, то на одном витке будет недокомпенсация, а на соседнем — перекомпенсация, и потенциометр входит в незатухающий автоколебательный режим. Поэтому, как правило, устанавливают порог чувствительности усилителя 1,2—1,25 критического. Для нашего случая 0,035 (1,2÷1,25) мВ=0,042÷0,044 мВ. При этом стрелка прибора при подходе к отметке шкалы совершает два-три полуколебания и останавливается.

О2.53. Сопротивление  $R_t$  медного термометра при температуре  $t$ , °С, определяется по формуле (2.2).

Если известно сопротивление  $R_{t_1}$  при температуре  $t_1$ , то для определения сопротивления  $R_{t_2}$  при температуре  $t_2$  нужно предварительно определить  $R_0$ , а затем по найденному  $R_0$  определить  $R_{t_2}$ :

$$R_{t_2} = R_0 (1 + \alpha t_2),$$

где

$$R_0 = \frac{R_{t_1}}{1 + \alpha t_1}.$$

Для нашего случая  $R_{100} = 2,3$  Ом;  $R_{150} = 2,64$  Ом.

О2.54. В общем виде зависимость сопротивления платинового термометра от температуры может быть аппроксимирована выражением

$$R_t = R_0 \sum_{i=0}^n A_i t^i.$$

Определим по табл. П.18 сопротивление термометра градуировки 10 П при температуре  $-200$  и  $+200$  °С:  $R_0 = 10$  Ом;  $R_{-200} = 1,7307$  Ом;  $R_{+200} = 17,7033$  Ом, откуда сопротивление термометра с  $R_0 = 7,45$  Ом будет

$$R_{-200} = \frac{1,7307}{10} 7,45 = 1,2894 \text{ Ом};$$

$$R_{+200} = \frac{17,7033}{10} 7,45 = 13,189 \text{ Ом}.$$

О2.55. Технические термометры сопротивления должны быть изготовлены таким образом, чтобы допустимые отклонения сопротивления термометра при 0 °С и отношения  $R_{100}/R_0$  не превышали определенных значений. Допустимые отклонения  $R_0$  не должны превышать значений, указанных в табл. П.16. Отношение  $R_{100}/R_0$  должно соответствовать значениям, указанным в табл. П.17.

Соответственно допускам термометры сопротивления различных классов имеют различные предельные погрешности. Наибольшую погрешность имеют термометры сопротивления класса III, наименьшую — класса I. Следует отметить, что платиновые термометры сопротивления выпускаются классов I и II, а медные — классов II и III.

О2.56. Предел допускаемого значения основной погрешности термопреобразователей сопротивления выбирается из ряда значений (табл. П.16) в соответствии с классом термометра и материалом его чувствительного элемента. Считаем, что предел равен 0,3 °С. Тогда допускаемая относительная основная погрешность

$$\delta = \frac{0,3}{300} 100 = 0,1\%.$$

О2.57. Зависимость сопротивления от температуры для медных термометров

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

Коэффициент преобразования на интервале определяется согласно выражению

$$S = \Delta R_t / \Delta t.$$

Следовательно, на всем интервале температур коэффициент преобразования

$$S = R_0 \alpha.$$

Термометры градуировки 50 М и 100 М отличаются значениями  $R_0$ , значение  $\alpha$  для обеих градуировок одинаково. Поэтому для градуировки 50 М  $S = 0,214$  Ом/К, для градуировки 100 М  $S = 0,428$  Ом/К.

О2.58. На интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$  среднее значение коэффициента преобразования  $S$  определяется по формуле

$$S = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{t_2 - t_1},$$

где  $R_{t_1}$  и  $R_{t_2}$  — сопротивление термометра соответственно при  $t_1$  и  $t_2$ .

Для термометра градуировки 10 П (табл. П.18)  $R_{300} = 21,3779$  Ом;  $R_{400} = 24,9358$  Ом;  $R_{500} = 28,376$  Ом. Следовательно, в интервале температур 300—400 °С значение коэффициента преобразования  $S = 0,03560$  Ом/К, а в интервале 400—500 °С  $S = 0,0344$  Ом/К. Для термометра градуировки 100 П (табл. П.18)  $R_{300} = 213,779$  Ом;  $R_{400} = 249,358$  Ом;  $R_{500} = 283,76$  Ом. Среднее значение коэффициента преобразования в интервале температур 300—400 °С будет  $S = 0,356$  Ом/К, а в интервале 400—500 °С  $S = 0,344$  Ом/К.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что большим коэффициентом преобразования обладают термометры градуировки 100 П, меньшим — градуировки 10 П. Кроме того, с увеличением температуры коэффициент преобразования уменьшается.

О2.59. Определим количество теплоты, выделяемой на нити при прохождении тока в единицу времени:

$$Q = I^2 R_t = 0,1^2 \cdot 0,54 = 0,0054 \text{ Вт}.$$

Количество теплоты, отдаваемой в измеряемую среду, определяем в соответствии с уравнением теплообмена

$$Q = \alpha_K F (t_H - t_B),$$

где  $t_H$  — температура нити, °C;  $t_B$  — температура воздуха, °C;  $F$  — поверхность нити, м<sup>2</sup>.

Из условия теплового баланса определим необходимый температурный напор

$$\Delta t = t_H - t_B = \frac{Q}{\alpha_K F} = \frac{5,4 \cdot 10^{-3}}{400 \pi \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 8,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

т.е. температура термометра должна быть всегда выше температуры среды на 8,6 °C. Для уменьшения погрешности следует выбирать меньшую силу тока в цепи термометра.

О2.60. Для медных термометров сопротивления градуировки 100 М коэффициент преобразования постояен и равен

$$S = \Delta R / \Delta t = R_0 \alpha = 100 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3} = 0,428 \text{ Ом/К}.$$

Для термометра градуировки 100 П при  $t = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$  коэффициент преобразования (табл. П.18)

$$S = \frac{R_{61} - R_{59}}{2} = \frac{124,003 - 123,223}{2} = \frac{0,78}{2} = 0,39 \text{ Ом/К}.$$

Для полупроводниковых термометров

$$R_t = R_0 \exp \left[ \frac{B(293 - T)}{293T} \right].$$

Отсюда получаем зависимость коэффициента преобразования от температуры

$$S = - \frac{R_0 B}{T^2} \exp \left[ \frac{B(293 - T)}{293T} \right].$$

При  $t = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $T = 333,15 \text{ К}$ )

$$S = - \frac{10600 \cdot 2500}{333,15^2} \exp \frac{2500(-43,15)}{293 \cdot 333,15} = -790 \text{ Ом/К}.$$

Легко заметить, что меньший по модулю коэффициент преобразования имеет термометр градуировки 100 П, больший — полупроводниковый. Коэффициенты преобразования платинового и полупроводникового термометров зависят от температуры.

Отрицательное значение  $S$  полупроводникового термометра означает, что его сопротивление уменьшается с увеличением температуры.

О2.61. Коэффициент преобразования медного термометра сопротивления градуировки 50 М равен

$$S = R_0 \alpha = 50 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3} = 0,214 \text{ Ом/К}.$$

Из определения коэффициента преобразования легко получить выражение для абсолютной погрешности  $\Delta t$  при отклонении сопротивления проводов от градуировочного на  $\Delta R$

$$\Delta t = \frac{\Delta R}{S} = \frac{-0,5}{0,214} = -2,34 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Эта погрешность является значительной, поэтому сопротивление соединительных проводов следует подгонять с большой точностью.

Для второго случая погрешность останется той же, так как разность действительного и градуировочного значений сопротивления соединительных проводов  $\Delta R$  не изменилась.

О2.62. Будет, поскольку от градуировки зависит коэффициент преобразования. Так, для термометра градуировки 100 М

$$S = 100 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3} = 0,428 \text{ Ом/К},$$

и, следовательно, погрешность

$$\Delta t = \frac{\Delta R}{S} = \frac{-0,5}{0,428} = -1,17 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

О2.63. Если сопротивление термометра при какой-то температуре равно  $R'_t$ , то при использовании градуировочных таблиц

$$t' = \frac{R'_t - R_0}{R_0 \alpha}.$$

Эта температура будет ошибочной, поскольку действительные значения  $R'_0$  и  $\alpha'$  термометра отличаются от градуировочных ( $R'_0 \neq R_0$  и  $\alpha' \neq \alpha$ ). Действительное значение  $t$  температуры следует рассчитывать по формуле

$$t = \frac{R'_t - R'_0}{R'_0 \alpha'}.$$

Следовательно, дополнительная погрешность

$$\Delta t = t' - t = R'_t \left( \frac{1}{R_0 \alpha} - \frac{1}{R'_0 \alpha'} \right) - \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha'}.$$

Для рассматриваемого примера

$$\Delta t = 75,58 \left( \frac{1}{50 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{49,90 \cdot 4,25 \cdot 10^{-3}} \right) - \frac{1}{4,28 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{4,25 \cdot 10^{-3}} = -1,56 \text{ К}.$$

02.64. Сопротивление термометра по показаниям приборов

$$R_t = R_0 \frac{U_T}{U_0}$$

Падение напряжения на образцовой катушке  $U_0 = 10 \cdot 3 = 30$  мВ, а на термометре при  $t = 100$  °С  $U_T = 13,91 \cdot 3 = 41,73$  мВ.

Предельную относительную погрешность сопротивления термометра можно определить по формуле (1.1)

$$\Delta R_t / R_t = \pm \sqrt{(\Delta R_0 / R_0)^2 + (\Delta U_T / U_T)^2 + (\Delta U_0 / U_0)^2}$$

По условию  $\Delta R_0 = \pm 0,01$  Ом и  $\Delta R_0 / R_0 = \pm 0,001$ . Предел допускаемой погрешности  $\Delta U_T$  определим из выражения

$$\Delta U_T = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 41,73 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,0458 \text{ мВ,}$$

откуда

$$\Delta U_T / U_T = \pm 0,0458 / 41,73 = \pm 0,0011.$$

Соответственно  $\Delta U_0 = \pm (5 \cdot 10^{-4} \cdot 30 + 0,5 \cdot 0,05) = \pm 0,04$  мВ и  $\Delta U_0 / U_0 = \pm 0,04 / 30 = \pm 0,0013$ .

$$\Delta R_t / R_t = \pm \sqrt{0,001^2 + 0,0011^2 + 0,0013^2} = \pm 0,00197$$

или

$$\Delta R_t \leq \pm 0,00197 \cdot 13,9113 = \pm 0,0274 \text{ Ом.}$$

Сопротивлению  $R_t = 13,9113$  Ом градуировки 10 П соответствует температура 100 °С, при которой коэффициент преобразования термометра

$$S = 0,03845 \text{ Ом/К.}$$

Следовательно, погрешности  $\Delta R_t = 0,0274$  Ом соответствует погрешность  $\Delta t_R$  в градусах, равная

$$\Delta t_R = \Delta R / S = 0,0274 / 0,03845 = 0,71 \text{ °С.}$$

Предел допускаемой погрешности термометра

$$\Delta t_T = \pm 0,2 \text{ °С.}$$

Следовательно, допускаемая суммарная погрешность определения температуры

$$\Delta t = \pm \sqrt{\Delta t_T^2 + \Delta t_R^2} = \pm \sqrt{0,2^2 + 0,71^2} = \pm 0,74 \text{ °С.}$$

02.65. Предположим, что собственно измерительный прибор ИП-милливольтметр имеет равномерную шкалу с делениями постоянной длины, и выясним, изменяется ли чувствительность неравновешенного моста при изменении  $R_t$ .

Выходное напряжение

$$U_{cd} = I_2 R_t - I_1 R_1,$$

где

$$I_1 = E / (R_1 + R_2); \quad I_2 = E / (R_t + R_3).$$

Следовательно,

$$U_{cd} = ER_t / (R_t + R_3) - ER_1 / (R_1 + R_2).$$

Коэффициент преобразования собственно моста (т. е. без показывающего прибора ИП) будет следующим образом зависеть от  $R_t$ :

$$S = dU_{cd} / dR_t = ER_3 / (R_t + R_3)^2.$$

Таким образом, при равномерной шкале ИП чувствительность комплекта «измерительная схема + ИП» будет зависеть от  $R_t$ , т. е. шкала будет неравномерной, даже если коэффициент преобразования термометра сопротивления будет неизменным.

Неуравновешенные мосты имеют два существенных недостатка: градуировочная характеристика  $U_{cd} = f(R_t)$  нелинейная и выходное напряжение  $U_{cd}$  зависит от напряжения питания. По этим причинам неуравновешенные мосты, как правило, не применяются для измерения температуры в комплекте с серийными техническими термометрами сопротивления.

02.66. Коэффициент преобразования различен. Для решения нужно определить зависимость  $U_{cd} = f(R_t)$ . Для мостовой схемы в общем виде

$$U_{cd} = E \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right).$$

Следовательно, для схемы рис. 2.11, а имеем

$$U_{cd} = E \left( \frac{R_t}{R_3 + R_t} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right); \quad S = \frac{ER}{(R_t + R)^2}.$$

Для схемы рис. 2.11, б

$$U_{cd} = E \left( \frac{R_t - R}{R_t + R} \right); \quad S = \frac{2ER}{(R_t + R)^2},$$

т. е. коэффициент преобразования вдвое выше, чем у схемы рис. 2.11, а. Для схемы рис. 2.11, в

$$U_{cd} = 0; \quad S = 0.$$

Отсюда очевидно, что для повышения коэффициента преобразования мостовой схемы желательно иметь два чувствительных элемента, которые нужно включать в противоположные плечи моста.

02.67. Обозначим через  $R_3$  сопротивление реохорда, соответствующее верхнему пределу измерения температуры, а сопротивление между текущим положением движка реохорда и начальной отметкой в долях от  $R_3$  обозначим через  $m$ . Таким образом, уравнением шкалы моста будет зависимость  $m = f(\Delta R_t)$ , и для определения погрешности нужно определить зависимость  $m$  от сопротивления переходного контакта. Пол-

ное сопротивление плеча  $ac$  будет складываться из переходного сопротивления  $r$ , текущего сопротивления  $mR_3$  и  $R_4$ :

$$R_{ac} = r + mR_3 + R_4.$$

Условие равновесия моста

$$R_{ac} R_1 = R_2 R_t,$$

или

$$(r + mR_3 + R_4) R_1 = R_2 (R_t + \Delta R_t),$$

откуда легко получить уравнение шкалы моста в зависимости от  $\Delta R_t$  и  $r$ :

$$m = \frac{1}{R_3} (\Delta R_t - r).$$

Градуировка моста производилась при  $r=0$ , т. е. градуировочное уравнение шкалы имеет вид

$$m' = \frac{1}{R_3} \Delta R_t.$$

Отсюда получаем выражение для относительного изменения показаний

$$\Delta m = m - m' = -\frac{r}{R_3}.$$

Знак минус указывает на занижение показаний моста при увеличении  $r$ .

Для предложенного варианта  $t=200^\circ\text{C}$  соответствует  $R_t=88,516$  Ом. Легко заметить, что при  $r=0$  и  $R_2/R_1=1$  верхнему пределу измерения соответствует  $R_3=56,889$  Ом [из условия  $(R_4+R_3)R_1=R_2R_t$ , где  $R_4=106,889$  — сопротивление термометра при  $t=300^\circ\text{C}$ ].

Отсюда имеем

$$\Delta m = \frac{0,2}{56,889} 100 = -0,35\%.$$

02.68. Зависит. В формулу для расчета изменения показаний

$$\Delta m = -\frac{r}{R_3}$$

отношение  $R_2/R_1$  в явном виде не входит. Однако в действительности  $R_3$  зависит от соотношения  $R_2/R_1$  и  $R_t$ , соответствующего верхнему пределу измерения согласно выражению

$$R_3 = \frac{R_2}{R_1} R_t.$$

Таким образом, окончательно

$$\Delta m = -r \frac{R_t}{R_2 R_1}.$$

$$\text{При } \frac{R_2}{R_1} = 0,1 \quad \Delta m = -\frac{0,2}{0,1 \cdot 98,34} = -2\%,$$

$$\text{при } \frac{R_2}{R_1} = 10 \quad \Delta m = -\frac{0,2}{10 \cdot 98,34} = -0,02\%.$$

02.69. При температуре термометра, соответствующей нижнему пределу измерения, значение  $R_t$  минимально.

Учитывая неизменность  $R_3$  и  $R_1$  (см. рис. 2.13, а), легко определить, что для обеспечения равновесия в начале шкалы движок реохорда должен стоять в точке  $a$ .

Аналогичный анализ схемы на рис. 2.13, б позволяет сделать вывод, что началу шкалы в этом случае соответствует точка  $b$ .

02.70. Градуировочная характеристика связывает смещение движка реохорда  $m$  от положения, соответствующего нижнему пределу измерения, со значением сопротивления  $R_t$ . При этом всю длину реохорда удобно принять равной 1, т. е. при  $R_t$ , соответствующем верхнему пределу измерения,  $m=1$ . Для вывода уравнения нужно написать условие равновесия схемы при произвольном  $R_t$ .

Для схемы рис. 2.13, а

$$(R_3 + mR_p) R_1 = [R_2 + (1 - m) R_p] R_t,$$

отсюда

$$m = \frac{R_t (R_2 + R_p) - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_t)}.$$

Легко заметить, что градуировочная характеристика этой схемы нелинейна.

Для схемы рис. 2.13, б по аналогии находим

$$(R_3 + mR_p) R_1 = [R_t + (1 - m) R_p] R_2,$$

отсюда

$$m = \frac{R_2 R_t}{R_p (R_1 + R_2)} - \frac{R_1 R_3 - R_p R_2}{R_p (R_1 + R_2)}.$$

Градуировочная характеристика этой схемы линейна, поэтому в автоматических уравновешенных мостах термометр сопротивления включают в плечо, прилежащее к реохорду.

02.71. Изменение показаний будет равно нулю. Равновесие моста определяется только соотношением сопротивлений плеч, сопротивления в диагоналях не влияют на условие равновесия. Поэтому изменение сопротивления любой диагонали не нарушит равновесия моста. По этой

причине в автоматических мостах движок реохорда включен в диагональ, а не в плечо моста.

О2.72. При двухпроводной схеме включения термометра сопротивления (см. рис. 2.14) выводы 1—2 замкнуты. Показания прибора зависят от положения  $m$  движка реохорда. Уравнение равновесия

$$[2R_{\text{л}} + R_t + (1 - m) R_p] R_2 = R_1 (mR_p + R_3),$$

откуда

$$m = \frac{(2R_{\text{л}} + R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2)} = \frac{(2 \cdot 2,5 + 15 + 40) \cdot 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80)} = 0,250.$$

При изменении линии на  $\Delta R_{\text{л}}$  показания моста изменятся на

$$\Delta m = m' - m = \frac{(2R_{\text{л}} + 2\Delta R_{\text{л}} + R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2)} - \frac{(2R_{\text{л}} + R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2)} = \frac{(2 \cdot 2,5 + 2 \cdot 0,5 + 15 + 40) 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80)} - \frac{(2 \cdot 2,5 + 15 + 40) 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80)} = 0,0125.$$

Относительная погрешность показаний при двухпроводной схеме включения

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,0125}{0,250} 100 = 5\%.$$

О2.73. При трехпроводной схеме включения термометра (см. рис. 2.14) замыкаются выводы 3—4. Питаящая диагональ подключена к зажиму термометра сопротивления. Уравнение равновесия в этом случае имеет вид

$$[R_{\text{л}} + R_t + (1 - m) R_p] R_2 = (R_1 + R_{\text{л}}) (R_3 + mR_p),$$

откуда

$$m = \frac{R_{\text{л}} (R_2 - R_3) + (R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2 + R_{\text{л}})} = \frac{2,5 (80 - 40) + (15 + 40) 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80 + 2,5)} = 0,2.$$

При увеличении  $R_{\text{л}}$  на  $\Delta R_{\text{л}} = 0,5$  Ом показания моста изменятся на

$$\Delta m = \frac{(R_{\text{л}} + \Delta R_{\text{л}}) (R_2 - R_3) + (R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2 + R_{\text{л}} + \Delta R_{\text{л}})} - \frac{R_{\text{л}} (R_2 - R_3) + (R_t + R_p) R_2 - R_1 R_3}{R_p (R_1 + R_2 + R_{\text{л}})} = \frac{(2,5 + 0,5) (80 - 40) + (15 + 40) 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80 + 2,5 + 0,5)} - \frac{2,5 (80 - 40) + (15 + 40) 80 - 80 \cdot 40}{40 (80 + 80 + 2,5)} = 0,00245.$$

Относительная погрешность показаний при трехпроводной схеме включения

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,00245}{0,2} 100 = 1,225\%.$$

Таким образом, при заданных параметрах моста трехпроводная схема подключения термометра сопротивления уменьшила относительную погрешность, вызванную изменением сопротивления соединительных проводов, почти в 5 раз.

О2.74. Погрешность показаний будет зависеть от сопротивления резисторов схемы. Определим погрешность показаний моста за счет изменения  $R_{\text{л}}$  для новых сопротивлений резисторов, воспользовавшись для этого соотношениями, приведенными в решении О2.73.

При  $R_{\text{л}} = 2,5$  Ом

$$m = \frac{2,5 (60 - 50) + (15 + 30) 60 - 35 \cdot 50}{30 (35 + 60 + 2,5)} = 0,3333.$$

При изменении сопротивления линии на  $\Delta R_{\text{л}} = 0,5$  Ом новое положение  $m'$  движка реохорда

$$m' = \frac{(2,5 + 0,5) (60 - 50) + (15 + 30) 60 - 35 \cdot 50}{30 (35 + 60 + 2,5 + 0,5)} = 0,3333.$$

Таким образом, в случае равенства смежных плеч  $(R_1 + R_{\text{л}})$  и  $[R_t + R_{\text{л}} + (1 - m) R_p]$  для уравновешенного моста (такой мост называется симметричным) изменение сопротивления линии не сказывается на показаниях прибора. Поэтому в схемах автоматических уравновешенных мостов сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  выбираются одинаковыми исходя из условия [12]

$$R_2 = R_3 = \frac{R_{\text{тк}} \eta_0 - R_{\text{тн}}}{1 - \eta_0},$$

где  $\eta_0 = 0,8 \div 0,9$  — коэффициент, устанавливающий такое соотношение между  $R_t$  и  $R_3$ , при котором изменение тока через реохорд не превыша-

ет 10—20 %;  $R_{тн}$  и  $R_{тк}$  — сопротивления термометра, соответствующие началу и концу шкалы.

О2.75. Условие равновесия в начале шкалы выражается уравнением

$$(R_{тн} + R_{л} + R_0 + R_9) R_2 = (R_1 + R_{л}) R_3,$$

где  $R_9$  — эквивалентное сопротивление реохорда,

$$R_9 = \frac{R_p R_{п}}{R_p + R_{п}}.$$

Условие равновесия в конце шкалы

$$(R_{тк} + R_{л} + R_0) R_2 = (R_1 + R_{л}) (R_3 + R_9).$$

Решая совместно полученные уравнения с учетом  $R_2 = R_3$ , получаем выражение для  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{(R_{тн} + R_0 - R_2 - R_{л})}{2} + \frac{\sqrt{(R_{тн} + R_0 - R_2 - R_{л})^2 + 4(R_0 R_2 + R_{тн} R_{л} + R_0 R_{л} + R_{тн} R_2)}}{2} = \frac{(50 + 5 - 200 - 2,5)}{2} + \frac{\sqrt{(50 + 5 - 200 - 2,5)^2 + 4(5 \cdot 200 + 50 \cdot 2,5 + 5 \cdot 2,5 + 82,096 \cdot 200)}}{2} = 77,893 \text{ Ом}.$$

Из этой же системы уравнений получаем выражение для  $R_9$ :

$$\frac{R_2 (R_{тк} - R_{тн})}{R_1 + R_2 + R_{л}} = \frac{200 (82,096 - 50)}{77,893 + 200 + 2,5} = 22,89 \text{ Ом}.$$

Сопротивление

$$R_{п} = \frac{R_p R_9}{R_p - R_9} = \frac{90 \cdot 22,89}{90 - 22,89} = 30,7 \text{ Ом}.$$

О2.76. Автоматический уравновешенный мост при  $R_2 = R_3$  будет симметричным только в начальной точке шкалы (при отсутствии нерабочих участков реохорда). Поэтому лишь в этой точке изменение показаний моста за счет изменения сопротивления линии будет отсутствовать, во всех же остальных точках шкалы мост будет несимметричным и изменение показаний будет иметь место (см. О2.74).

О2.77. Уравнение равновесия моста при произвольной температуре  $t$  имеет вид

$$[R_t + R_{л} + R_0 + (1 - m) R_9] R_2 = (R_1 + R_{л}) (R_3 + m R_9),$$

где  $R_t$  — сопротивление термометра при температуре  $t$ . При  $t = 120^\circ \text{C}$ ,

$R_t = 75,678 \text{ Ом}$  и  $R_{л} = 2,5 \text{ Ом}$ , подставив значения сопротивлений, определим  $m$ :

$$m = \frac{R_2 (R_t + R_{л} + R_0 + R_9) - R_3 (R_1 + R_{л})}{R_9 (R_1 + R_2 + R_{л})} = \frac{200 (75,678 + 2,5 + 5 + 22,89) - 200 (77,893 + 2,5)}{22,89 (77,893 + 200 + 2,5)} = 0,80007.$$

Значение  $m'$  при увеличении  $R_{л}$  на 0,1 Ом определяется аналогично и равно 0,79978.

Следовательно, изменение показаний  $\Delta m = 0,79978 - 0,80007 = -0,00029$ , или  $-0,036 \%$ .

Так как характеристика ТСМ линейна, то  $\Delta m = -0,036 \%$  соответствует занижению показаний моста на  $0,054^\circ \text{C}$ .

О2.78. Для решения вопроса о работоспособности схемы необходимо установить направление моментов рамок. В соответствии с правилом левой руки момент  $M_1$  рамки 1 направлен по часовой стрелке, момент  $M_2$  рамки 2, включенной последовательно с терморезистором  $R_t$ , направлен против часовой стрелки. При таком направлении моментов логометр работать не будет, так как, например, при увеличении  $R_t$  уменьшается  $M_2$  и рамки начнут поворачиваться по часовой стрелке. При этом момент  $M_1$  будет увеличиваться, так как рамка 1 будет перемещаться в более сильное магнитное поле, а  $M_2$  будет еще больше ослабевать. Следовательно, равенства моментов быть не может и подвижная система будет поворачиваться до упора. Аналогичная картина наблюдается и при уменьшении  $R_t$ .

Чтобы схема оказалась работоспособной,  $M_1$  должен быть направлен против часовой стрелки, а  $M_2$  — по часовой стрелке. Для этого достаточно изменить полярность подключения батарей.

О2.79. Изменение напряжения питания незначительно сказывается на показаниях логометра из-за того, что он измеряет отношение токов в рамках. Если считать внутреннее сопротивление батарей нулевым, то ток  $I_1$  в рамке 1 (см. рис. 2.16)

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{п1}};$$

момент рамки 1

$$M_1 = k B_1 \frac{E}{R_1 + R_{п1}},$$

где  $R_{п1}$  — сопротивление рамки 1;  $B_1$  — индукция поля в месте нахождения рамки 1;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Аналогично момент, развиваемый рамкой 2,

$$M_2 = k B_2 \frac{E}{R_t + R_{п2}}.$$

При равенстве моментов

$$kB_1 \frac{E}{R_1 + R_{p1}} = kB_2 \frac{E}{R_t + R_{p2}}$$

легко получить

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{R_t + R_{p2}}{R_1 + R_{p1}}$$

Отношение индукций  $B_1/B_2$  определяется углом отклонения подвижной системы  $\varphi$ , и, следовательно,

$$\varphi = f\left(\frac{R_t + R_{p2}}{R_1 + R_{p1}}\right)$$

В полученную формулу ЭДС источника питания не входит, и принципиально  $\varphi$  не зависит от  $E$ .

02.80. При снижении напряжения питания у логометра увеличивается зона нечувствительности. Действительно, для того чтобы подвижная система начала поворачиваться, должна быть определенная разница моментов  $\Delta M$  (см. рис. 2.16), которая зависит от изменения тока в цепи, содержащей  $R_t$ :

$$\Delta M = kB_2 \Delta I_2 = kB_2 \frac{E \Delta R_t}{(R_t + R_{p2})(R_t + \Delta R_t + R_{p2})}$$

т. е. чем больше  $E$ , тем меньшее значение  $\Delta R_t$  потребуется для начала движения рамок.

02.81. Возможно. Моменты, действующие на рамки логометра, должны иметь определенное направление. Поэтому направление токов в рамках должно оставаться неизменным. В то же время при неизменном  $R_t$  уменьшение напряжения питания в равной степени изменит токи в рамках, так что их отношение останется неизменным, а следовательно, угол поворота рамок не изменится. Отсюда ясно, что пульсирующим (т. е. переменным по значению, но не изменяющим направление) током в принципе питать схему логометра можно. Источники питания логометра СВ-4м имеют схему двухполупериодного выпрямителя без фильтров.

02.82. Сопротивление  $R_k$  логометра выбирается таким образом, чтобы численное значение его равнялось сопротивлению термометра при температуре, соответствующей отметке красной черты:  $R_t = 231,73$  Ом. Поэтому  $R_k = 231,73$  Ом. Если  $R_k$  включено, а  $R_t$  замкнуто накоротко, стрелка логометра встанет на красную черту только тогда, когда сопротивление линии  $R_{\Sigma}$  соответствует градуировочному значению.

02.83. Так как нет характеристик систематических и случайных погрешностей средств измерений, входящих в измерительную систему, то может быть подсчитана только предельная погрешность измерительной системы

$$\Delta R_{\Sigma} = \pm \sqrt{\Delta R_t^2 + \Delta R_{сп}^2 + \Delta R_{л}^2}$$

где  $\Delta R_t$ ,  $\Delta R_{сп}$  и  $\Delta R_{л}$  — допускаемые погрешности термометра сопротивления, соединительных проводов и логометра. Допускаемая погрешность медного термометра сопротивления  $\Delta t = \pm 1$  °С, что соответствует  $\Delta R_t = \pm 0,214$  Ом. Сопротивление соединительных проводов подогнано с погрешностью  $\Delta R_{сп} = \pm 0,05$  Ом. Допускаемая погрешность логометра определяется из выражения

$$\Delta R_{л} = \pm \frac{R_{тк} - R_{тн}}{100} K = \pm \frac{82,096 - 50,00}{100} \cdot 1,0 = \pm 0,321 \text{ Ом,}$$

где  $K$  — класс логометра.

С учетом найденного

$$\Delta R_{\Sigma} = \pm \sqrt{0,214^2 + 0,05^2 + 0,321^2} = \pm 0,389 \text{ Ом,}$$

что соответствует  $\Delta t = \pm 1,82$  °С.

02.84. Абсолютная погрешность измерения температуры газа за счет теплообмена излучением между термопреобразователем и стенкой определяется из выражения (2.4)

$$\Delta t = - \frac{5,67 \cdot 0,92}{485} \left[ \left( \frac{1693}{100} \right)^4 - \left( \frac{1373}{100} \right)^4 \right] = -501 \text{ К} = -501 \text{ °С.}$$

Действительная температура газа

$$t_c = t_T - \Delta t = 1420 + 501 = 1921 \text{ °С.}$$

02.85. Ход решения аналогичен ходу решения 02.84:

$$\Delta t = - \frac{5,67 \cdot 0,92}{485} \left[ \left( \frac{1393}{100} \right)^4 - \left( \frac{1073}{100} \right)^4 \right] = -262 \text{ К} = -262 \text{ °С;}$$

$$t_c = t_T - \Delta t = 1120 + 262 = 1382 \text{ °С.}$$

Как видно, при тех же условиях, что и в задаче 2.84, и той же разности температур между температурой термопреобразователя и стенки погрешность получилась существенно меньше только за счет уменьшения абсолютных значений температуры.

02.86. Погрешность измерения, вызванная лучистым теплообменом между термопреобразователем и экраном, будет определяться выражением (2.4).

Для заданных условий  $T_T$  определяется путем подбора из уравнения

$$T_T - T_c = - \frac{5,67 \cdot 0,92}{100} \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 + \frac{5,67 \cdot 0,92}{500} \left( \frac{1693}{100} \right)^4$$

или

$$T_T + 1,04328 \cdot 10^{-10} T_T^4 = 3033.$$

Окончательно получаем  $T_T = 1839$  К или  $t_T = 1566$  °С. Таким образом, за счет установки экрана погрешность измерения температуры газа уменьшилась от 501 (см. решение 02.84) до 337 °С, т. е. в 1,5 раза.

02.87.

$$\Delta t = - \frac{5,67 \cdot 0,92}{485} \left[ \left( \frac{1693}{100} \right)^4 - \left( \frac{1573}{100} \right)^4 \right] = - 225 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_c = 1420 + 225 = 1645 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Следовательно, при увеличении температуры стенки от 1100 до 1300 °С погрешность за счет лучистого теплообмена уменьшилась от 501 до 225 °С, т. е. более чем в 2 раза.

02.88. Погрешность, вызываемая отводом теплоты по чехлу термопреобразователя, определяется выражением (2.5). Подставляя значения величин, получаем

$$t_c = 356 + \frac{t_c - 270}{\text{ch } 0,1 \sqrt{\frac{0,024 \cdot 50,4}{18(0,024^2 - 0,016^2)}}},$$

откуда

$$t_c = 367 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ и } \Delta t = 356 - 367 = - 11 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

02.89.

$$\Delta t = 356 - t_c = - \frac{t_c - 270}{\text{ch } 1,826},$$

откуда  $t_c = 395 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t = 356 - 395 = - 39 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Следовательно, с увеличением коэффициента теплопроводности материала чехла погрешность увеличивается.

02.90.

$$\Delta t = 356 - t_c = - \frac{t_c - 270}{\text{ch } 1,443},$$

откуда  $t_c = 426 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t = 356 - 426 = - 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Сравнивая с 02.88, легко отметить целесообразность увеличения глубины погружения термопреобразователя.

02.91.

$$\Delta t = 356 - t_c = - \frac{t_c - 270}{\text{ch } 5,774};$$

$$t_c = 356,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta t = 356 - 356,5 = - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Сравнением с 02.88, легко установить, что с увеличением теплоотдачи от среды к термопреобразователю погрешность измерения за счет теплоотвода теплоты резко уменьшается.

02.92.

$$\Delta t = 356 - t_c = - \frac{t_c - 350}{\text{ch } 2,887};$$

$$t_c = 356,8 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Delta t = 356 - 356,8 = - 0,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, целесообразна хорошая изоляция стенки, так как это ведет к уменьшению погрешности.

02.93. Уравнение теплового баланса термопреобразователя записывается в виде

$$Q_T + Q_L = Q_R,$$

где  $Q_T$  — теплота, отводимая по термопреобразователю к стенке за счет теплопроводности;  $Q_L$  — теплота, передаваемая от термопреобразователя к стенке за счет излучения;  $Q_R$  — теплота, подводимая от газа к термопреобразователю за счет конвекции (предполагается, что лучистый теплообмен между газом и термопреобразователем отсутствует).

Тепловой поток  $Q_T$  по чехлу термопреобразователя к стенке за счет теплопроводности при условии теплообмена по всей поверхности с газовым потоком может быть определен из выражения

$$Q_T = qS.$$

Температура термопреобразователя в любом его сечении  $x$ , если считать, что по сечению температура не изменяется, может быть найдена из выражения

$$t_T(x) = t_c - (t_c - t_{CT}) \frac{\text{ch} \left( \sqrt{\text{Bi}} \frac{xP}{S} \right)}{\text{ch} \left( \sqrt{\text{Bi}} \frac{LP}{S} \right)},$$

где  $q$  — удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  — сечение чехла термопреобразователя, м<sup>2</sup>;  $P$  — периметр термопреобразователя, м;  $\text{Bi}$  — число Био,  $\text{Bi} = \alpha_K S / \lambda P$ .

Определяем тепловой поток  $Q_T$  по чехлу термопреобразователя к стенке в установившемся режиме:

$$Q_T = qS = - S\lambda \left. \frac{\partial t_T(x)}{\partial x} \right|_{x=l} = S\lambda \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}} (t_c - t_{CT}) \text{th } l \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}}.$$

Тепловой поток от термопреобразователя к стенке за счет излучения

$$Q_L = C_0 \varepsilon_{\text{пр}} F_T \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент теплового излучения системы термопреобразователь — стенка;  $F_T$  — поверхность термопреобразователя, м<sup>2</sup>.

В нашем случае поверхность стенки  $F_c \gg F_T$ , поэтому  $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_T$ .

Тепловой поток от газа к термопреобразователю за счет конвекции

$$Q_R = \alpha_K F_T (t_c - t_T).$$

Таким образом, общее уравнение теплового баланса термопреобразователя

$$\lambda S \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}} (t_c - t_{CT}) \operatorname{th} l \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}} + \\ + C_0 \varepsilon_{\text{пр}} \pi d_H l \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] = \alpha_K \pi d_H l (t_c - t_T).$$

Подставив значения параметров, определим температуру газа:

$$\frac{18\pi(0,024^2 - 0,016^2)}{4} \sqrt{\frac{90\pi \cdot 0,024 \cdot 4}{18\pi(0,024^2 - 0,016^2)}} (t_c - \\ - 630) \operatorname{th} 0,1 \sqrt{\frac{90\pi \cdot 0,096}{18\pi \cdot 32 \cdot 10^{-5}}} + 5,67 \cdot 0,8\pi \cdot 0,024 \cdot 0,1 \left[ \left( \frac{1093}{100} \right)^4 - \right. \\ \left. - \left( \frac{903}{100} \right)^4 \right] = 90\pi \cdot 0,024 \cdot 0,1 (t_c - 820); \\ 0,1755 (t_c - 630) + 268 = 0,678 (t_c - 820); \\ t_c = 1415 \text{ }^\circ\text{C}.$$

02.94.

$$t_c = t_T + \frac{C_0 \varepsilon_{\text{пр}}}{\alpha_K} \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] = 820 + \\ + \frac{5,67 \cdot 0,8}{80} \left[ \left( \frac{1093}{100} \right)^4 - \left( \frac{903}{100} \right)^4 \right] = 820 + 394 = 1214 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \Delta t = 820 - 1214 = -394 \text{ }^\circ\text{C}.$$

02.95.

$$t_c - t_T = \frac{t_c - t_{CT}}{\operatorname{ch} l \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}}}; \\ t_c - 820 = \frac{t_c - 630}{\operatorname{ch} 0,1 \sqrt{\frac{90\pi \cdot 0,024 \cdot 4}{18\pi(0,024^2 - 0,016^2)}}}; \\ t_c = 828,2 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \Delta t = 820 - 828,2 = -8,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, неучет отвода теплоты от термопреобразователя по челу и за счет излучения может привести к недопустимо большим погрешностям измерения.

02.96. Термодинамическая температура газового потока определяется из выражения

$$T_c = T_T - r \frac{v^2}{2C_p} = t_T + 273 - r \frac{v^2}{2C_p} = 560 + 273 - \\ - 0,91 \frac{350^2}{2 \cdot 1500} = 796 \text{ K}$$

Температура торможения

$$T^* = T_c + \frac{v^2}{2C_p} = 796 + \frac{350}{2 \cdot 1500} = 837 \text{ K}.$$

02.97. Решение уравнения имеет вид

$$t_T(\tau) - t_T(0) = [t_c(\tau) - t_c(0)] \left[ 1 - e^{-\frac{\tau}{T_d}} \right],$$

где  $t_T(\tau)$ ,  $t_c(\tau)$  — соответственно температура термопреобразователя и среды в момент времени  $\tau$ ;  $t_T(0)$ ,  $t_c(0)$  — температуры термопреобразователя и среды в начальный момент времени  $\tau=0$ .

Получим выражение для динамической погрешности:

$$\Delta t_d = t_T(\tau) - t_c(\tau) = t_T(0) - t_c(0) + [t_c(0) - t_c(\tau)] \exp(-\tau/T_d).$$

Так как  $t_T(0) = t_c(0)$ , то

$$\Delta t_d = [t_c(0) - t_c(\tau)] \exp(-\tau/T_d).$$

Для любого момента времени  $\tau > 0$   $t_c(\tau) = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Подставив в выражение численные значения, определим динамическую погрешность в момент времени  $\tau = 368 \text{ с}$ :

$$\Delta t_d = (20 - 300) \exp\left(-\frac{368}{120}\right) = -13 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Знак минус указывает на занижение температуры термопреобразователя относительно температуры среды.

02.98. Из уравнения переходной функции имеем

$$t_{c,K} - t_T(\tau) = (t_{c,K} - t_{c,H}) \exp(-\tau/T_d).$$

Запишем это выражение в виде

$$\frac{t_{c,K} - t_T(\tau)}{t_{c,K} - t_{c,H}} = e^{-\frac{\tau}{T_d}}.$$

Для любого момента времени  $\tau$  можно написать

$$\ln \frac{t_{c,K} - t_T(\tau)}{t_{c,K} - t_{c,H}} = -\frac{\tau}{T_d},$$

откуда

$$T_d = \frac{\tau}{\ln(t_{c,K} - t_{c,H}) - \ln[t_{c,K} - t_T(\tau)]}.$$

Подставив значение  $\tau$ , определим постоянную времени

$$T_d = \frac{10}{\ln 100 - \ln 57} = 17,8 \text{ с}.$$

02.99. Температура металла может быть определена даже в том случае, когда неизвестны значения коэффициентов уравнения (2.7), но известно, что они постоянны.

Уравнение переходного процесса имеет вид

$$t_c - t_T(\tau) = [t_c - t_T(0)] e^{-\frac{\tau}{T_d}}$$

Запишем это уравнение для  $\tau=0,5$  с,  $\tau=1$  с и  $\tau=1,5$  с:

$$t_c - 608 = [t_c - t_T(0)] e^{-\frac{0,5}{T_d}};$$

$$t_c - 980 = [t_c - t_T(0)] e^{-\frac{1,0}{T_d}};$$

$$t_c - 1202 = [t_c - t_T(0)] e^{-\frac{1,5}{T_d}}.$$

Разделим первое уравнение на второе и второе на третье:

$$\frac{t_c - 608}{t_c - 980} = e^{\frac{0,5}{T_d}}; \quad \frac{t_c - 980}{t_c - 1202} = e^{\frac{0,5}{T_d}};$$

$$\frac{t_c - 608}{t_c - 980} = \frac{t_c - 980}{t_c - 1202};$$

$$t_c^2 - 1810t_c + 608 \cdot 1202 = t_c^2 - 1960t_c + 980 \cdot 980;$$

$$t_c = 1530,6^\circ\text{C}.$$

02.100. Если температура среды постоянна, то, продифференцировав уравнение термометра по времени, получим

$$T_d \frac{d^2 t_T}{d\tau^2} + \frac{dt_T}{d\tau} = 0,$$

откуда

$$T_d = - \frac{dt_T}{d\tau} / \frac{d^2 t_T}{d\tau^2}.$$

Подставив  $T_d$  в исходное уравнение, получим

$$t_c = - \frac{669^2}{-200} + 657 = 2895^\circ\text{C}.$$

02.101. Введем следующие обозначения:  $dt_T/d\tau = t'$ ;  $d^2 t_T/d\tau^2 = t''$ .

При этом выражение для  $t_c$  будет иметь вид (см. решение 02.100)

$$t_c = -(t')^2/t'' + t_T.$$

Проведем оценку погрешности измерения температуры газового потока как результата косвенного измерения:

$$\begin{aligned} \Delta t_c &= \pm \sqrt{\left(\frac{\partial t_c}{\partial t_T} \Delta t_T\right)^2 + \left(\frac{\partial t_c}{\partial t'} \Delta t'\right)^2 + \left(\frac{\partial t_c}{\partial t''} \Delta t''\right)^2} = \\ &= \pm \sqrt{\Delta t_T^2 + \left(\frac{2t'}{t''} \Delta t'\right)^2 + \left[\frac{(t')^2}{(t'')^2} \Delta t''\right]^2}. \end{aligned}$$

Подставив значение погрешностей

$$\Delta t = \pm 3,3 \text{ К}; \quad \Delta t' = 13,4 \text{ К/с}; \quad \Delta t'' = \pm 20 \text{ (К/с)}^2,$$

получим

$$\Delta t_c = \pm \sqrt{3,3^2 + \left(\frac{2 \cdot 669}{200} \cdot 13,4\right)^2 + \left(\frac{669^2}{200^2} \cdot 20\right)^2} = \pm 241^\circ\text{C}$$

или

$$\frac{\Delta t_c}{t_c} = \frac{\pm 241}{2895} \cdot 100 = \pm 8,33 \%$$

02.102. Решим уравнение термопреобразователя при условии, что изменение температуры среды во времени имеет вид

$$t_c = t_{c0} + t_{cm} \sin \omega \tau,$$

где  $t_{c0}$  — постоянная составляющая температуры;  $t_{cm}$  — амплитуда синусоидальной составляющей температуры.

Тогда уравнение, описывающее изменение температуры термопреобразователя,

$$T_d t_T' + t_T = t_{c0} + t_{cm} \sin \omega \tau.$$

Решаем линейное дифференциальное уравнение с правой частью и получаем

$$t_T = t_{c0} + \frac{t_{cm}}{\sqrt{1 + (T_d \omega)^2}} \sin(\omega \tau - \varphi),$$

где

$$\varphi = \arctg T_d \omega.$$

Таким образом, амплитуда колебаний температуры термопреобразователя будет уменьшена в  $\sqrt{1 + (T_d \omega)^2}$  раз относительно амплитуды колебаний температуры измеряемой среды. Колебания температуры термопреобразователя будут отставать по фазе от колебаний температуры среды на угол  $\varphi = \arctg T_d \omega$ .

Динамическая погрешность для любого момента времени будет определяться разностью температур термопреобразователя и измеряемой среды:

$$\Delta t_d = t_T - t_C = t_{CM} [\sin(\omega\tau - \varphi) \cos \varphi - \sin \omega\tau].$$

Определим  $\tau$ , при котором динамическая погрешность будет максимальной. Для этого определим первую производную динамической погрешности и приравняем ее нулю:

$$[\sin(\omega\tau - \varphi) \cos \varphi - \sin \omega\tau]' = 0,$$

откуда

$$\tau = \frac{\text{arctg } T_d \omega}{\omega}.$$

Определяем для этого момента времени  $\Delta t_d$ :

$$(\Delta t_d)_{\text{макс}} = t_{CM} \frac{T_d \omega}{\sqrt{1 + (T_d \omega)^2}}.$$

По условию динамическая погрешность не должна превышать 5 % амплитуды колебаний температуры среды

$$t_{CM} \frac{T_d \omega}{\sqrt{1 + (T_d \omega)^2}} \leq 0,05 t_{CM};$$

при  $f=8$  Гц  $\omega=2\pi f=2\cdot 3,14\cdot 8=50,3$  с<sup>-1</sup>,

$$T_d \leq 0,001 \text{ с.}$$

Постоянная времени термопреобразователя должна быть не более 0,001 с.

02.103. Переходный процесс расплавляемого термоэлектрического термометра описывается уравнением (см. решение 02.97)

$$t_C - t_T(\tau) = [t_C - t_T(0)] e^{-\frac{\tau}{T_d}}.$$

Из условия имеем очевидное неравенство

$$t_C - t_T(\tau) \leq 0,005 [t_C - t_T(0)].$$

Отсюда легко получить

$$[t_C - t_T(0)] e^{-\frac{\tau}{T_d}} \leq 0,005 [t_C - t_T(0)];$$

$$e^{-\frac{\tau}{T_d}} \leq 0,005; \quad T_d \leq 0,377 \text{ с.}$$

02.104. В квазимонохроматическом методе температура определяется по спектральной энергетической яркости  $B_{0\lambda T}$  в соответствии с уравнением Планка [формула (2.11)].

В методе полного излучения температура определяется по интегральной энергетической яркости  $B_{0T}$ , определяемой по закону Стефана — Больцмана [формула (2.12)].

В методе спектрального отношения температура определяется по отношению спектральных энергетических яркостей при двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$

$$A_{0T} = B_{0\lambda_2 T} / B_{0\lambda_1 T}.$$

Для ответа на вопрос сравним изменения  $B_{0\lambda_1 T}$ ,  $B_{0T}$  и  $A_{0T}$  с увеличением температуры ( $\lambda_1=0,65$  мкм;  $\lambda_2=0,45$  мкм).

T, К	$B_{0\lambda_1 T}$ ( $\lambda_1=0,65$ мкм), Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	$B_{0T}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	$A_{0T}$
1000	$7,95 \cdot 10^{15}$	$5,67 \cdot 10^4$	2961
2000	$5,063 \cdot 10^{20}$	$90,8 \cdot 10^4$	21,7
4000	$1,28 \cdot 10^{23}$	$1452 \cdot 10^4$	1,86

В интервале 1000—2000 К

$$B_{0\lambda_1, 2000} / B_{0\lambda_2, 1000} = 63685; \quad B_{0, 2000} / B_{0, 1000} = 16; \quad A_{0, 1000} / A_{0, 2000} = 136,5.$$

Очевидно, что в этом интервале наибольшей чувствительностью обладает квазимонохроматический метод, наименьшей — метод полного излучения.

В интервале 2000—4000 К

$$B_{0\lambda_1, 4000} / B_{0\lambda_1, 2000} = 253; \quad B_{0, 4000} / B_{0, 2000} = 16; \quad A_{0, 2000} / A_{0, 4000} = 11,7.$$

Из сравнения видно, что чувствительность квазимонохроматического метода и метода спектрального отношения с увеличением температуры уменьшается, а радиационного — не изменяется.

02.105. Зависит. Например, если  $\lambda_2=0,45$  мкм, то при  $T=1000$  К  $B_{0\lambda_2, 1000} = 2,68 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>3</sup> и при  $T=2000$  К  $B_{0\lambda_2, 2000} = 2,33 \times 10^{19}$  Вт/м<sup>3</sup>, т.е.  $B_{0\lambda_2, 2000} / B_{0\lambda_2, 1000} = 86,93 \cdot 10^5$ , в то время как при  $\lambda_1=0,65$  мкм это отношение было равно  $63,68 \cdot 10^3$  (см. решение 02.104).

Таким образом, при уменьшении длины волны чувствительность возрастает.

02.106. ОППИР-017 предназначен для измерения температуры, начиная с 800 °С. При температурах, близких к нижнему пределу измерения, максимум спектральной энергетической яркости лежит в инфракрасной области спектра, и поэтому спектральная энергетическая яркость в видимой красной области значительно больше яркости в видимой синей области спектра.

Кроме того, индикатором яркости в ОППИР-017 является человеческий глаз, который различает больше оттенков красного цвета, чем синего.

02.107. Нет. Сравнение яркостей тела и нити пирометрической лампы должно происходить в свете одной длины волны, что обеспечивается установкой светофильтра непосредственно перед глазом. Если фильтр установить между объектом и лампой, то излучение от лампы монохроматическим не будет. Установка поглощающего стекла между лампой и глазом бесполезна, поскольку при этом в равной степени будет ослабляться излучение от лампы и тела, в то время как должна ослабляться только яркость раскаленного тела.

02.108. Квасимонохроматический (оптический) пирометр градуируется по излучению абсолютно черного тела, для которого спектральная энергетическая яркость при абсолютной температуре  $T$  и длине волны  $\lambda$  может быть определена из формулы Вина [формула (2.9)].

При измерении температуры реального тела оптическим пирометром осуществляется уравнивание спектральных энергетических яркостей реального тела с температурой  $T$  и абсолютно черного тела (или отградуированного по абсолютно черному телу) с температурой  $T_{\lambda}$ :

$$B_{\lambda T} = B_{0\lambda T_{\lambda}}$$

С учетом коэффициента теплового излучения можно написать

$$\epsilon_{\lambda T} B_{0\lambda T} = B_{0\lambda T_{\lambda}}$$

Температура  $T_{\lambda}$ , показываемая пирометром, называется яркостной температурой реального тела, которая всегда меньше действительной температуры тела  $T$ .

Используя формулу Вина, легко установить зависимость между  $T$  и  $T_{\lambda}$ :

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_{\lambda}} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}}$$

Для рассматриваемого случая

$$T = \frac{1}{\frac{1}{1373} - \frac{0,65 \cdot 10^{-6}}{1,438 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{1}{0,75}} = 1398 \text{ К.}$$

Разница  $T_{\lambda} - T$  является систематической погрешностью, определяемой самим методом измерения. Выражение для систематической погрешности имеет вид

$$\Delta T = T_{\lambda} - T = T_{\lambda} - \frac{1}{\frac{1}{T_{\lambda}} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}} = 1373 - 1398 = -25 \text{ К.}$$

02.109. Будет. Из формулы Вина можно получить

$$\Delta t = T_{\lambda} - T = -\frac{aT_{\lambda}^2}{1 - aT_{\lambda}}, \text{ где } a = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}$$

Например, если  $t_{\lambda} = 1827 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\epsilon_{\lambda T} = 0,38$ , то  $\Delta t = -212,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При  $t_{\lambda} = 1627 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $\Delta t = -173,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

02.110. Коэффициент пирометрического ослабления определяется из выражения

$$A = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\tau_{\lambda}},$$

где  $\tau_{\lambda}$  — коэффициент пропускания поглощающего стекла. Практически он может быть определен по формуле

$$A = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$$

Следовательно,

$$A = \frac{1}{1079} - \frac{1}{1376} = 0,0002 \text{ К}^{-1}$$

02.111. Температура тела при измерении квазимонохроматическим пирометром определяется по формуле

$$T = \frac{T_{\lambda}}{1 - T_{\lambda} \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}}$$

Для заданных значений

$$T = \frac{1373}{1 - 1373 \cdot \frac{0,66 \cdot 10^{-6}}{1,438 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{1}{0,65}} = 1411 \text{ К.}$$

Составляющая систематической погрешности, обусловленная «нечернотой» слитка, определяется из выражения

$$\Delta T_c = T_{\lambda} - T = 1373 - 1411 = -38 \text{ К.}$$

Оценим погрешность определения  $T$ , обусловленную возможным отклонением  $\lambda$  и  $\epsilon_{\lambda T}$  от расчетных значений. Погрешность рассчитываем, полагая, что  $T$  есть результат косвенных измерений:

$$\Delta T = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \epsilon_{\lambda T}} \Delta \epsilon_{\lambda T}\right)^2};$$

$$\frac{\partial T}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\frac{T_{\lambda}^2}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}}{\left(1 - T_{\lambda} \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}\right)^2} \Delta \lambda =$$

$$= \frac{1373 \frac{1373}{1,438 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{1}{0,65}}{\left(1 - 1373 \frac{0,66 \cdot 10^{-6}}{1,438 \cdot 10^{-2}} \ln \frac{1}{0,65}\right)^2} 0,01 \cdot 10^{-6} = 0,598 \text{ К};$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_{\lambda T}} \Delta \varepsilon_{\lambda T} = \frac{\frac{T_{\text{я}}^2}{c_2} \lambda \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{\lambda T}}\right)}{\left(1 - T_{\text{я}} \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda T}}\right)^2} \Delta \varepsilon_{\lambda T} = -7,035 \text{ К}.$$

Следовательно,

$$\Delta T = \pm \sqrt{0,598^2 + (-7,035)^2} = \pm 7,06 \text{ К}.$$

Таким образом, систематическая составляющая погрешности

$$\Delta T_{\text{с}} - \Delta T \leq \Delta_{\text{с}} \leq \Delta T_{\text{с}} + \Delta T;$$

$$-45,06 \text{ К} \leq \Delta_{\text{с}} \leq -30,94 \text{ К}.$$

02.112 Показатель визирования определяется как  $n = D/l$ , откуда  $l \leq D/n = 30 \cdot 7 = 210 \text{ мм}$ .

02.113 Определим минимальный диаметр измеряемого тела при  $l = 1400 \text{ мм}$  и  $n = 1/7$ :

$$D \geq l \cdot n = 1400 \cdot 1/7 = 200 \text{ мм}.$$

У нас размер слитка не менее 400 мм, следовательно, измерять можно.

02.114 Погрешность, обусловленная «нечернотой» измеряемого тела, определяется из выражения

$$T_{\text{п}} - T = (t_{\text{п}} + 273) - T_{\text{п}} \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}} =$$

$$= (1627 + 273) \left(1 - \sqrt[4]{\frac{1}{0,38}}\right) = -520,6 \text{ К}.$$

02.115 Действительная температура тела определяется по цветовой температуре:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{1}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_2 T}}{\varepsilon_{\lambda_1 T}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{1520} - \frac{1}{1,438 \cdot 10^{-2} \left(\frac{10^6}{0,65} - \frac{10^6}{0,45}\right)} \ln \frac{0,390}{0,358}} = 1500 \text{ К};$$

$$\Delta T_{\text{с}} = T_{\text{ц}} - T = 20 \text{ К}.$$

02.116. Если предположить, что корректирующий мост осуществляет полную компенсацию температуры свободных концов термоэлектрического термометра, то

$$E(t, t_0) + U_{ab} = E(t, 0),$$

и выходной ток

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{E(t, 0)}{R_{\text{ос}} + \frac{R_{\text{ВХ}} R_{\text{ВЫХ}}}{k_T r_{\text{ВЫХ}}}} =$$

$$= \frac{E(t, 0)}{R_{\text{ос}} + \frac{(R_{\text{ос}} + R_T + r_{\text{ВХ}})(R_{\text{Н}} + r_{\text{ВЫХ}})}{k_T r_{\text{ВЫХ}}}}$$

Подставляя значение параметров в формулу

$$R_{\text{ос}} + \frac{R_{\text{ос}}(R_{\text{Н}} + r_{\text{ВЫХ}})}{k_T r_{\text{ВЫХ}}} + \frac{(R_T + r_{\text{ВХ}})(R_{\text{Н}} + r_{\text{ВЫХ}})}{k_T r_{\text{ВЫХ}}} = \frac{E(t, 0)}{I_{\text{ВЫХ}}},$$

получаем

$$R_{\text{ос}} + \frac{R_{\text{ос}}(20\,000 + 35\,000)}{2500 \cdot 35\,000} + \frac{(30 + 70)(20\,000 + 35\,000)}{2500 \cdot 35\,000} =$$

$$= \frac{33,277}{5}; R_{\text{ос}} = 6,59 \text{ Ом}.$$

02.117. Исходя из уравнения связи между входными и выходными параметрами преобразователя (см. решение 02.116), имеем

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = \frac{E(t, 0)}{R_{\text{ос}} + \frac{R_{\text{ВХ}} R_{\text{ВЫХ}}}{k_T r_{\text{ВЫХ}}}} - \frac{E(t, 0)}{R_{\text{ос}} + \frac{R_{\text{ВХ}} R_{\text{ВЫХ}}}{k_T r_{\text{ВЫХ}}}} =$$

$$= \frac{33,277}{6,59 + \frac{106,597 \cdot 55\,000}{2250 \cdot 35\,000}} - \frac{33,277}{6,59 + \frac{106,597 \cdot 55\,000}{2500 \cdot 35\,000}} = -0,00825 \text{ мА}.$$

Относительная погрешность в конце диапазона

$$\delta I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}} 100 = \frac{-0,00825}{5} 100 = -0,165 \%$$

Нетрудно заметить, что если бы схема преобразователя состояла только из прямого тракта без обратной связи, то уменьшение  $k_T$  на 10% привело бы к уменьшению  $I_{\text{ВЫХ}}$  на 10%. Следовательно, применение глубокой отрицательной обратной связи привело к уменьшению зависимости коэффициента преобразования от изменения характеристик прямого тракта усиления.

02.118. Коэффициент преобразования нормирующего преобразователя (см. решение 02.117)

$$S = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta E_{\text{T}}} = \frac{1}{R_{\text{OC}} + \frac{R_{\text{ВХ}} R_{\text{ВЫХ}}}{k_{\text{T}} r_{\text{ВЫХ}}}}$$

У термоэлектрического термометра типа хромель — копель коэффициент преобразования выше, чем у термометра типа К:  $E_{\text{ХК}}(600^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) > E_{\text{К}}(600^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C})$ . В то же время максимальный выходной ток ( $I_{\text{ВЫХ.МАКС}} = 5 \text{ мА}$ ) должен оставаться неизменным. Для обеспечения этого нужно уменьшить  $S$ , что возможно за счет увеличения  $R_{\text{OC}}$ .

При изменении температуры свободных концов термо-ЭДС термометра хромель — копель изменяется на большую величину, чем градуировки К, поэтому необходимо увеличить компенсирующее напряжение  $U_{ab}$  на вершинах корректирующего моста. Это можно сделать путем увеличения сопротивления  $R_{\text{M}}$  при  $0^\circ\text{C}$  с одновременным увеличением  $R_2$  при неизменных  $R_1$  и  $R_3$  (для обеспечения равновесия моста при  $0^\circ\text{C}$ ).

02.119. Выходное напряжение неравновешенного моста при большом сопротивлении нагрузки и нулевом сопротивлении источника питания

$$U_{ab} = U_{\text{ПИТ}} \left( \frac{R_{\text{M}}}{R_{\text{M}} + R_1} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right).$$

Учитывая, что  $R_1 \gg R_{\text{M}}$  и  $R_3 = R_1$ , можно написать

$$U_{ab} = U_{\text{ПИТ}} \left( \frac{R_{\text{M}} - R_2}{R_1} \right).$$

При температуре свободных концов  $0^\circ\text{C}$   $R_{\text{M}} = R_{\text{M}0}$  и  $U_{ab} = 0$ . При новой температуре свободных концов  $t_0$  сопротивление  $R_{\text{M}}$  увеличится на  $\Delta R_{\text{M}} = R_{\text{M}0} \alpha t_0$  и на выходе появится напряжение (при  $U_{\text{ПИТ}} = \text{const}$ ), подсчитываемое по формуле

$$U_{ab} = U_{\text{ПИТ}} \frac{R_{\text{M}0} \alpha t_0}{R_1}.$$

Уменьшение термо-ЭДС термоэлектрического термометра на  $E(t_0, 0)$  должно компенсироваться увеличением  $U_{ab}$ :

$$E(t_0, 0) = U_{ab}.$$

Следовательно,

$$E(t_0, 0) = U_{\text{ПИТ}} \frac{R_{\text{M}0} \alpha t_0}{R_1}.$$

т. е.

$$R_{\text{M}0} = \frac{R_1 E(t_0, 0)}{U_{\text{ПИТ}} \alpha t_0}.$$

Для  $t_0 = 25^\circ\text{C}$

$$R_{\text{M}0} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{5,5 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 25} = 3,41 \text{ Ом}.$$

Очевидно, что  $R_2 = R_{\text{M}0} = 3,41 \text{ Ом}$ .

### Глава третья

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

03.1. Диаметры трубок могут оказаться различными, и отклонение уровней в трубках может быть различным. Поэтому делать отсчет по уровню в одной трубке не допускается.

03.2. При изменении уровня в первой трубке на  $h_1 = 204 \text{ мм}$  из первой трубки во вторую перетекает воды (в объемных единицах)

$$V = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1.$$

Определим, насколько переместился уровень воды во второй трубке:

$$h_2 = h_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 204 \left( \frac{8}{8,3} \right)^2 = 189,5 \text{ мм}.$$

Следовательно, действительное измеряемое давление

$$p_{\text{д}} = (h_1 + h_2) \rho g = 3,859 \text{ кПа}.$$

Погрешность измерения давления за счет неодинакового изменения уровня в первой и второй трубках

$$\delta p = \frac{p - p_{\text{д}}}{p_{\text{д}}} = \frac{4,0 - 3,859}{3,859} \cdot 100 = 3,65 \%$$

03.3. U-образный манометр фактически измеряет разность между измеряемым и атмосферным давлением. Если барометрическое давление уменьшилось на  $7 \text{ кПа}$ , а абсолютное измеряемое давление осталось неизменным, то показания манометра должны увеличиться на  $7 \text{ кПа}$ .

03.4. Приведение показаний барометра к нормальным условиям производится по формуле [8]

$$p_{\text{н}} = p_0 + \Delta_{14} + \Delta_2 + \Delta_3,$$

где  $\Delta_1$  — поправка на приведение показаний барометра к  $0^\circ\text{C}$ ;  $\Delta_2$  — поправка на приведение показаний барометра к географической широте  $45^\circ$ ;  $\Delta_3$  — поправка на приведение показаний барометра к уровню моря.

В нашем случае поправки имеют следующие значения (табл. П.29, П.30, П.31):  $\Delta_1 = -0,471$  кПа;  $\Delta_2 = 0,124$  кПа;  $\Delta_3 = 0$ ;  $\rho_n = 98,658 - 0,471 + 0,124 + 0 = 98,311$  кПа.

03.5. Значение  $p$  измеряемого давления через высоту  $h$  столба жидкости чашечного манометра вычисляется по формуле

$$p = h\rho g (1 + f/F),$$

где  $\rho$  — плотность заполняющей жидкости (в нашем случае  $\rho = 13\,595$  кг/м<sup>3</sup>);  $f$  и  $F$  — соответственно площади сечения трубки и плюсового сосуда, м<sup>2</sup>, откуда цена деления, соответствующая 1 мм,

$$\begin{aligned} \Delta p_1 &= 0,001 \cdot 13\,595 \cdot 9,80665 \left[ 1 + \left( \frac{6 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] = \\ &= 133,322 \cdot 1,01 = 134,655 \text{ Па} = 1,01 \text{ мм рт. ст.} \end{aligned}$$

Таким образом, изменение показаний на 1 мм соответствует изменению давления на 1,01 мм рт. ст. Легко заметить, что неучет цены деления шкалы манометра вызовет систематическую погрешность — 1 %.

03.6. Уравнение шкалы манометра по перепаду давления имеет вид

$$\Delta p = h\rho g (1 + f/F).$$

Для выполнения поставленного условия необходимо, чтобы

$$(1 + f/F) - 1 \leq 0,001$$

или

$$f/F \leq 0,001.$$

Значит,

$$d/D \leq \sqrt{0,001} = 0,0316,$$

т. е.

$$d \leq 0,0316D.$$

03.7.

В этом случае связь измеряемым перепадом давления  $\Delta p$  и показанием манометра  $h$  будет следующей:

$$\Delta p = hg (\rho_{\text{рт}} - \rho_{\text{в}}) (1 + f/F).$$

Определим цену деления дифманометра для данных условий измерения:

$$\Delta p_1 = 0,001 \cdot 9,80665 (13\,521 - 995,6) (1 + 6^2/60^2) = 122,832 \text{ Па.}$$

Без водяного заполнения цена деления

$$\Delta p'_1 = 0,001 \cdot 9,80665 \cdot 13\,521 \cdot 1,01 = 133,922 \text{ Па.}$$

Следовательно, при заполнении пространства над ртутью водой цена деления уменьшается.

03.8. Применительно к микроманометру чувствительность определяется отношением изменения длины столба жидкости в измерительной трубке к изменению давления, которое вызвало изменение уровня. С уменьшением угла наклона при неизменном измеряемом давлении длина столба увеличивается и, следовательно, чувствительность тоже увеличивается.

03.9. Если отсчет длины столба производится с погрешностью  $\pm \Delta n$  деления, то в первом случае относительная погрешность измерения

$$\delta = \pm \frac{\Delta n}{95} 100 \text{ \%}.$$

При уменьшении  $K$  столбик будет удлиняться, и при  $K=0,3$  его длина составит  $\frac{95 \cdot 0,6}{0,3} = 190$  делений. Если считать, что абсолютная погрешность отсчета ( $\pm \Delta n$  делений) остается прежней, то относительная погрешность измерения

$$\delta' = \pm \frac{\Delta n}{190} 100 \text{ \%},$$

т. е. погрешность уменьшилась вдвое.

В действительности с уменьшением  $K$  за счет размыва мениска в наклонной трубке точность отсчета длины столба жидкости уменьшается. Поэтому относительная погрешность измерения с увеличением чувствительности хотя и уменьшается, но не пропорционально увеличению чувствительности.

03.10. Измеряемое давление связано с показаниями микроманометра выражением

$$p = n\rho g \left( \sin \alpha + \frac{f}{F} \right).$$

Цена деления шкалы прибора при  $20^\circ\text{C}$  вычисляется по формуле

$$K = 0,001 \rho_{20} g \left( \sin \alpha + \frac{f}{F} \right),$$

которая выводится из предыдущей в предположении  $n=1$  мм:

$$K = 0,001 \cdot 808 \cdot 9,80665 \left[ 0,7476 + \left( \frac{4}{70} \right)^2 \right] = 5,94 \text{ Па/мм.}$$

Таким образом, измеряемое микроманометром давление можно определить по формуле

$$p = nK,$$

где  $n$  — показания прибора (длина столба), мм;  $K$  — цена деления прибора, Па/мм.

При изменении  $\rho_{20}$  до значения  $\rho_t$  длина столба изменится и станет равной  $n'$ , при этом для получения прежнего значения  $p$  в формулу следует вводить поправочный множитель  $\Pi_t$ :

$$p = n' K \Pi_t = n' \rho_t g \left( \sin \alpha + \frac{f}{F} \right) = \\ = n' \frac{\rho_t}{\rho_{20}} \rho_{20} g \left( \sin \alpha + \frac{f}{F} \right),$$

откуда получаем  $\Pi_t = \rho_t / \rho_{20}$ . При температуре  $35^\circ\text{C}$   $\Pi_t = 0,793 / 0,808 = 0,981$ .

**О3.11.** Измеряемое давление определяется по длине столба жидкости

$$p = nK,$$

где  $n$  — длина столба жидкости (показания микроманометра);  $K$  — цена деления шкалы прибора.

Как было показано выше (см. решение О3.10), поправочный множитель на температуру имеет вид

$$\Pi_t = \rho_t / \rho_{20}.$$

Рассуждая, как и в О3.10, легко установить, что поправочный множитель на отличие ускорения свободного падения от градуировочного значения будет иметь вид

$$\Pi_g = g_p / g_{гр},$$

где  $g_p$ ,  $g_{гр}$  — ускорение свободного падения при рабочих и градуировочных условиях. Следовательно, действительное измеряемое давление

$$p = nK \Pi_t \Pi_g = 195 \cdot 0,8 \cdot \frac{790}{808} \cdot \frac{9,8156}{9,80665} = \\ = 152,66 \text{ кгс/м}^2 (1506,7 \text{ Па}).$$

**О3.12.** В первом случае ход мембранной коробки (т. е. перемещение центра верхней мембраны) будет вдвое больше, поскольку он будет обусловлен прогибом обеих мембран. Во втором случае работать будет только верхняя мембрана. Поэтому в первом случае коэффициент преобразования мембранной коробки будет вдвое больше.

**О3.13.** Чувствительность манометрической трубчатой пружины по давлению определяется по формуле [2]

$$S = \frac{(1 - \mu^2)}{E} \frac{2R^3}{bh} \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{A\alpha}{\beta + \kappa^2},$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль упругости материала пружины;  $R$  — средний радиус пружины;  $h$  — толщина пружины;  $\kappa =$

$= 4Rh/a$  — главный параметр пружины;  $A = \sqrt{(1 - \cos \gamma)^2 + (\gamma - \sin \gamma)^2}$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты, зависящие от отношения  $a/b$  ( $\alpha$  уменьшается при увеличении отношения  $a/b$ ,  $\beta$  изменяется незначительно). Анализ формулы чувствительности и зависимости  $\alpha$  и  $\beta$  от отношения  $a/b$  (см. табл. 10.2.1 в [2]) показывает, что при уменьшении размера  $b$  (т. е. увеличении отношения  $a/b$ ) чувствительность пружины увеличивается. При неизменных размерах  $a$  и  $b$  и при увеличении угла  $\gamma$  чувствительность также растет, вследствие увеличения коэффициента  $A$ .

**О3.14.** Суммарная жесткость пружины и сильфона

$$K_M = K_{п} + K_C n = 9,20 + 0,25 \cdot 8 = 11,2 \text{ Н/мм},$$

где  $n$  — число гофр.

Противодействующее усилие, создаваемое пружиной и сильфоном при сжатии их на  $h = 4,5$  мм,

$$F_{пр} = K_M h = 11,2 \cdot 4,5 = 50,4 \text{ Н}.$$

Определим, какое давление на сильфон требуется, чтобы создать усилие, равное противодействующему:

$$p = F_{пр} / S_{эф} = 50,4 / 31,5 \cdot 10^{-6} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Следовательно, пределы измерения манометра 0—1,6 МПа.

**О3.15.** Уравнение, связывающее токовый выходной сигнал манометра с входным сигналом (давлением), имеет вид

$$I = \frac{I_{\max}}{p_{\max}} p_{\text{вх}}.$$

Определим выходной сигнал, который должен быть при  $p_{\text{вх}} = 3,2$  МПа:

$$I_d = \frac{5}{4} 3,2 = 4 \text{ мА}.$$

Определим абсолютную погрешность манометра по выходу

$$\Delta I = I - I_d = 3,93 - 4 = -0,07 \text{ мА}.$$

Определим приведенную погрешность манометра

$$\delta = \Delta I / I_{\max} = -0,07 / 5 = -0,014, \text{ или } -1,4 \text{ \%}.$$

Определим абсолютную погрешность манометра по входу

$$\Delta p = \delta (p_{\max} - p_{\min}) = -0,014 \cdot 4 = -0,056 \text{ МПа}.$$

**О3.16.** Уравнение, связывающее выходной сигнал манометра с входным, имеет вид

$$p_{\text{вых}} = 0,02 + p \frac{p_{\text{вых.макс}} - p_{\text{вых.мин}}}{p_{\max} - p_{\min}}.$$

При  $p=0,45$  МПа

$$p_{\text{ВЫХ}} = 0,02 + 0,45 \frac{0,08}{0,6} = 0,08 \text{ МПа.}$$

Определим абсолютную погрешность манометра по выходному сигналу

$$\Delta p_{\text{ВЫХ}} = 0,084 - 0,080 = +0,004 \text{ МПа.}$$

Приведенная погрешность манометра по выходу

$$\delta = \frac{\Delta p_{\text{ВЫХ}}}{p_{\text{ВЫХ.МАКС}} - p_{\text{ВЫХ.МИН}}} = \frac{+0,004}{0,08} 100 = +5 \%.$$

ОЗ.17. Шкала манометра (верхний предел измерения) выбирается таким образом, чтобы рабочий предел измерения (наибольшее рабочее давление) был не менее  $\frac{3}{4}$  верхнего предела измерения при постоянном давлении и не менее  $\frac{2}{3}$  верхнего предела измерения при переменном давлении.

Верхние пределы измерения манометра выбираются из ряда

$$1; 1,6; 2,5; 4; 6 \cdot 10^n,$$

где  $n$  — любое целое положительное или отрицательное число.

Выбираем верхние пределы измерения:

а)  $\frac{0,3}{3/4} = 0,4$  МПа, выбираем верхний предел измерения не более 0,4 МПа и шкалу 0—0,4 МПа;

б)  $\frac{26}{3/4} = 34,7$  МПа, т. е. желательно, чтобы верхний предел был не более 34,7 МПа. Однако приходится выбирать шкалу 0—40 МПа, так как ближайшая шкала с меньшим пределом 0—25 МПа не может быть использована.

ОЗ.18. Неодинаковыми, так как на показания манометров влияет давление, создаваемое столбом жидкости, заполняющей импульсную трубку (см. рис. 3.4). Наибольшее значение покажет манометр 3, наименьшее — манометр 1. На показания манометра 2 столб жидкости не будет оказывать влияния, так как место отбора давления и манометр расположены на одном уровне.

ОЗ.19. Если манометр установлен ниже паропровода, то импульсная линия заполнена конденсатом и манометр дает показания, завышенные относительно давления в паропроводе на значение гидростатического давления конденсата:

$$\Delta p = h\rho g = 5 \cdot 985,4 \cdot 9,80665 = 48\,330 \text{ Па} \approx 0,05 \text{ МПа.}$$

Следовательно, действительное давление

$$p_{\text{д}} = 5 - 0,05 = 4,95 \text{ МПа.}$$

ОЗ.20. Дифманометр должен быть сконструирован таким образом, чтобы при изменении температуры среды (при неизменном измеряемом перепаде давлений) плунжер, прикрепленный к центру верхней мембраны, не перемещался. Это возможно только в том случае, если увеличение объема смеси, заполняющей мембранный блок, за счет увеличения температуры не вызовет изменения объема верхней коробки. Очевидно, что для этого необходимо увеличение объема нижней (плюсовой) коробки, а это возможно, если ее жесткость много меньше жесткости верхней (минусовой) коробки.

ОЗ.21. Коэффициент преобразования не изменится. Это можно доказать следующим образом. При нулевом перепаде колокол висит на растянутой пружине, длину которой в этом положении обозначим через  $x$ . При этом вес колокола  $G$  уравновешивается силой упругости пружины

$$G = K_{\text{п}} x,$$

где  $K_{\text{п}}$  — удельная жесткость пружины.

При разности давлений  $\Delta p$  колокол поднимается на  $\Delta x$ , и условие его равновесия запишется в виде

$$G = \Delta p F + K_{\text{п}} (x - \Delta x),$$

где  $F$  — площадь дна колокола.

Вычитая из одного уравнения другое, получаем

$$\Delta p F = K_{\text{п}} \Delta x.$$

Следовательно, коэффициент преобразования будет определяться выражением

$$S = \Delta x / \Delta p = F / K_{\text{п}},$$

т. е. он оказывается не зависящим от веса колокола.

ОЗ.22. Для расчета можно воспользоваться уравнением, связывающим перепад давления  $\Delta p$  и перемещение колокола  $\Delta x$  (см. решение ОЗ.21):

$$\Delta x = \Delta p \frac{F}{K_{\text{п}}}, \text{ откуда } K_{\text{п}} = \frac{\Delta p}{\Delta x} F.$$

Подставляя заданные значения, получаем

$$K_{\text{п}} = \frac{1600 \cdot 9,80665}{4 \cdot 10^{-3}} \frac{\pi (0,05)^2}{4} = 7698 \text{ Н/м.}$$

ОЗ.23. Из уравнения, связывающего перемещение колокола с перепадом давления (см. решение ОЗ.21), очевидно, что  $\Delta x$  не зависит от плотности заполняющей жидкости. Однако следует иметь в виду, что под действием перепада происходит перемещение не только колокола, но и жидкости. Уровень жидкости под колоколом опускается, а

вне колокола поднимается, причем разность уровней  $\Delta H$  определяется измеряемым перепадом давлений  $\Delta p$  и плотностью жидкости  $\rho$ :

$$\Delta p = \Delta H \rho g.$$

Плотность жидкости должна иметь такое значение, чтобы  $\Delta H$  было меньше допустимого. Например, если  $\rho$  будет очень мало, то при том же  $\Delta p$  значение  $\Delta H$  будет велико и жидкость может попасть в импульсную трубку. Поэтому плотность жидкости должна выбираться в соответствии с диапазоном измерения дифманометра и размерами колокола.

О3.24. Уравнение шкалы кольцевого дифманометра имеет вид [9]

$$\varphi = \arcsin \frac{Rf}{Ga} \Delta p,$$

где  $\Delta p$  — разность давлений, Па;  $G$  — вес груза, Н;  $a$  — расстояние от оси вращения кольца до центра тяжести груза, м;  $f$  — сечение кольца, м<sup>2</sup>;  $R$  — средний радиус кольца м;  $\varphi$  — угол поворота, рад.

Из уравнения легко определить вес груза

$$G = \frac{Rf}{a \sin \varphi} \Delta p = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot 12,8 \cdot 10^{-4}}{65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,766} 4000 = 5,14 \text{ Н.}$$

О3.25. Изменятся, стрелка сдвинется до отказа к нулевой отметке. При правильном включении сигналы ДТП-1 и ДТП-2 равны и включены в противофазе, так что

$$\Delta e_2 - \Delta e_1 = 0.$$

При изменении фазы питания ДТП-1 на 180°  $\Delta e_1$  изменит знак на противоположный, поэтому на усилитель поступит сигнал

$$\Delta U = \Delta e_2 + \Delta e_1 \neq 0.$$

Следящая система будет стремиться уменьшить этот сигнал путем уменьшения  $\Delta e_2$ , что возможно при смещении стрелки к нулю. Однако при нулевом положении стрелки  $\Delta e_2 = 0$ , но  $\Delta e_1 \neq 0$ , поэтому указатель будет сдвинут до упора.

О3.26. При правильной фазировке преобразователей в режиме компенсации положения их рамок должны быть одинаковыми, т. е.  $e_1 = e_2$ . В этом случае положение стрелки на шкале будет соответствовать измеряемому давлению (при условии совпадения характеристик преобразователей и встречного включения обмоток). При изменении фазы питания характеристика преобразователя вторичного прибора (рис. О3.1, а) остается неизменной, а характеристика преобразователя первичного прибора (рис. О3.1, б) займет положение, указанное штрихпунктиром, при этом компенсирующее напряжение +0,5 В будет вырабатываться при положении указателя на отметке 1 МПа.

О3.27. Для решения нужно сравнить характеристики первичного ПФ1 (рис. О3.2, а) и вторичного ПФ3 преобразователей (рис. О3.2, б).

Рассуждая, так же, как и в О3.26, легко установить, что вторичный прибор будет показывать 1 МПа. При  $p=0$  указатель будет стоять на упоре в начале шкалы. При  $p=2$  МПа прибор покажет нуль, и при  $p=4$  МПа показание прибора будет 2 МПа.

О3.28. Работа электросиловых преобразователей основана на принципе силовой компенсации действия чувствительного элемента 1 (см. рис. 3.9) действием устройства обратной связи 6. В изображенной схеме при увеличении напора Т-образный рычаг 2 начнет поворачиваться

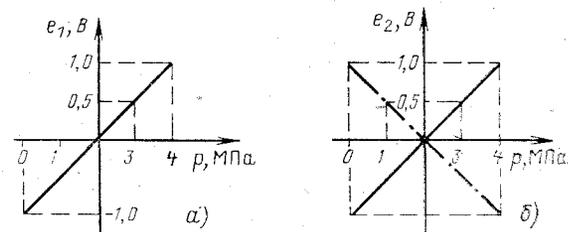


Рис. О3.1

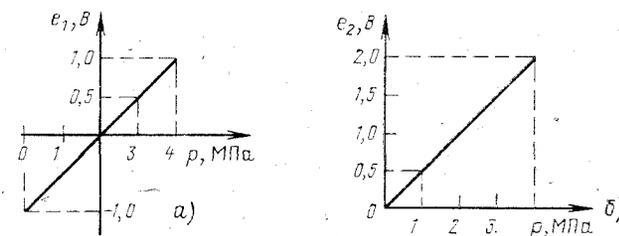


Рис. О3.2

против часовой стрелки, перемещая Г-образный рычаг 3 и далее плунжер индикатора рассогласования 4 вниз и вызывая этим увеличение выходного тока 1 усилителя 5. Действие катушки обратной связи должно быть таким, чтобы вернуть плунжер практически в прежнее положение. Очевидно, что это возможно, если при появлении 1 катушка будет выталкиваться из магнитопровода.

О3.29. Возможно. Для этого на рис. 3.9 катушку следует расположить слева от рычага 7. В реальных приборах используются устройства обратной связи, работающие по такой схеме.

О3.30. В состоянии равновесия на чувствительный элемент действуют следующие силы:  $q_n$ , создаваемая измеряемым давлением,  $q_n$ , создаваемая устройством обратной связи, и  $q_n$ , создаваемая пружиной

корректора. Силы  $q_{\text{н}}$  и  $q_{\text{к}}$  всегда направлены встречно, знак  $q_{\text{к}}$  может быть любым:  $q_{\text{н}} = q_{\text{к}} + q_{\text{п}}$ . Если пружина натянута, то  $q_{\text{н}} = q_{\text{к}} + q_{\text{п}}$ . В этом случае выходной ток будет иметь заниженное значение, так как часть усилия  $q_{\text{п}}$  компенсируется усилием  $q_{\text{н}}$ , причем занижение растет с увеличением натяжения пружины. Отсюда следует, что в рассматриваемой задаче натяжение пружины надо увеличить.

ОЗ.31. Изменение диапазона измерения осуществляется изменением положения подвижной опоры 9. При разборе задачи следует помнить, что в приборах с силовой компенсацией в момент равновесия усилие, развиваемое чувствительным элементом,  $q_{\text{н}}$  равно усилию  $q_{\text{к}}$ , действующему на него со стороны устройства обратной связи, т. е. в точке  $m$   $q_{\text{н}} = q_{\text{к}}$  (действием пружины корректора пренебрегаем).

Увеличение диапазона измерения означает, что выходной ток  $I$  должен принимать значение 5 мА при большем давлении  $p'_{\text{макс}}$ , в то же время до переградуировки  $I = 5$  мА при  $p_{\text{макс}} < p'_{\text{макс}}$ . Усилие  $q_{\text{о.с.}}$ , с которым катушка устройства обратной связи 6 действует в точке  $a$  на рычаг 7, при переградуировке не изменяется. Но усилие  $q_{\text{н}}$ , действующее на чувствительный элемент в точке  $m$ , зависит от положения опоры 9, причем эта зависимость может быть легко получена при известных плечах рычагов:

$$q_{\text{к}} = q_{\text{о.с.}} \frac{ab}{bc} \frac{dc}{fm} \frac{ef}{de},$$

где  $b, d, f$  — опоры рычагов;  $c, e$  — точки подвижного соединения рычагов. Так как длина плеч  $ab, bc, cd, fm$  остается неизменной, то

$$q_{\text{к}} = q_{\text{о.с.}} K \frac{ef}{de}$$

и, таким образом, с подъемом опоры вверх  $q_{\text{к}}$  увеличивается ( $ef$  растет,  $de$  — уменьшается). Поскольку с увеличением диапазона измерения  $q_{\text{н}}$  растет, то опора 9 должна быть сдвинута вверх таким образом, чтобы восстановилось равенство  $q_{\text{н}} = q_{\text{к}}$ . После установки верхнего предела измерения необходимо корректором 8 скорректировать нуль, после чего вновь проверить верхний предел и вновь нуль. Операции повторяются до окончательной установки нуля и верхнего предела.

ОЗ.32. При выводе зависимости  $I = f(p)$  удобнее рассматривать перемещение плунжера индикатора рассогласования от нейтрали при увеличении давления от нулевого. При нарастании давления от нулевого до значения  $p$  чувствительный элемент через рычажную систему отводит плунжер от нейтрального положения, вызывая этим изменение выходного тока. По мере увеличения тока увеличивается противодействие устройства обратной связи, которое стремится вернуть плунжер в исходное положение. При определенном  $I$  усилия в точке  $m$  уравновесятся и рычажная система останется в покое, но плунжер при этом

в исходное (нейтральное) положение не возвратится, так как в противном случае выходной ток был бы равен нулю. Если бы не было противодействия обратной связи, то перемещение плунжера под действием чувствительного элемента с линейной характеристикой линейно определялось бы значением  $p$ :

$$S_1 = k_1 p.$$

Аналогично перемещение под действием обратной связи  $S_2 = k_2 I$  (для первой разновидности обратной связи).

Разность  $S_1 - S_2$  будет остаточным отклонением плунжера от первоначального положения, значение которого линейно связано с напряжением  $\Delta U$ , снимаемым с индикатора рассогласования. При линейном усилителе  $I = k_y \Delta U$ . Окончательно получим

$$I = k_y \Delta U = k_y k_3 (k_1 p - k_2 I),$$

или

$$I = \frac{k_y k_1 k_3}{1 + k_y k_2 k_3} p \approx \frac{k_1}{k_2} p,$$

где  $k_3$  — линейный коэффициент, устанавливающий зависимость между напряжением  $\Delta U$  и смещением плунжера от нейтрали.

Следовательно, для первой разновидности обратной связи статическая характеристика преобразователя линейна.

Для второй разновидности обратной связи

$$S_2 = k_2 I^2;$$

$$I = k_y \Delta U = k_y k_3 (k_1 p - k_2 I^2),$$

или

$$k_y k_2 k_3 I^2 + I = k_y k_1 k_3 p.$$

Разделив все члены на  $k_y$  и учитывая, что  $1/k_y = 0$ , имеем

$$k_2 I^2 = k_1 p; \quad I = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} p = k_4 \sqrt{p}.$$

Преобразователь с такими характеристиками используется в дифманометрах-расходомерах, измеряющих перепад на сужающих устройствах.

ОЗ.33. Для измерения разрежения. Выходное давление усилителя 5 воздействует на сильфон обратной связи 4 и далее на Г-образный рычаг 3 и стремится повернуть Т-образный рычаг 2 по часовой стрелке. Очевидно, что действие измерительного сильфона 1 должно быть обратным, т. е. усилие на Т-образный рычаг со стороны сильфона 1 должно быть направлено вниз. Это возможно, если при увеличении (по абсолютному значению) измеряемого параметра сильфон сжимается, т. е. если находится под разрежением. Чтобы прибор мог измерять на-

пор, сильфон должен быть подключен к правой части рычага 2 в точке  $b$ . Остальные элементы схемы, в том числе индикатор рассогласования, остаются неизменными.

ОЗ.34. При компенсации усилий в точке  $b$  усилие со стороны сильфона обратной связи 4 должно уравниваться усилием, создаваемым чувствительным элементом 1 и пружиной корректора нуля. Со стороны обратной связи к точке  $b$  приложено усилие

$$q_K = S_0 p_{\text{ВЫХ}} \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4},$$

где  $l_2 = 115 - 56 = 59$  мм.

При нулевом измеряемом давлении

$$q_{K0} = S_0 p_{\text{ВЫХ.Н}} \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^4 \frac{40 \cdot 56}{59 \cdot 38} = 4 \text{ Н},$$

где  $p_{\text{ВЫХ.Н}} = 0,02$  МПа — значение выходного давления, соответствующее нулевому входному давлению. Усилие  $q_{K0}$  должно компенсироваться усилием пружины корректора нуля, которое, очевидно, не должно зависеть от измеряемого давления.

При  $p_{\text{ВЫХ}} = 0,1$  МПа

$$q_K = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^5 \frac{40 \cdot 56}{59 \cdot 38} = 20 \text{ Н}.$$

Следовательно, искомое максимальное входное давление  $p_{\text{МАКС}}$  должно создавать в точке  $b$  усилие

$$q_{\text{И}} = q_K - q_{K0} = 20 - 4 = 16 \text{ Н}.$$

Так как  $q_{\text{И}} = p_{\text{МАКС}} S_{\text{И}}$ , имеем

$$p_{\text{МАКС}} = q_{\text{И}} / S_{\text{И}} = 16 / 10 \cdot 10^{-4} = 0,016 \text{ МПа}.$$

ОЗ.35. Составим уравнения равновесия для случаев  $p=0$  и  $p=p_{\text{МАКС}}$ , используя общее уравнение равновесия

$$p_{\text{ВЫХ}} S_0 \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4} = q_0 + p S_{\text{И}},$$

где  $q_0$  — усилие в точке  $b$ , создаваемое пружиной корректора нуля, которое должно быть равным усилию обратной связи при  $p_{\text{ВЫХ.Н}} = 0,02$  МПа = 20 кПа.

Отсюда

$$p_{\text{ВЫХ}} S_0 \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4} = p_{\text{ВЫХ.Н}} S_0 \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4} + p S_{\text{И}}.$$

При  $p = 25$  кПа и  $p_{\text{ВЫХ}} = 0,1$  МПа = 100 кПа имеем

$$100 \cdot 2 \frac{40 l_3}{l_2 \cdot 38} = 20 \cdot 2 \frac{40 l_3}{l_2 \cdot 38} + 25 \cdot 10.$$

Окончательно получим соотношение плеч  $l_3 / l_2 = 1,49$ .

Из дополнительного соотношения  $l_2 + l_3 = 115$  мм получаем  $l_3 = 68,7$  мм.

ОЗ.36. В приборе с диапазоном измерения 0—16 кПа усилие в точке  $b$ , создаваемое пружиной корректора нуля,  $q_{K0} = 4$  Н. Это усилие сохранится и после переградуировки, поскольку по условию задачи степень сжатия пружины не изменилась. При  $p=0$  и новых значениях  $l_3$  и  $l_2$   $q_{K0}$  должно уравниваться усилием обратной связи

$$q_{K0} = p_{\text{ВЫХ}} S_0 \frac{l_1 l_3}{l_2 l_4},$$

отсюда

$$p_{\text{ВЫХ}} = \frac{q_{K0}}{S_0} \frac{l_2 l_4}{l_1 l_3} = \frac{4}{2 \cdot 10^{-4}} \frac{46,3 \cdot 38}{40 \cdot 68,7} = 12,8 \text{ кПа}.$$

Очевидно, что при переградуировке необходимо корректировать нижний предел изменения выходного сигнала. Поэтому переградуировка производится последовательной корректировкой верхнего и нижнего пределов изменения выходного сигнала.

## Глава четвертая

### ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

О4.1. Полное давление  $p_1$ , действующее в сечении  $a-a$  со стороны барабана, определяется давлением  $p$  пара и гидростатическим давлением, создаваемым столбом  $H$  воды:

$$p_1 = p + H \rho_{\text{В.Н}} g,$$

где  $\rho_{\text{В.Н}}$  — плотность воды в барабане, на линии насыщения при  $p = 10$  МПа,  $\rho_{\text{В.Н}} = 691,9$  кг/м<sup>3</sup> (см. табл. П.33).

Полное давление  $p_2$ , действующее в сечении  $a-a$  со стороны воды в водомерном стекле,

$$p_2 = p + h \rho_{\text{В}} g,$$

где  $\rho_{\text{В}}$  — плотность воды в водомерном стекле при  $t = 150^\circ\text{C}$  и  $p = 10$  МПа,  $\rho_{\text{В}} = 922,1$  кг/м<sup>3</sup> (см. табл. П.33).

В статическом режиме давления  $p_1$  и  $p_2$  должны быть равны. Отсюда имеем

$$h = H \frac{\rho_{\text{В.Н}}}{\rho_{\text{В}}} = 0,5 \frac{691,9}{922,1} = 0,375 \text{ м}.$$

Таким образом, за счет разности температур уровень в водомерном стекле будет занижен относительно действительного значения на 125 мм, или на 25 %.

О4.2. Новое значение плотности  $\rho_B = 715,36 \text{ кг/м}^3$ , следовательно,

$$h = H \frac{\rho_{BH}}{\rho_B} = 0,5 \frac{691,9}{715,36} = 0,484 \text{ м.}$$

Уровень в водомерном стекле будет занижен относительно действительного значения на 0,016 м, или на 3,2 %. Как видно, погрешность измерения уменьшилась, но все равно осталась значительной.

О4.3. Нельзя. В этой схеме включения при  $H=0$  на дифманометр действует перепад  $\Delta p = 0,03 \text{ МПа}$ . При максимальном уровне  $H_{\text{макс}} = 3 \text{ м}$  перепад возрастает до 0,06 МПа, что превышает верхний предел измерения дифманометра. Для использования этого дифманометра необходимо в минусовой камере создать давление, равное давлению в плюсовой камере при  $H=0$ . Это можно сделать, подключив к минусовой камере импульсную трубку необходимой длины, заполненную водой.

О4.4. При изменении уровня от нуля до максимума изменяется перепад давления между плюсовой и минусовой камерами дифманометра. При этом часть воды, находящейся в минусовой камере, вытесняется в минусовую импульсную трубку. Количество вытесненной воды зависит от перепада давления и конструкции дифманометра. Вода, вытесненная в минусовую импульсную трубку, повышает в ней уровень, что вызывает занижение показаний уровнемера, причем абсолютная погрешность измерения равна увеличению уровня жидкости в трубке.

Изменение уровня воды в минусовой трубке за счет вытеснения 4 см<sup>3</sup> воды из дифманометра будет равным

$$\Delta h = \frac{4\Delta V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{\pi 10^2} = 50,9 \text{ мм.}$$

Для уровня  $H_{\text{макс}} = 400 \text{ мм}$  относительная погрешность измерения

$$\delta H = -\frac{50,9}{400} 100 = -12,73 \text{ \%}.$$

О4.5. Составим уравнение равновесия давлений столбов жидкостей, действующих в сечении  $a-a$  (рис. 4.4), при текущем значении  $H$ :

$$H\rho_B + (H_0 + h_1)\rho_B = (h_1 + h_2)\rho_{PT} + (H_0 - h_2)\rho_B + h_3\rho_B.$$

Разность уровней ртути в дифманометре (пропорциональную показаниям дифманометра) можно выразить формулой

$$h = h_1 + h_2 = h_2 \left( 1 + \frac{D_c^2}{D_n^2} \right).$$

Тогда после некоторых преобразований имеем

$$H\rho_B + h\rho_B = h\rho_{PT} + h_3\rho_B;$$

$$h_3 = h_2 \frac{D_c^2}{d^2} = \frac{h}{1 + \frac{D_c^2}{D_n^2}} \frac{D_c^2}{d^2},$$

где  $d$  — диаметр импульсной трубки.  
Окончательно

$$H\rho_B = h(\rho_{PT} - \rho_B) + h \frac{1}{1 + \frac{D_c^2}{D_n^2}} \frac{D_c^2}{d^2} \rho_B.$$

Отсюда определяем

$$h = \frac{H\rho_B}{(\rho_{PT} - \rho_B) + \frac{1}{\left(1 + \frac{D_c^2}{D_n^2}\right)} \frac{D_c^2}{d^2} \rho_B}$$

Для заданных условий

$$h = \frac{0,4 \cdot 998,2}{(13546 - 998,2) + \frac{1}{1 + \frac{64,6^2}{77^2}} \frac{64,6^2}{10^2} 998,2} = 0,0108 \text{ м.}$$

Если бы показания дифманометра не были искажены изменением уровня  $h_3$  в импульсной трубке, то получили бы

$$h_d = \frac{H\rho_B}{(\rho_{PT} - \rho_B)} = \frac{0,4 \cdot 998,2}{13546 - 998,2} = 0,0318 \text{ м.}$$

Таким образом, погрешность измерения уровня поплавковым дифманометром, вызванная изменением уровня в минусовой трубке, составит

$$\delta H = \frac{h - h_d}{h_d} 100 \% = \frac{0,0108 - 0,0318}{0,0318} 100 = -66 \text{ \%}.$$

Такое значительное увеличение погрешности вызвано тем, что в поплавковом дифманометре для уравнивания перепада давления из поплавкового сосуда в сменный должны переместиться значительные

объемы уравнивающей жидкости (ртути). В нашем случае перемещенный объем составляет

$$V = h_2 F_c = h \frac{\pi D_c^2}{4 \left(1 + \frac{D_c^2}{D_n^2}\right)} = 1,08 \frac{\pi \cdot 6,46^2}{4 \left(1 + \frac{6,46^2}{7,7^2}\right)} = 20,8 \text{ см}^3.$$

Перемещенный объем в поплавковом дифманометре оказался почти в 6 раз больше, чем в мембранном. Следовательно, во столько же раз увеличилась погрешность.

О4.6. В этом случае перемещение объема жидкости в  $20,8 \text{ см}^3$  приведет к увеличению уровня в уравнительном сосуде

$$h_3 = \frac{4V}{\pi d_c^2} = \frac{4 \cdot 20,8}{\pi \cdot 10^2} = 0,265 \text{ см} = 2,65 \text{ мм}.$$

Погрешность, вызванная таким изменением уровня в минусовой импульсной трубке, будет достаточно малой (около 0,7 %). В этом заключается смысл применения уравнительных сосудов при измерении уровня гидростатическим способом.

О4.7. Дифманометр-уровнемер определяет уровень по давлению столба жидкости. Однозначная связь между гидростатическим давлением и уровнем может быть только в том случае, если плотность жидкости постоянна. Когда плотность жидкости в условиях эксплуатации не соответствует плотности при градуировке, возникает погрешность измерения. Если плотность жидкости при градуировке  $\rho_{гр}$  и уровень жидкости в емкости  $H$ , то на дифманометр действует перепад

$$\Delta p_d = H \rho_{гр} g.$$

При изменении плотности и неизменном уровне на дифманометр будет действовать перепад

$$\Delta p = H \rho g.$$

Абсолютная погрешность измерения перепада

$$\Delta(\Delta p) = \Delta p - \Delta p_d = Hg(\rho - \rho_{гр}) = \Delta p \frac{\rho - \rho_{гр}}{\rho}.$$

Очевидно, что для определения действительного уровня показания уровнемера следует умножить на поправочный множитель

$$K = \rho_{гр} / \rho.$$

В нашем случае  $\rho_{гр} = 995,6 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho = 965,3 \text{ кг/м}^3$ ; следовательно,  $K = 995,6/965,3 = 1,03$ . Неучет изменения плотности воды вызовет занижение показаний на 3 %.

О4.8. Для решения задачи составим выражение для перепада, действующего на дифманометр при произвольном уровне  $H$ . При низком

давлении в емкости плотностью пара по сравнению с плотностью воды можно пренебречь. Поэтому

$$\Delta p = (H_{\text{макс}} - H) \rho_v g.$$

Следовательно, в рассматриваемой схеме измерения перепад, действующий на дифманометр, и, следовательно, показания уровнемера зависят не только от измеряемого уровня, но и от плотности жидкости.

О4.9. При увеличении давления начинает увеличиваться плотность пара и давление столба пара становится соизмеримым с давлением столба воды. Поэтому перепад, действующий на дифманометр (см. рис. 4.6), будет определяться следующим образом:

$$\Delta p = H_{\text{макс}} \rho_{в.н} g - H \rho_{в.н} g - (H_{\text{макс}} - H) \rho_{п.н} g,$$

где  $\rho_{в.н}$  и  $\rho_{п.н}$  — плотность воды на линии насыщения и плотность насыщенного пара.

Уравнение можно преобразовать к виду

$$\Delta p = (H_{\text{макс}} - H) (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g.$$

Аналогично О4.7 можно установить, что изменение разности  $\rho_{в.н} - \rho_{п.н}$  относительно градуировочного значения  $(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})_{гр}$  вызывает необходимость умножения показаний уровнемера на множитель  $K$ :

$$K = \frac{(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})_{гр}}{(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})}.$$

В нашем случае

$$K = \frac{958,95 - 0,58}{691,9 - 54,17} = 1,504,$$

т. е. неучет изменения плотности воды и пара приведет к занижению показаний на 50 %.

Из анализа полученных результатов очевидно, что при переменных давлении и температуре в показания уровнемера необходимо вводить поправку на изменение плотности не только воды, но и пара.

О4.10. Для ответа на вопрос запишем выражение для перепада давления, действующего на дифманометр (см. рис. 4.7):

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{H_{\text{макс}}}{2} \rho_{в.н} g + \frac{H_{\text{макс}}}{2} \rho_v g - H \rho_{в.н} g - (H_{\text{макс}} - H) \rho_{п.н} g = \\ &= (H_{\text{макс}} - H) (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g + \frac{H_{\text{макс}}}{2} (\rho_v - \rho_{в.н}) g, \end{aligned}$$

где  $\rho_{п.н}$  и  $\rho_{в.н}$  — плотность пара и воды в барабане при температуре насыщения;  $\rho_v$  — плотность воды в импульсной трубке.

По сравнению с (О4.9) появляется дополнительная составляющая в выражении для перепада

$$\frac{H_{\text{макс}}}{2} (\rho_v - \rho_{в.н}) g.$$

Оценим погрешность показаний для обоих вариантов, вызванную изменением параметров в барабане котла:

для 10 МПа

$$(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})' = 691,9 - 54,2 = 637,7 \text{ кг/м}^3;$$

$$(\rho_{в} - \rho_{в.н})' = 999,9 - 691,9 = 308,0 \text{ кг/м}^3;$$

для 20 МПа

$$(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})'' = 503,3 - 161,8 = 341,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$(\rho_{в} - \rho_{в.н})'' = 1004,0 - 503,3 = 500,7 \text{ кг/м}^3.$$

Относительная погрешность  $\delta H$  измерения уровня при изменении разности плотностей для рис. 4.6 может быть определена из выражения

$$\delta H = \frac{(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})' - (\rho_{в.н} - \rho_{п.н})''}{(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})''} = \frac{637,7 - 341,5}{341,5} 100 = 86,7\%.$$

Эта погрешность не зависит от текущего значения уровня. Относительная погрешность измерения уровня для рис. 4.7 определяется выражением

$$\delta H = \frac{(H_{\max} - H)(\rho_{в.н} - \rho_{п.н})' + \frac{H_{\max}}{2}(\rho_{в} - \rho_{в.н})'}{(H_{\max} - H) \cdot (\rho_{в.н} - \rho_{п.н})'' + \frac{H_{\max}}{2}(\rho_{в} - \rho_{в.н})''} - 1, \quad (O4.1)$$

т. е. относительная погрешность зависит от текущего значения уровня.

При  $H=0$

$$\delta H = \left( \frac{0,5 \cdot 637,7 + 0,25 \cdot 308}{0,5 \cdot 341,5 + 0,25 \cdot 500,7} - 1 \right) 100 = 33,8\%.$$

При  $H=0,5H_{\max}$

$$\delta H = \left( \frac{0,25 \cdot 637,7 + 0,25 \cdot 308}{0,25 \cdot 341,5 + 0,25 \cdot 500,7} - 1 \right) 100 = 12,3\%.$$

При  $H=H_{\max}$

$$\delta H = \left( \frac{308}{500,7} - 1 \right) 100 = -38,5\%.$$

Таким образом, оказывается, что погрешность измерения уровня, возникающая в результате изменения температуры и давления в барабане, во втором варианте меньше. В нашем случае числитель выражения (O4.1) обращается в 0 при  $H \approx 0,675H_{\max}$ . Однако при всех других значениях уровня погрешность оказывается значительной. Поэтому для измерения уровня жидкости в сосудах с изменяющимися

давлением и температурой следует предусматривать возможность введения коррекции в показания уровнемера.

O4.11. Перепад давления, действующий на дифманометр, определяется из выражения

$$\Delta p = (H_6 \rho_{в.н} + h \rho_{в}) g - (H_6 \rho_{п.н} + h \rho_{в}) g = H_6 (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g.$$

Таким образом, перепад давления (см. рис. 4.8) зависит только от разности плотностей воды и пара при рабочих условиях и базового размера  $H_6$  и не зависит от уровня воды в барабане. Такая схема может быть использована для введения коррекции на изменение плотностей воды и пара с изменением давления и температуры.

O4.12. Перепад  $\Delta p_1$ , действующий на дифманометр ДМ1, будет равен (см. решение O4.10)

$$\Delta p_1 = (H_{\max} - H)(\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g.$$

Перепад  $\Delta p_2$ , действующий на ДМ2 (см. решение O4.11),

$$\Delta p_2 = H_6 (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g.$$

Следовательно, при  $U_1 = k U_2$

$$(H_{\max} - H)(\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g = k H_6 (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g,$$

откуда

$$k = \frac{H_{\max} - H}{H_6} = \frac{H_{\max}}{H_6} - \frac{1}{H_6} H.$$

Следовательно, коэффициент преобразования следящей системы не зависит от плотностей воды и пара и линейно зависит только от  $H$ . Если положение указателя вторичного прибора будет однозначно определяться значением  $k$ , то показания такого уровнемера будут определяться только текущим значением измеряемого уровня при любых параметрах среды.

O4.13. У дифманометров-уровнемеров (см. рис. 4.10) токовый выходной сигнал пропорционален перепаду:

$$I_1 = k_1 \Delta p_1; \quad I_2 = k_2 \Delta p_2.$$

На вход электронного усилителя ЭУ поступает сигнал

$$\Delta U = I_1 R_1 - I_2 R_{ab},$$

где  $R_{ab}$  — сопротивление участка реохорда  $R_2$  между точками  $a$  и  $b$ .

Электронный усилитель ЭУ воздействует на реверсивный двигатель РД, перемещающий движок реохорда  $R_2$  до тех пор, пока  $\Delta U$  не будет равно нулю, т. е.

$$R_{ab}/R_1 = I_1/I_2 = K.$$

Следовательно, отношение  $K=R_{ab}/R_1$  изменяется при перемещении движка и, по сути, является показанием прибора. Таким образом,

$$K = I_1/I_2 = k_1 \Delta p_1/k_2 \Delta p_2.$$

Подставляя  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  из 04.12, окончательно получаем

$$K = \frac{k_1 (H_{\max} - H) (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g}{k_2 H_6 (\rho_{в.н} - \rho_{п.н}) g} = \frac{k_1}{k_2} \left( \frac{H_{\max}}{H_6} - \frac{H}{H_6} \right).$$

Таким образом, показания прибора линейно связаны с уровнем и не зависят от плотностей воды и пара. Очевидно, что при  $H = H_{\max}$   $K = 0$ , т. е.  $R_{ab} = 0$  и движок реохорда будет находиться в крайнем нижнем положении.

04.14. Если не происходит изменения массы жидкости, а происходит только одновременное изменение плотности и объема в зависимости от температуры, то показания гидростатического уровнемера изменяться не будут (при неизменном объеме резервуара).

Это легко показать следующим образом. При изменении температуры плотность керосина изменяется в соответствии с выражением

$$\rho_t = \rho_0 / (1 + \beta t),$$

где  $\rho_t$  и  $\rho_0$  — плотности при  $t$  и  $0^\circ\text{C}$ ;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения керосина.

Соответственно объем жидкости также изменяется

$$V_t = V_0 (1 + \beta t).$$

Для цилиндрического вертикального резервуара уровень жидкости  $h$  и ее объем  $V$  связаны соотношением

$$h = 4V / \pi D^2,$$

где  $D$  — диаметр резервуара.

Следовательно, при изменении температуры уровень будет изменяться при постоянных размерах резервуара в соответствии с выражением

$$h_t = h_0 (1 + \beta t).$$

Гидростатический уровнемер работает по принципу измерения давления, создаваемого столбом жидкости,  $p = h \rho g$ . При температуре  $0^\circ\text{C}$   $p_0 = h_0 \rho_0 g$ . При температуре  $t$

$$p_t = h_t \rho_t g = h_0 (1 + \beta t) \frac{\rho_0}{(1 + \beta t)} g = h_0 \rho_0 g = p_0.$$

Таким образом, показания уровнемера не изменяются, в то время как действительное значение уровня при понижении температуры уменьшается.

04.15. Проверим плавучесть поплавка. Вес поплавка

$$G = V_{\text{п}} \rho_{\text{п}} g = \frac{4}{3} \pi \left[ \left( \frac{D_{\text{п}}}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_{\text{п}} - 2b}{2} \right)^3 \right] \rho_{\text{п}} g = \frac{4}{3} \pi \left[ \left( \frac{100}{2} \right)^3 - \left( \frac{90}{2} \right)^3 \right] 1500 \cdot 10^{-9} \cdot 9,80665 = 2,089 \text{ Н}.$$

Выталкивающая сила при полном погружении поплавок

$$F = \frac{4}{3} \pi R_{\text{п}}^3 \rho_{\text{в}} g = \frac{4}{3} \pi \cdot 50^3 \cdot 1230 \cdot 10^{-9} \cdot 9,80665 = 6,315 \text{ Н}.$$

Следовательно, поплавок будет плавать, так как  $F > G$ . Вес груза должен быть больше суммы веса троса, на котором подвешен поплавок, плюс сила трения. Примем его равным 4Н.

Угол поворота барабана при перемещении поплавка на 500 мм составит

$$\varphi = \frac{\Delta H}{\pi D_6} 360^\circ = 1148^\circ.$$

Для преобразования такого угла поворота в перемещение стрелки от начала до конца шкалы необходимо, чтобы коэффициент преобразования (передаточное число) системы передачи был равен

$$n = \frac{\varphi}{\alpha} = \frac{1148}{270} = 4,25.$$

04.16. При измерении уровня пневмометрическим методом давление воздуха в источнике питания принимается приблизительно на 20 кПа больше, чем то, которое нужно, чтобы преодолеть давление столба жидкости и давление в аппарате.

Максимальное давление столба жидкости

$$p_{\text{ст}} = H_{\max} \rho g = 0,4 \cdot 1280 \cdot 9,81 = 512 \cdot 9,81 \text{ Н/м}^2 = 5,02 \text{ кПа}.$$

Следовательно, минимальное абсолютное давление воздуха в напорной линии должно быть

$$p_b = p_c + p_a + 20 = 5,02 + 16 + 20 = 41,02 \text{ кПа},$$

т. е. в качестве источника питания можно использовать атмосферный воздух.

Расход воздуха должен быть таким, чтобы из трубки выходили в жидкость один-два пузырька воздуха в секунду. При двух пузырьках в секунду за 1 ч через раствор пройдет объем воздуха, равный (в предположении, что диаметр пузырька равен диаметру трубки)

$$V_p = 2 \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d}{2} \right)^3 3600 = 0,814 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Воздух, выходящий из трубки, имеет температуру  $80^\circ\text{C}$  и находится под абсолютным давлением, несколько большим значения 21,02 кПа. Предположим, что оно равно 25 кПа. В этом случае легко определить объемный часовой расход воздуха, отбираемого из атмосферы при нормальных условиях:  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $p = 101,3$  кПа:

$$V_{\text{н}} = V_p \frac{T_{\text{н}}}{T_p} \frac{p_{\text{н}}}{p_p} \frac{1}{k} = 0,814 \cdot 10^{-3} \frac{293}{101,3} \frac{25}{353} 1 = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Индекс «н» относится к нормальным, индекс «р» к рабочим параметрам воздуха;  $k=1$  — коэффициент сжимаемости воздуха.

04.17. Емкость цилиндрического преобразователя рассчитывается по формуле

$$C = C_0 + C' + C'',$$

где  $C'$  — емкость части преобразователя, заполненной жидкостью;  $C''$  — емкость части преобразователя, заполненной парами.

В свою очередь

$$C' = \frac{C'_{н0} C'_{0т}}{C'_{н0} + C'_{0т}}; \quad C'' = \frac{C''_{н0} C''_{0т}}{C''_{н0} + C''_{0т}},$$

где  $C'_{н0}$ ,  $C'_{0т}$  — емкость между внешним электродом и наружной поверхностью внутреннего электрода, заполненных соответственно керосином и его парами;  $C''_{н0}$ ,  $C''_{0т}$  — то же между внешней поверхностью внутреннего электрода и самим тросиком. Эти составляющие вычисляются как емкости цилиндрических конденсаторов.

$$C'_{н0} = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{к} h}{\ln \frac{D}{d+2b}}; \quad C'_{0т} = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} h}{\ln \frac{D}{d+2b}};$$

$$C''_{н0} = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} (l-h)}{\ln \frac{D}{d+2b}}; \quad C''_{0т} = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} (l-h)}{\ln \frac{D}{d+2b}},$$

где  $\epsilon_0 = 8,854$  пФ/м — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Следовательно,

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{к} \epsilon_{п} h}{\epsilon_{к} \ln \frac{D}{d+2b} + \epsilon_{п} \ln \frac{D}{d+2b}};$$

$$C'' = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} \epsilon_{п} (l-h)}{\epsilon_{п} \ln \frac{D}{d+2b} + \epsilon_{п} \ln \frac{D}{d+2b}}.$$

При  $h=0$   $C'=0$ ;  $C''=1868,3$  пФ;  $C=1943,3$  пФ. При  $h=8$  м  $C'=3923,4$  пФ;  $C''=0$ ;  $C=3998,4$  пФ. Коэффициент преобразования

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta h} = \frac{3998,4 - 1943,3}{8} = 256,89 \text{ пФ/м.}$$

04.18. Зависит. Емкость преобразователя описывается выражением

$$C_h = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{ж} h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} (l-h)}{\ln \frac{D}{d}} =$$

$$= C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon_{п} l}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{D}{d}} (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п}).$$

Обозначим член  $C_{п} = 2\pi\epsilon_0 / \ln \frac{D}{d}$  как погонную геометрическую емкость; получим выражение

$$C_h = C_0 + C_{п} l \epsilon_{п} + C_{п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п}).$$

На основании полученного коэффициент преобразования

$$S = \frac{\Delta C_h}{\Delta h} = C_{п} (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п}),$$

откуда делаем вывод, что с увеличением разности  $\epsilon_{ж} - \epsilon_{п}$  он увеличивается, а при  $\epsilon_{ж} = \epsilon_{п}$  будет равен нулю.

04.19. При изменении  $\epsilon_{ж}$  до значения  $\epsilon'_{ж}$  возникает относительная погрешность (см. решение 04.18)

$$\delta C_h = \frac{C_{п} h (\epsilon'_{ж} - \epsilon_{п}) - C_{п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п})}{C_0 + C_{п} l \epsilon_{п} + C_{п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п})} =$$

$$= \frac{C_{п} h (\epsilon'_{ж} - \epsilon_{ж})}{C_0 + C_{п} l \epsilon_{п} + C_{п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п})}.$$

Для заданных условий  $\epsilon'_{ж} = 18(1 + 25 \cdot 0,002) = 18,9$ . Тогда при  $h=2$  м  $\delta C = \frac{240 \cdot 2 (18,9 - 18)}{82 + 240 \cdot 21 + 240 (18 - 1) \cdot 2} 100 = 4,95 \%$ . Следовательно,

температурная погрешность может оказаться значительной, если не принимать специальных мер для ее уменьшения.

04.20. Анализ решения 04.19 показывает, что изменение  $\epsilon_{ж}$  от 18 до 20 (т. е. на 11%) вызовет соизмеримое изменение показаний уровнемера. Поэтому использовать емкостный уровнемер с измерительной схемой без автоматической поправки на изменение диэлектрической проницаемости можно только на тех жидкостях, на которых производилась его градуировка. Для всех других жидкостей требуется переградуировка уровнемера.

04.21. Емкость  $C_{к}$  компенсационной части

$$C_{к} = C_{к0} + C_{к.п} l_{к} \epsilon_{ж}.$$

Емкость измерительной части (см. 04.18)

$$C_{п} = C_0 + C_{п.п} l_{п} \epsilon_{п} + C_{п.п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п}).$$

Показания уровнемера  $П$  будут определяться отношением

$$П = k \frac{C_0 + C_{п.п} l_{п} \epsilon_{п} + C_{п.п} h (\epsilon_{ж} - \epsilon_{п})}{C_{к0} + C_{к.п} l_{к} \epsilon_{ж}},$$

где  $k$  — коэффициент преобразования вторичного прибора.

При  $h=2$  м и исходной температуре

$$P = k \frac{82 + 240 \cdot 2,1 + 240 \cdot 2 (18 - 1)}{30 + 860 \cdot 0,1 \cdot 18} = k \cdot 5,5273.$$

При  $h=2$  м и новой температуре

$$\varepsilon'_{ж} = \varepsilon_{ж} (1 + \alpha_e \Delta t) = 18 (1 + 0,002 \cdot 25) = 18,9;$$

$$P' = k \frac{82 + 240 \cdot 2,1 + 240 \cdot 2 (18,9 - 1)}{30 + 860 \cdot 0,1 \cdot 19,9} = k \cdot 5,5298.$$

Диапазон изменения показаний при изменении уровня от 0 до 2 м составляет

$$\Delta P = k \frac{C_0 + C_{и.п} l_{и} (\varepsilon_{ж} - \varepsilon_{п})}{C_{н.о} + C_{к.п} l_{к} \varepsilon_{ж}} = \frac{82 + 240 \cdot 2 (18 - 1)}{30 + 860 \cdot 0,1 \cdot 18} = 5,1711k.$$

Относительное изменение показаний

$$\delta P = \frac{5,5298 - 5,5273}{5,1711} = 0,048\%.$$

Таким образом, применение компенсационной части емкостного преобразователя и измерительной схемы с автоматическим введением поправки существенно уменьшает погрешность, вызванную изменением диэлектрической проницаемости.

04.22. Измерительные схемы радиоизотопных уровнемеров в большинстве случаев фиксируют переход через границу раздела двух сред, а положение границы раздела определяется с помощью следящей системы. При этом активность источника и чувствительность схемы могут быть невысокими, поскольку плотности двух сред, как правило, существенно различны (на два-три порядка). В этом случае изменение поглощения, вызванное переменной измеряемой среды, даже в 2—3 раза практически не повлияет на результаты измерения уровня.

Иногда измерительные схемы уровнемеров строят по принципу измерения ослабления радиоактивного излучения, проходящего через слой измеряемой среды. В этом случае ослабление излучения определяется уравнением

$$I = I_0 \exp(-\mu_0 \rho l),$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $I$  — интенсивность излучения после прохождения через слой жидкости, Вт/м<sup>2</sup>;  $\mu_0$  — массовый коэффициент ослабления, м<sup>2</sup>/кг;  $\rho$  — плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  — толщина просвечиваемого слоя, м.

Ослабление радиоактивного излучения будет зависеть не только от толщины слоя и плотности жидкости, но и от массового коэффициента ослабления, который определяется атомарным составом измеря-

емой среды. Поэтому уровнемеры этого типа можно применять для измерения уровня только определенной жидкости. Для измерения уровня других жидкостей требуется переградуировка уровнемеров. Кроме того, такие уровнемеры требуют источников излучения большой активности, а также высокой чувствительности измерительных схем.

04.23. Составим уравнения равновесия рычага для двух положений заслонки  $x=0$  и  $x=0,1$  мм, соответствующих конечному и начальному значениям уровня жидкости. При  $x=0,1$  мм уровень жидкости будет минимальным и боек будет погружен в жидкость на глубину  $L_0$ . Если общая длина буйка  $L$ , а его сечение  $S$ , то боек будет создавать вращающий момент относительно опоры 0:

$$M_б = SL\rho_б lg - L_0\rho_{ж} lg.$$

Противодействующий момент, создаваемый пружиной,

$$M_{пр} = \left( F_0 + W \frac{b}{a} x \right) b.$$

Влиянием силы действия струи воздуха на заслонку можно пренебречь; тогда

$$\left( F_0 + W \frac{b}{a} x \right) b = Slg (L\rho_б - L_0\rho_{ж}). \quad (04.2)$$

При  $x=0$

$$M_б = Slg L\rho_б - Slg (L_0 + h) \rho_{ж};$$

$$M_{пр} = F_0 b;$$

$$F_0 b = Slg (L\rho_б - L_0\rho_{ж} - h\rho_{ж}). \quad (04.3)$$

Вычитая (04.3) из (04.2), получаем

$$W \frac{b}{a} xb = Slgh\rho_{ж}.$$

Для цилиндра  $S = \pi D^2/4$ , откуда

$$l = \frac{4Wb^2 x}{ag h \rho_{ж} \pi D^2} =$$

$$= \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{0,02 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 1300 \cdot 3,14 \cdot 20^2 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \text{ м.}$$

## Глава пятая

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

05.1. При измерении расхода его значение может характеризоваться как массовым  $Q_m$ , так и объемным  $Q_0$  расходом. За единицу массового расхода принят килограмм в секунду (кг/с). Это массовый расход, при котором через определенное сечение за время 1 с равномерно

перемещается вещество массой 1 кг. За единицу объемного расхода принят кубический метр в секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Это объемный расход, при котором через определенное сечение за время 1 с равномерно перемещается вещество объемом  $1 \text{ м}^3$ . Значения объемного и массового расходов связаны между собой выражением  $Q_m = \rho Q_0$ , где  $\rho$  — плотность вещества,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

05.2. Объемный расход равен произведению средней скорости на площадь сечения потока:

$$Q_0 = v_c \frac{\pi D^2}{4}$$

Следовательно, массовый расход

$$Q_m = \rho v_c \frac{\pi D^2}{4} = 990 \cdot 1,5 \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} = 11,66 \text{ кг/с.}$$

05.3. Давление  $p_1$  будет равно статическому давлению среды  $p_c$ . Давление  $p_2$  будет равно полному давлению движущегося потока (статическое давление  $p_c$  плюс динамическое давление  $p_d$ ). Разность давлений  $p_2 - p_1$  будет равна динамическому давлению  $p_d$ .

05.4. Давление  $p_1$  изменяться не будет, так как статическое давление  $p_c$  остается неизменным. Давление  $p_2$  будет изменяться в зависимости от скорости потока, так как  $p_2 = p_c + p_d$ , а с изменением скорости динамическое давление  $p_d$  изменяется пропорционально квадрату скорости

$$p_d = k_T \frac{\rho v^2}{2}$$

05.5. Перепад давления, создаваемый напорными трубками, определяется из выражения

$$\Delta p = k_T \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\text{В нашем случае } \Delta p = 0,97 \frac{985 \cdot 0,1^2}{2} = 4,78 \text{ Па.}$$

Значение перепада давления при скорости 0,1 м/с настолько мало, что в промышленных условиях измерить его будет затруднительно, поэтому напорные трубки для измерения малых скоростей жидкостей, как правило, не применяются. Расчетами также легко установить, что измерение скорости воздуха и газов по перепаду на напорных трубках из-за их небольшой плотности практически возможно только для скоростей в несколько десятков метров в секунду.

05.6. Для определения объемного расхода  $Q_0$  или массового расхода  $Q_m$  нужно определить среднюю по сечению скорость потока  $v_c$ . Тогда

$$Q_0 = v_c \frac{\pi D^2}{4}; \quad Q_m = v_c \frac{\pi D^2}{4} \rho.$$

$$v^2 = \frac{2 \Delta p}{k_T \rho}, \quad \Delta p = k_T \frac{\rho v^2}{2}$$

Для определения  $v_c$  определяем сначала скорость газового потока  $v$  в месте установки трубки. Для этого можно использовать зависимость перепада давления на напорной трубке от скорости потока

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{k_T \rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 9,81}{0,98^2 \cdot 0,405}} = 49,71 \text{ м/с.}$$

Распределение скоростей в потоке (характер изменения отношения местной скорости  $v$  к средней  $v_c$ ) является функцией числа Рейнольдса Re:

$$\text{Re} = \frac{v D}{\nu} = \frac{49,71 \cdot 0,2}{93,6 \cdot 10^{-6}} = 10,62 \cdot 10^4.$$

Отношение расстояния трубки от центра трубы  $r$  к радиусу трубы  $R$

$$\frac{r}{R} = \frac{100 - 23,8}{100} = 0,762.$$

Согласно [15] при  $\text{Re} = 4 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^6$  в точке сечения на расстоянии 0,762 от центра местная скорость равна средней скорости по сечению. Следовательно,  $v_c = 49,71 \text{ м/с}$ . Таким образом, объемный расход

$$Q_0 = v_c \frac{\pi D^2}{4} = 49,71 \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} = 1,56 \text{ м}^3/\text{с.}$$

05.7. Стандартным сужающим устройством называется сужающее устройство, удовлетворяющее ряду требований [15, 16], благодаря чему возможно изготовлять и применять такие устройства по результатам расчета без индивидуальной градуировки. При этом должны соблюдаться следующие условия измерения:

диаметр трубопровода должен быть не менее  $D_{\text{мин}}$ ;  $D_{\text{мин}} = 50 \text{ мм}$  при использовании для измерения расхода газов или жидкостей диафрагм или при использовании для измерения расхода газов сопел;  $D_{\text{мин}} = 30 \text{ мм}$  при измерении расхода жидкостей с использованием сопел;

измеряемая среда должна заполнять все сечения трубопровода до и после сужающего устройства;

поток должен быть установившийся и однофазный.

05.8. Принципиально возможно. Для трубопроводов диаметром менее  $D_{\text{мин}}$  сохраняется общий вид зависимости между расходом и перепадом  $Q = K \sqrt{\Delta p}$ , но для стандартных сужающих устройств при  $D \gg D_{\text{мин}}$  численное значение коэффициента  $K$  может быть определено расчетным путем [16], в то время как при  $D < D_{\text{мин}}$  коэффициент  $K$  расчетным путем определить нельзя, он определяется экспериментально для каждого сужающего устройства (поэтому такие устройства называются нестандартными).

05.9. Коэффициенты расхода зависят от типа и относительной площади сужающего устройства  $m$ , а также от числа Рейнольдса Re.

С возрастанием  $Re$  его влияние на расходный коэффициент уменьшается, и при значении  $Re > Re_{мин}$  (для каждого типа и относительной площади сужающего устройства свое значение  $Re_{мин}$ ) коэффициенты расхода можно считать постоянными. Однако при расходах, когда  $Re < Re_{мин}$ , значения коэффициента расхода будут изменяться с изменением расхода. Кроме того, при  $Re > Re_{мин}$  значения коэффициента расхода могут изменяться при изменении шероховатости стенок трубопровода и остроты входной кромки.

05.10. Расчетное уравнение расхода имеет вид

$$Q = K \sqrt{\Delta p},$$

где  $K$  — постоянный для данной диафрагмы коэффициент,

$$K = \frac{Q_{макс}}{\sqrt{\Delta p_{макс}}} = \frac{250}{\sqrt{4000}} = 3,953 \frac{\text{т/ч}}{\text{Па}^{1/2}}.$$

При расходе 380 т/ч перепад на данной диафрагме

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 = \left(\frac{380}{3,953}\right)^2 = 9241 \text{ Па}.$$

Согласно [16] дифманометр должен иметь верхний предел измерения, возможно близкий к расчетному значению  $\Delta p = 9241$  Па. Следовательно, для измерения расхода 380 т/ч следует выбрать дифманометр с верхним пределом измерения  $\Delta p'_{макс} = 10\,000$  Па. При этом максимальный расход, который можно будет измерить этим расходомером,

$$Q'_{макс} = K \sqrt{\Delta p'_{макс}} = 3,953 \sqrt{10\,000} = 395,3 \text{ т/ч}.$$

05.11. Рассмотрим общее уравнение массового расхода для несжимаемой жидкости

$$Q_M = \alpha F_0 \sqrt{2\Delta p \rho}.$$

По условию задачи все параметры, входящие в уравнение, остались постоянными, кроме  $F_0$  и  $\rho$ .

При  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  расход  $Q_1$  будет следующим образом связан с диаметром отверстия  $d_1$  и плотностью воды  $\rho_1$ :

$$Q_1 = \alpha \frac{\pi}{4} d_1^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}.$$

Аналогично при температуре воды  $t_2 = 150^\circ\text{C}$

$$Q_2 = \alpha \frac{\pi}{4} d_2^2 \sqrt{2\Delta p \rho_2}.$$

Получаем

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} = Q_2 \frac{1}{(k_t')^2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = 1 - \frac{1}{(k_t')^2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Определим  $\rho_1$  и  $\rho_2$  для воды при  $p = 2$  МПа;  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 150^\circ\text{C}$ . Из табл. П.33  $k_t' = 1,0023$ ;  $\rho_1 = 999$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2 = 917,8$  кг/м<sup>3</sup>.

Подставив значения, определим относительную погрешность

$$\delta = 1 - \frac{1}{1,0023^2} \sqrt{\frac{999}{917,8}} = 1 - 1,0386 = -0,0386, \text{ или } \delta = 3,9\%.$$

Ошибка большая, поэтому расходомеры должны работать при расчетных условиях или в их показания должны вводиться поправки на изменение параметров измеряемой среды.

05.12. Рассмотрим уравнение массового расхода

$$Q_M = \alpha F_0 \sqrt{2\Delta p \rho}.$$

Очевидно, все параметры, кроме плотности  $\rho$ , можно считать постоянными, поэтому между расходом  $Q_p$  при исходной температуре  $t_p = 20^\circ\text{C}$  и расходами  $Q_1$  при  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  и  $Q_2$  при  $t_2 = 10^\circ\text{C}$  устанавливается следующая взаимосвязь:

$$Q_1 = Q_p \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_p}}; \quad Q_2 = Q_p \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_p}}.$$

Относительные погрешности

$$\delta_1 = \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_p}}\right) 100\%; \quad \delta_2 = \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_p}}\right) 100\%.$$

Плотность при различных температурах и давлении 0,6 МПа определяем из [16] или табл. П.33:

$$\rho_p = 998,4 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_1 = 996,64 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3.$$

Окончательно

$$\delta_1 = \left(1 - \sqrt{\frac{996,64}{998,4}}\right) 100 = +0,09\%;$$

$$\delta_2 = \left(1 - \sqrt{\frac{1000}{998,4}}\right) 100 = -0,08\%.$$

05.13. Плотность сухого сернистого газа при нормальных условиях [16]

$$\rho_H = 2,727 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность сухого сернистого газа в рабочих условиях при  $p = 0,13$  МПа и  $t = 25$  °С определяется из выражения [16]

$$\rho = \rho_H \frac{pT_H}{p_H T k}$$

где  $k$  — коэффициент сжимаемости газа,

$$k = k' k_0$$

$k' = 1,023$  — отношение действительной плотности газа при температуре 0 °С и давлении 0,1013 МПа к расчетной плотности газа в том же состоянии, найденной по законам идеального газа [16];

$$k_0 = p\nu/RT,$$

где  $\nu = 1/\rho$  — удельный объем газа при  $p$  и  $T$ ;  $R$  — газовая постоянная.

Для  $p = 0,1013$  МПа и  $T = 273$  К  $\nu = 1/2,927$  м<sup>3</sup>/кг и

$$R = \frac{8314,3}{M} = \frac{8314,3}{64,06} = 129,8 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)},$$

где  $M$  — молекулярная масса.

Следовательно,

$$k_0 = \frac{0,1013 \cdot 10^6}{129,8 \cdot 273 \cdot 2,927} = 0,977;$$

$$k = 1,023 \cdot 0,977 = 0,999.$$

Действительное значение плотности влажного газа в рабочем состоянии определяется из формулы

$$\rho_D = \rho_{с.г} + \rho_{в.п.}$$

где  $\rho_{с.г}$  — плотность сухой части влажного газа при давлении  $p$  и температуре  $t$ ;  $\rho_{в.п.}$  — плотность водяного пара при его парциальном давлении и температуре  $t$ ;

$$\rho_{с.г} = \rho_H \frac{(p - \varphi p_{в.п.м}) T_H}{p_H T k};$$

$p_{в.п.м}$  — наибольшее возможное давление водяного пара во влажном газе при температуре  $t$ ;  $k$  — коэффициент сжимаемости смеси;

$$\rho_{в.п.} = \varphi \rho_{в.п.м};$$

$\rho_{в.п.м}$  — наибольшая возможная плотность водяного пара во влажном газе при давлении  $p$  и температуре  $t$ .

Если температура газа не превышает температуру насыщения водяного пара  $t_{нп}$ , соответствующую рабочему давлению  $p$ , то  $\rho_{в.п.м} = \rho_{н.п}$  и  $p_{в.п.м} = p_{н.п}$  ( $\rho_{н.п}$  и  $p_{н.п}$  — соответственно плотность и давление насы-

щенного пара при температуре  $t$ ). В нашем случае  $p_{в.п.м} = p_{н.п} = 3,167$  кПа и  $\rho_{в.п.м} = \rho_{н.п} = 0,02304$  кг/м<sup>3</sup> [16], поэтому

$$\rho_{с.г} = 2,727 \frac{(0,13 \cdot 10^6 - 0,3 \cdot 3,167 \cdot 10^3) \cdot 293}{1,01325 \cdot 10^6 \cdot 298 \cdot 0,997} = 3,418 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{в.п.} = 0,3 \cdot 0,02304 = 0,0070 \text{ кг/м}^3,$$

и тогда

$$\rho_D = 3,418 + 0,007 = 3,425 \text{ кг/м}^3.$$

Уравнение объемного расхода имеет вид

$$Q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Полагая в нашем случае, что  $\varepsilon$  остается неизменным, как и в Об.12, определяем

$$Q_D = Q_H \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho_D}} = Q_H \sqrt{\frac{2,727}{3,425}} = Q_H \cdot 0,892.$$

Таким образом, для определения действительного расхода нужно показание расходомера умножить на 0,892.

Об.14. Изменение влажности газовой смеси изменяет плотность смеси, что в свою очередь вызывает погрешность измерения расхода. В связи с этим для оценки допускаемых колебаний влажности газа необходимо оценить возможные плотности газа и связанную с этим погрешность. Для этого определяем плотность компонентов газовой смеси в нормальных условиях  $p_H = 0,1013$  МПа,  $t_H = 20$  °С:

$$\rho_H(\text{CO}) = 1,165 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H(\text{H}_2) = 0,0837 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_H(\text{CH}_4) = 0,6679 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H(\text{C}_2\text{H}_4) = 1,174 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_H(\text{C}_2\text{H}_6) = 1,263 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H(\text{C}_3\text{H}_8) = 1,872 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_H(\text{H}_2\text{S}) = 1,434 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H(\text{CO}_2) = 1,842 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_H(\text{O}_2) = 1,331 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_H(\text{N}_2) = 1,166 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность газовой смеси в нормальных условиях

$$\rho_H = \sum_{i=1}^k a_i \rho_{Hi},$$

где  $a_i$  — объемная доля компонента в смеси (в долях единицы);  $\rho_{Hi}$  — плотность компонента.

$$\begin{aligned} \rho_H &= 0,068 \cdot 1,165 + 0,57 \cdot 0,0837 + 0,223 \cdot 0,6679 + 0,009 \cdot 1,174 + \\ &+ 0,009 \cdot 1,263 + 0,009 \cdot 1,872 + 0,004 \cdot 1,434 + 0,023 \cdot 1,842 + \\ &+ 0,008 \cdot 1,331 + 0,077 \cdot 1,166 = 0,4632 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Плотность влажного газа в рабочем состоянии вычисляется по формуле

$$\rho = \rho_{с.г} + \rho_{в.п.}$$

Для того чтобы определить плотность влажного газа, необходимо знать коэффициент сжимаемости смеси  $k$ . Коэффициент сжимаемости газовой смеси определяем по [16],  $k_{с.м} \approx 1$ .

Определим значения  $\rho_{в.п.макс}$  и  $\rho_{в.п.макс}$  для избыточного давления  $p = 0,1$  МПа и  $t = 30^\circ\text{C}$  по [16]:

$$\rho_{в.п.макс} = 0,03205 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{в.п.макс} = 0,00458 \text{ МПа.}$$

Определяем

$$\rho_{с.г} = 0,4632 \frac{293(0,2 - 0,8 \cdot 0,00458)}{0,1013 \cdot 303 \cdot 1} = 0,8681 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{в.п} = 0,8 \cdot 0,03205 = 0,0256 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho = 0,8681 + 0,0256 = 0,8937 \text{ кг/м}^3.$$

Изменение показаний расходомера при постоянном расходе может вызываться изменением относительной влажности газа, которое вызывает изменение плотности.

Определим изменения действительных значений плотности относительно расчетных, вызывающих изменение показаний расходомера на  $\pm 1\%$ :

$$\delta = \frac{Q_{о.р} - Q_{о.д}}{Q_{о.д}} = \frac{Q_{о.р}}{Q_{о.д}} - 1 = \sqrt{\frac{\rho_д}{\rho_р}} - 1 \leq \pm 0,01;$$

$$\sqrt{\frac{\rho_д}{\rho_р}} \leq 1 \pm 0,01; \quad \frac{\rho_д}{\rho_р} \leq 1 \pm 0,02 \text{ или } \Delta\rho \leq \pm 0,02\rho_р.$$

Следовательно, изменение плотности газа, вызванное изменением влажности, не должно превышать  $2\%$  расчетного значения плотности:

$$0,8937(1 - 0,02) < \rho_д < 0,8937(1 + 0,02);$$

$$0,876 < \rho_д < 0,912.$$

Оценим плотность при  $\varphi = 100\%$ :

$$\rho_{с.г} = 0,4632 \frac{293(0,2 - 0,00458)}{0,1013 \cdot 303 \cdot 1} = 0,8641 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{в.п} = 1 \cdot 0,03205 = 0,03205 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho = 0,8641 + 0,03205 = 0,8962 \text{ кг/м}^3.$$

Оценим значение плотности при  $\varphi = 0\%$ :

$$\rho_{с.г} = 0,4632 \cdot \frac{293 \cdot 0,2}{0,1013 \cdot 303 \cdot 1} = 0,8843 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{в.п} = 0; \quad \rho = 0,8843 \text{ кг/м}^3.$$

Таким образом, изменение влажности газа от  $0$  до  $100\%$  вызывает изменение плотности, не превышающее  $\pm 2\%$  расчетного значения, и изменение влажности от  $30$  до  $100\%$  вызывает погрешность не более  $1\%$ .

О5.15. Для определения перепада давления преобразуем уравнение массового расхода [16]

$$\Delta p = \frac{1}{\rho} \left( \frac{Q_M}{0,01252 \alpha \mu D^2} \right)^2.$$

Для условий задачи  $\rho = 870,7$  кг/м<sup>3</sup>. Перед определением  $\alpha$  необходимо убедиться, что  $Re > Re_{мин}$ :

$$Re = 0,0361 \frac{Q_M}{D \mu} = 0,0361 \frac{100 \cdot 10^3}{200 \cdot 14,1 \cdot 10^{-6}} = 1,28 \cdot 10^6,$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость воды, кгс·с/м<sup>2</sup>.

Определяем  $Re_{мин}$  [16]:  $Re_{мин} = 10^4$ . Следовательно,  $Re > Re_{мин}$ . Определим значение исходного коэффициента расхода  $\alpha_n$ :

$$\alpha_n = 0,6937.$$

Действительный коэффициент расхода  $\alpha$  больше исходного вследствие шероховатости трубы и притупления входной кромки диафрагмы

$$\alpha = \alpha_n k_{ш} k_{п}.$$

По [16]  $k_{ш} k_{п} = 1,0056$ .

Следовательно,  $\alpha = 0,698$ . Окончательно

$$\Delta p = \frac{1}{870,7} \left( \frac{100 \cdot 10^3}{0,01252 \cdot 0,698 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 200^2} \right)^2 = 375,97 \text{ кгс/м}^2 = 3,69 \text{ кПа.}$$

О5.16. Потеря давления определяется по [16]. Для диафрагмы при  $m = 0,5$   $p_n/\Delta p = 0,48$ . При  $\Delta p = 376$  кгс/м<sup>2</sup>  $p_n = 0,48 \cdot 376 = 180,5$  кгс/м<sup>2</sup> =  $1,77$  кПа.

О5.17. Для сопел коэффициент расхода больше, чем для диафрагмы с тем же значением  $m$ . Поэтому при одинаковых расходах перепад давления на сопле будет меньше. Кроме того, согласно [16]  $p_n/\Delta p$  у сопел меньше. Отсюда ясно, что потеря давления при использовании сопел меньше. Чтобы произвести количественное сравнение, произведем расчет для сопла, аналогичный по расчетам в О5.15 и О5.16:

$$\alpha = \alpha_n k_{ш} = 1,08 \cdot 1,0029 = 1,083;$$

$$\Delta p = \frac{1}{870,7} \left( \frac{100 \cdot 10^3}{0,01252 \cdot 1,083 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 200^2} \right)^2 = 156,17 \text{ кгс/м}^2 = 1,53 \text{ кПа.}$$

По [16]  $p_n/\Delta p = 0,28$ . Следовательно,  $p_n = 43,8$  кгс/м<sup>2</sup> =  $0,43$  кПа. Таким образом, при одних и тех же значениях расхода и относительной площади  $m$  потеря давления в сопле значительно меньше, чем в диафрагме.

05.18. Сопло обладает следующими безусловными преимуществами по сравнению с диафрагмой: точность измерения расхода газов и пара при использовании сопла выше, изменение или загрязнение входного профиля сужающего устройства в процессе эксплуатации мало влияет на коэффициент расхода сопла и в значительно большей степени влияет на коэффициент расхода диафрагмы.

Количественная оценка преимущества какого-либо сужающего устройства может производиться по потере давления и длине прямых участков. Определим эти параметры для сопла и диафрагмы:

$$m\alpha = \frac{Q_{M,II}}{0,01252D^2 \sqrt{\rho \Delta p}} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,01252 \cdot 200^2 \sqrt{870,7 \cdot 400}} = 0,338.$$

Для сопла по [16]  $m=0,33$ . Относительная потеря давления по [16]  $p_{II}/\Delta p=0,46$ .

Абсолютная потеря давления

$$p_{II} = 0,46 \cdot 400 = 184 \text{ кгс/м}^2 = 1,8 \text{ кПа.}$$

При наличии колена перед соплом между ними должен быть прямой участок длиной  $l_1$ , определяемой по [16]:

$$l_1/D_{20} = 17; \quad l_1 = 3400 \text{ мм.}$$

Для диафрагмы по [16]  $m=0,487$ ; потеря давления по [16]  $p_{II}/\Delta p=0,48$ ;  $p_{II}=0,48 \cdot 400=192 \text{ кгс/м}^2=1,88 \text{ кПа}$ .

Длина прямого участка

$$l_1/D_{20} = 27; \quad l_1 = 5400 \text{ мм.}$$

Аналогичные расчеты прямых участков  $l_2$  за сужающими устройствами показывают, что для сопел они меньше. Следовательно, при одних и тех же значениях расхода и перепада давления потери давления в диафрагме и сопле приблизительно одинаковы (у сопла  $m$  получается меньшим). Однако при этих условиях для сопла требуются более короткие прямые участки трубопровода.

05.19. Коэффициент коррекции на число Рейнольдса  $k_{Re}$  вводится вследствие наличия слабой зависимости коэффициента расхода  $\alpha$  от  $Re$ . При расходе 10 т/ч  $Re=0,0361 Q_M/D_{II}=1,25 \cdot 10^5$  (при заданных условиях  $\mu=28,8 \cdot 10^{-6} \text{ кгс} \cdot \text{с/м}^2$ ), при этом по [16]  $\alpha_{II}=0,748$ . При расходе 4 т/ч  $Re=5 \cdot 10^4$  и  $\alpha_{II}=0,756$ .

Таким образом, если расчет диафрагмы производился на расход 10 т/ч, то при расходе 4 т/ч показания расходомера будут заниженными. Во избежание этого показания его должны быть умножены на коэффициент  $k_{Re}=0,756/0,748=1,011$ .

Поправочные множители на шероховатость трубопровода  $k_{II}$  и припухание входной кромки  $k_{II}$  не учитываются, так как не зависят от  $Re$ .

05.20. Изменится. В этом случае при  $Q_M=10 \text{ т/ч}$   $\alpha_{II}=0,6356$ , при 4 т/ч  $\alpha_{II}=0,639$  и, следовательно,  $k_{Re}=1,005$ . Значение  $k_{Re}$  приближает-

ся к единице при увеличении  $Re$  и уменьшении  $m$ , поэтому  $m$  для диафрагмы рекомендуется выбирать близким к 0,2. Дальнейшее уменьшение нецелесообразно из-за увеличения потери давления, хотя  $1-k_{Re}$  при этом уменьшалось бы.

05.21. Поправочный множитель на расширение измеряемой среды определяется по значениям  $\Delta p/p$ ,  $m$  и  $\kappa$  [16].

Из общей зависимости

$$Q = K \sqrt{\Delta p}$$

определяем перепад при  $Q=0,4Q_{\text{макс}}$ :

$$\Delta p = 0,4^2 \Delta p_{\text{макс}} = 6,4 \text{ кПа.}$$

Определяем  $\Delta p/p$  для обоих случаев:

$$\text{при } p = 2 \text{ МПа } \Delta p_{\text{макс}}/p = \frac{0,04}{2} = 0,02 \text{ и } \frac{\Delta p}{p} = \frac{0,0064}{2} = 0,0032;$$

$$\text{при } p = 0,08 \text{ МПа } \Delta p_{\text{макс}}/p = \frac{0,04}{0,08} = 0,5 \text{ и } \frac{\Delta p}{p} = \frac{0,0064}{0,08} = 0,08.$$

Этим значениям  $\Delta p/p$  соответствуют следующие поправочные множители на расширение среды [16]:

$\Delta p/p$	$\varepsilon$	$\Delta p/p$	$\varepsilon$
0,0032	0,999	0,08	0,9748
0,02	0,9937	0,5	0,7793

Если принять за расчетное значение  $Q=Q_{\text{макс}}$ , то уменьшение расхода до  $0,4Q_{\text{макс}}$  вызовет погрешность за счет отклонения  $\varepsilon$  от расчетного значения  $\varepsilon_p$ , определяемую по формуле

$$\delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon} 100\%.$$

$$\text{Для } p = 2 \text{ МПа } \delta_\varepsilon = \frac{0,9937 - 0,999}{0,999} 100 = -0,53\%.$$

$$\text{Для } p = 0,08 \text{ МПа } \delta_\varepsilon = \frac{0,7793 - 0,9748}{0,9748} 100 = -20,06\%.$$

Если в первом случае погрешность сравнительно невелика, то во втором случае погрешность имеет недопустимое для технических измерений значение.

05.22. Длина прямого участка до сужающего устройства определяется относительной площадью, типом местного сопротивления и диаметром трубопровода. При одинаковом  $m$  для всех типов сужающих устройств относительные длины прямых участков одинаковы. Значения наименьших длин прямых участков определяются по [16]. Для тройника, стоящего перед диафрагмой или соплом при  $m=0,5$ , находим

$$l_1 = 28D = 28 \cdot 0,2 = 5,6 \text{ м.}$$

При сокращенной длине прямых участков возникает погрешность  $\delta_{\alpha L}$ , входящая составной частью в погрешность  $\sigma_{\alpha}$  коэффициента расхода.

Длина прямых участков после сужающего устройства определяется только его относительной площадью и диаметром трубопровода и не зависит от типа местного сопротивления. Согласно [16] длина прямых участков  $l_2$  должна быть не менее  $7,9D$ , т. е.  $l_2 \geq 7,9 \cdot 0,2 = 1,58$  м:

05.23. Согласно [16], если регулирующий вентиль стоит перед сужающим устройством, длина прямого участка между регулирующим вентилем и сужающим устройством должна быть не менее  $100D$ . В нашем случае  $l_1 \geq 20$  м. Эта длина не зависит от  $m$  сужающего устройства и должна быть сохранена и при  $m=0,45$ .

05.24. Показания будут одинаковыми. При одинаковой длине импульсных трубок влияние веса столба жидкости в минусовой трубке компенсируется весом столба жидкости в плюсовой трубке. Небольшая разница в длине столбов может быть скорректирована нуль-корректором прибора при нулевом перепаде давления.

05.25. Уровень будет изменяться. При увеличении расхода появляется перепад давления, под действием которого мембранная коробка в плюсовой камере дифманометра сжимается, ее объем уменьшается, а объем плюсовой камеры увеличивается. Одновременно расширяется мембранная коробка в минусовой камере, объем коробки увеличивается, а объем минусовой камеры уменьшается.

Если объем плюсовой камеры увеличится, в нее из импульсной трубки поступит дополнительное количество воды, что приведет к понижению уровня в плюсовой импульсной трубке. Из минусовой камеры, наоборот, часть воды будет вытеснена в импульсную трубку, и уровень в ней возрастет.

Таким образом, при появлении расхода газа появляется разница уровней воды в импульсных линиях, которая создает перепад, противоположный по знаку перепаду на сужающем устройстве. Очевидно, что без стабилизации уровней в импульсных трубках дифманометр будет показывать заниженный расход, причем абсолютная погрешность будет расти с увеличением расхода.

05.26. Если бы уровень в импульсных трубках не изменялся, то расходомер должен был бы показывать  $Q_0 = 10$  м<sup>3</sup>/ч. При изменении расхода от  $Q_0 = 0$  до  $Q_0 = 10$  м<sup>3</sup>/ч уровень в плюсовой трубке понизится на  $\Delta H$ :

$$\Delta H = \frac{4\Delta V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 10^3}{\pi \cdot 10^2} = 50,9 \text{ мм.}$$

В минусовой трубке уровень повысится на такое же значение. Следовательно, за счет разницы уровней воды в импульсных трубках создается перепад  $\Delta p' = 2\Delta H \rho g = 2 \cdot 50,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 9,81 = 998,3$  Па.

Этот перепад уменьшает перепад, создаваемый расходом газа, и на дифманометр будет действовать перепад  $\Delta p'' = \Delta p - \Delta p' = 10\,000 - 998,3 = 9001,7$  Па.

Учитывая, что зависимость между показаниями расходомера  $Q_0$  и измеряемым перепадом  $\Delta p$  квадратичная,  $Q_0 = K\sqrt{\Delta p}$ , можно вычислить показания расходомера при  $\Delta p = 9001,7$  Па:

$$Q_0'' = Q_0 \sqrt{\frac{\Delta p''}{\Delta p}} = 10 \sqrt{\frac{9001,7}{10\,000}} = 9,49 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Относительная погрешность измерения составит 5,1%. С увеличением диаметра импульсных трубок погрешность будет уменьшаться, однако такое увеличение диаметра по всей длине является нецелесообразным. Вместо этого можно на концах импульсных трубок, подсоединяемых к сужающему устройству, устанавливать сосуды большого диаметра — уравнивательные сосуды, применение которых стабилизирует уровень в трубках.

05.27. Аналогично 05.26 определяем понижение уровня  $\Delta H$  в сосуде 1:

$$\Delta H = \frac{4\Delta V}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 10}{\pi \cdot 100^2} = 0,51 \text{ мм.}$$

В сосуде 2 уровень не изменится, так как излишек конденсата, поступивший из минусовой камеры, сольется в трубу. Разность уровней воды в сосудах создает перепад  $\Delta p' = 5$  Па. Таким образом, перепад, действующий на дифманометр,

$$\Delta p'' = \Delta p_{\text{макс}} - \Delta p' = 10\,000 - 5 = 9995 \text{ Па.}$$

Показание расходомера в этом случае будет

$$Q = 10 \sqrt{\frac{9995}{10\,000}} = 9,9975 \text{ т/ч.}$$

Относительная погрешность будет равна 0,025%. Сравнением 05.26 и 05.27 легко понять, что применение уравнивательных сосудов свело ошибку от нестабильности уровней практически к нулю.

05.28. Диаметры разделительных сосудов для поплавковых дифманометров могут быть определены из выражения [16]

$$D_p \geq 22D_{\Pi} D_{\text{см}} \sqrt{\frac{\pm (\rho_{\text{р.с}} - \rho_{\text{с}})}{(D_{\Pi}^2 + D_{\text{см}}^2) (\rho_{\text{г}} - \rho')}}},$$

где  $D_{\Pi}$  и  $D_{\text{см}}$  — диаметры соответственно поплавкового и сменного сосудов;  $\rho_{\text{р.с}}$  — плотность разделительной жидкости при атмосферном давлении и температуре разделительных сосудов;  $\rho_{\text{с}}$  — плотность измеряемой среды при давлении  $p$  и температуре разделительных сосудов;

$\rho_y$  — плотность уравновешивающей жидкости при атмосферном давлении и температуре 20 °С;  $\rho'$  — плотность вещества над уравновешивающей жидкостью при давлении  $p$  и температуре 20 °С.

Так как температура разделительных сосудов 20 °С, то  $\rho' = \rho_{p.c.}$ . Таким образом, диаметр разделительного сосуда должен быть не менее

$$D_p \geq 22,78 \cdot 13,83 \sqrt{\frac{-(880,3 - 1560)}{(78^2 - 13,83^2)(13\,546 - 880,3)}} = 71,62 \text{ мм.}$$

05.29. Измерение расхода по перепаду давления является косвенным измерением. Величины, входящие в формулу расхода

$$Q_M = \alpha_e F_0 \sqrt{\rho \Delta p},$$

разделяются на две группы. К первой относятся величины  $\alpha$  и  $e$ , которые определяются путем многократных измерений и для которых известны средние квадратические  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_e$  и предельные погрешности. Если бы средние квадратические погрешности были известны и для других величин, то можно было бы применять закон сложения средних погрешностей. Однако в формулу расхода входит ряд величин ( $d$ ,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ,  $p$ ,  $t$ ), которые измеряются однократно, и для них известна только предельная погрешность однократного измерения. Таким образом, в строгом понимании закон сложения дисперсий применять нельзя. Однако при оценке погрешности измерения расхода делается допущение: предельная погрешность измерения величин  $d$ ,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ,  $p$  и  $t$  рассматривается как удвоенная средняя квадратическая погрешность ряда измерений соответствующей величины (при вероятности 0,95). Предполагается также, что значения этих величин при большом числе измерений распределены по нормальному закону. Исходя из этого средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром определяется по формуле [16]

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_e^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4} \sigma_\rho^2}.$$

05.30. Средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода определяется из выражения [16]

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\sigma_{\alpha_{II}}^2 + \sigma_{k_{III}}^2 + \sigma_{k_{II}}^2}.$$

Средняя квадратическая погрешность исходного коэффициента расхода  $\sigma_{\alpha_{II}}$  для диафрагм при  $m \leq 0,36$  и для сопл при  $m \leq 0,25$  определяется из выражения

$$\sigma_{\alpha_{II}} = (0,3^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2)^{0,5}$$

и для остальных значений  $m$  для диафрагм

$$\sigma_{\alpha_{II}} = [(0,5m)^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2]^{0,5},$$

и для сопл

$$\sigma_{\alpha_{II}} = [(m^{0,5} - 0,2)^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2]^{0,5}.$$

Погрешности  $\sigma_{\alpha_d}$  и  $\sigma_{\alpha_D}$  возникают из-за допустимых отклонений диаметров  $d$  и  $D$ :

$$\sigma_{\alpha_d} = 2\sigma_d \left(1 + \frac{m^2}{\alpha}\right) \text{ и } \sigma_{\alpha_D} = 2\sigma_D \frac{m^2}{\alpha},$$

где для диафрагм и сопл  $\sigma_d = 0,025$  при  $m \geq 0,4$ ,  $\sigma_d = 0,05$  при  $m < 0,4$ ,  $\sigma_D = 0,15$ .

Расчеты показывают, что значение  $\sigma_{\alpha_{II}}$  увеличивается (при неизменном Re) при увеличении  $m$ , и, таким образом, для диафрагм и сопл имеет максимальное значение  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\max}$  при  $m = 0,05$  и минимальное  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\min}$  при  $m = 0,64$ . При заданных условиях для диафрагм  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\min} = 0,316\%$ ,  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\max} = 0,367\%$  и для сопл  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\min} = 0,316\%$  и  $(\sigma_{\alpha_{II}})_{\max} = 0,613\%$ .

Значение средней квадратической погрешности  $\sigma_{k_{III}}$  поправочного множителя на шероховатость трубопровода растет с увеличением  $m$  и уменьшением диаметра труб (при  $D \geq 300$  мм  $\sigma_{k_{III}} = 0$ ). Для диафрагм при  $m = 0,64$  и  $D = 50$  мм (минимальный диаметр трубопровода)  $\sigma_{k_{III}} = 1,236\%$ , и для сопл при  $m = 0,64$  и  $D = 30$  мм (минимальный диаметр трубопровода для жидкостей)  $\sigma_{k_{III}} = 0,963$ . Средняя квадратическая погрешность  $\sigma_{k_{II}}$  на притупление входной кромки диафрагмы уменьшается с увеличением  $m$  диафрагмы и диаметра трубопровода. Максимальное значение  $\sigma_{k_{II}} = 0,795\%$  при  $m = 0,05$  и  $D = 50$  мм.

Как видно из расчетов, большинство составляющих погрешности  $\sigma_\alpha$  (кроме  $\sigma_{k_{II}}$ ) для диафрагм увеличивается с увеличением  $m$  и уменьшением  $D$ . Поэтому для оценки  $\sigma_{\alpha_{\max}}$  выберем  $m = 0,64$  и  $D = 50$  мм. При этом  $\sigma_{\alpha_{II}} = 0,367\%$ ;  $\sigma_{k_{III}} = 1,236\%$ ;  $\sigma_{k_{II}} = 0,304\%$ . Отсюда

$$\sigma_{\alpha_{\max}} = \sqrt{0,367^2 + 1,236^2 + 0,304^2} = 1,325\%.$$

Минимальное значение погрешности  $\sigma_{\alpha_{\min}}$  имеет место при  $m = 0,05$  и  $D \geq 300$  мм. При этом  $\sigma_{\alpha_{II}} = 0,316\%$ ;  $\sigma_{k_{III}} = 0$ ,  $\sigma_{k_{II}} = 0$  и, следовательно,  $\sigma_{\alpha_{\min}} = 0,316\%$ . Максимальное значение для сопл определяем при  $m = 0,64$  и  $D = 30$  мм (минимальный диаметр для жидкостей). При этом  $\sigma_{\alpha_{II}} = 0,613\%$ ;  $\sigma_{k_{III}} = 0,963\%$ ;  $\sigma_{\alpha_{\max}} = \sqrt{0,613^2 + 0,923^2} = 1,142\%$ . Минимальное значение определяем при  $m = 0,05$  и  $D \geq 300$  мм. При этом  $\sigma_{\alpha_{II}} = 0,316\%$ ;  $\sigma_{k_{III}} = 0$  и  $\sigma_{\alpha_{\min}} = 0,316\%$ . Из этого анализа видим, что

максимальная средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода для сопл меньше, чем для диафрагм.

О5.31. Погрешность измерения разности давлений в сужающем устройстве, %, определяется из выражения [16]

$$\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \frac{K_Q}{2Q'},$$

где  $K_Q$  — класс точности (по расходу) измерительного комплекта;  $Q'$  — расход, выраженный в долях верхнего предела измерения расходомера.

Полагая, что погрешность дифманометра и вторичного прибора независимы, значение погрешности измерительного комплекта «дифманометр — вторичный прибор» можно определить из выражения [16]

$$K_Q = \sqrt{K_d^2 + K_b^2} = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1,41\%,$$

где  $K_d$  — класс точности дифманометра;  $K_b$  — класс точности вторичного прибора.

Таким образом, приведенная погрешность измерительного комплекта по расходу не должна превышать  $K_Q = \pm 1,41\%$ . Для расхода  $Q = Q_{\max}$   $Q' = 1$ , и в том случае

$$\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \frac{1,41}{2 \cdot 1} = 0,705\%.$$

О5.32. Средняя квадратическая относительная погрешность на расширение измеряемой среды для диафрагм вычисляется по формуле

$$\sigma_\varepsilon = \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} [\sigma_\kappa^2 + \sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_p^2]^{0,5} + \sigma_0.$$

При  $m=0,5$ ,  $\sigma_0 = 2 \Delta p/p = 2 \cdot 0,16 = 0,32\%$ . Если предположить, что корнеизвлекающее устройство КСД-2 не вносит дополнительной погрешности, то  $\sigma_{\Delta p} = \sigma_{\sqrt{\Delta p}} = 0,705\%$  (см. решение О5.31). Средняя квадратическая погрешность  $\sigma_p$  измерения давления вычисляется по формуле

$$\sigma_p = 0,5 \frac{p_{\text{пр}}}{p} K,$$

где  $p_{\text{пр}}$  — верхний предел измерения манометра,  $K$  — его класс.

В рассматриваемой задаче

$$\sigma_p = 0,5 \cdot 1,6 \cdot 1,5/1 = 1,2\%.$$

Погрешность  $\sigma_\kappa$  определения показателя адиабаты воздуха вычисляется по формуле  $\sigma_\kappa = 50 \Delta \kappa/\kappa$ , где  $\Delta \kappa$  — максимальная абсолютная погрешность  $\kappa$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры табличного значения  $\kappa$ . При заданных условиях  $\kappa = 1,40$ ;  $\Delta \kappa = 0,005$ ;  $\sigma_\kappa = 0,18\%$ . Значение  $\varepsilon$  определяется по таблицам:  $\varepsilon = 0,9431$ .

Окончательно имеем

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1 - 0,9431}{0,9431} [0,18^2 + 0,705^2 + 1,2^2]^{0,5} + 0,32 = 0,41\%.$$

Для сопл погрешность  $\sigma_\varepsilon$  также определяется значениями  $\sigma_\kappa$ ,  $\sigma_{\Delta p}$ ,  $\sigma_p$ , однако эта зависимость является более сложной, чем у диафрагм [16]. При заданных условиях для сопла  $\sigma_\varepsilon = 0,48\%$ . Анализ формул показывает, что погрешность  $\sigma_\varepsilon$  уменьшается при уменьшении отношения  $\Delta p/p$ . Так, при  $\Delta p/p = 0,01$  для диафрагм с  $m = 0,5$   $\sigma_\varepsilon = 0,031\%$  и для сопл с  $m = 0,5$   $\sigma_\varepsilon = 0,23\%$ .

О5.33. Плотность газа определяется по формуле

$$\rho = \rho_H \frac{p T_H}{p_H T k}.$$

Средняя квадратическая погрешность определения плотности газа оценивается выражением

$$\sigma_\rho = \sqrt{\sigma_{\rho_H}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_k^2}.$$

Средняя квадратическая погрешность определения значения плотности  $\sigma_{\rho_H}$ , %, при нормальных условиях подсчитывается по формуле [16]

$$\sigma_{\rho_H} = 50 \frac{\Delta \rho_H}{\rho_H},$$

где  $\Delta \rho_H$  — максимальная абсолютная погрешность  $\rho_H$ , равная половине единицы разряда последней цифры в табличном значении  $\rho_H$ .

Для рассматриваемой задачи

$$\sigma_{\rho_H} = \frac{50 \cdot 0,0005}{1,166} = 0,021\%.$$

Средняя квадратическая погрешность определения давления, %, подсчитывается по формуле

$$\sigma_p = \frac{1}{2p} \sqrt{(100 \Delta p_6)^2 + (p_M K_M)^2},$$

где  $\Delta p_6$  — максимальная абсолютная погрешность показания барометра (в предложенной задаче  $\Delta p_6 = 0,1$  мм рт. ст. = 13,33 Па);  $p_M$  — верхний предел измерения манометра;  $K_M$  — класс точности манометра;  $p$  — абсолютное давление среды.

Таким образом, для условий задачи

$$\sigma_p = \frac{1}{2(800\,000 + 101\,3000)} \sqrt{(100 \cdot 13,33)^2 + (1\,000\,000 \cdot 1,5)^2} = 0,83\%.$$

Средняя квадратическая погрешность определения температуры, %,

$$\sigma_T = \frac{50\Delta t}{T}$$

где  $\Delta t$  — максимальная абсолютная погрешность измерения температуры.

Для условий задачи

$$\sigma_T = \frac{50 \cdot 2}{373} = 0,27 \%$$

Погрешность  $\sigma_k$  зависит от метода определения коэффициента сжимаемости. Согласно [16] для азота  $\sigma_k = 0,5 \%$ . Таким образом,

$$\sigma_p = \sqrt{0,021^2 + 0,83^2 + 0,27^2 + 0,5^2} = 1,01 \%$$

О5.34. Средняя квадратическая погрешность определения плотности по таблицам определяется по формуле [2]

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{4} \delta_\rho^2 + \sigma_p^2 + \sigma_t^2}$$

где  $\delta_\rho$  — максимальная относительная погрешность табличного значения плотности, вычисляемая по формуле

$$\delta_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho} 100 \%$$

Определение  $\Delta\rho$  производится по [16]. Для заданных условий

$$\delta_\rho = \frac{0,05 \cdot 100}{861,2} = 0,0058 \%$$

Значения  $\sigma_p$  и  $\sigma_t$  определяются, как и в О5.33:

$$\sigma_p = \frac{p_M K_M}{2p} = \frac{16 \cdot 1,5}{2 \cdot 13} = 0,92 \%$$

$$\sigma_t = \frac{50\Delta t}{t} = \frac{50 \cdot 5}{210} = 1,19 \%$$

Таким образом,

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{4} 0,0058^2 + 0,92^2 + 1,19^2} = 1,5 \%$$

Следует заметить, что погрешность определения плотности жидкостей, вычисленная по такой методике, оказывается завышенной. Проиллюстрируем это следующим образом. Предположим, что в предлагаемой задаче погрешности измерений  $t$  и  $p$  максимальны и действительные параметры  $t = 210 + 5 = 215$  °C и  $p = 13 - \frac{16 \cdot 1,5}{100} = 12,76$  МПа. В таком слу-

чае действительная плотность воды  $\rho_d = 854,9$  кг/м<sup>3</sup> и относительная погрешность определения плотности равна

$$\sigma_\rho = \frac{1}{2} \frac{(\rho - \rho_d)}{\rho_d} 100 = \frac{861,2 - 854,9}{2 \cdot 854,9} 100 = 0,37 \%$$

против значения 1,5 %, подсчитанного по [2].

О5.35. Средняя квадратическая погрешность измерения расхода вычисляется по формуле

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4} \sigma_\rho^2}$$

При максимальном расходе, равном  $Q_{пр}$ , коэффициент коррекции на число Рейнольдса  $k_{Re} = 1$  и, следовательно  $\sigma_{k_{Re}} = 0$ . На основании расчетов О5.30—О5.33 для диафрагм имеем  $\sigma_{\alpha_{макс}} = 1,325 \%$ ;  $\sigma_\varepsilon = 0,41 \%$ ;  $\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = 0,705 \%$ ;  $\sigma_\rho = 1,01 \%$ . Таким образом, максимальное значение средней квадратической погрешности измерения расхода

$$\sigma_Q = \sqrt{1,325^2 + 0,41^2 + 0,705^2 + 1,01^2} = 1,85 \%$$

О5.36. Для расчета составляющих погрешности необходимо по [16] определить  $\alpha$ . Расчеты дают следующие значения:  $\alpha_n = 1,117$ ;  $k_{ш} = 1,0044$  и, следовательно,  $\alpha = 1,122$ . Исходя из заданных условий, получаем  $\sigma_{\alpha_d} = 0,064 \%$ ;  $\sigma_{\alpha_D} = 0,087 \%$ ;  $\sigma_{\alpha_n} = 0,564 \%$ ;  $\sigma_{k_{ш}} = 0,215 \%$  и, следовательно,  $\sigma_\alpha = 0,604 \%$ . При сокращенной длине прямых участков до сужающего устройства погрешность  $\sigma_\alpha$  должна быть увеличена на погрешность  $\sigma_{\alpha_L}$ , зависящую от отношения действительной длины прямого участка к диаметру трубы. В рассматриваемой задаче длина прямого участка  $L_2$  за соплом достаточна. Длина  $L_1$  прямого участка до сопла недостаточна:  $L_1/D = 4,4/0,217 = 20,3$ , при этом  $\delta_{\alpha_L} = 0,61 \%$  и  $\sigma'_{\alpha} = 0,604 + 0,306 = 0,91 \%$ .

В соответствии с [16] перепад давления в сопле при предельном расходе для поплавковых дифманометров, когда над ртутью находится вода, определяется из выражения  $\Delta p = 0,926 \Delta p_n = 0,926 \cdot 160 = 148,2$  кПа, и, следовательно,  $\Delta p/p = 0,01467$ . Показатель адиабаты при вычисленном значении  $\Delta p/p$  и заданном  $m = 1,268$ , отсюда  $\Delta \kappa = 0,0005$  и  $\sigma_\kappa = 50 \times 0,0005/1,268 = 0,02 \%$ .

Погрешность измерения перепада для расхода, соответствующего верхнему пределу измерения (при классе дифманометра 1,5), будем считать равной погрешности измерения  $\sqrt{\Delta p}$ , т. е.

$$\sigma_{\Delta p} = \sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \frac{K_Q}{2} = 0,75 \%$$

Аналогично О5.34 имеем

$$\sigma_p = \frac{\rho_M K_M}{2p} = \frac{16 \cdot 1,5}{2 \cdot 10} = 1,2 \%$$

Подставив полученные значения в выражение для  $\sigma_\varepsilon$  [16], имеем:  $\sigma_\varepsilon = 0,20 \%$ .

Плотность пара определяется по таблицам, в силу чего

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_\rho^2 + \sigma_p^2 + \sigma_i^2},$$

где  $\delta_\rho = 0,005 \cdot 100/29,35 = 0,017 \%$ ;

$$\sigma_i = 50 \cdot 5/510 = 0,49 \%$$

Таким образом,  $\sigma_\rho = 1,3 \%$ .

При предельном расходе  $\sigma_{Re} = 0$ , и окончательно

$$\begin{aligned} \sigma_Q &= \sqrt{(\sigma'_\alpha)^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{V/\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \sigma_\rho^2} = \\ &= \sqrt{0,91^2 + 0,207^2 + 0,75^2 + \frac{1}{4} \cdot 1,32^2} = 1,37 \%. \end{aligned}$$

О5.37. Объемный расход  $Q_0$  и параметры ротаметра связаны между собой выражением

$$Q_0 = \alpha f_R \sqrt{\frac{2gV(\rho_\Pi - \rho_B)}{\rho_B f}} = C f_R,$$

где  $f_R$  — площадь кольцевого зазора между поплавком и стенкой трубки, зависящая от положения поплавка,  $m^2$ ;  $C$  — коэффициент пропорциональности.

Подставив численные значения, получим

$$C = 0,98 \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 600 \cdot 10^{-9} (7870 - 998,2)}{998,2 \cdot 78,6 \cdot 10^{-6}}} = 0,995 \text{ м/с.}$$

Следовательно,

$$Q_0 = 0,995 f_R.$$

При  $Q_0 = 10$  л/ч поплавок должен занимать крайнее нижнее положение, при этом площадь кольцевого зазора

$$f_{к1} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot 0,995} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 2,8 \text{ мм}^2.$$

Такой кольцевой зазор будет обеспечен, если внутренний диаметр трубки будет равен

$$d_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} (f_{к1} + f)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} (2,8 + 78,6)} = 10,18 \text{ мм.}$$

При  $Q_0 = 500$  л/ч поплавок должен занять крайнее верхнее положение. Аналогичными расчетами получаем

$$f_{к2} = 139,4 \text{ мм}^2; \quad d_2 = 16,66 \text{ мм.}$$

Угол конусности  $\varphi$  легко определить следующим образом:

$$\varphi = \arctg \frac{(d_2 - d_1)}{2H} = \frac{16,66 - 10,18}{2 \cdot 160} = 1^\circ 9' 42''.$$

О5.38. Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на возникновении ЭДС в проводнике, перемещающемся в магнитном поле. Роль проводника в электромагнитных расходомерах выполняет сама измеряемая жидкость. Поэтому если жидкость будет неэлектропроводной, то в ней не будет индуцироваться ЭДС. Таким образом, электромагнитный метод не может использоваться для измерения расхода неэлектропроводных жидкостей. К электропроводным относятся жидкости с проводимостью  $\kappa \gg 10^{-5}$  См/м, и их расход можно измерять электромагнитными расходомерами. Жидкости с проводимостью  $\kappa < 10^{-5}$  См/м относятся к непроводящим, и их расход измерять электромагнитными расходомерами нельзя.

О5.39. Нет. В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в расходомере, определяется по формуле [15]

$$E = Bdv_{ср},$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;  $d$  — расстояние между электродами;  $v_{ср}$  — средняя скорость потока.

Соотношение ЭДС будет следующим:

$$\frac{E_{НС1}}{E_{КОН}} = \frac{Bd \cdot 10}{Bd \cdot 20} = \frac{1}{2}.$$

О5.40. Определим среднюю скорость воды, проходящей через расходомер:

$$v_{ср} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 200}{3600 \pi \cdot 0,1^2} = 7,07 \text{ м/с.}$$

Значение ЭДС, индуцируемой в электромагнитном расходомере, будет

$$E = Bdv_{ср} = 0,01 \cdot 0,1 \cdot 7,07 = 7,07 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 7,07 \text{ мВ.}$$

О5.41. Милливольтметр показывает напряжение  $U$  на его входных зажимах, которое связано с ЭДС источника соотношением

$$U = E \frac{R_{МВ}}{R_{МВ} + R} = \frac{E}{1 + \frac{R}{R_{МВ}}} = \frac{15}{1 + \frac{10^7}{200}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ мВ.}$$

Следовательно, при измерении расхода воды показания милливольтметра будут практически равны нулю. Это связано с тем что почти вся

ЭДС будет «падать» на внутреннем сопротивлении источника. Очевидно, что для уменьшения погрешности необходимо стремиться к уменьшению внутреннего сопротивления, расходомера относительно входного сопротивления измерительного прибора. Так, если бы тем же расходомером измерялся расход  $\text{HCl}$ , то внутреннее сопротивление расходомера составляло бы около 10 Ом. При этом

$$U = \frac{15}{1 + \frac{10}{200}} = \frac{15}{1,05} = 14,3 \text{ мВ}$$

и погрешность измерения  $\delta \approx 4,7\%$ .

Для обеспечения высокой точности измерения электронный измерительный блок электромагнитных расходомеров должен иметь большое входное сопротивление.

05.42. Необходимо, чтобы труба первичного преобразователя была изготовлена из немагнитного материала, в противном случае магнитные силовые линии замкнутся через трубу, магнитное поле в жидкости будет отсутствовать и сигнал будет нулевым.

Кроме того, желательно, чтобы труба первичного преобразователя была изготовлена из неэлектропроводного материала. Если же это условие выполнить нельзя, то следует покрыть трубу электроизоляционным материалом изнутри с тем, чтобы проводимость трубопровода была примерно на два порядка меньше, чем проводимость жидкости. Электроды также должны быть изолированы от трубы. Если эти условия не будут выполнены, то электроды расходомера будут шунтированы сопротивлением трубы, соизмеримым с сопротивлением между электродами, что приведет к существенному занижению выходного сигнала.

05.43. При постоянном магнитном поле конструкция первичного преобразователя проще и габариты меньше. Однако из-за поляризации электродов они не могут быть использованы для измерения расхода жидкости с ионной проводимостью (в том числе и растворов щелочей) и применяются только для жидкостей с электронной проводимостью (например, жидких металлов).

Для измерения расхода щелочей применяются электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем.

05.44. Паразитная трансформаторная ЭДС в электромагнитном расходомере с переменным магнитным полем имеет место всегда, когда включено питание электромагнитной системы. Полезный сигнал имеет место только при наличии расхода жидкости через расходомер. Таким образом, сигнал на выходе первичного преобразователя электромагнитного расходомера при нулевом расходе жидкости будет паразитной трансформаторной ЭДС. Она может быть устранена с помощью специальных органов настройки.

05.45. Максимальная скорость воды

$$v_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{макс}} \cdot 4}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{300 \cdot 4}{3600 \pi \cdot 0,1^2} = 10,62 \text{ м/с.}$$

Время прохождения звуковых колебаний «по потоку»

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v_{\text{макс}}} = \frac{0,3}{1500 + 10,62} = 198,596 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Время прохождения звуковых колебаний «против потока»

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v_{\text{макс}}} = \frac{0,3}{1500 - 10,62} = 201,426 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Время прохождения звуковых колебаний при нулевой скорости воды

$$\tau_0 = \frac{L}{c} = \frac{0,3}{1500} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

05.46. Разность времени прохождения звука «по потоку» и «против потока»

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 201,426 - 198,596 = 2,83 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Разность фазовых углов будет определяться как разность времени, помноженная на круговую частоту:

$$\Delta\varphi = \Delta\tau\omega = 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 20\,000 = 0,355 \text{ рад.}$$

05.47. Фазовый сдвиг определяется как разность времени прохождения звука «по потоку» и «против потока», помноженная на круговую частоту:

$$\Delta\varphi = \Delta\tau\omega = (\tau_2 - \tau_1)\omega = \left( \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} \right)\omega = \frac{2Lv\omega}{c^2 - v^2}.$$

Для  $c_1 = 1475 \text{ м/с}$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10 \cdot 2\pi \cdot 25\,000}{1475^2 - 10^2} = 0,3608 \text{ рад;}$$

для  $c_2 = 1435 \text{ м/с}$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10 \cdot 2\pi \cdot 25\,000}{1435^2 - 10^2} = 0,3812 \text{ рад.}$$

Следовательно, относительная погрешность

$$\delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_1} = \frac{0,3812 - 0,3608}{0,3608} = 0,0565 = 5,65\%.$$

Можно оценить температурный коэффициент прибора

$$\Delta_t = \frac{\delta\varphi}{\Delta t} = \frac{5,65}{17} = 0,332\%/\text{К.}$$

05.48. В общем случае количество теплоты, выделяемой нагревателем, определяется его мощностью. Разность температур до и после нагревателя определяется расходом измеряемой среды и ее теплоемкостью:

$$t_1 - t_2 = \frac{W}{c_p Q_M},$$

где  $W$  — мощность нагревателя, Вт;  $c_p$  — теплоемкость измеряемой среды, Дж/(кг·К);  $Q_M$  — массовый расход измеряемой среды, кг/с.

Для вычисления  $Q_M$  определяем по таблицам значение плотности воды  $\rho_B$  и воздуха  $\rho_{\text{возд}}$  при 20 °С:

$$\rho_B = 998,2 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{\text{возд}} = 1,205 \text{ кг/м}^3.$$

Определяем значение теплоемкостей:

$$c_B = 4,183 \text{ кДж/(кг·К)}; \quad c_{\text{возд}} = 1,005 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$Q_{M,B} = Q_0 \rho_B = 50 \cdot 998,2 = 49\,910 \text{ кг/ч} = 13,863 \text{ кг/с};$$

$$Q_{M,\text{возд}} = Q_0 \rho_{\text{возд}} = 50 \cdot 1,205 = 60,25 \text{ кг/ч} = 0,016736 \text{ кг/с}.$$

Определяем разность температур для воды:

$$\Delta t_B = \frac{200}{4183 \cdot 13,863} = 0,00345 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким образом, для измерения расхода воды мощность нагревателя мала. Увеличение мощности на 2—3 порядка для получения приемлемых значений  $\Delta t$  вряд ли целесообразно, поэтому в рассматриваемом случае применять такие расходомеры не следует.

Определяем разность температур для воздуха:

$$\Delta t_{\text{возд}} = \frac{200}{1005 \cdot 0,016736} = 11,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В этом случае применение такого расходомера целесообразно.

05.49. Уравнение, устанавливающее связь между скоростью потока и температурой нити, имеет вид [15]

$$W = (T_H - T_B) (a + bv^n);$$

$$a = 0,5\pi\lambda \text{ и } b = C \text{Pr}^{0,4} \pi\lambda \left( \frac{d\rho}{\mu} \right)^n,$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности среды при средней температуре потока, Вт/(м·К);  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — динамическая вязкость, Па·с;  $\text{Pr}$  — число Прандтля.

Определим значение  $\lambda_{\text{ср}}$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  и  $\text{Pr}$  [18, 19] и, подставив их в исходное уравнение, получим

$$W = (T_H - 253) \left[ 0,5\pi \cdot 2,28 \cdot 10^{-2} + C \text{Pr}^{0,4} \pi \cdot 2,28 \cdot 10^{-2} \left( \frac{0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1,395}{16,2 \cdot 10^{-6}} v \right)^n \right].$$

Определим сначала значение  $\text{Re}$  при  $v = 2$  м/с:

$$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1,395}{16,2 \cdot 10^{-6}} = 8,6.$$

При  $5 < \text{Re} < 80$  согласно [15]  $n = 0,4$  и  $C \text{Pr}^{0,4} = 0,81$ , окончательно получаем выражение уравнения связи

$$W = (T_H - 253) (0,0358 + 0,1040v^{0,4}).$$

Отсюда, подставив значение  $W$ , имеем:

для  $v = 2$  м/с

$$T_H = \frac{8}{0,0358 + 0,104 \cdot 2^{0,4}} + 253 = 299,3 \text{ К};$$

для  $v = 30$  м/с

$$T_H = \frac{8}{0,0358 + 0,104 \cdot 30^{0,4}} + 253 = 271,2 \text{ К}.$$

05.50. В преобразователе расхода щелевого типа с прямоугольным отверстием истечения (см. рис. 5.6) расход определяется по высоте уровня жидкости над нижним краем отверстия [15]

$$Q = C \sqrt{h}.$$

Расход через отверстие шириной  $x$  и высотой  $dy$ , находящееся на высоте  $y$  от нижней кромки отверстия истечения, будет равен

$$dQ = Ax dy \sqrt{y}.$$

Если проинтегрировать это выражение от 0 до  $h$ , то получим расход через отверстие. Если считать, что  $A = \text{const}$ , то

$$Q = Ax \int_0^h \sqrt{y} dy = \frac{2}{3} Ax h^{3/2}.$$

Таким образом, уравнение расхода запишется в виде

$$Q = Kh^{3/2}.$$

05.51. Для равномерной шкалы уравнение расхода должно иметь вид

$$Q = Kh,$$

причем

$$K = \frac{Q_{\text{макс}}}{h_{\text{макс}}} = \frac{520}{0,5} = 1040 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

С другой стороны (см. решение 05.50),

$$Q_{\text{макс}} = Kh_{\text{макс}} = \int_0^{h_{\text{макс}}} Ax \sqrt{h} dh.$$

Требуется определить зависимость  $x=f(h)$ .

Из последнего уравнения очевидно, что при выполнении условия  $B=x\sqrt{h}$  и при  $A=\text{const}$  зависимость будет иметь вид  $Q=ABh$ .  
Определим значения  $A$  и  $B$ :

$$B = x_{\text{макс}} \sqrt{h_{\text{макс}}} = 0,15 \sqrt{0,5} = 0,106 \text{ м}^{3/2};$$

$$A = K/B = 1040/0,106 = 9811,3 \text{ м/ч.}$$

Определим значение  $x_{\text{мин}}$  при  $h_{\text{мин}}=10$  мм:

$$x_{\text{мин}} = B/\sqrt{h_{\text{мин}}} = 0,106/\sqrt{0,01} = 1,06 \text{ м.}$$

Таким образом, если щелевое отверстие истечения будет изменять ширину по высоте в соответствии с выражением

$$x = 0,106/\sqrt{h}$$

и если  $x_{\text{макс}}=0,15$  м и  $x_{\text{мин}}=1,06$  м, то уравнение расхода,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , будет иметь вид

$$Q = 1040h.$$

## Глава шестая

### АНАЛИЗ СОСТАВА СРЕД

Об.1. Электропроводность  $\kappa$  раствора, заполняющего ячейку,

$$\kappa = 1/R.$$

Удельная электропроводность  $\kappa_0$  связана с постоянной ячейки  $K$  зависимостью

$$\kappa_0 = K\kappa = K/R_{\text{я}},$$

откуда  $K=\kappa_0/\kappa=\kappa_0 R_{\text{я}}=12,1 \cdot 13,7=165,8$  1/м.

Об.2. Удельная электропроводность раствора  $\kappa_0$  может быть определена из выражения

$$\kappa_0 = \frac{K}{R_{\text{я}}} = \frac{11,2}{5 \cdot 10^6} = 2,24 \cdot 10^{-6} \text{ См/м.}$$

Концентрация

$$C = \frac{\kappa_0}{a} = \frac{2,24 \cdot 10^{-6}}{1,75 \cdot 10^{-8}} = 128 \text{ мг/л.}$$

Об.3. Температурная компенсация возможна в том случае, если изменение сопротивления  $\Delta R_{\text{я}}$  электродной ячейки будет равно (и противоположно по знаку) изменению сопротивления медного резистора.

В узком интервале температур можно считать, что зависимость сопротивления ячейки от температуры имеет вид

$$R_{\text{я}t} = \frac{R_{\text{я}1}}{1 + \beta(t-t_1)} = \frac{R_{\text{я}1}}{1 + \beta\Delta t},$$

где  $t$  — текущая температура на интервале  $t_1-t_2$ ;  $\beta$  — средний температурный коэффициент электропроводности раствора на интервале  $t_1-t_2$ ;  $R_{\text{я}t}$  и  $R_{\text{я}1}$  — сопротивления ячейки при значениях температуры  $t$  и  $t_1$ .

Изменение сопротивления  $\Delta R_{\text{я}}$  ячейки при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$  равно

$$\Delta R_{\text{я}} = R_{\text{я}2} - R_{\text{я}1} = -R_{\text{я}1} \frac{\beta(t_2-t_1)}{1 + \beta(t_2-t_1)},$$

т. е. сопротивление нелинейно уменьшается с ростом температуры (рис. Об.1).

Изменение сопротивления  $\Delta R_{\text{м}}$  медного резистора при изменении его температуры от  $t_1$  до  $t_2$  равно

$$\Delta R_{\text{м}} = R_{\text{м}0} \alpha(t_2-t_1),$$

где  $R_{\text{м}0}$  — сопротивление резистора при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha=4,26 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  — температурный коэффициент электросопротивления меди (рис. Об.1).

Из-за нелинейного изменения  $\Delta R_{\text{я}}$  и линейного изменения  $\Delta R_{\text{м}}$  полная компенсация (т. е. выполнение условия  $\Delta R_{\text{я}} = -\Delta R_{\text{м}}$ ) возможна не более чем в двух точках температурного диапазона. В предложенной задаче  $t_1=20^\circ\text{C}$ ;  $t_2=40^\circ\text{C}$  и, следовательно,  $\Delta t=20^\circ\text{C}$ . Отсюда легко найти  $R_{\text{м}0}$  из условия

$$R_{\text{м}0} \alpha \Delta t = R_{\text{я}1} \frac{\beta \Delta t}{(1 + \beta \Delta t)};$$

$$R_{\text{м}0} = \frac{R_{\text{я}1} \beta}{(1 + \beta \Delta t) \alpha} = \frac{K \beta}{\kappa_0 (1 + \beta \Delta t) \alpha}.$$

В нашем случае

$$R_{\text{м}0} = \frac{190}{7,18} \frac{1}{(1 + 0,0201 \cdot 20)} \frac{0,0201}{0,00426} = 89,06 \text{ Ом.}$$

Таким образом, теоретически возможна компенсация температурной погрешности в двух точках. При небольших концентрациях растворов  $\kappa_0$  мало, в силу чего  $R_{\text{м}0}$  получается большим. Например, для 0,1 %-ного раствора  $\text{KCl}$   $\kappa_0=0,171$  См/м;  $\beta=0,0222 \text{ К}^{-1}$ , и в этом случае

$$R_{\text{м}0} = \frac{190}{0,171} \frac{1}{1 + 0,0222 \cdot 20} \frac{1}{0,00426} = 4010 \text{ Ом.}$$

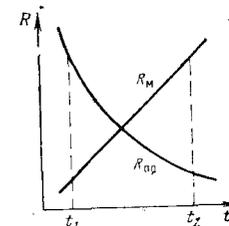


Рис. Об.1

Медный резистор с таким сопротивлением изготовить сложно. Поэтому при малых концентрациях для обеспечения температурной компенсации при небольших  $\kappa_0$  электроды ячейки шунтируются манганиновым резистором.

Об.4. Приведенное сопротивление  $R_{пр}$  измерительной ячейки, шунтированной манганиновым резистором  $R_{ш}$ , будет равно

$$R_{пр} = R_{я} R_{ш} / (R_{я} + R_{ш}).$$

При изменении температуры раствора от первоначального значения  $t_1$  до текущего  $t$  приведенное сопротивление  $R_{прt}$  станет равным (см. Об.3)

$$R_{прt} = R_{ят} R_{шт} / (R_{ят} + R_{шт}) = R_{я1} R_{ш} / [R_{я1} + R_{ш} (1 + \beta \Delta t)],$$

где  $R_{я1}$  — сопротивление электродной ячейки при  $t_1$ .

Очевидно, что зависимость приведенного сопротивления ячейки от температуры имеет нелинейный характер (рис. Об.1), в то время как изменение сопротивления компенсирующего медного резистора имеет линейный характер (рис. Об.1). Поэтому полная температурная компенсация возможна только при двух значениях температуры. Для осуществления компенсации необходимо, чтобы изменение приведенного сопротивления  $\Delta R_{пр}$  было равным и противоположным по знаку изменению сопротивления медного резистора  $\Delta R_{м}$ . Для  $\Delta t = t_2 - t_1$  имеем

$$\Delta R_{м} = R_{м2} - R_{м1} = R_{м0} \alpha \Delta t;$$

$$\Delta R_{пр} = R_{пр2} - R_{пр1} = - \frac{R_{я1} R_{шт}}{R_{я1} + R_{шт}} \frac{\beta \Delta t}{\frac{R_{я1}}{R_{шт}} + (1 + \beta \Delta t)}.$$

Отсюда легко получить выражение для  $R_{м0}$ :

$$R_{м0} = \frac{R_{я1} R_{шт}}{R_{я1} + R_{шт}} \frac{\beta}{\frac{R_{я1}}{R_{шт}} + (1 + \beta \Delta t)} \frac{1}{\alpha}.$$

Определим значение сопротивления медного резистора при  $t=0^\circ\text{C}$ , учитывая, что по условию  $R_{шт} = R_{я1}$ :

$$R_{м0} = \frac{R_{я1} \beta}{2(2 + \beta \Delta t) \alpha} = \frac{K \beta}{2 \kappa_0 (2 + \beta \Delta t) \alpha} = \frac{190 \cdot 0,0201}{2 \cdot 7,18 (2 + 0,0201 \cdot 20) 0,00426} = 26 \text{ Ом};$$

$$R_{шт} = R_{я1} = K / \kappa_0 = 190 / 7,18 = 26,46 \text{ Ом}.$$

Об.5. Очевидно, что максимальная погрешность будет иметь место, когда  $\partial R_{пр} / \partial t = -\partial R_{м} / \partial t$ . Определим температуру, при которой выполняется это условие (см. решение Об.4)

$$\frac{\partial R_{пр}}{\partial t} = R_{я1} R_{шт} \left\{ - \frac{1}{[R_{я1} + R_{шт} (1 + \beta \Delta t)]^2} \right\} R_{шт} \beta = \frac{R_{я1} R_{шт}^2 \beta}{[R_{я1} + R_{шт} (1 + \beta \Delta t)]^2},$$

где  $\Delta t = t - t_1$  — отклонение текущей температуры  $t$  от исходной температуры  $t_1$ ;

$$\frac{\partial R_{м}}{\partial t} = R_{м0} \alpha.$$

Отсюда равенство

$$\partial R_{пр} / \partial t = -\partial R_{м} / \partial t$$

выполняется при условии

$$\frac{R_{я1} R_{шт}^2 \beta}{R_{м0} \alpha} = (R_{я1} + R_{шт} + R_{шт} \beta \Delta t)^2;$$

следовательно,

$$t - t_1 = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{R_{я1} \beta}{R_{м0} \alpha} - \frac{R_{я1}}{\beta R_{шт}} - \frac{1}{\beta}} = \frac{1}{0,0201} \sqrt{\frac{190 \cdot 0,0201}{7,18 \cdot 25,99 \cdot 0,00426} - \frac{1}{0,0201} - \frac{1}{0,0201}} = 9,55^\circ\text{C},$$

откуда  $t = t_1 + 9,55 = 20 + 9,55 = 29,55^\circ\text{C}$ .

При этой температуре сопротивление измерительной ячейки

$$R_{прt} = \frac{R_{я1} R_{шт}}{R_{я1} + R_{шт} (1 + \beta \Delta t)} = \frac{26,46}{2 + 0,0201 \cdot 9,55} = 12,07 \text{ Ом}.$$

Медный резистор при  $t = 29,55^\circ\text{C}$  имеет сопротивление

$$R_{мt} = 26 (1 + 0,00426 \cdot 29,55) = 29,26 \text{ Ом}.$$

В случае полной температурной компенсации при любой температуре  $t$  должно соблюдаться равенство

$$(R_{пр1} + R_{м1}) = (R_{прt} + R_{мt}).$$

$$\text{При } R_{шт} = R_{я1} \text{ имеем } R_{пр1} + R_{м1} = \frac{K}{2\kappa} + R_{м0} (1 + \alpha t_1) = 13,23 + 28,20 = 41,43 \text{ Ом}.$$

При  $t = 29,55^\circ\text{C}$

$$R_{прt} + R_{мt} = 12,07 + 29,26 = 41,43 \text{ Ом}.$$

Следовательно, погрешность компенсации будет равна

$$(R_{прt} + R_{мt}) - (R_{пр1} + R_{м1}) = 41,33 - 41,43 = -0,1 \text{ Ом}.$$

На погрешность температурной компенсации вторичный прибор будет реагировать как на уменьшение сопротивления электродной ячейки на значение  $\Delta R_{я}$ , вызывающее уменьшение  $R_{пт}$  на 0,1 Ом:

$$\Delta R_{я} = R_{ят} - R_{ят}^* = \frac{R_{ш} R_{пт}}{R_{ш} - R_{пт}} - \frac{(R_{пт} - 0,1) R_{ш}}{R_{ш} - (R_{пт} - 0,1)} =$$

$$= \frac{12,07 \cdot 29,26}{29,26 - 12,07} - \frac{11,97 \cdot 29,26}{29,26 - 11,97} = 20,54 - 20,26 = 0,28 \text{ Ом.}$$

Такое уменьшение сопротивления электродной ячейки эквивалентно увеличению удельной электропроводности раствора на

$$\Delta \kappa_0 = \kappa'_0 - \kappa_0 = 190/20,26 - 190/20,54 =$$

$$= 9,378 - 9,25 = 0,128 \text{ См/м.}$$

Абсолютная погрешность  $\Delta C$  прибора, отградуированного в процентах концентрации, может быть легко определена с использованием заданной зависимости удельной электропроводности  $\kappa_0$  от концентрации

$$\kappa_0 = 7,18 + 1,38 (C - 5); \quad \Delta C = \frac{\Delta \kappa_0}{1,38} = 0,093 \% \text{ КС1.}$$

Относительная погрешность

$$\Delta C/C = 0,093/5 = 1,86\%.$$

Об.6. Определим сопротивление электродной ячейки при концентрациях 5 и 50 мг/л:

$$R_{я} = 4l/\pi d_{эф}^2 \kappa_0.$$

Для  $C_1 = 5$  мг/л  $\kappa_0 = 191,5 = 955$  мкСм/м;

$$R_{я1} = \frac{4 \cdot 7 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,955 \cdot 10^{-3}} = 77,13 \text{ МОм.}$$

Для  $C_2 = 50$  мг/л  $\kappa_0 = 191,50 = 9,55$  мкСм/м;

$$R_{я2} = \frac{4 \cdot 7 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 9,55 \cdot 10^{-3}} = 7,713 \text{ МОм.}$$

Значения  $R_{ш}$  и  $R_{м0}$  по [23] рекомендуется определять из выражений

$$R_{ш} = \sqrt{\frac{R_{я1} R_{я2}}{1 + \beta \Delta t}};$$

$$R_{м0} = \frac{R_{я1} R_{ш}^2 \beta}{(R_{я1} + R_{ш}) [R_{я1} + R_{ш} (1 + \beta \Delta t)] \alpha}.$$

Определяя для нашего случая значения  $R_{ш}$  и  $R_{м0}$  из двух этих выражений, получаем

$$R_{ш} = \sqrt{\frac{77,13 \cdot 7,713 \cdot 10^{12}}{1 + 0,0229 \cdot 20}} = 20,2 \text{ МОм};$$

$$R_{м0} =$$

$$= \frac{77,13 \cdot 10^6 (20,2 \cdot 10^6)^2 \cdot 0,0229}{(77,13 \cdot 10^6 + 20,2 \cdot 10^6) [77,13 + 20,2 (1 + 0,0229 \cdot 20)] 10^6 \cdot 0,00426} =$$

$$= 16,309 \text{ МОм.}$$

Изготовление такого медного резистора для температурной компенсации практически неосуществимо. Поэтому, когда сопротивление ячейки имеет значение, исчисляемое десятками килоом и более, целесообразнее задаваться реальным значением  $R_{м0}$ , которое не должно превышать 200 Ом, и, наоборот, когда сопротивление ячейки имеет значение единиц или десятков ом, возможно температурную компенсацию осуществить без шунтирующего сопротивления (см. Об.3).

В нашем случае задаемся  $R_{м0} = 100$  Ом. Далее воспользуемся уравнениями из Об.4 и определим  $R_{ш}$  для  $R_{я1}$ :

$$R_{ш1} = \frac{R_{я1} \left[ -(2 + \beta \Delta t) \pm \sqrt{(2 + \beta \Delta t)^2 - 4 \left( 1 + \beta \Delta t - \frac{R_{я1} \beta}{R_{м0} \alpha} \right)} \right]}{2 \left( 1 + \beta \Delta t - \frac{R_{я1} \beta}{R_{м0} \alpha} \right)} =$$

$$= \frac{77,13 \cdot 10^6 \left[ -(2 + 0,0229 \cdot 20) + \sqrt{(2 + 0,0229 \cdot 20)^2 - 4 \left( 1 + 0,0229 \cdot 20 - \frac{77,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0229}{100 \cdot 0,00426} \right)} \right]}{2 \left( 1 + 0,0229 \cdot 20 - \frac{77,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0229}{100 \cdot 0,00426} \right)} =$$

$$= \frac{\frac{77,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0229}{100 \cdot 0,00426}}{2 \left( 1 + 0,0229 \cdot 20 - \frac{77,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0229}{100 \cdot 0,00426} \right)} = 37904 \text{ Ом.}$$

Для  $R_{я2}$  значение  $R_{ш}$  при  $R_{м0} = 100$  Ом должно быть равным

$$R_{ш2} = \frac{7,713 \cdot 10^6 \cdot 1287,8}{0,8292 \cdot 10^6} = 11980 \text{ Ом.}$$

В связи с тем, что значения  $R_{ш}$  для различных концентраций, заданных условиями задачи, различаются примерно в 3 раза, необходимо при определении  $R_{ш}$  брать в расчете значение сопротивления ячейки,

соответствующее номинальной концентрации раствора в данном технологическом процессе. Сопротивление ячейки при  $C=40$  мг/л

$$R_{ян} = \frac{4,7 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 191 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 9,64 \text{ МОм.}$$

При заданном  $R_{м0}=100$  Ом можно определить номинальное сопротивление шунта

$$R_{шн} = \frac{9,64 \cdot 10^6 \left[ -2,458 + \sqrt{2,458^2 + 4 \cdot 0,5182 \cdot 10^6} \right]}{2 \cdot 0,5182} = 13412 \text{ Ом.}$$

Оценим температуру, соответствующую максимальной погрешности при  $R_{ян}=9,64 \cdot 10^6$  Ом (см. Об.5):

$$t - t_1 = \frac{R_{шн} \sqrt{\frac{R_{ян} \beta}{R_{м0} \alpha}} - R_{ян} - R_{шн}}{R_{шн} \beta} =$$

$$= \frac{13412 \sqrt{\frac{9,64 \cdot 10^6 \cdot 0,0229}{100 \cdot 0,00426}} - 9,6414 \cdot 10^6 - 13412}{13412 \cdot 0,0229} = 2,5^\circ \text{C};$$

$$t = 20 + 2,5 = 22,5^\circ \text{C}.$$

При этой температуре приведенное сопротивление ячейки

$$R_{пр1} = \frac{R_{ян} R_{шн}}{R_{ян} + R_{шн} (1 + \beta \Delta t)} =$$

$$= \frac{9,64 \cdot 10^6 \cdot 13412}{9,64 \cdot 10^6 + 13412 (1 + 0,0229 \cdot 2,5)} = 13392,3 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ячейки при  $20^\circ \text{C}$

$$R_{пр1} = \frac{R_{ян} R_{шн}}{R_{ян} + R_{шн}} = \frac{9,64 \cdot 10^6 \cdot 13412}{9,64 \cdot 10^6 + 13412} = 13393,4 \text{ Ом.}$$

Сопротивление медного резистора при  $20^\circ \text{C}$

$$R_{м1} = R_{м0} (1 + \alpha t_1) = 100 (1 + 0,00426 \cdot 20) = 108,5^\circ \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление при  $20^\circ \text{C}$

$$R_{пр1} + R_{м1} = 13393,4 + 108,5 = 13501,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивление медного резистора при  $22,5^\circ \text{C}$

$$R_{м1} = R_{м0} (1 + \alpha t) = 100 (1 + 0,00426 \cdot 22,5) = 109,6 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление при  $22,5^\circ \text{C}$

$$R_{пр1} + R_{м1} = 13392,3 + 109,6 = 13501,9 \text{ Ом.}$$

Погрешность в омах определяется как разность

$$(R_{пр1} + R_{м1}) - (R_{пр1} + R_{м1}) = 13501,9 - 13501,9 = 0.$$

Однако несмотря на то, что погрешность получилась нулевой, ячейка с данными значениями  $R_{шн}$  и  $R_{м0}$  будет работать с малыми погрешностями только при определенной концентрации (в нашем случае  $C=40$  мг/л). Во всех других случаях погрешности будут значительны. В силу этого при малых концентрациях целесообразным может оказаться использование в качестве термокомпенсирующих элементов полупроводниковых терморезисторов или использование специальных схем компенсации [9, 23].

Об.7. Концентраметры, использующие электродную измерительную ячейку, в принципе измеряют электропроводность, и градуировка шкалы по процентному содержанию компонента возможна только для однокомпонентных растворов. Прибор покажет такое содержание NaCl, раствор которого будет иметь ту же электропроводность, что и 6 %-ный раствор KCl ( $\kappa'_0=8,564$  См/м). Это содержание NaCl (показания прибора) определяется из условия задачи

$$8,564 = 7,01 + 1,104 (C - 5),$$

откуда  $C=6,408$  % NaCl.

Об.8. Изменение показаний концентраметра возникает за счет изменения электропроводности в связи с попаданием в раствор NaOH. Для слабоконцентрированных растворов электропроводности отдельных веществ можно суммировать. На практике для расчета электропроводности вводится так называемая относительная проводимость, которая представляет собой проводимость вещества в долях проводимости раствора NaCl такой же концентрации.

Относительная электропроводность NaOH составляет 2,8. Поэтому случайное попадание в раствор 5 мг/л NaOH вносит в показания концентраметра погрешность в 14 мг/л NaCl, что соответствует в нашем случае относительной погрешности, равной 14 % измеряемой концентрации.

Об.9. Принцип действия безэлектродных компенсационных кондуктометров основан на уравнивании магнитного потока, создаваемого в измерительном трансформаторе  $Tr2$  жидкостным контуром, магнитным потоком компенсационного контура (см. рис. 6.2). В случае неравенства этих магнитных потоков в сигнальной обмотке  $n_3$  измерительного трансформатора  $Tr2$  возникает сигнал, который через усилитель УС и реверсивный двигатель РД изменяет компенсирующее напряжение  $U_k$  компенсационного контура.

Магнитный поток в жидкостном контуре зависит от числа витков жидкостного контура  $n_ж$  и тока  $I_ж$ , протекающего в жидкости. Ток  $I_ж$  зависит от напряжения питания  $U_{пит}$ , коэффициента преобразования  $n_1/n_ж$  и сопротивления жидкостного контура  $R_ж$ . Таким образом,

$$I_ж = \frac{U_{пит} n_ж}{R_ж n_1} = U_{пит} \frac{n_ж}{n} \kappa,$$

где  $\kappa$  — проводимость жидкостного контура. Магнитный поток, создаваемый током  $I_{ж}$  в измерительном трансформаторе  $Tr2$  и пропорциональный намагничивающей силе  $I_{ж}n_{ж}$ , будет уравниваться магнитным потоком, создаваемым током  $I_{к}$  компенсационного контура и пропорциональным намагничивающей силе  $I_{к}n_{2}$ :

$$I_{ж} n_{ж} = I_{к} n_{2}$$

или

$$U_{пит} n_{ж} n_{ж} / (R_{ж} n_{1}) = U_{к} n_{2} / R_{к},$$

где  $R_{к}$  — суммарное сопротивление компенсационного контура. При  $U_{пит} = \text{const}$  и для заданных  $n_{1}$ ,  $n_{2}$  и  $n_{ж}$  значение  $U_{к}$  должно однозначно определяться только концентрацией раствора.

Таким образом, уравнение шкалы кондуктометра имеет вид

$$U_{к} = \frac{U_{пит} n_{ж}^2}{n_{1} n_{2}} R_{к} \kappa. \quad (Об.1)$$

Электропроводность раствора, а соответственно и сопротивление жидкостного контура  $R_{ж}$  изменяют свое значение с изменением температуры, что при неизменном напряжении питания приведет к изменению намагничивающей силы  $I_{ж}n_{ж}$ . Например, с увеличением температуры уменьшается  $R_{ж}$ , ток увеличится на  $\Delta I_{ж}$  и намагничивающая сила увеличится на  $\Delta I_{ж}n_{ж}$ . Если предположить, что  $U_{к}$  не изменится при изменении  $R_{т}$  [условие обеспечивается при  $R_{т} \gg R_{1}$  и  $R_{1} \gg (R_{2} + R_{3})$ , что имеет место в реальных условиях], то можно подобрать элементы компенсационного контура так, что уменьшение  $R_{т}$  вызовет прирост  $\Delta I_{к}$ , который увеличит намагничивающую силу  $\Delta I_{к}n_{к} = \Delta I_{ж}n_{ж}$ . При этом следящая система останется неподвижной. Таким образом, в предложенной схеме температурная компенсация осуществима. Очевидно, что показания кондуктометра, характеризуемые положением движка реохорда  $R_{3}$ , а также напряжением  $U_{к}$ , не будут изменяться с изменением температуры раствора, если для любой температуры раствора от  $t_{1}$  до  $t_{2}$  будет оставаться постоянным отношение

$$R_{к} / R_{ж} = R_{к1} / R_{ж1}.$$

Обозначим исходную температуру раствора  $t_{1}$  и возможный диапазон изменения температуры  $\Delta t = t_{2} - t_{1}$ , соответственно исходные значения сопротивлений  $R_{к1}$  и  $R_{ж1}$  и их изменения  $\Delta R_{к}$  и  $\Delta R_{ж}$ . Тогда условие компенсации можно переписать в виде

$$\frac{R_{к1}}{R_{ж1}} = \frac{R_{к1} + \Delta R_{к}}{R_{ж1} + \Delta R_{ж}} = \frac{R_{к1} \left(1 + \frac{\Delta R_{к}}{R_{к1}}\right)}{R_{ж1} \left(1 + \frac{\Delta R_{ж}}{R_{ж1}}\right)}$$

или окончательно

$$\Delta R_{к} / R_{к1} = \Delta R_{ж} / R_{ж1}.$$

Изменение сопротивления жидкости может быть описано выражением

$$R_{ж1} = R_{ж0} / (1 + \beta t),$$

откуда

$$\Delta R_{ж} / R_{ж1} = -\beta (t_{2} - t_{1}) / (1 + \beta t_{2}).$$

Соответственно сопротивление компенсационного контура

$$R_{к1} = R_{1} + \frac{R_{т} R_{ш}}{R_{т} + R_{ш}}, \quad \text{причем } R_{т} = R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{0}} \right). \quad (Об.2)$$

Отсюда имеем

$$\Delta R_{к} = \frac{R_{ш}^2 R_{0} \left[ \exp B \left( \frac{1}{T_{2}} - \frac{1}{T_{0}} \right) - \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right) \right]}{\left( R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{2}} - \frac{1}{T_{0}} \right) + R_{ш} \right) \left[ R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right) + R_{ш} \right]}.$$

Расчетное условие температурной компенсации имеет вид

$$\frac{R_{ш}^2 R_{0} \left[ \exp B \left( \frac{1}{T_{2}} - \frac{1}{T_{0}} \right) - \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right) \right]}{\left( R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{2}} - \frac{1}{T_{0}} \right) + R_{ш} \right) \left[ (R_{1} + R_{ш}) R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right) + R_{1} R_{ш} \right]} = - \frac{\beta (t_{2} - t_{1})}{1 + \beta t_{2}}. \quad (Об.3)$$

В уравнении (Об.3) неизвестны  $R_{1}$  и  $R_{ш}$ . Значения  $R_{0}$  и  $B$  заданы характеристиками терморезистора. Значения  $t_{1}$ ,  $t_{2}$  и  $\beta$  задаются условиями работы кондуктометра и свойствами раствора. Для определения  $R_{1}$  и  $R_{ш}$  возьмем уравнение для  $U_{к}$  (Об.1) при концентрации, соответствующей верхнему пределу измерения и температуре  $t_{1}$ :

$$U_{к, \text{макс}} = U_{пит} \frac{n_{ж}^2 R_{к1}}{n_{1} n_{2} R_{ж1}^{\text{мин}}}. \quad (Об.4)$$

Решая совместно (Об.2) и (Об.4), получаем выражение для  $R_{1}$ :

$$R_{1} = R_{ж1}^{\text{мин}} \frac{U_{к, \text{макс}} n_{2} n_{1}}{U_{пит} n_{ж}^2} - \frac{R_{ш} R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right)}{R_{ш} + R_{0} \exp B \left( \frac{1}{T_{1}} - \frac{1}{T_{0}} \right)}. \quad (Об.5)$$

Подставив (Об.5) в (Об.3), получим выражение для  $R_{шт}$ :

$$\frac{R_{шт}^2 R_0 \left[ \exp B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) - \exp B \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_0} \right) \right]}{R_{шт} \left[ R_{шт} + R_0 \exp B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[ R_{шт} + R_0 \exp B \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_0} \right) \right]} = \frac{\beta (t_2 - t_1)}{1 + \beta t_2} \quad (Об.6)$$

Определяем значение  $R_{шт}$  для  $C_{\max}$  и  $t$ , т.е. для  $R_{шт}^{\min}$ . Очевидно, в этом случае  $U_{к} = U_{к.макс}$ . Тогда

$$R_{шт} = R_{шт}^{\min} \frac{U_{к.макс} n_1 n_2}{U_{шт} n_{ж}^2} = \frac{k}{\kappa_{01}^{\max}} \frac{U_{к.макс} n_1 n_2}{U_{шт} n_{ж}^2}$$

Подставив  $R_{шт}$  в (Об.6), определяем  $R_{шт}$ . Затем, подставив  $R_{шт}$  в (Об.2), определяем  $R_1$ .

Об.10. Для расчета воспользуемся формулами решения задачи Об.9. Определим значение отношения  $R_{ж}/R_{к}$  для конца шкалы. На конце шкалы по условию компенсационный сигнал  $U_{к.макс} = 10$  В;

$$\frac{R_{ж}(C_3)}{R_{к}} = \frac{U_{шт} n_{ж}^2}{U_{к.макс} n_1 n_2} = \frac{127 \cdot 1 \cdot 1}{10 \cdot 10 \cdot 127} = 0,01.$$

Определим значение  $R_{жн}$  при  $C_3 = 15\%$  КСI, соответствующей концу шкалы при температуре  $t_{н} = 35^\circ\text{C}$ :

$$R_{жн}(C_3) = \frac{K(1 + \beta_3 t_1)}{\kappa_{03}(1 + \beta_3 t_{н})} = \frac{700(1 + 0,0179 \cdot 20)}{20,9(1 + 0,0179 \cdot 35)} = 27,96 \text{ Ом.}$$

Соответственно значение  $R_{кн}$  при этом должно равняться

$$R_{кн} = \frac{R_{жн}(C_3) U_{к.макс} n_2 n_1}{U_{шт} n_{ж}^2} = \frac{27,96 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 127}{127 \cdot 1 \cdot 1} = 2796 \text{ Ом.}$$

Подставляем  $R_{кн} = 2796$  Ом в уравнение (Об.6) и определяем  $R_{шт}$ :

$$\frac{R_{шт}^2 \cdot 5000 \left[ e^{2300 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273} \right)} - e^{2300 \left( \frac{1}{323} - \frac{1}{273} \right)} \right]}{2796 \left[ R_{шт} + 5000e^{2300 \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{273} \right)} \right] \left[ R_{шт} + 5000e^{2300 \left( \frac{1}{323} - \frac{1}{273} \right)} \right]} = \frac{0,0188(50 - 20)}{1 + 0,0188 \cdot 50};$$

$$R_{шт}^2 - 5268,26 R_{шт} - 4822747,3 = 0;$$

$$R_{шт} = 6063,6 \text{ Ом.}$$

Подставив  $R_{кн}$  в (Об.2), определим  $R_1$ :

$$R_1 = 2796 - \frac{6063,6 \cdot 5000e^{2300 \left( \frac{1}{308} - \frac{1}{273} \right)}}{6063,6 + 5000e^{2300 \left( \frac{1}{308} - \frac{1}{273} \right)}} = 1338 \text{ Ом.}$$

В связи с тем, что температурные коэффициенты раствора для различных концентраций различны, уравнение шкалы будет изменяться с изменением температуры. Компенсационный сигнал  $U_{к}$ , определяющий показания прибора, можно определить из выражения

$$U_{кн} = \frac{U_{шт} n_{ж}^2 R_{кн}}{n_2 n_1 K} \kappa_0(C) = \frac{127 \cdot 1 \cdot 1}{127 \cdot 10} \cdot \frac{2796}{700} (0,2472 + 1,715C - 0,004072C^2) = 0,09874 + 0,6850C - 0,001626C^2.$$

Определим  $U_{к}$  при различных концентрациях: при  $C_3 = 15\%$   $U_{кн3} = 10,008$  В; при  $C_2 = 10\%$   $U_{кн2} = 6,786$  В; при  $C_1 = 5\%$   $U_{кн1} = 3,483$  В. Определим погрешность, которая будет иметь место при  $C_1 = 5\%$  КСI и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и при  $C_3 = 15\%$  КСI и  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ .

Для  $C_1 = 5\%$  КСI и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$   $\kappa_{01}(C_1) = 7,177$  См/м;  $R_{к1} = 3250,29$  Ом. Для  $C_3 = 15\%$  КСI и  $t_2 = 50^\circ\text{C}$   $\kappa_{02}(C_3) = 29,192$  См/м;  $R_{к2} = 2448,29$  Ом.

Определим показания кондуктометра  $U_{кн1}$  при  $C_1 = 5\%$  КСI и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $U_{кн2}$  при  $C_3 = 15\%$  и  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ :

$$U_{кн1} = R_{к1} \kappa_{01}(C_1) / U_{к.макс} K = \frac{3250,29}{10 \cdot 700} \cdot 7,177 = 3,332 \text{ В;}$$

$$U_{кн2} = R_{к2} \kappa_{02}(C_3) / U_{к.макс} K = \frac{2448,29}{10 \cdot 700} \cdot 29,192 = 10,210 \text{ В.}$$

Диапазон измерения

$$U_{кн2} - U_{кн1} = 10,008 - 3,483 = 6,525 \text{ В.}$$

Оценим погрешность при  $C_3 = 15\%$  КСI и  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ :

$$\delta U = \frac{U_{кн2} - U_{кн3}}{U_{кн2} - U_{кн1}} 100 = \frac{10,210 - 10,008}{6,525} \cdot 100 = +3,09\%.$$

Для  $C_1 = 5\%$  КСI и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$

$$\delta U = \frac{U_{кн1} - U_{кн1}}{U_{кн2} - U_{кн1}} 100 = \frac{3,332 - 3,483}{6,525} \cdot 100 = -2,31\%.$$

Во всех остальных точках погрешность будет меньше. Полученные погрешности можно считать удовлетворительными. Изменение на  $15^\circ\text{C}$  вызывает погрешность, не превышающую  $3,09\%$ .

Об.11. Начало шкалы соответствует максимальному сопротивлению жидкостного контура, а следовательно, минимальным значениям  $I_{ж}$

и  $I_K$ . Движок  $R_3$  должен стоять в крайнем нижнем положении, однако при этом ток  $I_K$  не может быть равным нулю, если только начало шкалы не соответствует нулевой электропроводности. Начальный ток будет обеспечиваться падением напряжения на  $R_2$ . Нужное значение этого напряжения может обеспечить  $R_{II}$ , которое служит для подстройки начала шкалы. При максимальной электропроводности движок  $R_3$  находится в верхнем положении, а  $I_K$  должен иметь максимальное значение. Следовательно, падение напряжения на  $R_3$  должно обеспечивать весь диапазон изменения  $I_K$ , т. е. диапазон измерения прибора.

Об.12. Из уравнения Нернста определяем коэффициент преобразования:

$$K = \Delta E / \Delta (\text{pH}) = -0,1984T, \text{ мВ/рН.}$$

Из выражения видно, что коэффициент преобразования не изменяется с изменением рН, т. е. зависимость  $E=f(\text{pH})$  линейна. При температуре раствора  $T=25+273$  К имеем

$$K = -0,1984 \cdot 298 = -59,12 \text{ мВ/рН.}$$

Об.13. Изопотенциальной называется точка, положение которой в координатах  $E$ , рН не зависит от температуры. Частная производная функции  $E=f(\text{pH}, t)$  по температуре определяется выражением

$$\partial E / \partial t = -0,198 (\text{pH} - 4,13).$$

Отсюда следует, что ЭДС не будет зависеть от температуры только в одной точке при  $\text{pH}_{II}=4,13$ , т. е. это значение рН является одной из координат изопотенциальной точки. Вторая координата  $E_{II}$  может быть определена из исходного выражения  $E=f(\text{pH}, t)$  путем подстановки  $\text{pH}=\text{pH}_{II}$ :  $E_{II}=-203$  мВ.

Коэффициент преобразования

$$K = \frac{\Delta E}{\Delta (\text{pH})} = -54,16 - 0,198t.$$

Таким образом, ЭДС системы линейно зависит от температуры раствора.

Об.14. При градуировочной температуре  $t_1$  и определенном рН ЭДС системы равна

$$E_1 = E_{II} - (54,16 + 0,198t_1)(\text{pH} - \text{pH}_{II}).$$

Отсюда

$$\text{pH} = \frac{E_{II} - E_1}{54,16 + 0,198t_1} + \text{pH}_{II}.$$

При изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$  ЭДС изменится до значения

$$E_2 = E_{II} - (54,16 + 0,198t_2)(\text{pH} - \text{pH}_{II}).$$

Если прибор градуирован при температуре раствора  $t_1=20^\circ\text{C}$  и не имеет компенсатора температурной погрешности, то при температуре

раствора  $t_2=35^\circ\text{C}$  и прежнем значении рН его показания будут равными

$$\text{pH}' = \frac{E_{II} - E_2}{54,16 + 0,198t_1} + \text{pH}_{II}.$$

Следовательно, абсолютная погрешность показаний прибора, обусловленная изменением температуры, будет

$$\Delta (\text{pH}) = \text{pH}' - \text{pH} = \frac{E_1 - E_2}{54,16 + 0,198t_1} = \frac{0,198 (t_2 - t_1) (\text{pH} - \text{pH}_{II})}{54,16 + 0,198t_1}.$$

Для заданных условий

$$\Delta (\text{pH}) = \frac{0,198 (35 - 20) (9 - 4,13)}{54,16 + 0,198 \cdot 20} = 0,249.$$

Относительная погрешность равна

$$\delta_{\text{рН}} = \frac{\Delta (\text{pH})}{\text{рН}} = \frac{0,249}{9} = 0,0277, \text{ или } 2,77 \%.$$

Об.15. Для любой электродной системы в общем виде зависимость ЭДС от температуры и рН может быть записана в виде

$$E = E_{II} - (54,16 + 0,1984t) (\text{pH} - \text{pH}_{II}), \quad (\text{Об.7})$$

где  $E_{II}$  и  $\text{pH}_{II}$  — координаты изопотенциальной точки системы.

Запишем (Об.7) для стандартных буферных растворов и температур, заданных условиями задачи:

$$\left. \begin{aligned} +1,27 &= E_{II} - (54,16 + 0,1984 \cdot 15) (1,67 - \text{pH}_{II}); \\ -494,4,14 &= E_{II} - (54,16 + 0,1984 \cdot 80) (8,88 - \text{pH}_{II}). \end{aligned} \right\} (\text{Об.8})$$

Решая систему (Об.8), определяем  $E_{II}$  и  $\text{pH}_{II}$ :

$$E_{II} = -40,9 \text{ мВ}; \quad \text{pH}_{II} = 2,408.$$

Однако реальные характеристики и температурные коэффициенты конкретных электродных систем могут несколько отличаться от расчетных. Это отличие объясняется тем, что уравнение (Об.7) не учитывает гистерезис и флуктуации потенциала. Кроме того, в уравнении (Об.7) неявно выражена зависимость потенциалов вспомогательного электрода контактной системы от изменения температуры и связанного с этим изменения рН приэлектродной жидкости [20]. Поэтому значения всех коэффициентов реальных электродных систем лучше получить путем градуировки их в стандартных буферных растворах при различных температурах (условия настоящей задачи). Определяем значения крутизны характеристики при  $t_1=15^\circ\text{C}$  и  $t_2=80^\circ\text{C}$  [20]:

$$K_1 = \frac{\Delta E}{\Delta (\text{pH})} (t_1) = \frac{E_3 - E_1}{\text{pH}_3 - \text{pH}_1} =$$

$$= \frac{-432,69 - 1,27}{9,27 - 1,67} = -57,1 \text{ мВ/ед. рН};$$

$$K_2 = \frac{\Delta E}{\Delta (\text{рН})} (t_2) = \frac{E_4 - E_2}{\text{рН}_4 - \text{рН}_2} =$$

$$= \frac{-494,14 - 4,27}{8,88 - 1,77} = -70,1 \text{ мВ/ед. рН}; \quad (\text{Об. 10})$$

$$\frac{K_2 - K_1}{t_2 - t_1} = \frac{-70,1 + 57,1}{80 - 15} = -0,200 \text{ мВ/(К·ед. рН)}. \quad (\text{Об. 11})$$

По (Об.7), (Об.9) — (Об.11) получаем

$$\text{рН}_{\text{II}} = \frac{E_1 - E_4 - K_1 \text{рН}_1 + K_2 \text{рН}_4}{K_2 - K_1} =$$

$$= \frac{1,27 + 494,14 + 57,1 \cdot 1,67 - 70,1 \cdot 8,88}{-70,1 + 57,1} = 2,44;$$

$$E_{\text{II}} - E_1 - K_1 [\text{рН}_1 - \text{рН}_{\text{II}}] = 1,27 + 57,1 (1,67 - 2,44) = -42,7 \text{ мВ.}$$

Таким образом, уравнение реальной электродной системы имеет вид

$$E = -42,7 - (57,10 + 0,2t) (\text{рН} - 2,44) \text{ мВ.}$$

Об.16. Известно, что милливольтметр измеряет напряжение  $U$  на своих зажимах, которое меньше ЭДС  $E$  источника на падение напряжения во внешней цепи:

$$U = \frac{E}{1 + \frac{R_{\text{II}} + R_{\text{C}}}{R_{\text{ВХ}}}} = \frac{500}{1 + \frac{(0,02 + 5) 10^6}{0,5 \cdot 10^3}} = 0,005 \text{ мВ.}$$

Таким образом, показания милливольтметра практически будут нулевыми. Поэтому для измерения ЭДС электродных систем должны применяться устройства с очень высоким входным сопротивлением.

Об.17. Кажущееся содержание анализируемого компонента определяется следующим образом:

$$C = \frac{V_0 - V_{\text{II}}}{V_0} 100 \% = \frac{100 - 94}{100} 100 = 6 \% \text{ CO}_2.$$

Действительный объем двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  в смеси

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{V_0 - V_{\text{II}}}{K_{\text{II}}} = \frac{6}{0,95} = 6,315 \text{ мл.}$$

Действительное содержание двуокиси углерода в смеси

$$C_{\text{д}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_0 + V_{\text{ВII}}} 100 \% = \frac{6,315}{100 + 2,5} 100 = 6,16 \% \text{ CO}_2.$$

Об.18. Кажущееся содержание кислорода в смеси без учета изменения температуры

$$C = \frac{V_0 - V_{\text{II}}}{V_0} 100 \% = \frac{100 - 95}{100} \cdot 100 = 5 \% \text{ O}_2.$$

Уменьшение объема газа за счет изменения температуры

$$\Delta V_t = (V_0 + V_{\text{ВII}}) \left( 1 - \frac{t_2 + 273}{t_1 + 273} \right) =$$

$$= (100 + 2,5) \left( 1 - \frac{303}{313} \right) = 3,27 \text{ мл.}$$

Уменьшение объема газовой смеси за счет поглощения кислорода с учетом изменения температуры

$$\Delta V = V_0 - V_{\text{II}} - \Delta V_t = 100 - 95 - 3,27 = 1,73 \text{ мл.}$$

Действительный объем кислорода в смеси

$$V_{\text{O}_2} = \Delta V / K_{\text{II}} = 1,73 / 0,95 = 1,82 \text{ мл.}$$

Действительное содержание кислорода в смеси

$$C_{\text{д}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_0 + V_{\text{ВII}}} \cdot 100 \% = \frac{1,82}{100 + 2,5} \cdot 100 = 1,77 \% \text{ O}_2.$$

Об.19. Если предположить, что количество теплоты, отдаваемой чувствительным элементом к стенкам камеры, не изменяется, то для конкретной камеры

$$\lambda_{\text{В}} (t_{\text{Н1}} - t_{\text{С}}) = \lambda_{\text{Г}} (t_{\text{Н2}} - t_{\text{С}}),$$

где  $\lambda_{\text{В}}$  и  $\lambda_{\text{Г}}$  — теплопроводность воздуха и продуктов горения, Вт/(м·К);  $t_{\text{Н1}}$  и  $t_{\text{Н2}}$  — соответственно температура нити, находящейся в воздухе и газовой смеси, °С. Отсюда

$$\lambda_{\text{В}} / \lambda_{\text{Г}} = (t_{\text{Н2}} - t_{\text{С}}) / (t_{\text{Н1}} - t_{\text{С}}).$$

Теплопроводность смеси может быть определена из выражения [22]

$$\lambda_{\text{Г}} = \sum \lambda_i C_i,$$

где  $\lambda_i$  — теплопроводность компонентов газовой смеси (продуктов горения), Вт/(м·К);  $C_i$  — объемная концентрация компонентов.

Определяем значения теплопроводности компонентов газовой смеси по [19] при  $t = (t_{\text{Н1}} + t_{\text{С}}) / 2 = 50$  °С. Для воздуха

$$\lambda_{\text{В}} = \lambda_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} + \lambda_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2} = 27,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79 + 28,67 \cdot 10^{-3} \cdot 0,21 =$$

$$= 27,93 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.$$

Объем продуктов горения в газоанализаторе уменьшается за счет практически полной конденсации водяных паров. При этом несколько

изменяется процентное содержание других компонентов. Теплопроводность смеси в этом случае будет определяться выражением

$$\begin{aligned}\lambda_{\Gamma} &= \lambda_{\text{CO}_2} \frac{C_{\text{CO}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{O}_2} \frac{C_{\text{O}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{N}_2} \frac{C_{\text{N}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} = \\ &= 18,49 \cdot 10^{-3} \frac{0,15}{1 - 0,18} + 28,67 \cdot 10^{-3} \frac{0,04}{1 - 0,18} + \\ &+ 27,73 \cdot 10^{-3} \frac{0,63}{1 - 0,18} = 26,08 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.\end{aligned}$$

Определяем температуру нити при омывании ее продуктами горения:

$$t_{\text{н2}} = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\Gamma}} (t_{\text{н1}} - t_{\text{с}}) + t_{\text{с}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,08 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 84,26 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким образом, температура нити увеличилась на  $84,26 - 80 = 4,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Об.20. Определим теплопроводность смеси:

$$\begin{aligned}\lambda_{\Gamma} &= \lambda_{\text{CO}_2} \frac{C_{\text{CO}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{O}_2} \frac{C_{\text{O}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{N}_2} \frac{C_{\text{N}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \\ &+ \lambda_{\text{H}_2} \frac{C_{\text{H}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} = 18,49 \cdot 10^{-3} \frac{0,15}{1 - 0,18} + \\ &+ 28,67 \cdot 10^{-3} \frac{0,04}{1 - 0,18} + 27,73 \cdot 10^{-3} \frac{0,628}{1 - 0,18} + \\ &+ 195,96 \cdot 10^{-3} \frac{0,002}{1 - 0,18} = 26,49 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.\end{aligned}$$

Оценим новое значение температуры нити:

$$t'_{\text{н2}} = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_{\Gamma}} (t_{\text{н1}} - t_{\text{с}}) + t_{\text{с}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,49 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 83,26 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Оценим возможное занижение показаний газоанализатора, полагая, что изменение температуры пропорционально концентрации:

$$\begin{aligned}\Delta C_{\text{CO}_2} &= \frac{t'_{\text{н2}} - t_{\text{н2}}}{t_{\text{н2}} - t_{\text{н1}}} (C_{\text{CO}_2} - 0) = \\ &= \frac{83,26 - 84,26}{84,26 - 80} (0,15 - 0) = -0,035, \text{ или } -3,5 \% \text{ CO}_2.\end{aligned}$$

Таким образом, содержание в продуктах горения 0,2 %  $\text{H}_2$  занижает показания газоанализатора в нашем случае на 3,5 %  $\text{CO}_2$ .

Об.21. Для оценки погрешности определяем теплопроводность син-

тетических смесей  $\text{CO}_2 + \text{воздух}$  ( $\lambda_1$ ) и  $\text{CO}_2 + \text{азот}$  ( $\lambda_2$ ) для концентрации  $\text{CO}_2 = 10 \%$  и температуры газа  $t_{\Gamma} = (t_{\text{н0}} + t_{\text{с}})/2$ :

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \lambda_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2} + \lambda_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2} + \lambda_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} = 18,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 + \\ &+ 28,67 \cdot 10^{-3} \cdot 0,189 + 27,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,711 = 26,98 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}; \\ \lambda_2 &= \lambda_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2} + \lambda_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} = 18,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 + \\ &+ 27,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 = 26,81 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.\end{aligned}$$

Теплопроводность продуктов горения в предположении полной конденсации водяных паров рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned}\lambda_{\Gamma} &= \lambda_{\text{CO}_2} \frac{C_{\text{CO}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{O}_2} \frac{C_{\text{O}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{N}_2} \frac{C_{\text{N}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} = \\ &= 18,49 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{1 - 0,18} + 28,67 \cdot 10^{-3} \frac{0,02}{1 - 0,18} + \\ &+ 27,73 \cdot 10^{-3} \frac{0,7}{1 - 0,18} = 26,63 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.\end{aligned}$$

Установка нуля осуществляется при заполнении измерительной камеры воздухом с теплопроводностью (см. решение Об.19)

$$\lambda_{\text{В}} = 27,93 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м·К)}.$$

Оценим погрешность показаний газоанализатора, отградуированного на смеси  $\text{CO}_2 + \text{воздух}$ , при измерении  $\text{CO}_2$  в продуктах горения газа. Для этого оценим значения температуры нити для различных смесей (см. решение Об.20). Для смеси  $\text{CO}_2 + \text{воздух}$

$$t_{\text{н1}} = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\lambda_1} (t_{\text{н}} - t_{\text{с}}) + t_{\text{с}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,98 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 82,11 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$

$$t_{\text{н2}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,81 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 82,51 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для продуктов горения

$$t_{\text{н3}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,63 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 82,93 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Если предположить, что изменение температуры нити относительно ее температуры в воздухе (нулевая концентрация  $\text{CO}_2$ ) пропорционально концентрации  $\text{CO}_2$ , то показания газоанализатора, отградуированного на смеси  $\text{CO}_2 + \text{воздух}$  при концентрации  $\text{CO}_2$ , равной 10 %, будут

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{t_{\text{н3}} - t_{\text{н0}}}{t_{\text{н1}} - t_{\text{н0}}} (C_{\text{CO}_2} - 0) = \\ &= \frac{82,93 - 80}{82,11 - 80} 0,1 = 0,1389, \text{ или } 13,89 \% \text{ CO}_2.\end{aligned}$$

Для газоанализатора, отградуированного на смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ ,

$$C_2 = \frac{t_{н3} - t_{н0}}{t_{н2} - t_{н0}} (C_{\text{CO}_2} - 0) = \\ = \frac{82,93 - 80}{82,51 - 80} 0,1 = 0,1167 \text{ или } 11,67 \% \text{ CO}_2.$$

Таким образом, показания газоанализатора, отградуированного на смеси  $\text{CO}_2 + \text{воздух}$ , в реальных условиях для среднего состава продуктов горения, данного в условиях задачи, надо умножить на множитель  $1/1,389 = 0,72$ , а показания газоанализатора, отградуированного на смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ , на множитель  $1/1,167 = 0,857$ .

Об.22. Для решения задачи необходимо установить связь между содержанием  $\text{CO}_2$  и напряжением в измерительной диагонали моста. Количество теплоты, передаваемой в единицу времени от чувствительного элемента к стенкам камеры за счет теплопроводности, определяется выражением [22]

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

где  $t_n$  — температура нити чувствительного элемента;  $\lambda$  — теплопроводность газовой смеси при  $t = (t_n + t_c)/2$ .

Такое же количество теплоты выделяется в чувствительном элементе:

$$Q = I^2 R.$$

Таким образом, температура нити будет определяться выражением

$$t_n = t_c + \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l \lambda} I^2 R.$$

Изменение сопротивления проводника при изменении теплопроводности смеси от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$

$$\Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} I^2 R_0^2 \alpha \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right),$$

или

$$\Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} I^2 R_0^2 \alpha \frac{\Delta\lambda}{\lambda (\lambda + \Delta\lambda)}.$$

Если в схеме (см. рис. 6.3) всегда выполняются условия  $R_1 = R_3$  и  $R_2 = R_4$ , то изменение напряжения на измерительной диагонали моста

(при бесконечном входном сопротивлении милливольтметра)

$$\Delta U = \frac{1}{2} I \Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{4\pi l} I^3 R_0^2 \alpha \frac{\Delta\lambda}{\lambda (\lambda + \Delta\lambda)}. \quad (Об.12)$$

Так как градуировка газоанализатора производится по синтетической смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ , то для выявления уравнения шкалы нужно установить зависимость между теплопроводностью синтетической смеси  $\lambda$  и содержанием  $\text{CO}_2$  в ней.

Теплопроводность смеси  $\lambda$  следующим образом зависит от концентрации компонентов  $C_i$  и их теплопроводности  $\lambda_i$ :

$$\lambda = \sum C_i \lambda_i = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + C_{\text{N}_2} \lambda_{\text{N}_2} = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + (1 - C_{\text{CO}_2}) \lambda_{\text{N}_2}.$$

Если в качестве исходной принять теплопроводность азота (теплопроводность синтетической смеси с нулевым содержанием  $\text{CO}_2$ ), то

$$\Delta\lambda = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + (1 - C_{\text{CO}_2}) \lambda_{\text{N}_2} - \lambda_{\text{N}_2} = C_{\text{CO}_2} (\lambda_{\text{CO}_2} - \lambda_{\text{N}_2}).$$

Если  $\lambda$  и  $\Delta\lambda$  подставить в выражение (Об.12), то получим уравнение шкалы

$$\Delta U = \frac{\ln \frac{D}{d}}{4\pi l} I^3 R_0^2 \alpha \frac{C_{\text{CO}_2} (\lambda_{\text{N}_2} - \lambda_{\text{CO}_2})}{\lambda_{\text{N}_2} [\lambda_{\text{N}_2} - C_{\text{CO}_2} (\lambda_{\text{N}_2} - \lambda_{\text{CO}_2})]}. \quad (Об.13)$$

Вид этого уравнения показывает, что зависимость изменения напряжения на измерительной диагонали  $\Delta U$  от содержания  $\text{CO}_2$  в газовой смеси имеет нелинейный характер. Проиллюстрируем это конкретными значениями. Определим значения  $\Delta U$  при 0, 5, 10, 15 и 20 %  $\text{CO}_2$ :  
при  $C_{\text{CO}_2} = 0$   $\Delta U = 0$ ;

$$\text{при } C_{\text{CO}_2} = 0,05 \Delta U = \frac{\ln \frac{6,6}{0,05}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \cdot 35^3 \cdot 10^{-6} \cdot 1^2 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \frac{0,05 (27,73 \cdot 10^{-3} - 18,49 \cdot 10^{-3})}{27,73 \cdot 10^{-3} [27,73 \cdot 10^{-3} - 0,05 (27,73 \cdot 10^{-3} - 18,49 \cdot 10^{-3})]} = \\ = 2 \text{ мВ};$$

$$\text{при } C_{\text{CO}_2} = 0,1 \Delta U = 4,06 \text{ мВ};$$

$$\text{при } C_{\text{CO}_2} = 0,15 \Delta U = 6,2 \text{ мВ};$$

$$\text{при } C_{\text{CO}_2} = 0,2 \Delta U = 8,4 \text{ мВ}.$$

Об.23. Связь между содержанием водорода в кислороде и температурной нити определяется режимом нагрева нити и условиями отвода теплоты от нити к стенкам камеры. Количество теплоты, выделившееся на нити за счет проходящего тока,  $Q_H$  должно быть передано к стенкам измерительной камеры за счет теплопроводности газа  $Q_T$ , излучения  $Q_L$  и конвективного теплообмена  $Q_K$ . Некоторое количество теплоты передается за счет теплопроводности самой проволоки. Но при  $l/d > 100$  этим теплоотводом можно пренебречь. В нашем случае  $l/d = 1000$ .

Оценим приближенные значения  $Q_L$  и  $Q_T$ , предполагая, что температура смеси  $t_{CM} = \frac{t_H + t_C}{2} = 50^\circ\text{C}$ , а  $t_H = 80^\circ\text{C}$ :

$$Q_L = \varepsilon_0 F \left[ \left( \frac{T_H}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_C}{100} \right)^4 \right] = 0,2 \cdot 5,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-5} \times \\ \times 2 \cdot 10^{-2} (3,53^4 - 2,93^4) = 0,0000581 \text{ Вт};$$

$$Q_T = \frac{2\pi l \lambda_{CM}}{\ln \frac{D}{d}} (t_H - t_C) = \\ = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 28,67 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{5}{0,01}} (80 - 20) = 0,0552 \text{ Вт}.$$

Очевидно, что  $Q_L \ll Q_T$ , и поэтому  $Q_L$  можно пренебречь. При малых диаметрах проволоки ( $d < 0,2$  мм) комплекс Gr·Pr, характеризующий теплообмен при свободной конвекции, значительно меньше 1. Поэтому можно считать, что конвективный перенос теплоты отсутствует и теплообмен осуществляется только теплопроводностью [24]. Следовательно, в установившемся режиме

$$Q_H = Q_T \text{ или } I^2 R = \frac{2\pi l}{\ln \frac{D}{d}} \lambda_{CM} (t_H - t_C). \quad (Об. 14)$$

Учитывая, что  $R_l = R_c(1 + \alpha t_H)$ , выражение (Об.14) можно переписать в виде

$$t_H = t_C + I^2 R_0 (1 + \alpha t_H) \frac{D}{2\pi l \lambda_{CM}}. \quad (Об. 15)$$

Теплопроводность смеси  $\lambda_{CM}$  зависит от содержания водорода и кислорода следующим образом:

$$\lambda_{CM} = \lambda_{H_2} C_{H_2} + \lambda_{O_2} (1 - C_{H_2}) = \lambda_{O_2} + C_{H_2} (\lambda_{H_2} - \lambda_{O_2}). \quad (Об. 16)$$

Подставив (Об.16) в (Об.15) и преобразовав его, получим

$$t_H = \frac{(\lambda_{H_2} - \lambda_{O_2}) C_{H_2} t_C + \lambda_{O_2} t_C + I^2 R_0 \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l}}{(\lambda_{H_2} - \lambda_{O_2}) C_{H_2} + \lambda_{O_2} - I^2 R_0 \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} \alpha}. \quad (Об. 17)$$

Для определения  $R_0$  воспользуемся выражением  $R_0 = \rho l/s$ . Для платины [2] значение  $\rho = 0,0981 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Определим температуру нити при содержании водорода в кислороде 0; 5 и 10 %. При  $C_{H_2} = 0$  выражение (Об.17) имеет вид

$$t_H = \frac{\lambda_{O_2} t_C + I^2 \rho \frac{4l}{\pi d^2} \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l}}{\lambda_{O_2} - I^2 \rho \frac{4l}{\pi d^2} \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} \alpha} = \\ = \frac{28,67 \cdot 10^{-3} \cdot 20 + 0,051^2 \cdot 0,0981 \cdot 10^{-6} \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 4}{3,14 (2 \cdot 10^{-5})^2} \times \\ \times \frac{\ln \frac{5}{0,02}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}}{28,67 \cdot 10^{-3} - 0,051^2 \cdot 0,0981 \cdot 10^{-6} \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 4}{3,14 (2 \cdot 10^{-5})^2} \times \\ \times \frac{\ln \frac{5}{0,02}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}} = 80^\circ\text{C}.$$

При  $C_{H_2} = 5\%$

$$t_H = \frac{(\lambda_{H_2} - \lambda_{O_2}) C_{H_2} t_C + \lambda_{O_2} t_C + I^2 \rho \frac{4l \ln \frac{D}{d}}{2\pi^2 l d^2}}{(\lambda_{H_2} - \lambda_{O_2}) C_{H_2} + \lambda_{O_2} - I^2 \rho \frac{4l \ln \frac{D}{d}}{2\pi^2 l d^2} \alpha} = 64,3^\circ\text{C}.$$

Аналогичным расчетом легко установить, что при  $C_{H_2} = 10\%$   $t_H = 55,1^\circ\text{C}$ .

Об.24. Если смесь состоит из  $n$  компонентов с относительной магнитной восприимчивостью  $\kappa_i$ , то относительная магнитная восприимчивость смеси [22]

$$\kappa_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \kappa_i C_i,$$

где  $C_i$  — объемная концентрация компонентов. Следовательно, для исходной смеси газов

$$\kappa_{\text{см}} = -0,15 \cdot 0,0057 + 0,04 \cdot 1 - 0,63 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = 0,03734.$$

Если содержание кислорода увеличится на 1 %, а содержание азота уменьшится на 1 %, то объемная магнитная восприимчивость  $\kappa'_{\text{см}} =$

$$= -0,15 \cdot 0,0057 + 0,05 \cdot 1 - 0,62 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = +0,04738.$$

Таким образом, относительное изменение магнитной восприимчивости при изменении содержания  $O_2$  на 1 % составляет

$$\delta' = \frac{0,04738 - 0,03734}{0,03734} = 0,268, \text{ или } 26,8 \%.$$

Если содержание  $CO_2$  увеличится на 1 %, а  $N_2$  уменьшится на 1 %, то магнитная восприимчивость

$$\kappa''_{\text{см}} = -0,16 \cdot 0,0057 + 0,04 \cdot 1 - 0,62 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = +0,03733.$$

Относительное изменение восприимчивости при изменении концентрации  $CO_2$  на 1 %

$$\delta'' = \frac{0,03733 - 0,03734}{0,03734} = -0,00027, \text{ или } -0,027 \%.$$

Из примера видно, что изменение магнитной восприимчивости газовой смеси, вызванное изменением содержания углекислого газа, значительно меньше, чем вызванное изменением содержания кислорода.

Таким образом, можно считать, что магнитная восприимчивость дымовых газов определяется содержанием кислорода, в то время как влияние других компонентов мало.

Об.25. Показания газоанализатора определяются интенсивностью термомагнитной конвекции, которая в свою очередь определяется силой  $F_M$ , действующей на единичный объем смеси, нагретой до температуры  $T_2$  и окруженной газовой смесью того же состава с температурой  $T_1$  [22]:

$$F_M = (\kappa_1 - \kappa_2) H \frac{dH}{dx},$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля, градиент которого направлен вдоль оси  $x$ ;  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  — объемная магнитная восприимчивость смеси при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

На основании уравнения зависимости  $\kappa$  от температуры можно получить следующее выражение для  $F_M$  [22]:

$$F_M = C_{O_2} \kappa_0 T_0^2 \left( \frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \frac{p}{p_0} H \frac{dH}{dx},$$

где  $C_{O_2}$  — концентрация кислорода в смеси;  $\kappa_0$  — объемная восприимчивость кислорода при температуре  $T_0 = 273 \text{ К}$  и давление  $p_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$ ;  $p$  — давление газовой смеси.

Из формулы видно, что уменьшение  $p$  уменьшает значение  $F_M$ , а следовательно, и показания прибора. Если считать, что значения всех величин, кроме  $p$ , постоянны, то относительное изменение  $F_M$  при изменении  $p$  будет следующим:

$$\delta F_{Mp} = \frac{p' - p}{p} 100 \% = \frac{91,322 - 98,322}{98,322} 100 = -7,14 \%,$$

где  $p'$  и  $p$  — текущее и градуировочное давление смеси.

Увеличение температуры смеси  $T$  на входе уменьшает интенсивность термомагнитной конвекции и приводит к уменьшению показаний. Относительное уменьшение  $F_M$  при заданных условиях, если считать неизменными все остальные параметры, будет равно

$$\delta F_{Mt} = \frac{\frac{1}{T_2^2} - \frac{1}{T_1^2}}{\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_c^2}} 100 \% = \frac{\frac{1}{323^2} - \frac{1}{293^2}}{\frac{1}{293^2} - \frac{1}{373^2}} 100 = -46,24 \%.$$

Следует отметить, что изменение показаний прибора при изменении  $p$  и  $t$  смеси может быть иным, так как газовая конвекция в приборе осуществляется не только за счет силы  $F_M$ , но и за счет силы тепловой конвекции, которая в задаче не учитывалась. Кроме того, для уменьшения влияния  $p$  и  $t$  смеси на показания прибора применяются устройства для их стабилизации.

Об.26. В мостовой схеме компаратора напряжений показания прибора определяются положением движка реохорда  $R_p$ , который устанавливается в такое положение, при котором напряжение  $U_{AB}$  на диагонали  $AB$  измерительного моста равно напряжению  $U_{EF}$  на участке  $EF$  реохорда. При увеличении концентрации  $O_2$  в смеси увеличивается  $U_{AB}$ , в силу чего для обеспечения равновесия движок  $R_p$  должен двигаться вниз. Следовательно, концу шкалы прибора соответствует крайнее нижнее положение движка  $R_p$ .

Об.27. Схема будет неработоспособной. Напряжение  $U_{AB}$  будет максимальным, а  $U_{CD}$  будет зависеть от концентрации  $O_2$  и только в предельном случае может быть равным  $U_{AB}$ . Напряжение  $U_{EF}$  пред-

ставляет часть  $U_{CD}$ , т. е. равенство  $U_{AB} = U_{EF}$  при произвольном содержании  $O_2$  достигнуто быть не может.

Об.28. Камера  $R_1$  измерительного моста. Если бы магнитный шунт был установлен на камере  $R_5$ , то при замыкании им полюсов магнита камеры  $R_5$  напряжение  $U_{CD}$  было бы равным нулю. Напряжение  $U_{AB} \neq 0$ , поэтому движок стал бы смещаться вниз до упора, что эквивалентно смещению стрелки к концу шкалы до упора. Если шунт установлен на камере  $R_1$ , то при его опускании  $U_{AB} = 0$  и движок  $R_p$  установится в верхнем положении, соответствующем нулевой отметке шкалы.

Об.29. Принцип действия измерительной схемы магнитного газоанализатора заключается в изменении сопротивления плеча  $R_1$ , пропорциональном содержанию кислорода в смеси. При этом в измерительной диагонали  $AB$  моста возникает напряжение

$$U_{AB} = U_{\text{пит}} \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

В схеме на рис. 6.5 это напряжение измеряется измерительным прибором и, следовательно, уменьшение  $U_{\text{пит}}$  на 10% приведет к такому же уменьшению показаний прибора. В схеме на рис. 6.4 показание прибора (положение стрелки на шкале) однозначно связано с положением движка реохорда  $R_p$ . При компенсации напряжение  $U_{AB}$  на диагонали  $AB$  измерительного моста равно напряжению  $U_{EF}$  на части реохорда  $R_p$ , которое представляет собой часть  $\alpha$  напряжения  $U_{CD}$  измерительной диагонали сравнительного моста. Эта часть  $\alpha$  определяется положением движка, т. е. однозначно связана с показанием прибора:

$$U_{AB} = U_{EF} = \alpha U_{CD}$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{U_{AB}}{U_{CD}}; \quad U_{CD} = U_2 \frac{R_6 R_8 - R_5 R_7}{(R_5 + R_6)(R_7 + R_8)};$$

$$\alpha = \frac{U_1}{U_2} \frac{(R_2 R_4 - R_1 R_3)(R_5 + R_6)(R_7 + R_8)}{(R_6 R_8 - R_5 R_7)(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

При уменьшении  $U_{\text{пит}}$  в равной степени изменяются  $U_1$  и  $U_2$ , т. е.  $\alpha$  останется неизменным, если все сопротивления останутся неизменными. В реальных условиях изменение  $U_{\text{пит}}$  приведет к изменению температуры резисторов  $R_1, R_2, R_5$  и  $R_6$ , в силу чего изменится их сопротивление. Поэтому даже в схеме на рис. 6.4 изменение напряжения питания вызывает погрешность, но значительно меньшую, чем в схеме на рис. 6.5.

Об.30. Фильтровые камеры оптико-акустического газоанализатора служат для уменьшения влияния неанализируемых компонентов на результаты измерения. Известно, что погрешность измерения вызывается

наличием таких неизмеряемых компонентов, спектры поглощения которых налагаются на спектр поглощения анализируемого компонента. Из рассмотрения рис. 6.6 легко заметить, что такими компонентами являются газы  $CH_4$  (спектр поглощения которого перекрывает спектр поглощения  $CO_2$  с максимумом  $\lambda \approx 2,6$  мкм),  $CO$  (спектр поглощения которого перекрывает спектр поглощения  $CO_2$  с максимумом  $\lambda \approx 4,3$  мкм). Спектр поглощения этана  $C_2H_6$  не перекрывается со спектром поглощения  $CO_2$ . Азот  $N_2$  и водород  $H_2$  инфракрасной радиации не поглощают. В связи с вышеизложенным в фильтровых камерах должны быть газы, спектры которых накладываются на спектр поглощения  $CO$ , т. е.  $CO$  и  $CH_4$ , причем концентрация их в фильтровых камерах должна быть больше возможной их концентрации в газовой смеси. В газоанализаторе ОА2209 фильтровые камеры заполнены газовой смесью, состоящей из 50%  $CO$  и  $CH_4$ .

Об.31. Поглощение лучистой энергии газом описывается законом Ламберта—Бера

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C l),$$

где  $I_{0\lambda}$  — интенсивность монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ , входящего в поглощающий слой газа;  $I_\lambda$  — то же, но выходящего из поглощающего слоя газа;  $\varepsilon_\lambda$  — коэффициент поглощения, характерный для данного газа и длины волны  $\lambda$ ;  $C$  — концентрация анализируемого компонента в газовой смеси, поглощающего излучение длиной волны  $\lambda$ ;  $l$  — толщина поглощающего слоя.

$$I_{\lambda 1} = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_1 l_1); \quad I_{\lambda 2} = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_2 l_2),$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — концентрация анализируемого компонента соответственно в сравнительной и измерительной камерах;  $l_1$  и  $l_2$  — соответственно толщина газового слоя в сравнительной и измерительной камерах;  $I_{0\lambda}$  — интенсивность потоков излучения на входе в сравнительную и измерительную камеры.

Отсюда имеем

$$\frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}} = \frac{I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_1 l_1)}{I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_2 l_2)} = \exp \varepsilon_\lambda (C_2 l_2 - C_1 l_1)$$

или

$$\varepsilon_\lambda (C_2 l_2 - C_1 l_1) = \ln \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}}.$$

Таким образом, искомая зависимость имеет вид

$$C_2 = \frac{1}{l_2} \left( C_1 l_1 + \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \ln \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}} \right).$$

Легко заметить, что у прибора с такой схемой шкала неравномерная.

Об.32. Поглощение лучистой энергии газом определяется уравнением (см. решение Об.31)

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \exp(-\epsilon_{\lambda} Cl).$$

Если применить указанное уравнение к двухканальной схеме газоанализатора, то, исходя из условия равенства потоков после измерительной и компенсационной камер, можно записать

$$I_{0\lambda} \exp(-\epsilon_{\lambda} C_K \cdot 2x) = I_{0\lambda} \exp(-\epsilon_{\lambda} Cl),$$

где  $x$  — смещение поршня компенсационной камеры от первоначального (нулевого) положения;  $C_K$  — концентрация анализируемого компонента в компенсационной камере;  $l$  — толщина слоя газа в измерительной камере;  $C$  — искомая концентрация анализируемого компонента в смеси. Отсюда легко получить выражения

$$2C_K x = Cl \text{ и } x = C \frac{l}{2C_K},$$

т. е. зависимость между положением поршня и концентрацией анализируемого компонента линейная.

Об.33. Диапазон измерения уменьшается. Положение стрелки на шкале однозначно связано с положением поршня в компенсационной камере. Поэтому при неизменной длине шкалы прибора ход поршня не зависит от диапазона измерения. С учетом зависимости положения поршня от концентрации (см. решение Об.32) очевидно, что уменьшение  $C_K$  (при неизменном максимальном  $x$ ) приведет к необходимости уменьшения максимального значения  $C$ , т. е. уменьшению диапазона измерения.

Об.34. Относительная влажность воздуха определяется по психрометрическим таблицам, которые для каждого типа психрометра несколько отличаются одна от другой. Для аспирационного психрометра определяем относительную влажность из таблицы [25] по значению  $t_c$  и разности  $t_c - t_m$ . В нашем случае  $t_c - t_m = 4^\circ\text{C}$ . Интерполируя, находим значение влажности  $\varphi = 68,5\%$ . Для простого психрометра при тех же  $t_c$  и  $t_m$  влажность  $\varphi = 66,5\%$ . Как видно, разница в психрометрических таблицах, составленных для различных типов психрометров, невелика.

Об.35. Относительная влажность  $\varphi$  воздуха может быть определена из выражения [16]

$$\varphi = \frac{p f_H}{(f_H + \rho_{в.п.м} K) p_{в.п.м}},$$

где  $p$  — абсолютное давление воздуха, МПа,  $p = 0,1 + p_H = 0,3$  МПа;  $\rho_{в.п.м}$  — наибольшее возможное давление водяного пара во влажном

воздухе при температуре  $t$ , МПа,  $\rho_{в.п.м} = p = 0,3$  МПа;  $\rho_{в.п.м}$  — наибольшая возможная плотность водяного пара во влажном газе при  $p$  и  $t$ , кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{в.п.м} = 1,121$  кг/м<sup>3</sup>;  $K$  — коэффициент сжимаемости воздуха,  $K = 1,001$ .

Относительная влажность

$$\varphi = \frac{0,3 \cdot 0,03}{(0,03 + 1,121 \cdot 1,001) \cdot 0,3} = 0,026, \text{ или } 2,6\%.$$

Об.36. Определяем наибольшую плотность водяного пара во влажном газе при  $t_{тр}$  по температуре насыщения:

$$\rho_{в.п.м} = 0,0347 \text{ кг/м}^3.$$

Значит, абсолютная влажность доменного газа  $f_v = 34,7$  г/м<sup>3</sup> влажного газа.

Об.37. Для оценки погрешности влагомера будем полагать, что изменились показания влагомера при неизменной абсолютной влажности воздуха. Абсолютная влажность при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и точке росы  $t_{тр} = 10^\circ\text{C}$  [16]

$$f = 9,4 \text{ г/м}^3.$$

Содержание водяных паров в насыщенном ими воздухе при  $t = 20^\circ\text{C}$   $f_t = 17,29$  г/м<sup>3</sup>.

Относительная влажность

$$\varphi = \frac{f}{f_t} 100 = \frac{9,40}{17,29} 100 = 54,4\%.$$

После протирки зеркала абсолютная влажность по показаниям влагомера  $f' = 4,85$  г/м<sup>3</sup> при  $t_{тр} = 0^\circ\text{C}$ . Так как температура воздуха осталась неизменной, то и содержание водяных паров в насыщенном воздухе остается прежним:  $f_t' = 17,29$  г/м<sup>3</sup>.

Ложное значение относительной влажности по показаниям влагомера

$$\varphi' = \frac{f'}{f_t} 100 = \frac{4,85}{17,29} 100 = 28,1\%.$$

Поэтому абсолютная погрешность определения относительной влажности составит

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = 28,1 - 54,4 = -26,3\%.$$

Одной из вероятных причин возникновения погрешности является оставление жировой пленки на зеркальце после протирки грязными руками или тряпкой. Жировая пленка существенно изменяет температуру зеркала, при которой начинается выпадение росы.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1. Значения нормальной функции распределения

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

x	$\Phi^*(x)$	x	$\Phi^*(x)$	x	$\Phi^*(x)$	x	$\Phi^*(x)$
-0,00	0,5000	-1,55	0,0606	0,00	0,5000	1,55	0,9394
-0,05	0,4801	-1,60	0,0548	0,05	0,5199	1,60	0,9452
-0,10	0,4602	-1,65	0,0495	0,10	0,5398	1,65	0,9505
-0,15	0,4404	-1,70	0,0446	0,15	0,5596	1,70	0,9554
-0,20	0,4207	-1,75	0,0401	0,20	0,5793	1,75	0,9599
-0,25	0,4013	-1,80	0,0359	0,25	0,5987	1,80	0,9641
-0,30	0,3821	-1,85	0,0322	0,30	0,6179	1,85	0,9678
-0,35	0,3632	-1,90	0,0288	0,35	0,6368	1,90	0,9713
-0,40	0,3446	-1,95	0,0256	0,40	0,6554	1,95	0,9744
-0,45	0,3264	-2,00	0,0228	0,45	0,6736	2,00	0,9772
-0,50	0,3085	-2,10	0,0179	0,50	0,6915	2,10	0,9821
-0,55	0,2912	-2,20	0,0139	0,55	0,7088	2,20	0,9861
-0,60	0,2743	-2,30	0,0107	0,60	0,7257	2,30	0,9893
-0,65	0,2578	-2,40	0,0082	0,65	0,7422	2,40	0,9918
-0,70	0,2420	-2,50	0,0062	0,70	0,7580	2,50	0,9938
-0,75	0,2266	-2,60	0,0047	0,75	0,7734	2,60	0,9953
-0,80	0,2119	-2,70	0,0035	0,80	0,7881	2,70	0,9965
-0,85	0,1977	-2,80	0,0026	0,85	0,8023	2,80	0,9974
-0,90	0,1841	-2,90	0,0019	0,90	0,8159	2,90	0,9981
-0,95	0,1711	-3,00	0,0014	0,95	0,8289	3,00	0,9986
-1,00	0,1587	-3,10	0,0010	1,00	0,8413	3,10	0,9990
-1,05	0,1469	-3,20	0,0007	1,05	0,8531	3,20	0,9993
-1,10	0,1357	-3,30	0,0005	1,10	0,8643	3,30	0,9995
-1,15	0,1251	-3,40	0,0003	1,15	0,8749	3,40	0,9997
-1,20	0,1151	-3,50	0,0002	1,20	0,8849	3,50	0,9998
-1,25	0,1056	-3,60	0,0002	1,25	0,8944	3,60	0,9998
-1,30	0,0968	-3,70	0,0001	1,30	0,9032	3,70	0,9999
-1,35	0,0885	-3,80	0,00007	1,35	0,9115	3,80	0,99993
-1,40	0,0808	-3,90	0,00005	1,40	0,9192	3,90	0,99995
-1,45	0,0735	-4,00	0,00003	1,45	0,9265	4,00	0,99997
-1,50	0,0668	-5,00	0,0000003	1,50	0,9332	5,00	0,99999

14\* Таблица П.2. Значения коэффициентов  $t_p$  распределения Стьюдента и величины  $\frac{t_p}{\sqrt{n}}$

n-1	p = 0,683		0,90		0,95		0,99		0,997		0,999	
	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$	$t_p$	$\frac{t_p}{\sqrt{n}}$
1	1,833	1,296	4,465	1,396	8,987	1,396	63,66	45,01	23,48	166,0	636,6	450,1
2	1,283	0,741	1,686	2,920	2,484	4,303	9,925	5,730	18,72	10,81	31,62	18,26
3	1,197	0,598	1,176	2,353	1,591	3,182	5,841	2,920	9,005	4,502	12,91	6,455
4	1,142	0,511	0,953	2,132	1,241	2,776	4,604	2,059	6,485	2,900	8,615	3,853
5	1,110	0,453	0,823	2,015	1,050	2,447	4,032	1,646	5,404	2,206	6,865	2,803
6	1,089	0,412	0,734	1,943	0,925	2,447	3,707	1,401	4,819	1,821	5,963	2,254
7	1,075	0,380	0,670	1,895	0,836	2,365	3,499	1,237	4,455	1,575	5,408	1,912
8	1,066	0,355	0,620	1,859	0,769	2,306	3,355	1,118	4,209	1,403	5,041	1,680
9	1,058	0,334	0,580	1,833	0,715	2,262	3,250	1,028	4,032	1,275	4,783	1,512
10	1,052	0,317	0,546	1,812	0,672	2,228	3,169	0,955	3,898	1,175	4,596	1,386
12	1,042	0,289	0,494	1,782	0,604	2,179	3,054	0,847	3,711	1,029	4,322	1,199
14	1,036	0,267	0,455	1,761	0,554	2,145	2,977	0,769	3,586	0,926	4,146	1,076
16	1,031	0,250	0,423	1,746	0,514	2,120	2,921	0,708	3,496	0,848	4,025	0,901
18	1,027	0,236	0,398	1,734	0,482	2,101	2,878	0,660	3,430	0,787	3,929	0,841
20	1,024	0,223	0,376	1,725	0,455	2,086	2,845	0,621	3,378	0,737	3,853	0,801
22	1,021	0,213	0,358	1,717	0,432	2,074	2,819	0,588	3,336	0,696	3,792	0,791
24	1,020	0,204	0,342	1,711	0,413	2,063	2,797	0,559	3,302	0,660	3,747	0,749
26	1,019	0,196	0,328	1,706	0,396	2,056	2,779	0,535	3,274	0,630	3,719	0,716
28	1,017	0,189	0,316	1,701	0,380	2,048	2,763	0,513	3,250	0,604	3,676	0,683
30	1,016	0,182	0,305	1,697	0,367	2,042	2,750	0,494	3,230	0,580	3,654	0,656
40	1,011	0,158	0,263	1,684	0,316	2,021	2,704	0,422	3,160	0,494	3,551	0,554
60	1,007	0,129	0,214	1,671	0,256	2,000	2,660	0,341	3,093	0,396	3,463	0,443
100	1,003	0,100	0,165	1,660	0,197	1,984	2,626	0,261	3,042	0,340	3,402	0,338
200	0,999	0,070	0,117	1,653	0,139	1,972	2,601	0,183	3,003	0,212	3,358	0,237
∞	0,998	0	0	1,645	0	1,960	2,576	0	2,966	0	3,294	0

1- $\alpha$ = доверительная вероятность	$\chi^2$ при доверительной вероятности $p$																		
	0,999	0,995	0,99	0,975	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
15	3,48	4,605	5,23	6,27	7,26	8,55	10,3	11,7	13,0	14,3	15,8	17,2	19,3	22,4	25,0	27,4	30,6	32,9	37,6
16	3,94	5,14	5,81	6,91	7,97	9,31	11,2	12,6	14,0	15,3	16,8	18,4	20,5	23,5	26,2	28,8	32,0	34,6	39,2
17	4,42	5,70	6,41	7,56	8,67	10,1	12,0	13,5	14,9	16,3	17,8	19,6	21,6	24,8	27,5	30,3	33,3	35,7	40,8
18	4,90	6,26	7,02	8,23	9,40	10,9	12,8	14,4	15,9	17,3	18,9	20,5	22,7	25,9	28,8	31,5	34,7	37,1	42,3
19	5,42	6,84	7,64	8,91	10,1	11,6	13,7	15,4	16,8	18,3	20,0	21,7	23,9	27,2	30,2	32,9	36,1	38,6	43,9
20	5,92	7,44	8,26	9,60	10,9	12,4	14,6	16,3	17,8	19,3	21,0	22,8	25,0	28,4	31,4	34,2	37,6	40,0	45,4
22	6,97	8,65	9,55	11,0	12,3	14,0	16,3	18,1	19,7	21,3	23,1	24,9	27,3	30,8	33,9	36,7	40,3	42,9	48,2
24	8,09	9,89	10,8	12,4	13,8	15,6	18,1	19,9	21,6	23,3	25,2	27,1	29,5	33,1	36,5	39,4	43,0	45,6	51,1
26	9,23	11,2	12,2	13,8	15,4	17,3	19,8	21,8	23,6	25,3	27,3	29,1	31,7	35,6	39,0	41,9	45,8	48,4	54,1
28	10,4	12,5	13,6	15,3	16,9	18,9	21,6	23,7	25,5	27,3	29,1	31,4	34,2	37,8	41,4	44,5	48,2	51,0	56,8
30	11,6	13,8	14,9	16,8	18,5	20,6	23,4	25,5	27,4	29,3	31,2	33,6	36,3	40,2	43,8	47,1	51,0	53,7	59,7
35	14,7	17,2	18,5	20,6	22,5	24,8	27,8	30,2	32,3	34,3	36,4	38,8	41,6	46,2	49,7	53,2	57,4	60,2	66,5
40	17,9	20,7	22,2	24,4	26,5	29,0	32,4	34,9	37,1	39,3	41,6	44,0	47,2	52,0	55,6	59,2	63,6	66,8	73,6
45	21,2	24,3	25,9	28,4	30,6	33,3	36,9	39,6	42,0	44,3	46,8	49,5	52,6	57,6	61,6	65,2	69,8	73,4	80,1
50	24,7	28,0	29,7	32,4	34,8	37,7	41,4	44,3	46,8	49,4	52,0	54,5	58,0	63,0	67,5	71,5	76,0	79,5	86,5

Таблица 11.4. Значения функции  $A(\omega^2)$  в зависимости от  $\omega^2$

$\omega^2$	$A(\omega^2)$									
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007
0,2	0,010	0,013	0,016	0,020	0,025	0,030	0,035	0,041	0,048	0,055
0,3	0,062	0,070	0,078	0,086	0,095	0,104	0,113	0,122	0,132	0,141
0,4	0,151	0,161	0,171	0,181	0,192	0,202	0,212	0,222	0,233	0,243
0,5	0,253	0,263	0,274	0,284	0,294	0,304	0,313	0,323	0,333	0,343
0,6	0,352	0,361	0,371	0,380	0,389	0,398	0,407	0,416	0,424	0,433
0,7	0,441	0,449	0,458	0,466	0,474	0,482	0,489	0,497	0,504	0,512
0,8	0,519	0,526	0,533	0,540	0,547	0,554	0,560	0,567	0,573	0,580
0,9	0,586	0,592	0,598	0,604	0,610	0,615	0,621	0,627	0,632	0,637
1,0	0,643	0,648	0,653	0,658	0,663	0,668	0,673	0,677	0,682	0,687
1,1	0,691	0,696	0,700	0,704	0,709	0,713	0,717	0,721	0,725	0,729
1,2	0,732	0,736	0,740	0,744	0,747	0,751	0,754	0,758	0,761	0,764
1,3	0,768	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786	0,789	0,792	0,795
1,4	0,798	0,800	0,803	0,806	0,809	0,811	0,814	0,816	0,819	0,821
1,5	0,824	0,826	0,828	0,831	0,833	0,835	0,837	0,839	0,842	0,844
1,6	0,846	0,848	0,850	0,852	0,854	0,856	0,858	0,859	0,861	0,863
1,7	0,865	0,867	0,868	0,870	0,872	0,873	0,875	0,877	0,878	0,880
1,8	0,881	0,883	0,884	0,886	0,887	0,889	0,890	0,892	0,893	0,894
1,9	0,896	0,897	0,898	0,899	0,901	0,902	0,903	0,905	0,906	0,907
2,0	0,908	0,909	0,910	0,912	0,913	0,914	0,915	0,916	0,917	0,918
2,1	0,919	0,920	0,921	0,922	0,923	0,924	0,925	0,926	0,927	0,928
2,2	0,929	0,929	0,930	0,931	0,932	0,933	0,934	0,935	0,936	0,937
2,3	0,937	0,938	0,938	0,939	0,940	0,941	0,941	0,942	0,943	0,943
2,4	0,944	0,945	0,945	0,946	0,947	0,947	0,948	0,949	0,949	0,950

Примечания: 1. Значения  $\omega^2$  вычисляются по формуле

$$\omega^2 = -n-2 \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2i-1}{n} \ln F(x_i) + \left( 1 - \frac{2i-1}{n} \right) \ln [1 - F(x_i^2)] \right]$$

где  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) — результат наблюдения, имеющий  $i$ -й номер в вариационном ряду;  $F(x_i)$  — функция теоретического распределения при заданном аргумента, равном  $x_i$

2. Гипотеза о функции распределения случайной величины считается принятой, если  $\alpha(\omega^2) < (1-\alpha)$ , где  $\alpha$  — уровень значимости, равный 0,1 или 0,2.

Таблица 11.5. Предельные значения нормированных отклонений опытного распределения от значений теоретического распределения для заданных доверительных вероятностей (по Колмогорову)

Доверительная вероятность	Нормированное отклонение	Доверительная вероятность	Нормированное отклонение
0,01	0,44	0,60	0,89
0,05	0,52	0,70	0,97
0,10	0,57	0,80	1,07
0,15	0,61	0,90	1,22
0,20	0,65	0,95	1,36
0,30	0,71	0,98	1,52
0,40	0,77	0,99	1,63

222 Таблица П.6. Градуировочная характеристика медь-копелевой термопары для диапазона температур  $-200 \div +100^\circ\text{C}$  (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-6,154									
-190	-5,975	-5,993	-6,012	-6,030	-6,048	-6,066	-6,084	-6,102	-6,119	-6,136
-180	-5,781	-5,801	-5,821	-5,841	-5,860	-5,880	-5,899	-5,918	-5,937	-5,956
-170	-5,572	-5,594	-5,615	-5,636	-5,657	-5,678	-5,699	-5,720	-5,740	-5,761
-160	-5,349	-5,372	-5,394	-5,417	-5,440	-5,462	-5,484	-5,507	-5,529	-5,550
-150	-5,111	-5,135	-5,159	-5,184	-5,208	-5,231	-5,255	-5,279	-5,302	-5,325
-140	-4,859	-4,885	-4,910	-4,936	-4,961	-4,986	-5,012	-5,037	-5,061	-5,086
-130	-4,593	-4,620	-4,647	-4,674	-4,701	-4,728	-4,754	-4,780	-4,807	-4,833
-120	-4,313	-4,342	-4,370	-4,399	-4,427	-4,454	-4,483	-4,510	-4,538	-4,566
-110	-4,021	-4,051	-4,080	-4,110	-4,139	-4,169	-4,198	-4,227	-4,256	-4,285
-100	-3,715	-3,746	-3,777	-3,808	-3,839	-3,869	-3,900	-3,930	-3,961	-3,991
-90	-3,396	-3,429	-3,461	-3,493	-3,525	-3,557	-3,589	-3,621	-3,652	-3,684
-80	-3,065	-3,099	-3,133	-3,166	-3,199	-3,232	-3,266	-3,298	-3,331	-3,364
-70	-2,722	-2,757	-2,792	-2,826	-2,861	-2,895	-2,930	-2,964	-2,998	-3,032
-60	-2,367	-2,403	-2,439	-2,475	-2,510	-2,546	-2,582	-2,617	-2,652	-2,687
-50	-2,000	-2,037	-2,074	-2,111	-2,148	-2,185	-2,222	-2,258	-2,295	-2,331
-40	-1,622	-1,660	-1,698	-1,736	-1,774	-1,812	-1,850	-1,888	-1,925	-1,963
-30	-1,232	-1,272	-1,311	-1,350	-1,389	-1,428	-1,467	-1,506	-1,545	-1,583
-20	-0,832	-0,873	-0,913	-0,953	-0,993	-1,034	-1,074	-1,113	-1,153	-1,193
-10	-0,421	-0,463	-0,504	-0,546	-0,587	-0,628	-0,669	-0,710	-0,751	-0,791
0	0	-0,043	-0,085	-0,127	-0,170	-0,212	-0,254	-0,296	-0,338	-0,380
+0	0	0,043	0,085	0,128	0,171	0,214	0,258	0,301	0,344	0,388
10	0,431	0,475	0,519	0,563	0,606	0,651	0,695	0,739	0,783	0,828
20	0,872	0,917	0,962	1,006	1,051	1,096	1,142	1,187	1,232	1,277
30	1,323	1,368	1,414	1,460	1,506	1,552	1,598	1,644	1,690	1,736
40	1,783	1,829	1,876	1,922	1,969	2,016	2,063	2,110	2,157	2,204
50	2,253	2,299	2,346	2,394	2,441	2,489	2,537	2,585	2,633	2,681
60	2,729	2,777	2,826	2,874	2,922	2,971	3,020	3,068	3,117	3,166
70	3,215	3,264	3,313	3,362	3,412	3,461	3,510	3,560	3,610	3,659
80	3,709	3,759	3,809	3,859	3,909	3,959	4,009	4,060	4,110	4,160
90	4,211	4,262	4,312	4,363	4,414	4,465	4,516	4,567	4,618	4,669
100	4,721									

Таблица П.7. Градуировочная характеристика медь — медноникелевой термопары, тип Т, в диапазоне температур  $-200 \div +400^\circ\text{C}$  (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	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	-2,217	-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

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-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
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
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	18,178	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	18,966
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	20,745	20,807
400	20,869									

226 Таблица П.8. Градуировочная характеристика железо — медноникелевой термопары, тип J, в диапазоне температур  $-200 \div +900$  °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего 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	-0,050	-0,100	-0,151	-0,201	-0,251	-0,301	-0,351	-0,401	-0,451
+0	0,000	0,051	0,101	0,052	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	5,322	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
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	14,774	14,829	14,885	14,940	14,995	15,051	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

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	21,129	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
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	30,382	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	34,510	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
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	49,742	49,807	49,871	49,935
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									

230 Таблица П.9. Градуировочная характеристика хромель—копелевой термопары в диапазоне температур —50  
 + +800 °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура ра- бочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—50	—3,110									
—40	—2,500	—2,561	—2,622	—2,683	—2,744	—2,805	—2,866	—2,927	—2,988	—3,049
—30	—1,890	—1,951	—2,012	—2,073	—2,134	—2,195	—2,256	—2,317	—2,378	—2,439
—20	—1,270	—1,336	—1,394	—1,456	—1,518	—1,580	—1,642	—1,704	—1,766	—1,828
—10	—0,640	—0,703	—0,766	—0,829	—0,892	—0,955	—1,018	—1,081	—1,144	—1,207
—0	—0,000	—0,064	—0,128	—0,192	—0,256	—0,320	—0,384	—0,448	—0,512	—0,576
+0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	17,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,783

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
370	28,870	28,957	29,044	29,131	29,218	29,305	29,392	29,479	29,566	29,656
380	29,740	29,827	29,914	30,001	30,088	30,175	30,262	30,349	30,436	30,523
390	30,610	30,697	30,784	30,871	30,958	31,045	31,132	31,219	31,306	31,393
400	31,480	31,567	31,654	31,741	31,828	31,915	31,002	32,089	32,176	32,263
410	32,350	32,438	32,526	32,614	32,702	32,790	32,878	32,966	33,054	33,142
420	33,230	33,318	33,406	33,494	33,582	33,670	33,758	33,846	33,934	34,022
430	34,110	34,198	34,286	34,374	34,462	34,550	34,638	34,726	34,814	34,902
440	34,990	35,078	35,116	35,254	35,342	35,430	35,518	35,606	35,694	35,782
450	35,870	35,958	36,046	36,134	36,222	36,310	36,398	36,486	36,574	36,662
460	36,750	36,838	36,926	37,014	37,102	37,190	37,278	37,366	37,454	37,542
470	37,630	37,718	37,806	37,894	37,982	38,070	38,158	38,246	38,334	38,422
480	38,510	38,598	38,686	38,774	38,862	38,950	39,038	39,126	39,214	39,302
490	39,390	39,478	39,566	39,654	39,742	39,830	39,918	40,006	40,094	40,182
500	40,270	40,358	40,446	40,534	40,622	40,710	40,798	40,886	40,974	41,062
510	41,150	41,238	41,326	41,414	41,502	41,590	41,678	41,766	41,854	41,942
520	42,030	42,118	42,206	42,294	42,382	42,470	42,558	42,646	42,734	42,822
530	42,910	42,998	43,086	43,174	43,262	43,350	43,438	43,526	43,614	43,702
540	43,790	43,878	43,966	44,054	44,142	44,230	44,318	44,406	44,494	44,582
550	44,670	44,758	44,846	44,934	45,022	45,110	45,198	45,286	45,374	45,462
560	45,550	45,639	45,728	45,817	45,906	45,995	46,084	46,173	46,262	46,351

570	46,440	46,529	46,618	46,707	46,796	46,885	46,974	47,063	47,152	47,241
580	47,330	47,418	47,506	47,594	47,682	47,770	47,858	47,946	48,034	48,122
590	48,210	48,298	48,386	48,474	48,562	48,650	48,738	48,826	48,914	49,002
600	49,090	49,178	49,266	49,354	49,442	49,530	49,618	49,706	49,794	49,882
610	49,970	50,058	50,146	50,234	50,322	50,410	50,498	50,586	50,674	50,762
620	50,850	50,938	51,026	51,114	51,202	51,290	51,378	51,466	51,554	51,642
630	51,730	51,818	51,906	51,994	52,082	52,170	52,258	52,346	52,434	52,522
640	52,610	52,697	52,784	52,871	52,958	53,045	53,132	53,219	53,306	53,393
650	53,480	53,567	53,654	53,741	53,828	53,915	54,002	54,089	54,176	54,263
660	54,350	54,437	54,524	54,611	54,698	54,785	54,872	54,959	55,046	55,133
670	55,220	55,307	55,394	55,481	55,568	55,655	55,742	55,829	55,916	56,003
680	56,090	56,177	56,264	56,351	56,438	56,525	56,612	56,699	56,786	56,873
690	56,960	57,046	57,132	57,218	57,304	57,390	57,476	57,562	57,648	57,734
700	57,820	57,906	57,992	58,078	58,164	58,250	58,336	58,422	58,508	58,594
710	58,680	58,766	58,852	58,938	59,024	59,110	59,196	59,282	59,368	59,454
720	59,540	59,626	59,712	59,798	59,884	59,970	60,056	60,142	60,228	60,314
730	60,400	60,486	60,572	60,658	60,744	60,830	60,916	61,002	61,088	61,174
740	61,260	61,346	61,432	61,518	61,604	61,690	61,776	61,862	61,948	62,034
750	62,120	62,206	62,292	62,378	62,464	62,550	62,636	62,722	62,808	62,894
760	62,980	63,066	63,152	63,238	63,324	63,410	63,496	63,582	63,668	63,754
770	63,840	63,926	64,012	64,098	64,184	64,270	64,356	64,442	64,528	64,614
780	64,700	64,786	64,872	64,958	65,044	65,130	65,216	65,302	65,388	65,474
790	65,560	65,646	65,732	65,818	65,904	65,990	66,076	66,162	66,248	66,334
800	66,420									

234 Таблица П.10. Градуировочная характеристика никельхром—медноникелевой термопары, тип Е, в диапазоне температур  $-100 \div +900$  °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-8,824									
-190	-8,561	-8,589	-8,617	-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	-5,237	-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
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	1,617	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	3,237	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	7,477	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	10,286	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	15,059	15,134	15,209	15,284	15,359	15,435	15,510	15,586
230	15,661	15,736	15,812	15,887	15,963	16,038	16,114	16,190	16,265	16,341
240	16,417	16,493	16,569	16,645	16,721	16,797	16,873	16,949	17,026	17,102
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	22,832	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	24,487	24,566	24,645	24,724	24,803	24,882

15\*

235

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	25,913	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	27,425	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
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	41,045	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
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	56,449	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	60,001	60,080	60,158
790	60,237	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	63,368	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									

238 Таблица П.11. Градуировочная характеристика никельхром — никельалюминиевой (хромель — алюмелевой) термопары, тип К, в диапазоне температур  $-200 \div +1300$  °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-5,892									
-190	-5,730	-5,747	-5,764	-5,781	-5,797	-5,813	-5,829	-5,845	-5,861	-5,877
-180	-5,550	-5,568	-5,587	-5,605	-5,624	-5,642	-5,660	-5,677	-5,695	-5,712
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,414	-5,434	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,249	-5,270	-5,291	-5,312	-5,333
-150	-4,913	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,051	-5,074	-5,096	-5,119
-140	-4,669	-4,694	-4,718	-4,743	-4,767	-4,792	-4,816	-4,840	-4,865	-4,889
-130	-4,410	-4,436	-4,462	-4,489	-4,515	-4,541	-4,567	-4,592	-4,618	-4,643
-120	-4,138	-4,166	-4,193	-4,221	-4,248	-4,276	-4,303	-4,330	-4,356	-4,383
-110	-3,852	-3,881	-3,910	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,053	-4,082	-4,110
-100	-3,553	-3,583	-3,613	-3,644	-3,674	-3,704	-3,734	-3,763	-3,793	-3,822
-90	-3,242	-3,273	-3,305	-3,336	-3,368	-3,399	-3,430	-3,461	-3,491	-3,522
-80	-2,920	-2,952	-2,985	-3,017	-3,050	-3,082	-3,114	-3,146	-3,178	-3,210
-70	-2,586	-2,620	-2,653	-2,687	-2,720	-2,754	-2,787	-2,820	-2,854	-2,887
-60	-2,243	-2,278	-2,312	-2,347	-2,381	-2,416	-2,450	-2,484	-2,518	-2,552
-50	-1,889	-1,925	-1,960	-1,996	-2,031	-2,067	-2,102	-2,137	-2,173	-2,208
-40	-1,527	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853
-30	-1,156	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,416	-1,453	-1,490
-20	-0,777	-0,815	-0,853	-0,891	-0,929	-0,967	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-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	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,736	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,217	8,257	8,297	8,337	8,377	8,417	8,457	8,497
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510
380	15,552	15,594	15,636	15,679	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,004	20,086	20,129	20,172
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582
570	23,624	23,667	23,710	23,754	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284

610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825
790	32,866	32,907	32,948	32,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	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	36,483
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,893	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,810	40,840
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230
1000	41,269	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619
1010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006
1020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393
1030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779
1040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164
1050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547
1060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930
1070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311
1080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691

1090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070
1100	45,108	45,146	45,184	45,222	45,260	45,297	45,335	45,373	45,411	45,448
1110	45,486	45,524	45,561	45,599	45,637	45,675	45,712	45,750	45,787	45,825
1120	45,863	45,900	45,938	45,975	46,013	46,051	46,088	46,126	46,163	46,201
1130	46,238	46,275	46,313	46,350	46,388	46,425	46,463	46,500	46,537	46,575
1140	46,612	46,649	46,687	46,724	46,761	46,799	46,836	46,873	46,910	46,948
1150	46,985	47,022	47,059	47,096	47,134	47,171	47,208	47,245	47,282	47,319
1160	47,356	47,393	47,430	47,467	47,504	47,541	47,578	47,615	47,652	47,689
1170	47,726	47,763	47,800	47,837	47,874	47,911	47,948	47,985	48,021	48,058
1180	48,095	48,132	48,169	48,205	48,242	48,279	48,316	48,352	48,389	48,426
1190	48,462	48,499	48,536	48,572	48,609	48,645	48,682	48,718	48,755	48,792
1200	48,828	48,865	48,901	48,937	48,974	49,010	49,047	49,083	49,120	49,156
1210	49,192	49,229	49,265	49,301	49,338	49,374	49,410	49,446	49,483	49,519
1220	49,555	49,591	49,627	49,663	49,700	49,736	49,772	49,808	49,844	49,880
1230	49,916	49,952	49,988	50,024	50,060	50,096	50,132	50,168	50,204	50,240
1240	50,276	50,311	50,347	50,383	50,419	50,455	50,491	50,526	50,562	50,598
1250	50,633	50,669	50,705	50,741	50,776	50,812	50,847	50,883	50,919	50,954
1260	50,990	51,025	51,061	51,096	51,132	51,167	51,203	51,238	51,274	51,309
1270	51,344	51,380	51,415	51,450	51,486	51,521	51,556	51,592	51,627	51,662
1280	51,697	51,733	51,768	51,803	51,838	51,873	51,908	51,943	51,979	52,014
1290	52,049	52,084	52,119	52,154	52,189	52,224	52,259	52,294	52,329	52,364
1300	52,398									

Т а б л и ц а П.12. Градуировочная характеристика платиновых (10 %) — платиновой термопары, тип S, в диапазоне температур 0—1600 °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,049
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,130	0,136	0,142	0,148	0,154	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,209	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,247	0,254	0,260	0,266	0,273	0,279	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,318	0,325	0,331	0,338	0,344	0,351	0,358
60	0,364	0,371	0,378	0,384	0,391	0,398	0,405	0,412	0,418	0,425
70	0,432	0,439	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	0,537	0,544	0,551	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,587	0,595	0,602	0,609	0,616	0,623	0,631	0,638
100	0,645	0,652	0,660	0,667	0,675	0,682	0,689	0,697	0,704	0,712
110	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,757	0,765	0,772	0,780	0,787
120	0,795	0,803	0,810	0,818	0,825	0,833	0,841	0,849	0,856	0,864
130	0,872	0,880	0,887	0,895	0,902	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,973	0,981	0,989	0,997	1,005	1,013	0,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,093	1,101
160	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,157	1,165	1,174	1,182
170	1,190	1,198	1,206	1,215	1,223	1,231	1,239	1,248	1,256	1,265
180	1,273	1,281	1,289	1,298	1,306	1,314	1,322	1,331	1,339	1,348
190	1,356	1,364	1,373	1,381	1,390	1,398	1,406	1,415	1,423	1,432
200	1,440	1,448	1,457	1,465	1,474	1,482	1,491	1,499	1,508	1,516
210	1,525	1,534	1,542	1,551	1,559	1,568	1,577	1,585	1,594	1,602
220	1,611	1,620	1,628	1,637	1,645	1,654	1,663	1,672	1,680	1,689
230	1,698	1,707	1,715	1,724	1,732	1,741	1,750	1,759	1,767	1,776
240	1,785	1,794	1,803	1,811	1,820	1,829	1,838	1,847	1,855	1,864
250	1,873	1,882	1,891	1,899	1,908	1,917	1,926	1,935	1,944	1,953

260	1,962	1,971	1,980	1,988	1,997	2,006	2,015	2,024	2,033	2,042
270	2,051	2,060	2,069	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132
280	2,141	2,150	2,159	2,168	2,177	2,186	2,195	2,204	2,214	2,223
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,359	2,368	2,377	2,386	2,396	2,405
310	2,414	2,423	2,432	2,442	2,451	2,460	2,469	2,478	2,488	2,497
320	2,506	2,515	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,608	2,618	2,627	2,637	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,701	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,777
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,824	2,833	2,842	2,852	2,861	2,871
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,918	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050	3,060
380	3,069	3,079	3,088	3,098	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145	3,155
390	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,222	3,231	3,241	3,250
400	3,260	3,270	3,279	3,289	3,298	3,308	3,318	3,327	3,337	3,346
410	3,356	3,366	3,375	3,385	3,394	3,404	3,414	3,423	3,433	3,442
420	3,452	3,462	3,471	3,481	3,490	3,500	3,510	3,520	3,529	3,539
430	3,549	3,559	3,568	3,578	3,587	3,597	3,607	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,665	3,674	3,684	3,694	3,704	3,714	3,723	3,733
450	3,743	3,753	3,762	3,772	3,781	3,791	3,801	3,811	3,820	3,830
460	3,840	3,850	3,860	3,869	3,879	3,889	3,899	3,909	3,918	3,928
470	3,938	3,948	3,958	3,967	3,977	3,987	3,997	4,007	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,066	4,076	4,086	4,096	4,106	4,115	4,125
490	4,135	4,145	4,155	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,214	4,224
500	4,234	4,244	4,254	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,333	4,343	4,353	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	4,792	4,802	4,812	4,822
560	4,832	4,842	4,852	4,863	4,873	4,883	4,893	4,903	4,913	4,923
570	4,933	4,943	4,953	4,964	4,974	4,984	4,994	5,004	5,014	5,024

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
580	5,034	5,044	5,054	5,065	5,075	5,085	5,095	5,105	5,116	5,126
590	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,196	5,206	5,217	5,227
600	5,237	5,247	5,257	5,268	5,278	5,288	5,298	5,308	5,319	5,329
610	5,339	5,349	5,360	5,370	5,381	5,391	5,401	5,411	5,422	5,432
620	5,442	5,452	5,462	5,473	5,483	5,493	5,503	5,513	5,524	5,534
630	5,544	5,554	5,565	5,575	5,586	5,596	5,606	5,617	5,627	5,638
640	5,648	5,658	5,669	5,679	5,690	5,700	5,710	5,720	5,731	5,741
650	5,751	5,761	5,772	5,782	5,793	5,803	5,813	5,824	5,834	5,845
660	5,855	5,865	5,876	5,886	5,897	5,907	5,918	5,928	5,939	5,949
670	5,960	5,970	5,981	5,991	6,002	6,012	6,022	6,033	6,043	6,054
680	6,064	6,075	6,085	6,096	6,106	6,117	6,127	6,138	6,148	6,159
690	6,169	6,180	6,190	6,201	6,211	6,222	6,232	6,243	6,253	6,264
700	6,274	6,285	6,295	6,306	6,316	6,327	6,338	6,348	6,359	6,369
710	6,380	6,391	6,401	6,412	6,422	6,433	6,444	6,454	6,465	6,475
720	6,486	6,497	6,507	6,518	6,528	6,539	6,550	6,560	6,571	6,581
730	6,592	6,603	6,613	6,624	6,634	6,645	6,656	6,667	6,677	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,741	6,752	6,763	6,773	6,784	6,794
750	6,805	6,816	6,827	6,837	6,848	6,859	6,870	6,881	6,891	6,902
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,955	6,966	6,977	6,988	6,998	7,009
770	7,020	7,031	7,042	7,052	7,063	7,074	7,085	7,096	7,106	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,160	7,171	7,182	7,193	7,204	7,214	7,225
790	7,236	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,313	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,377	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,486	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	7,650	7,661
830	7,672	7,683	7,694	7,705	7,716	7,727	7,738	7,749	7,760	7,771
840	7,782	7,793	7,804	7,815	7,826	7,837	7,848	7,859	7,870	7,881

850	7,892	7,903	7,914	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992
860	8,003	8,014	8,025	8,036	8,047	8,058	8,069	8,080	8,092	8,103
870	8,114	8,125	8,136	8,147	8,158	8,169	8,180	8,191	8,203	8,214
880	8,225	8,236	8,247	8,259	8,270	8,281	8,292	8,303	8,314	8,325
890	8,336	8,347	8,358	8,370	8,381	8,392	8,403	8,414	8,426	8,437
900	8,448	8,459	8,470	8,482	8,493	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549
910	8,560	8,571	8,583	8,594	8,606	8,617	8,628	8,639	8,651	8,662
920	8,673	8,684	8,695	8,707	8,718	8,729	8,740	8,752	8,763	8,775
930	8,786	8,797	8,808	8,820	8,831	8,842	8,853	8,865	8,876	8,888
940	8,899	8,910	8,922	8,933	8,945	8,956	8,967	8,978	8,990	9,001
950	9,012	9,023	9,035	9,046	9,058	9,069	9,080	9,092	9,103	9,115
960	9,126	9,137	9,149	9,160	9,172	9,183	9,194	9,206	9,217	9,229
970	9,240	9,252	9,263	9,275	9,286	9,298	9,309	9,321	9,332	9,344
980	9,355	9,366	9,378	9,389	9,401	9,412	9,424	9,435	9,447	9,458
990	9,470	9,481	9,493	9,504	9,516	9,527	9,539	9,550	9,562	9,573
1000	9,585	9,596	9,608	9,619	9,631	9,642	9,654	9,665	9,677	9,688
1010	9,700	9,712	9,723	9,735	9,746	9,758	9,770	9,781	9,793	9,804
1020	9,816	9,828	9,839	9,851	9,862	9,874	9,886	9,897	9,909	9,920
1030	9,932	9,944	9,955	9,967	9,978	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036
1040	10,048	10,060	10,072	10,083	10,095	10,107	10,119	10,130	10,142	10,153
1050	10,165	10,177	10,189	10,200	10,212	10,224	10,236	10,247	10,259	10,270
1060	10,282	10,294	10,306	10,317	10,329	10,341	10,353	10,365	10,376	10,388
1070	10,400	10,412	10,424	10,435	10,447	10,459	10,471	10,482	10,494	10,505
1080	10,517	10,529	10,541	10,552	10,564	10,576	10,588	10,600	10,611	10,623
1090	10,635	10,647	10,659	10,670	10,682	10,694	10,706	10,718	10,730	10,742
1100	10,754	10,766	10,778	10,789	10,801	10,813	10,825	10,837	10,848	10,860
1110	10,872	10,884	10,896	10,907	10,919	10,931	10,943	10,955	10,967	10,979
1120	10,991	11,003	11,015	11,026	11,038	11,050	11,062	11,074	11,086	11,098
1130	11,110	11,122	11,134	11,145	11,157	11,169	11,181	11,193	11,205	11,217
1140	11,229	11,241	11,253	11,264	11,276	11,288	11,300	11,312	11,324	11,336
1150	11,348	11,360	11,372	11,384	11,396	11,408	11,420	11,432	11,443	11,455

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1160	11,467	11,479	11,491	11,503	11,515	11,527	11,539	11,551	11,563	11,575
1170	11,587	11,599	11,611	11,623	11,635	11,647	11,659	11,671	11,683	11,695
1180	11,707	11,719	11,731	11,743	11,755	11,767	11,779	11,791	11,803	11,815
1190	11,827	11,839	11,851	11,863	11,875	11,887	11,899	11,911	11,923	11,935
1200	11,947	11,959	11,971	11,983	11,995	12,007	12,019	12,031	12,043	12,055
1210	12,067	12,079	12,091	12,104	12,116	12,128	12,140	12,152	12,164	12,176
1220	12,188	12,200	12,212	12,224	12,236	12,248	12,260	12,272	12,284	12,296
1230	12,308	12,320	12,332	12,345	12,357	12,369	12,381	12,393	12,405	12,417
1240	12,429	12,441	12,453	12,465	12,477	12,489	12,501	12,513	12,526	12,538
1250	12,550	12,562	12,574	12,586	12,598	12,610	12,622	12,634	12,647	12,659
1260	12,671	12,683	12,695	12,707	12,719	12,731	12,743	12,755	12,768	12,780
1270	12,792	12,804	12,816	12,828	12,840	12,852	12,864	12,876	12,889	12,901
1280	12,913	12,925	12,937	12,949	12,961	12,973	12,985	12,997	13,010	13,022
1290	13,034	13,046	13,058	13,070	13,082	13,094	13,106	13,118	13,131	13,143
1300	13,155	13,167	13,179	13,192	13,204	13,216	13,228	13,240	13,252	13,264
1310	13,276	13,288	13,300	13,313	13,325	13,337	13,349	13,361	13,373	13,385
1320	13,397	13,409	13,421	13,434	13,446	13,458	13,470	13,482	13,495	13,507
1330	13,519	13,531	13,543	13,555	13,567	13,579	13,591	13,603	13,616	13,628
1340	13,640	13,652	13,664	13,677	13,689	13,701	13,713	13,725	13,737	13,749
1350	13,761	13,773	13,785	13,798	13,810	13,822	13,834	13,846	13,859	13,871
1360	13,883	13,895	13,907	13,919	13,931	13,943	13,955	13,967	13,980	13,992
1370	14,004	14,016	14,028	14,041	14,053	14,065	14,077	14,089	14,101	14,113
1380	14,125	14,137	14,149	14,162	14,174	14,186	14,198	14,210	14,223	14,235
1390	14,247	14,259	14,271	14,283	14,295	14,307	14,319	14,331	14,344	14,356
1400	14,368	14,380	14,392	14,405	14,417	14,429	14,441	14,453	14,465	14,477
1410	14,489	14,501	14,513	14,526	14,538	14,550	14,562	14,574	14,586	14,598
1420	14,610	14,622	14,634	14,647	14,659	14,671	14,683	14,695	14,707	14,719

1430	14,731	14,743	14,755	14,768	14,780	14,792	14,804	14,816	14,828	14,840
1440	14,852	14,864	14,876	14,889	14,901	14,913	14,925	14,937	14,949	14,961
1450	14,973	14,985	14,997	15,010	15,022	15,034	15,046	15,058	15,070	15,082
1460	15,094	15,106	15,118	15,131	15,143	15,155	15,167	15,179	15,191	15,203
1470	15,215	15,227	15,239	15,251	15,263	15,275	15,287	15,299	15,312	15,324
1480	15,336	15,348	15,360	15,372	15,384	15,396	15,408	15,420	15,432	15,444
1490	15,456	15,468	15,480	15,492	15,504	15,516	15,528	15,540	15,552	15,564
1500	15,576	15,588	15,600	15,613	15,625	15,637	15,649	15,661	15,673	15,685
1510	15,697	15,709	15,721	15,733	15,745	15,757	15,769	15,781	15,793	15,805
1520	15,817	15,829	15,841	15,853	15,865	15,877	15,889	15,901	15,913	15,925
1530	15,937	15,949	15,961	15,973	15,985	15,997	16,009	16,021	16,033	16,045
1540	16,057	16,069	16,081	16,092	16,104	16,116	16,128	16,140	16,152	16,164
1550	16,176	16,188	16,200	16,212	16,224	16,236	16,248	16,260	16,272	16,284
1560	16,296	16,308	16,320	16,331	16,343	16,355	16,367	16,379	16,391	16,403
1570	16,415	16,427	16,439	16,450	16,462	16,474	16,486	16,498	16,510	16,522
1580	16,534	16,546	16,558	16,569	16,581	16,593	16,605	16,617	16,629	16,641
1590	16,653	16,665	16,677	16,688	16,700	16,712	16,724	16,736	16,747	16,759
1600	16,771									

Таблица П.13. Градуировочная характеристика платинородий (30%) — платинородиевой (6%) термопары, тип В, в диапазоне температур 300÷1800 °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	0,431	0,434	0,437	0,440	0,443	0,446	0,449	0,452	0,456	0,459
310	0,462	0,465	0,468	0,472	0,475	0,478	0,481	0,484	0,488	0,491
320	0,494	0,497	0,500	0,504	0,507	0,510	0,513	0,517	0,520	0,524
330	0,527	0,530	0,534	0,537	0,541	0,544	0,547	0,551	0,554	0,558

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
340	0,561	0,564	0,568	0,571	0,575	0,578	0,582	0,585	0,589	0,592
350	0,596	0,600	0,603	0,607	0,610	0,614	0,618	0,621	0,625	0,628
360	0,632	0,636	0,639	0,643	0,646	0,650	0,654	0,658	0,661	0,665
370	0,669	0,673	0,677	0,680	0,684	0,688	0,692	0,696	0,699	0,703
380	0,707	0,711	0,715	0,719	0,723	0,727	0,731	0,735	0,738	0,742
390	0,746	0,750	0,754	0,758	0,762	0,766	0,770	0,774	0,778	0,782
400	0,786	0,790	0,794	0,799	0,803	0,807	0,811	0,815	0,819	0,823
410	0,827	0,831	0,835	0,840	0,844	0,848	0,852	0,857	0,861	0,866
420	0,870	0,874	0,878	0,883	0,887	0,891	0,895	0,900	0,904	0,909
430	0,913	0,917	0,922	0,926	0,931	0,935	0,939	0,944	0,948	0,953
440	0,957	0,961	0,966	0,970	0,975	0,979	0,984	0,988	0,993	0,997
450	1,002	1,007	1,011	1,016	1,020	1,025	1,030	1,034	1,039	1,043
460	1,048	1,053	1,057	1,062	1,066	1,071	1,076	1,081	1,085	1,090
470	1,095	1,100	1,105	1,109	1,114	1,119	1,124	1,129	1,133	1,138
480	1,143	1,148	1,153	1,157	1,162	1,167	1,172	1,177	1,182	1,187
490	1,192	1,197	1,202	1,206	1,211	1,216	1,221	1,226	1,231	1,236
500	1,241	1,246	1,251	1,257	1,262	1,267	1,272	1,277	1,282	1,287
510	1,292	1,297	1,302	1,308	1,313	1,318	1,323	1,328	1,334	1,339
520	1,344	1,349	1,354	1,360	1,365	1,370	1,375	1,381	1,386	1,392
530	1,397	1,402	1,407	1,413	1,418	1,423	1,428	1,434	1,439	1,445
540	1,450	1,455	1,461	1,466	1,472	1,477	1,483	1,488	1,494	1,499
550	1,505	1,510	1,516	1,521	1,527	1,532	1,538	1,543	1,549	1,554

560	1,560	1,566	1,571	1,577	1,582	1,588	1,594	1,600	1,605	1,611
570	1,617	1,623	1,628	1,634	1,639	1,645	1,651	1,657	1,662	1,668
580	1,674	1,680	1,686	1,691	1,697	1,703	1,709	1,715	1,720	1,726
590	1,732	1,738	1,744	1,750	1,756	1,762	1,768	1,774	1,779	1,785
600	1,791	1,797	1,803	1,809	1,815	1,821	1,827	1,833	1,839	1,845
610	1,851	1,857	1,863	1,870	1,876	1,882	1,888	1,894	1,900	1,906
620	1,912	1,918	1,924	1,931	1,937	1,943	1,949	1,955	1,962	1,968
630	1,974	1,980	1,986	1,993	1,999	2,005	2,011	2,017	2,024	2,030
640	2,036	2,042	2,049	2,055	2,062	2,068	2,074	2,081	2,087	2,094
650	2,100	2,106	2,113	2,119	2,126	2,132	2,138	2,145	2,151	2,158
660	2,164	2,171	2,177	2,184	2,190	2,197	2,204	2,210	2,217	2,223
670	2,230	2,237	2,243	2,250	2,256	2,263	2,270	2,276	2,283	2,289
680	2,296	2,303	2,309	2,316	2,322	2,329	2,336	2,343	2,349	2,356
690	2,363	2,370	2,376	2,383	2,389	2,396	2,403	2,410	2,416	2,423
700	2,430	2,437	2,444	2,451	2,458	2,465	2,472	2,479	2,485	2,492
710	2,499	2,506	2,513	2,520	2,527	2,534	2,541	2,548	2,555	2,562
720	2,569	2,576	2,583	2,590	2,597	2,604	2,611	2,618	2,625	2,632
730	2,639	2,646	2,653	2,660	2,667	2,674	2,681	2,688	2,696	2,703
740	2,710	2,717	2,724	2,732	2,739	2,746	2,753	2,760	2,768	2,775
750	2,782	2,789	2,796	2,804	2,811	2,818	2,825	2,833	2,840	2,848
760	2,855	2,862	2,870	2,877	2,885	2,892	2,899	2,906	2,914	2,921
770	2,928	2,936	2,943	2,951	2,958	2,966	2,973	2,981	2,988	2,996
780	3,003	3,010	3,018	3,025	3,033	3,040	3,048	3,055	3,063	3,070
790	3,078	3,086	3,093	3,101	3,108	3,116	3,124	3,131	3,139	3,146
800	3,154	3,162	3,169	3,177	3,184	3,192	3,200	3,208	3,215	3,223
810	3,231	3,239	3,246	3,254	3,261	3,269	3,277	3,285	3,292	3,300

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
820	3,308	3,316	3,324	3,331	3,339	3,347	3,355	3,363	3,371	3,379
830	3,387	3,395	3,403	3,410	3,418	3,426	3,434	3,442	3,450	3,458
840	3,466	3,474	3,482	3,490	3,498	3,506	3,514	3,522	3,530	3,538
850	3,546	3,554	3,562	3,570	3,578	3,586	3,594	3,602	3,610	3,618
860	3,626	3,634	3,642	3,651	3,659	3,667	3,675	3,683	3,692	3,700
870	3,708	3,716	3,724	3,733	3,741	3,749	3,757	3,765	3,774	3,782
880	3,790	3,798	3,806	3,815	2,823	3,831	3,839	3,848	3,856	3,865
890	3,873	3,882	3,891	3,899	3,907	3,915	3,923	3,932	3,940	3,949
900	3,957	3,965	3,974	3,982	3,991	3,999	4,007	4,016	4,024	4,033
910	4,041	4,049	4,058	4,066	4,075	4,083	4,092	4,100	4,109	4,117
920	4,126	4,135	4,143	4,152	4,160	4,169	4,178	4,186	4,195	4,203
930	4,212	4,221	4,229	4,237	4,246	4,255	4,264	4,272	4,281	4,289
940	4,298	4,307	4,316	4,324	4,333	4,342	4,351	4,360	4,368	4,377
950	4,386	4,395	4,404	4,412	4,421	4,430	4,439	4,448	4,456	4,465
960	4,474	4,483	4,492	4,500	4,509	4,518	4,527	4,536	4,544	4,553
970	4,562	4,571	4,580	4,589	4,598	4,607	4,616	4,625	4,634	4,643
980	4,652	4,661	4,670	4,679	4,688	4,697	4,706	4,715	4,724	4,733
990	4,742	4,751	4,760	4,769	4,778	4,787	4,796	4,805	4,815	4,824
1000	4,833	4,842	4,851	4,861	4,870	4,879	4,888	4,897	4,907	4,916
1010	4,925	4,934	4,943	4,953	4,962	4,971	4,980	4,989	4,999	5,008
1020	5,017	5,026	5,035	5,045	5,054	5,063	5,072	5,082	5,091	5,101
1030	5,110	5,119	5,129	5,138	5,148	5,157	5,166	5,176	5,185	5,195
1040	5,204	5,213	5,223	5,232	5,242	5,251	5,260	5,270	5,279	5,289
1050	5,298	5,307	5,317	5,326	5,336	5,345	5,354	5,364	5,373	5,383
1060	5,392	5,402	5,411	5,421	5,430	5,440	5,450	5,459	5,469	5,478
1070	5,488	5,498	5,507	5,517	5,526	5,536	5,546	5,555	5,565	5,574
1080	5,584	5,594	5,603	5,613	5,622	5,632	5,642	5,651	5,661	5,670
1090	5,680	5,690	5,699	5,709	5,718	5,728	5,738	5,748	5,757	5,767
1100	5,777	5,787	5,797	5,806	5,816	5,826	5,836	5,846	5,855	5,865
1110	5,875	5,885	5,895	5,904	5,914	5,924	5,934	5,944	5,953	5,963
1120	5,973	5,983	5,993	6,003	6,013	6,023	6,033	6,043	6,053	6,063
1130	6,073	6,083	6,093	6,102	6,112	6,122	6,132	6,142	6,152	6,162
1140	6,172	6,182	6,192	6,203	6,213	6,223	6,233	6,243	6,253	6,263
1150	6,273	6,283	6,293	6,303	6,313	6,323	6,333	6,343	6,354	6,364
1160	6,374	6,384	6,394	6,404	6,414	6,424	6,434	6,444	6,455	6,465
1170	6,475	6,485	6,495	6,506	6,516	6,526	6,536	6,546	6,557	6,567
1180	6,577	6,587	6,598	6,608	6,619	6,629	6,639	6,649	6,660	6,670
1190	6,680	6,690	6,701	6,711	6,722	6,732	6,742	6,752	6,763	6,773
1200	6,783	6,793	6,804	6,814	6,825	6,835	6,845	6,856	6,866	6,877
1210	6,887	6,897	6,908	6,918	6,929	6,939	6,949	6,960	6,970	6,981
1220	6,991	7,002	7,012	7,023	7,033	7,044	7,054	7,065	7,075	7,086
1230	7,096	7,107	7,117	7,128	7,138	7,149	7,160	7,170	7,181	7,191
1240	7,202	7,213	7,223	7,234	7,244	7,255	7,266	7,276	7,287	7,297
1250	7,308	7,319	7,329	7,340	7,350	7,361	7,372	7,382	7,393	7,403
1260	7,414	7,425	7,435	7,446	7,456	7,467	7,478	7,489	7,499	7,510
1270	7,521	7,532	7,543	7,553	7,564	7,575	7,586	7,596	7,607	7,617
1280	7,628	7,639	7,650	7,660	7,671	7,682	7,693	7,704	7,714	7,725
1290	7,736	7,747	7,758	7,768	7,779	7,790	7,801	7,812	7,823	7,834

Температура рабочего конца, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1300	7,845	7,856	7,867	7,877	7,888	7,899	7,910	7,921	7,931	7,942
1310	7,953	7,964	7,975	7,986	7,997	8,008	8,019	8,030	8,041	8,052
1320	8,063	8,074	8,085	8,086	8,107	8,118	8,129	8,140	8,150	8,161
1330	8,172	8,183	8,194	8,205	8,216	8,227	8,238	8,249	8,261	8,272
1340	8,283	8,294	8,305	8,316	8,327	8,338	8,349	8,360	8,371	8,382
1350	8,393	8,404	8,415	8,427	8,438	8,449	8,460	8,471	8,482	8,493
1360	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549	8,560	8,571	8,582	8,594	8,605
1370	8,616	8,627	8,638	8,649	8,660	8,671	8,682	8,693	8,705	8,716
1380	8,727	8,738	8,749	8,761	8,772	8,783	8,794	8,805	8,817	8,828
1390	8,839	8,850	8,862	8,873	8,885	8,896	8,907	8,918	8,930	8,941
1400	8,952	8,963	8,974	8,986	8,997	9,008	9,020	9,031	9,043	9,054
1410	9,065	9,076	9,087	9,099	9,110	9,121	9,132	9,144	9,155	9,167
1420	9,178	9,189	9,201	9,212	9,224	9,235	9,246	9,257	9,269	9,280
1430	9,291	9,302	9,314	9,325	9,337	9,348	9,359	9,371	9,382	9,394
1440	9,405	9,416	9,428	9,439	9,451	9,462	9,473	9,485	9,496	9,508
1450	9,519	9,531	9,542	9,554	9,565	9,577	9,588	9,600	9,611	9,623
1460	9,634	9,645	9,657	9,668	9,680	9,691	9,703	9,714	9,726	9,737
1470	9,749	9,760	9,772	9,783	9,795	9,806	9,817	9,829	9,840	9,852
1480	9,863	9,875	9,886	9,898	9,909	9,921	9,933	9,944	9,956	9,967
1490	9,979	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036	10,048	10,059	10,071	10,082
1500	10,094	10,106	10,117	10,129	10,140	10,152	10,164	10,175	10,187	10,198
1510	10,210	10,222	10,233	10,245	10,256	10,268	10,279	10,291	10,302	10,314
1520	10,325	10,337	10,348	10,360	10,371	10,383	10,395	10,406	10,418	10,429
1530	10,441	10,453	10,465	10,476	10,488	10,500	10,512	10,523	10,535	10,546

1540	10,558	10,570	10,581	10,593	10,604	10,616	10,628	10,639	10,651	10,663
1550	10,674	10,686	10,697	10,709	10,720	10,732	10,744	10,755	10,767	10,778
1560	10,790	10,802	10,814	10,825	10,837	10,849	10,861	10,872	10,884	10,895
1570	10,907	10,919	10,930	10,942	10,953	10,965	10,977	10,989	11,000	11,012
1580	11,024	11,036	11,047	11,059	11,070	11,082	11,094	11,106	11,117	11,129
1590	11,141	11,153	11,164	11,176	11,187	11,199	11,211	11,222	11,234	11,245
1600	11,257	11,269	11,281	11,292	11,304	11,316	11,328	11,339	11,351	11,362
1610	11,374	11,386	11,398	11,409	11,421	11,433	11,445	11,456	11,468	11,479
1620	11,491	11,503	11,515	11,526	11,538	11,550	11,562	11,573	11,585	11,596
1630	11,608	11,620	11,632	11,643	11,655	11,667	11,679	11,690	11,702	11,713
1640	11,725	11,737	11,749	11,760	11,772	11,784	11,796	11,807	11,819	11,830
1650	11,842	11,854	11,866	11,877	11,889	11,901	11,913	11,924	11,936	11,947
1660	11,959	11,971	11,983	11,994	12,006	12,018	12,030	12,041	12,053	12,064
1670	12,076	12,088	12,099	12,111	12,122	12,134	12,146	12,158	12,169	12,181
1680	12,193	12,205	12,216	12,228	12,239	12,251	12,263	12,275	12,286	12,298
1690	12,310	12,322	12,333	12,345	12,356	12,368	12,380	12,391	12,403	12,414
1700	12,426	12,438	12,450	12,461	12,473	12,485	12,497	12,508	12,520	12,531
1710	12,543	12,555	12,566	12,578	12,589	12,601	12,613	12,624	12,636	12,647
1720	12,659	12,671	12,683	12,694	12,706	12,718	12,730	12,741	12,753	12,764
1730	12,776	12,788	12,799	12,811	12,823	12,834	12,846	12,857	12,869	12,880
1740	12,892	12,904	12,915	12,927	12,938	12,950	12,962	12,973	12,985	12,996
1750	13,008	13,020	13,031	13,043	13,054	13,066	13,078	13,089	13,101	13,112
1760	13,124	13,135	13,147	13,158	13,170	13,181	13,193	13,204	13,216	13,227
1770	13,239	13,251	13,262	13,274	13,285	13,297	13,309	13,320	13,332	13,343
1780	13,355	13,366	13,378	13,389	13,401	13,412	13,424	13,435	13,447	13,458
1790	13,470	13,481	13,493	13,504	13,516	13,527	13,539	13,550	13,562	13,573
1800	13,585									

Таблица П.14. Градуировочная характеристика вольфрамрений (5 %) — вольфрамрениевой (20 %) термопары в диапазоне температур 0—2500 °С (по СТ СЭВ 1059-78)

Температура рабочего 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	3,870	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	6,294	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	6,770	6,787	6,804	7,821	6,838	6,855	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	7,722
490	7,739	7,756	7,773	7,790	7,807	7,824	7,841	7,858	7,875	7,892
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

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	13,650	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	14,492	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	14,764	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	16,968	16,984	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

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	30,971	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
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

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	33,293	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									

Таблица П.15. Основные параметры термопреобразователей сопротивления

Тип термопреобразователя	Номинальное сопротивление при 0 °С, Ом	Условные обозначения градуировочной характеристики	Диапазон измеряемых температур, °С
ТСП	1	1 П	-50 ÷ +1100
	5	5 П	-100 ÷ +1100
	10	10 П	-200 ÷ +1000
	(46)	(гр.21)	-260 ÷ +1000
	500	500 П	-260 ÷ +1000
ТСМ	10	10 М	-50 ÷ +200
	50	50 М	-50 ÷ +200
	(53)	(гр.23)	-50 ÷ +180
	100	100 М	-200 ÷ +200

Примечания: 1. Термопреобразователи градуировок (гр. 21 и гр. 23) в новых разработках применять нельзя.  
2. Пределы измерений термопреобразователей должны находиться внутри диапазонов, указанных в таблице.

Таблица П.16. Допустимое отклонение сопротивления  $R_0$  термопреобразователя при 0 °С в процентах номинального значения

Тип преобразователя	Допустимое отклонение номинального сопротивления $R_0$ при 0 °С, % для классов				
	I	II	III	IV	V
ТСП	±0,05	±0,1	±0,2	±0,4	±0,8
ТСМ	—	±0,1	±0,2	±0,5	±1,0

Таблица П.17. Отношение сопротивления термопреобразователей при 100 °С к сопротивлению при 0 °С

Тип термопреобразователя и материал чувствительного элемента	$R_{100}/R_0$ для классов				
	I	II	III	IV	V
ТСП (платиновый проволочный)	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0005}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0010}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0020}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0030}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0050}$
ТСМ (медная проволочная)	—	$1,4280 \pm 0,0010$	$1,4280 \pm 0,0020$	$1,4280 \pm 0,0030$	$1,4280^{+0,0030}_{-0,0050}$

Примечания: 1. Термопреобразователи изготавливаются I—III классов — платиновые, II и III класса — медные.  
2. Во время работы, после которого отклонение может соответствовать другому классу, указывается в технических условиях.

266 Таблица П.18. Градуировочные характеристики платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур  $-260 \div +1100$  °С градуировок 100 П, 10 П\* и 1 П\*

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-260	0,406									
-250	1,022	0,919	0,827	0,745	0,673	0,610	0,555	0,507	0,465	0,430
-240	2,701	2,481	2,269	2,071	1,886	1,712	1,550	1,401	1,262	1,137
-230	5,487	5,167	4,855	4,551	4,257	3,971	3,696	3,431	3,176	2,933
-220	9,058	8,676	8,298	7,926	7,559	7,197	6,842	6,494	6,151	5,815
-210	13,075	12,660	12,248	11,838	11,431	11,027	10,626	10,228	9,834	9,444
-200	17,307	16,878	16,450	16,023	15,598	15,174	14,751	14,329	13,909	13,491
-190	21,657	21,221	20,784	20,347	19,909	19,471	19,035	18,601	18,168	17,737
-180	25,986	25,554	25,122	24,690	24,258	23,825	23,392	22,959	22,525	22,091
-170	30,279	29,851	29,422	28,993	28,563	28,133	27,703	27,273	26,842	26,411
-160	34,552	34,125	33,699	33,273	32,846	32,419	31,992	31,564	31,137	30,708
-150	38,799	38,374	37,949	37,524	37,101	36,676	36,252	35,827	35,402	34,977
-140	43,008	42,588	42,168	41,747	41,326	40,904	40,483	40,061	39,639	39,217
-130	47,195	46,777	46,359	45,940	45,523	45,104	44,686	44,267	43,847	43,428
-120	51,359	50,943	50,528	50,112	49,696	49,279	48,862	48,445	48,029	47,612
-110	55,500	55,086	54,673	54,259	53,846	53,432	53,018	52,603	52,189	51,774
-100	59,621	59,209	58,799	58,387	57,975	57,563	57,151	56,739	56,326	55,912
-90	63,724	63,316	62,906	62,496	62,086	61,676	61,265	60,854	60,443	60,032
-80	67,812	67,404	66,996	66,587	66,179	65,771	65,362	64,953	64,544	64,134
-70	71,883	71,476	71,070	70,663	70,256	69,850	69,443	69,034	68,628	68,220
-60	75,940	75,535	75,130	74,725	74,319	73,914	73,508	73,101	72,695	72,289
-50	79,983	79,580	79,175	78,771	78,368	77,963	77,559	77,155	76,750	76,346
-40	84,012	83,609	83,207	82,805	82,402	82,000	81,596	81,193	80,790	80,387
-30	88,028	87,627	87,226	86,825	86,423	86,022	85,620	85,218	84,816	84,414
-20	92,032	91,631	91,231	90,831	90,431	90,031	89,631	89,230	88,830	88,429

-10	96,022	95,624	95,225	94,827	94,428	94,028	93,629	93,230	92,830	92,431
-0	100,000	99,603	99,206	98,808	98,411	98,012	97,615	97,217	96,819	96,421
+0	100,000	100,397	100,794	101,191	101,587	101,984	102,380	102,776	103,172	103,568
+10	103,965	104,361	104,757	105,152	105,548	105,944	106,339	106,734	107,129	107,524
+20	107,919	108,313	108,708	109,103	109,498	109,892	110,286	110,680	111,073	111,467
+30	111,861	112,254	112,647	113,041	113,434	113,828	114,220	114,613	115,006	115,398
+40	115,791	116,183	116,575	116,967	117,359	117,751	118,142	118,534	118,925	119,317
+50	119,708	120,100	120,490	120,881	121,271	121,662	122,053	122,443	122,833	123,223
+60	123,613	124,003	124,393	124,783	125,172	125,562	125,951	126,340	126,729	127,118
+70	127,507	127,895	128,283	128,672	129,060	129,448	129,836	130,224	130,612	131,000
+80	131,388	131,775	132,162	132,549	132,936	133,323	133,710	134,097	134,484	134,870
+90	135,256	135,642	136,028	136,415	136,801	137,186	137,572	137,958	138,343	138,729
+100	139,113	139,498	139,883	140,268	140,653	141,038	141,423	141,807	142,191	142,576
110	142,959	143,343	143,727	144,110	144,494	144,877	145,260	145,643	146,026	146,409
120	146,792	147,175	147,558	147,940	148,322	148,704	149,087	149,469	149,851	150,233
130	150,613	150,995	151,377	151,758	152,138	152,519	152,900	153,281	153,662	154,043
140	154,423	154,803	155,183	155,563	155,943	156,323	156,704	157,083	157,463	157,843
150	158,221	158,600	158,979	159,358	159,736	160,115	160,494	160,873	161,251	161,629
160	162,007	162,385	162,763	163,141	163,518	163,896	164,274	164,650	165,027	165,404
170	165,781	166,158	166,535	166,911	167,288	167,664	168,040	168,417	168,793	169,169
180	169,544	169,919	170,295	170,669	171,045	171,420	171,795	172,170	172,545	172,920
190	173,294	173,668	174,043	174,417	174,791	175,166	175,540	175,913	176,287	176,660
200	177,033	177,408	177,779	178,152	178,525	178,898	179,271	179,644	180,016	180,389
210	180,760	181,132	181,504	181,876	182,248	182,619	182,991	183,362	183,734	184,105
220	184,475	184,846	185,217	185,588	185,958	186,328	186,698	187,068	187,439	187,809
230	188,179	188,549	188,919	189,288	189,658	190,027	190,397	190,767	191,135	191,504
240	191,873	192,241	192,610	192,978	193,347	193,715	194,083	194,451	194,819	195,186
250	195,552	195,920	196,287	196,654	197,021	197,389	197,755	198,122	198,488	198,854
260	199,221	199,587	199,953	200,320	200,686	201,051	201,417	201,783	202,148	202,514
270	202,878	203,243	203,608	203,973	204,338	204,703	205,067	205,432	205,796	206,158

Температура термометра, °С	Сопротивление термомпреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
280	206,523	206,887	207,251	207,615	207,978	208,342	208,705	209,069	209,432	209,795
290	210,158	210,521	210,883	211,245	211,607	211,970	212,332	212,694	213,056	213,418
300	213,779	214,141	214,503	214,864	215,225	215,586	215,947	216,308	216,668	217,029
310	217,390	217,751	218,111	218,470	218,830	219,190	219,550	219,910	220,270	220,629
320	220,988	221,348	221,708	222,066	222,425	222,784	223,142	223,501	223,859	224,218
330	224,576	224,934	225,292	225,650	226,007	226,365	226,723	227,080	227,437	227,794
340	228,151	228,508	228,865	229,222	229,578	229,935	230,291	230,647	231,002	231,358
350	231,715	232,071	232,427	232,782	233,137	233,493	233,848	234,203	234,558	234,913
360	235,267	235,622	235,977	236,331	236,685	237,039	237,393	237,747	238,100	238,454
370	238,807	239,161	239,514	239,867	240,220	240,573	240,926	241,279	241,631	241,984
380	242,336	242,688	243,040	243,392	243,744	244,096	244,447	244,799	245,150	245,501
390	245,853	246,204	246,555	246,905	247,256	247,607	247,957	248,307	248,657	249,008
400	249,358	249,707	250,057	250,407	250,756	251,106	251,455	251,804	252,153	252,502
410	252,852	253,200	253,549	253,897	254,246	254,594	254,942	255,290	255,638	255,985
420	256,333	256,680	257,028	257,375	257,722	258,069	258,416	258,763	259,110	259,456
430	259,803	260,149	260,495	260,841	261,187	261,533	261,879	262,224	262,570	262,915
440	263,260	263,605	263,950	264,295	264,640	264,986	265,330	265,675	266,019	266,363
450	266,707	267,051	267,395	267,739	268,082	268,426	268,769	269,112	269,456	269,799
460	270,142	270,484	270,827	271,169	271,512	271,854	272,196	272,538	272,880	273,222
470	273,564	273,906	274,247	274,588	274,930	275,271	275,611	275,952	276,292	276,633
480	276,975	277,315	277,655	277,995	278,335	278,675	279,014	279,354	279,694	280,033
490	280,372	280,712	281,051	281,390	281,729	282,068	282,406	282,745	283,083	283,421
500	283,760	284,098	284,435	284,772	285,110	285,448	285,785	286,123	286,460	286,797
510	287,134	287,471	287,808	288,144	288,481	288,816	289,152	289,489	289,825	290,161
520	290,496	290,832	291,168	291,503	291,839	292,173	292,508	292,843	293,178	293,513
530	293,847	294,182	294,516	294,849	295,184	295,518	295,852	296,185	296,518	296,852

540	297,185	297,519	297,852	298,185	298,518	298,850	299,182	299,515	299,848	300,179
550	300,511	300,844	301,176	301,508	301,838	302,170	302,502	302,833	303,163	303,495
560	303,826	304,157	304,488	304,818	305,148	305,479	305,809	306,139	306,468	306,798
570	307,128	307,457	307,787	308,117	308,446	308,774	309,104	309,433	309,762	310,090
580	310,418	310,746	311,074	311,403	311,731	312,058	312,386	312,713	313,040	313,368
590	313,694	314,022	314,348	314,675	315,001	315,328	315,655	315,982	316,308	316,634
600	316,960	317,286	317,611	317,937	318,262	318,588	318,913	319,238	319,563	319,888
610	320,212	320,537	320,861	321,186	321,510	321,834	322,158	322,482	322,806	323,130
620	323,453	323,777	324,100	324,423	324,746	325,069	325,392	325,715	326,037	326,360
630	326,682	327,004	327,325	327,647	327,968	328,289	328,611	328,932	329,253	329,573
640	329,894	330,216	330,536	330,857	331,178	331,498	331,819	332,139	332,458	332,779
650	333,098	333,418	333,737	334,056	334,375	334,694	335,013	335,332	335,650	335,970
660	336,288	336,606	336,924	337,242	337,560	337,878	338,196	338,513	338,830	339,148
670	339,465	339,782	340,099	340,416	340,732	341,051	341,365	341,682	341,998	342,314
680	342,631	342,948	343,263	343,580	343,896	344,211	344,527	344,842	345,158	345,473
690	345,788	346,103	346,417	346,732	347,046	347,360	347,674	347,988	348,302	348,616
700	348,931	349,244	349,558	349,869	350,184	350,497	350,810	351,123	351,435	351,748
710	352,061	352,374	352,686	352,998	353,310	353,622	353,934	354,245	354,557	354,868
720	355,180	355,491	355,803	356,114	356,426	356,737	357,048	357,359	357,670	357,980
730	358,291	358,601	358,911	359,221	359,531	359,840	360,149	360,459	360,768	361,077
740	361,387	361,696	362,004	362,313	362,621	362,930	363,238	363,546	363,854	364,162
750	364,470	364,778	365,085	365,393	365,700	366,007	366,314	366,621	366,928	367,235
760	367,542	367,849	368,156	368,462	368,769	369,075	369,382	369,688	369,994	370,300
770	370,606	370,912	371,218	371,523	371,828	372,133	372,438	372,743	373,047	373,351
780	373,655	373,960	374,265	374,569	374,873	375,177	375,480	375,784	376,087	376,390
790	376,693	376,997	377,300	377,602	377,905	378,207	378,510	378,812	379,114	379,417
800	379,719	380,020	380,322	380,623	380,925	381,226	381,527	381,828	382,129	382,430
810	382,732	383,032	383,334	383,634	383,935	384,235	384,536	384,836	385,137	385,436
820	385,737	386,036	386,335	386,635	386,934	387,233	387,533	387,832	388,130	388,429
830	388,727	389,025	389,323	389,621	389,919	390,217	390,514	390,812	391,110	391,407
840	391,705	392,003	392,300	392,597	392,894	393,190	393,483	393,787	394,079	394,375

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
850	394,672	394,968	395,264	395,561	395,856	396,151	396,447	396,742	397,037	397,332
860	397,627	397,922	398,217	398,512	398,806	399,100	399,394	399,688	399,982	400,276
870	400,571	400,864	401,158	401,452	401,746	402,039	402,333	402,626	402,919	403,212
880	403,505	403,797	404,091	404,383	404,675	404,966	405,258	405,550	405,841	406,133
890	406,425	406,716	407,007	407,299	407,589	407,880	408,171	408,461	408,751	409,042
900	409,333	409,623	409,912	410,203	410,493	410,782	411,072	411,362	411,652	411,941
910	412,231	412,519	412,808	413,097	413,385	413,673	413,961	414,249	414,537	414,825
920	415,114	415,402	415,690	415,977	416,265	416,552	416,840	417,127	417,414	417,701
930	417,989	418,275	418,561	418,847	419,133	419,419	419,705	419,991	420,277	420,563
940	420,849	421,135	421,420	421,706	421,991	422,276	422,561	422,845	423,130	423,415
950	423,699	423,984	424,269	424,553	424,838	425,122	425,406	425,690	425,974	426,258
960	426,542	426,824	427,107	427,390	427,672	427,955	428,238	428,520	428,802	429,084
970	429,366	429,648	429,930	430,212	430,494	430,775	431,056	431,338	431,619	431,901
980	432,181	432,461	432,742	433,023	433,303	433,583	433,863	434,143	434,422	434,702
990	434,982	435,263	435,542	435,822	436,101	436,381	436,660	436,939	437,218	437,497
1000	437,776	438,054	438,332	438,611	438,888	439,166	439,444	439,722	440,000	440,277
1010	440,554	440,831	441,108	441,385	441,662	441,939	442,215	442,492	442,768	443,045
1020	443,321	443,598	443,874	444,150	444,426	444,701	444,976	445,252	445,527	445,802
1030	446,077	446,353	446,627	446,903	447,177	447,452	447,726	448,000	448,274	448,549
1040	448,823	449,097	449,371	449,645	449,918	450,191	450,464	450,737	451,009	451,282
1050	451,555	451,827	452,100	452,373	452,645	452,917	453,189	453,461	453,732	454,004
1060	454,276	454,548	454,819	455,091	455,361	455,632	455,903	456,175	456,446	456,716
1070	456,987	457,258	457,529	457,799	458,069	458,340	458,610	458,879	459,149	459,418
1080	459,688	459,957	460,226	460,495	460,764	461,033	461,302	461,571	461,839	462,107
1090	462,376	462,644	462,912	463,180	463,448	463,716	463,983	464,251	464,518	464,785
1100	465,052									

\* Значения делить соответственно на 10 и 100.

Таблица П.19. Градуировочные характеристики платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур  $-260 \div +1100$  °С градуировок 500 П\*, 50 П и 5 П\*

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-260	0,203									
-250	0,511	0,460	0,414	0,373	0,336	0,305	0,278	0,254	0,233	0,215
-240	1,351	1,239	1,135	1,036	0,943	0,856	0,775	0,701	0,631	0,569
-230	2,744	2,584	2,428	2,276	2,129	1,986	1,848	1,716	1,588	1,467
-220	4,529	4,338	4,149	3,963	3,780	3,599	3,421	3,247	3,076	2,908
-210	6,538	6,330	6,124	5,919	5,716	5,514	5,313	5,114	4,917	4,722
-200	8,654	8,439	8,225	8,012	7,799	7,587	7,376	7,165	6,955	6,746
-190	10,828	10,611	10,392	10,174	9,954	9,736	9,518	9,301	9,085	8,868
-180	12,993	12,777	12,561	12,345	12,129	11,912	11,696	11,479	11,262	11,046
-170	15,139	14,925	14,711	14,496	14,281	14,066	13,851	13,636	13,421	13,205
-160	17,276	17,062	16,849	16,636	16,423	16,209	15,996	15,782	15,568	15,354
-150	19,399	19,187	18,974	18,762	18,550	18,338	18,126	17,913	17,701	17,488
-140	21,504	21,294	21,084	20,873	20,663	20,452	20,241	20,030	19,819	19,608
-130	23,597	23,388	23,179	22,970	22,761	22,552	22,343	22,133	21,923	21,714
-120	25,679	25,471	25,264	25,056	24,848	24,639	24,431	24,222	24,014	23,806
-110	27,750	27,543	27,336	27,129	26,923	26,716	26,509	26,301	26,094	25,887
-100	29,810	29,604	29,399	29,193	28,987	28,781	28,575	28,369	28,163	27,956
-90	31,862	31,658	31,453	31,248	31,043	30,838	30,632	30,427	30,221	30,016
-80	33,906	33,702	33,498	33,293	33,090	32,885	32,681	32,476	32,272	32,067
-70	35,941	35,738	35,535	35,331	35,128	34,925	34,721	34,517	34,314	34,110
-60	37,970	37,767	37,565	37,362	37,159	36,957	36,754	36,550	36,347	36,144
-50	39,991	39,790	39,587	39,385	39,184	38,980	38,779	38,577	38,375	38,173
-40	42,006	41,804	41,603	41,402	41,201	41,000	40,798	40,596	40,395	40,193
-30	44,014	43,813	43,613	43,412	43,211	43,011	42,810	42,609	42,408	42,207
-20	46,016	45,815	45,616	45,415	45,215	45,015	44,815	44,615	44,415	44,214

Температура термометра, °C	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-10	48,011	47,812	47,612	47,413	47,214	47,014	46,814	46,615	46,415	46,215
- 0	50,000	49,801	49,603	49,404	49,205	49,006	48,807	48,608	48,409	48,210
+ 0	50,000	50,198	50,397	50,595	50,793	50,992	51,190	51,387	51,586	51,784
10	51,982	52,180	52,378	52,576	52,774	52,972	53,169	53,367	53,564	53,762
20	53,959	54,156	54,354	54,551	54,749	54,946	55,143	55,340	55,536	55,733
30	55,930	56,127	56,323	56,520	56,717	56,914	57,110	57,306	57,503	57,699
40	57,895	58,091	58,287	58,483	58,679	58,875	59,071	59,267	59,462	59,658
50	59,854	60,050	60,245	60,440	60,635	60,831	61,026	61,221	61,416	61,611
60	61,806	62,001	62,196	62,391	62,586	62,781	62,975	63,170	63,364	63,559
70	63,753	63,947	64,141	64,336	64,530	64,724	64,918	65,112	65,306	65,500
80	65,694	65,887	66,081	66,275	66,468	66,661	66,855	67,048	67,242	67,435
90	67,628	67,821	68,014	68,207	68,400	68,593	68,786	68,979	69,171	69,364
100	69,556	69,749	69,941	70,134	70,326	70,514	70,711	70,903	71,095	71,288
110	71,479	71,671	71,863	72,055	72,238	72,438	72,630	72,821	73,013	73,204
120	73,396	73,587	73,779	73,970	74,161	74,352	74,543	74,734	74,925	75,116
130	75,306	75,497	75,688	75,879	76,069	76,259	76,450	76,640	76,831	77,021
140	77,211	77,401	77,591	77,781	77,971	78,161	78,352	78,541	78,731	78,921
150	79,110	79,300	79,489	79,679	79,868	80,057	80,247	80,436	80,625	80,814
160	81,003	81,192	81,381	81,570	81,759	81,948	82,137	82,325	82,513	82,702
170	82,890	83,079	83,267	83,455	83,644	83,832	84,020	84,208	84,396	84,584
180	84,772	84,959	85,147	85,334	85,522	85,710	85,897	86,085	86,272	86,460
190	86,647	86,834	87,021	87,208	87,395	87,583	87,770	87,956	88,143	88,330
200	88,516	88,704	88,889	89,076	89,262	89,449	89,635	89,822	90,008	90,194
210	90,380	90,566	90,752	90,938	91,124	91,309	91,495	91,681	91,867	92,052
220	92,237	92,423	92,609	92,794	92,979	93,164	93,349	93,534	93,719	93,904
230	94,089	94,274	94,459	94,644	94,829	95,013	95,198	95,383	95,567	95,752
240	95,936	96,120	96,305	96,489	96,673	96,857	97,041	97,225	97,409	97,593

250	97,776	97,960	98,143	98,327	98,510	98,694	98,877	99,061	99,244	99,427
260	99,610	99,793	99,976	100,160	100,343	100,525	100,708	100,891	101,074	101,257
270	101,439	101,621	101,804	101,986	102,169	102,351	102,433	102,716	102,898	102,079
280	103,261	103,443	103,625	103,807	103,989	104,171	104,352	104,534	104,716	104,897
290	105,079	105,260	105,441	105,622	105,803	105,985	106,166	106,347	106,528	106,709
300	106,889	107,070	107,251	107,432	107,612	107,793	107,973	108,154	108,334	108,514
310	108,695	108,875	109,055	109,235	109,415	109,595	109,775	109,955	110,135	110,314
320	110,494	110,674	110,854	111,033	111,212	111,392	111,571	111,750	111,929	112,109
330	112,288	112,467	112,646	112,825	113,003	113,182	113,361	113,540	113,718	113,897
340	114,075	114,254	114,432	114,611	114,789	114,967	115,145	115,323	115,501	115,679
350	115,858	116,035	116,213	116,391	116,568	116,746	116,924	117,101	117,279	117,456
360	117,633	117,811	117,988	118,165	118,342	118,519	118,696	118,873	119,050	119,227
370	119,403	119,580	119,757	119,933	120,110	120,286	120,463	120,639	120,815	120,992
380	121,168	121,344	121,520	121,696	121,872	122,048	122,223	122,399	122,575	122,750
390	122,926	123,102	123,277	123,452	123,628	123,803	123,978	124,153	124,328	124,504
400	124,679	124,853	125,028	125,203	125,378	125,553	125,727	125,902	126,076	126,251
410	126,426	126,600	126,774	126,948	127,123	127,297	127,471	127,645	127,819	127,992
420	128,166	128,340	128,514	128,687	128,861	129,034	129,208	129,381	129,555	129,728
430	129,901	130,074	130,247	130,420	130,593	130,766	130,939	131,112	131,285	131,457
440	131,630	131,802	131,975	132,147	132,320	132,493	132,665	132,837	133,009	133,181
450	133,353	133,525	133,697	133,869	134,041	134,213	134,384	134,556	134,728	134,899
460	135,071	135,242	135,413	135,584	135,756	135,927	136,098	136,269	136,440	136,611
470	136,782	136,953	137,123	137,294	137,465	137,635	137,805	137,976	138,146	138,316
480	138,487	138,657	138,827	138,997	139,167	139,337	139,507	139,677	139,847	140,016
490	140,186	140,356	140,525	140,695	140,864	141,034	141,203	141,372	141,541	141,710
500	141,880	142,049	142,217	142,386	142,555	142,724	142,892	143,061	143,230	143,398
510	143,567	143,735	143,905	144,072	144,240	144,408	144,576	144,744	144,912	145,080
520	145,248	145,416	145,584	145,751	145,919	146,086	146,254	146,421	146,589	146,756
530	146,923	147,091	147,258	147,424	147,592	147,759	147,926	148,092	148,259	148,426
540	148,592	148,759	148,926	149,092	149,258	149,425	149,591	149,757	149,924	150,089
550	150,255	150,422	150,588	150,754	150,919	151,085	151,251	151,416	151,581	151,747

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
560	151,913	152,078	152,244	152,409	152,574	152,739	152,904	153,069	153,234	153,399
570	153,564	153,728	153,893	154,058	154,223	154,387	154,552	154,716	154,881	155,045
580	155,209	155,373	155,537	155,701	155,865	156,029	156,193	156,356	156,520	156,684
590	156,847	157,011	157,174	157,337	157,500	157,664	157,827	157,991	158,154	158,317
600	158,480	158,643	158,805	158,968	159,131	159,294	159,456	159,619	159,781	159,944
610	160,106	160,268	160,430	160,593	160,755	160,917	161,079	161,241	161,403	161,565
620	161,726	161,888	162,050	162,211	162,373	162,534	162,696	162,857	163,018	163,180
630	163,341	163,502	163,662	163,823	163,984	164,144	164,305	164,466	164,626	164,786
640	164,947	165,108	165,268	165,428	165,589	165,749	165,909	166,069	166,229	166,389
650	166,549	166,709	166,868	167,028	167,187	167,347	167,506	167,666	167,825	167,985
660	168,144	168,303	168,462	168,621	168,780	168,939	169,098	169,256	169,415	169,574
670	169,732	169,891	170,049	170,208	170,366	170,525	170,682	170,841	170,999	171,157
680	171,315	171,474	171,631	171,790	171,948	172,105	172,263	172,421	172,579	172,736
690	172,894	173,051	173,208	173,366	173,523	173,680	173,837	173,994	174,151	174,308
700	174,465	174,622	174,779	174,934	175,092	175,248	175,405	175,561	175,717	175,874
710	176,030	176,187	176,343	176,499	176,655	176,811	176,967	177,122	177,278	177,434
720	177,590	177,745	177,901	178,057	178,213	178,368	178,524	178,679	178,835	178,990
730	179,145	179,300	179,455	179,610	179,765	179,920	180,074	180,229	180,384	180,538
740	180,693	180,848	181,002	181,156	181,310	181,465	181,619	181,773	181,927	182,081
750	182,235	182,389	182,542	182,696	182,850	183,003	183,157	183,310	183,464	183,617
760	183,771	183,924	184,078	184,231	184,384	184,537	184,691	184,844	184,997	185,150
770	185,303	185,455	185,609	185,761	185,914	186,066	186,219	186,371	186,523	186,675
780	186,827	186,980	187,132	187,284	187,436	187,588	187,740	187,892	188,043	188,195
790	188,346	188,498	188,650	188,801	188,952	189,103	189,255	189,406	189,557	189,708
800	189,859	190,010	190,161	190,311	190,462	190,613	190,763	190,914	191,064	191,215
810	191,366	191,516	191,667	191,817	191,967	192,117	192,268	192,418	192,568	192,718
820	192,868	193,018	193,167	193,317	193,467	193,616	193,766	193,916	194,065	194,214
830	194,363	194,512	194,661	194,810	194,959	195,108	195,257	195,406	195,555	195,703
840	195,852	196,001	196,150	196,298	196,447	196,595	196,743	196,891	197,039	197,187
850	197,336	197,484	197,632	197,780	197,928	198,075	198,223	198,371	198,518	198,666
860	198,813	198,961	199,108	199,256	199,403	199,550	199,697	199,844	199,991	200,138
870	200,285	200,432	200,579	200,726	200,873	201,019	201,166	201,313	201,459	201,606
880	201,752	201,898	202,045	202,191	202,337	202,483	202,629	202,775	202,920	203,066
890	203,212	203,358	203,503	203,649	203,794	203,940	204,085	204,230	204,375	204,521
900	204,666	204,811	204,956	205,101	205,246	205,391	205,536	205,681	205,826	205,970
910	206,115	206,259	206,404	206,548	206,692	206,836	206,980	207,124	207,268	207,412
920	207,557	207,701	207,845	207,988	208,132	208,276	208,420	208,563	208,707	208,850
930	208,994	209,137	209,280	209,423	209,566	209,709	209,852	209,995	210,138	210,281
940	210,424	210,567	210,710	210,853	210,995	211,138	211,280	211,422	211,565	211,707
950	211,849	211,992	212,134	212,276	212,419	212,561	212,703	212,845	212,987	213,129
960	213,271	213,412	213,553	213,695	213,836	213,977	214,119	214,260	214,401	214,542
970	214,683	214,824	214,965	215,106	215,247	215,387	215,528	215,669	215,809	215,950
980	216,090	216,230	216,371	216,511	216,651	216,791	216,931	217,071	217,211	217,351
990	217,491	217,631	217,771	217,911	218,050	218,190	218,330	218,469	218,609	218,748
1000	218,888	219,027	219,166	219,305	219,444	219,583	219,722	219,861	220,000	220,138
1010	220,277	220,415	220,554	220,693	220,831	220,969	221,107	221,246	221,384	221,522
1020	221,660	221,799	221,937	222,075	222,213	222,350	222,488	222,626	222,763	222,901
1030	223,038	223,176	223,313	223,451	223,588	223,726	223,863	224,000	224,137	224,274
1040	224,411	224,548	224,685	224,822	224,959	225,095	225,232	225,368	225,504	225,641
1050	225,777	225,913	226,050	226,186	226,322	226,458	226,594	226,730	226,866	227,002
1060	227,138	227,274	227,409	227,545	227,680	227,816	227,951	228,087	228,223	228,358
1070	228,493	228,629	228,764	228,899	229,034	229,170	229,305	229,439	229,574	229,709
1080	229,844	229,978	230,113	230,247	230,382	230,516	230,651	230,785	230,919	231,053
1090	231,188	231,322	231,456	231,590	231,724	231,858	231,991	232,125	232,259	232,392
1100	232,526									

Таблица П.20. Градуировочные характеристики медных термопреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона температур  $-200 \div +200$  °С градуировок 100 М и 10М\*

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	12,160									
-190	16,270	15,800	15,420	15,000	14,590	14,190	13,780	13,380	12,970	12,560
-180	20,610	20,170	19,730	19,290	18,850	18,420	17,980	17,550	17,120	16,700
-170	25,080	24,620	24,170	23,720	23,270	22,830	22,380	21,940	21,490	21,050
-160	29,620	29,170	28,710	28,260	27,800	27,350	26,890	26,440	25,990	25,530
-150	34,180	33,720	33,270	32,810	32,360	31,900	31,450	30,990	30,530	30,080
-140	38,730	38,280	37,820	37,370	36,920	36,460	36,000	35,550	35,090	34,640
-130	43,210	42,760	42,320	41,870	41,430	40,980	40,530	40,090	39,640	39,190
-120	47,690	47,250	46,800	46,350	45,900	45,450	45,000	44,550	44,100	43,650
-110	52,160	51,710	51,260	50,820	50,370	49,930	49,480	49,030	48,590	48,140
-100	56,610	56,170	55,720	55,280	54,830	54,390	53,940	53,500	53,050	52,600
-90	61,030	60,590	60,150	59,710	59,270	58,820	58,380	57,940	57,490	57,050
-80	65,420	64,980	64,540	64,100	63,660	63,220	62,790	62,350	61,910	61,470
-70	69,790	69,360	68,920	68,490	68,050	67,610	67,170	66,730	66,300	65,860
-60	74,150	73,710	73,280	72,850	72,410	71,970	71,540	71,100	70,670	70,230
-50	78,480	78,050	77,620	77,190	76,750	76,320	75,880	75,450	75,020	74,580
-40	82,810	82,380	81,950	81,510	81,080	80,650	80,220	79,780	79,350	78,920
-30	87,120	86,690	86,260	85,830	85,400	84,970	84,540	84,100	83,670	83,240
-20	91,420	90,990	90,560	90,130	89,700	89,270	88,840	88,410	87,980	87,550
-10	95,720	95,290	94,860	94,430	94,000	93,570	93,140	92,710	92,280	91,850
-0	100,000	99,572	99,144	98,716	98,288	97,860	97,432	97,004	96,576	96,148
+0	100,000	100,428	100,856	101,284	101,712	102,140	102,568	102,996	103,424	103,852
10	104,281	104,709	105,138	105,566	105,994	106,422	106,850	107,279	107,707	108,135
20	108,563	108,991	109,419	109,847	110,275	110,703	111,131	111,560	111,988	112,416
30	112,844	113,272	113,700	114,128	114,556	114,984	115,412	115,840	116,268	116,696
40	117,124	117,552	117,980	118,408	118,836	119,264	119,692	120,120	120,548	120,976
50	121,404	121,832	122,260	122,688	123,116	123,544	123,972	124,400	124,828	125,257
60	125,684	126,112	126,540	126,968	127,396	127,824	128,252	128,680	129,107	129,535
70	129,963	130,391	130,819	131,247	131,675	132,103	132,531	132,959	133,386	133,814
80	134,242	134,670	135,098	135,526	135,954	136,382	136,810	137,238	137,666	138,094
90	138,522	138,949	139,377	139,805	140,233	140,661	141,088	141,517	141,945	142,373
100	142,800	143,228	143,656	144,084	144,512	144,940	145,368	145,796	146,224	146,652
110	147,079	147,507	147,935	148,363	148,790	149,218	149,646	150,074	150,502	150,930
120	151,357	151,785	152,213	152,641	153,069	153,497	153,924	154,352	154,780	155,208
130	155,635	156,063	156,491	156,919	157,346	157,774	158,202	158,630	159,058	159,486
140	159,913	160,341	160,769	161,197	161,625	162,053	162,481	162,908	163,336	163,764
150	164,192	164,620	165,048	165,476	165,904	166,331	166,759	167,187	167,615	168,042
160	168,470	168,898	169,326	169,754	170,182	170,610	171,037	171,465	171,893	172,321
170	172,748	173,176	173,604	174,032	174,460	174,888	175,316	175,743	176,171	176,599
180	177,026	177,454	177,882	178,310	178,738	179,166	179,594	180,021	180,449	180,877
190	181,305	181,733	182,160	182,588	183,016	183,444	183,872	184,299	184,727	185,155
200	185,583									

\* Значения делить на 10.

Таблица П.21. Градуировочная характеристика медных термопреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона температур  $-50 \div +200$  °С градуировки 50 М

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	39,240									
-40	41,405	41,190	40,975	40,755	40,540	40,325	40,110	39,890	39,675	39,460
-30	43,560	43,345	43,130	42,915	42,700	42,485	42,270	42,050	41,835	41,620
-20	45,710	45,495	45,280	45,065	44,850	44,635	44,420	44,205	43,990	43,775
-10	47,860	47,645	47,430	47,215	47,000	46,785	46,570	46,355	46,140	45,925
-0	50,000	49,786	49,572	49,358	49,144	48,930	48,716	48,502	48,288	48,074

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, 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									

Таблица П.22. Градуировочная характеристика платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур  $-200 \div +650$  °С градуировки 21 ( $R_0=46$  Ом)

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	7,95									
-190	9,96	9,76	9,56	9,36	9,16	8,96	8,75	8,55	8,35	8,15
-180	11,95	11,75	11,55	11,36	11,16	10,96	10,76	10,56	10,36	10,16
-170	13,93	13,73	13,54	13,34	13,14	12,94	12,75	12,55	12,35	12,15
-160	15,90	15,70	15,50	15,31	15,11	14,92	14,72	14,52	14,33	14,13
-150	17,85	17,65	17,46	17,26	17,07	16,87	16,68	16,48	16,29	16,09
-140	19,79	19,59	19,40	19,21	19,01	18,82	18,63	18,43	18,24	18,04
-130	21,72	21,52	21,33	21,14	20,95	20,75	20,56	20,37	20,17	19,98
-120	23,63	23,44	23,25	23,06	22,87	22,68	22,48	22,29	22,10	21,91
-110	25,54	25,35	25,16	24,97	24,78	24,59	24,40	24,21	24,02	23,82
-100	27,44	27,25	27,06	26,87	26,68	26,49	26,30	26,11	25,92	25,73
-90	29,33	29,14	28,95	28,76	28,57	28,38	28,19	28,00	27,82	27,63
-80	31,21	31,02	30,83	30,64	30,45	30,27	30,08	29,89	29,70	29,51
-70	33,08	32,89	32,70	32,52	32,33	32,14	31,96	31,77	31,58	31,39
-60	34,94	34,76	34,57	34,38	34,20	34,01	33,83	33,64	33,45	33,27
-50	36,80	36,62	36,43	36,24	36,06	35,87	35,69	35,50	35,32	35,13
-40	38,65	38,47	38,28	38,10	37,91	37,73	37,54	37,36	37,17	36,99
-30	40,50	40,31	40,13	39,95	39,76	39,58	39,39	39,21	39,02	38,84
-20	42,34	42,15	41,97	41,79	41,60	41,42	41,24	41,05	40,87	40,68
-10	44,17	43,99	43,81	43,62	43,44	43,26	43,07	42,89	42,71	42,52
0	46,00	45,82	45,63	45,45	45,27	45,09	44,90	44,72	44,54	44,35
+0	46,00	46,18	46,37	46,55	46,75	46,91	47,09	47,28	47,46	47,64
10	47,82	48,01	48,19	48,37	48,55	48,73	48,91	49,09	49,28	49,46
20	49,64	49,82	50,00	50,18	50,37	50,55	50,73	50,91	51,09	51,27
30	51,45	51,63	51,81	51,99	52,18	52,36	52,54	52,72	52,90	53,08

Температура термометра, °С	Сопротивление термопреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	53,26	53,44	53,62	53,80	53,98	54,16	54,34	54,52	54,70	54,88
50	55,06	55,24	55,42	55,60	55,78	55,96	56,14	56,32	56,50	56,68
60	56,86	57,04	57,22	57,39	57,57	57,75	57,93	58,11	58,29	58,47
70	58,65	58,83	59,00	59,18	59,36	59,54	59,72	59,90	60,07	60,25
80	60,43	60,61	60,79	60,97	61,14	61,32	61,50	61,68	61,86	62,04
90	62,21	62,39	62,57	62,74	62,92	63,10	63,28	63,45	63,63	63,81
100	63,99	64,16	64,34	64,52	64,70	64,87	65,05	65,22	65,40	65,58
110	65,76	65,93	66,11	66,28	66,46	66,64	66,81	66,99	67,16	67,34
120	67,52	67,69	67,87	68,05	68,22	68,40	68,57	68,75	68,93	69,10
130	69,28	69,45	69,63	69,80	69,98	70,15	70,33	70,50	70,68	70,85
140	71,03	71,20	71,38	71,55	71,73	71,90	72,08	72,25	72,43	72,60
150	72,78	72,95	73,12	73,30	73,47	73,65	73,82	74,00	74,17	74,34
160	74,52	74,69	74,87	75,04	75,21	75,39	75,56	75,73	75,91	76,08
170	76,26	76,43	76,60	76,77	76,95	77,12	77,29	77,47	77,64	77,81
180	77,99	78,16	78,33	78,50	78,68	78,85	79,02	79,19	79,37	79,54
190	79,71	79,88	80,05	80,23	80,40	80,57	80,75	80,92	81,09	81,26
200	81,43	81,60	81,78	81,95	82,12	82,29	82,46	82,63	82,81	82,98
210	83,15	83,32	83,49	83,66	83,83	84,00	84,18	84,35	84,52	84,69
220	84,86	85,03	85,20	85,37	85,54	85,71	85,88	86,05	86,22	86,39
230	85,56	85,73	85,90	86,07	86,24	86,41	86,58	86,75	86,92	87,09
240	88,26	88,43	88,60	88,77	88,94	89,11	89,28	89,45	89,62	89,79
250	89,96	90,12	90,29	90,46	90,63	90,80	90,97	91,14	91,31	91,48
260	91,64	91,81	91,98	92,15	92,32	92,49	92,66	92,82	92,99	93,16
270	93,33	93,50	93,66	93,83	94,00	94,17	94,33	94,50	94,67	94,84
280	95,00	95,17	95,34	95,51	95,67	95,84	96,01	96,18	96,34	96,51
290	96,68	96,84	97,01	97,18	97,34	97,51	97,68	97,84	98,01	98,18
300	98,34	98,51	98,68	98,84	99,01	99,18	99,34	99,51	99,67	99,84
310	100,01	100,17	100,34	100,50	100,67	100,83	101,00	101,17	101,33	101,50
320	101,66	101,83	101,99	102,16	102,32	102,49	102,65	102,82	102,98	103,15
330	103,31	103,48	103,64	103,81	103,97	104,14	104,30	104,46	104,63	104,79
340	104,96	105,12	105,29	105,45	105,61	105,78	105,94	106,11	106,27	106,43
350	106,60	106,76	106,92	107,09	107,25	107,42	107,58	107,74	107,90	108,07
360	108,23	108,39	108,56	108,72	108,88	109,05	109,21	109,37	109,54	109,70
370	109,86	110,02	110,19	110,35	110,51	110,67	110,84	111,00	111,16	111,32
380	111,48	111,65	111,81	111,97	112,13	112,29	112,46	112,62	112,78	112,94
390	113,10	113,26	113,43	113,59	113,75	113,91	114,07	114,23	114,39	114,56
400	114,72	114,88	115,04	115,20	115,36	115,52	115,68	115,84	116,00	116,16
410	116,32	116,48	116,64	116,80	116,97	117,13	117,29	117,45	117,61	117,77
420	117,93	118,09	118,25	118,41	118,57	118,73	118,89	119,04	119,20	119,36
430	119,52	119,68	119,84	120,00	120,16	120,32	120,48	120,64	120,80	120,96
440	121,11	121,27	121,43	121,59	121,75	121,91	122,07	122,23	122,38	122,54
450	122,70	122,86	123,02	123,18	123,33	123,49	123,65	123,81	123,96	124,12
460	124,28	124,44	124,60	124,76	124,91	125,07	125,23	125,39	125,54	125,70
470	125,86	126,02	126,17	126,33	126,49	126,64	126,80	126,96	127,11	127,27
480	127,43	127,58	127,74	127,90	128,05	128,21	128,37	128,52	128,68	128,84
490	128,99	129,14	129,30	129,46	129,61	129,77	129,92	130,08	130,23	130,39
500	130,55	130,70	130,86	131,02	131,17	131,33	131,48	131,63	131,79	131,95
510	132,10	132,26	132,41	132,57	132,72	132,88	133,03	133,19	133,34	133,50
520	133,65	133,81	133,96	134,12	134,27	134,43	134,58	134,73	134,89	135,04
530	135,20	135,35	135,50	135,66	135,81	135,97	136,12	136,27	136,43	136,58
540	136,73	136,89	137,04	137,19	137,35	137,50	137,65	137,81	137,96	138,11
550	138,27	138,42	138,57	138,73	138,88	139,03	139,18	139,33	139,48	139,64
560	139,79	139,94	140,10	140,25	140,40	140,55	140,70	140,86	141,01	141,16
570	141,32	141,47	141,62	141,77	141,92	142,07	142,22	142,37	142,53	142,68
580	142,83	142,98	143,13	143,28	143,44	143,59	143,74	143,89	144,04	144,19
590	144,34	144,49	144,64	144,79	144,94	145,09	145,24	145,40	145,55	145,70
600	145,85	146,00	146,15	146,30	146,45	146,60	146,75	146,90	147,05	147,20
610	147,35	147,50	147,65	147,80	147,95	148,10	148,24	148,39	148,54	148,69

Температура термометра, °С	Сопротивление термпреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
620	148,84	148,99	149,14	149,29	149,44	149,59	149,74	149,89	150,03	150,18
630	150,33	150,48	150,63	150,78	150,93	151,07	151,22	151,37	151,52	151,67
640	151,81	151,96	152,11	152,26	152,41	152,55	152,70	152,85	153,00	153,15
650	153,30									

Таблица П.23. Градуировочная характеристика медных термпреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона температур  $-50 \div +180$  °С градуировки 23 ( $R_0 = 53$  Ом,  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$  1/°С)

Температура термометра, °С	Сопротивление термпреобразователя, Ом									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	41,71									
-40	43,97	43,74	43,52	43,29	43,07	42,84	42,61	42,39	42,16	41,94
-30	46,23	46,00	45,78	45,55	45,32	45,10	44,87	44,65	44,42	44,20
-20	48,48	48,26	48,03	47,81	47,58	47,36	47,13	46,90	46,68	46,45
-10	50,74	50,52	50,29	50,07	49,84	49,61	49,39	49,16	48,94	48,71

18\*

-0	53,00	52,77	52,55	52,32	52,10	51,87	51,65	51,42	51,19	50,97
+0	53,00	53,23	53,45	53,68	53,90	54,13	54,36	54,58	54,81	55,03
+10	55,26	55,48	55,71	55,94	56,16	56,39	56,61	56,84	57,06	57,29
+20	57,52	57,74	57,97	58,19	58,42	58,65	58,87	59,10	59,32	59,55
+30	59,77	60,00	60,23	60,45	60,68	60,90	61,13	61,35	61,58	61,81
+40	62,03	62,26	62,48	62,71	62,93	63,16	63,39	63,61	63,84	64,06
+50	64,29	64,52	64,74	64,97	65,19	65,42	65,64	65,87	66,10	66,32
+60	66,55	66,77	67,00	67,22	67,45	67,68	67,90	68,13	68,35	68,58
70	68,81	69,03	69,26	69,48	69,71	69,93	70,16	70,39	70,61	70,84
80	71,06	71,29	71,51	71,74	71,97	72,19	72,42	72,64	72,87	73,09
90	73,32	73,55	73,77	74,00	74,22	74,45	74,68	74,90	75,13	75,35
100	75,58	75,80	76,03	76,26	76,48	76,71	76,93	77,15	77,38	77,61
110	77,84	78,06	78,29	78,51	78,74	78,97	79,19	79,42	79,64	79,87
120	80,09	80,32	80,55	80,77	81,00	81,22	81,45	81,67	81,90	82,13
130	82,35	82,58	82,80	83,03	83,26	83,48	83,71	83,93	84,16	84,38
140	84,61	84,84	85,06	85,29	85,51	85,74	85,96	86,19	86,42	86,64
150	86,87	87,09	87,32	87,54	87,77	88,00	88,22	88,45	88,67	88,90
160	89,13	89,35	89,58	89,80	90,03	90,25	90,48	90,71	90,93	91,16
170	91,38	91,61	91,83	92,06	92,29	92,51	92,74	92,96	93,18	93,42
180	93,64									

Примечание. Термометры градуировки 23 в новых разработках применять запрещается.

284 Таблица П.24. Теплофизические и электрические свойства некоторых материалов, применяемых в термометрах сопротивления и термоэлектрических термометрах

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температурный коэффициент расширения, К <sup>-1</sup>	Теплопроводность Вт/(м·К)	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м·10 <sup>3</sup>	Температурный коэффициент сопротивления, К <sup>-1</sup> ·10 <sup>3</sup>	Термо-ЭДС в паре с платиной при t=100 °С, мВ
Алюмель	8900	—	29—41	0,52	245—340	1,57	—1,16
Алюминий (чистый)	2779—0,251·T	24·10 <sup>-6</sup>	230	0,757+ +0,473× ×10 <sup>-3</sup> ·T	26—29	4,20	+0,40
Вольфрам (чистый)	19 380—0,28·T	4·10 <sup>-6</sup>	100—160	0,129+ +0,0198× ×10 <sup>-3</sup> ·T	53—55	4,64	+0,8
Железо (чистое)	7870	12·10 <sup>-6</sup>	50—87	0,309+ +0,47× ×10 <sup>-3</sup> ·T	113	6,60	+1,8
Константан (Cu—60 %, Ni—40 %)	8900	14,4·10 <sup>-6</sup>	23	0,409	465	0,02— 0,002	—3,4
Копель (Cu—56 %, Ni—44 %)	8990	—	24,2 (0 °С)	0,314	470	—0,4÷ ÷+0,08	—3,97
Латунь (Cu—67 %, Zn—33 %)	8600	18·10 <sup>-6</sup>	100—150	0,388	60÷70	0,5	—
Манганин	8430	16·10 <sup>-6</sup>	22—27	0,407	430	0,02	+0,76
Медь	9075—0,44·T	17·10 <sup>-6</sup>	360—390	0,355+ +0,107× ×10 <sup>-3</sup> ·T	17	4,28	+0,76
Никель	8910—0,049·T	16·10 <sup>-6</sup>	52—67	0,304+ +0,456× ×10 <sup>-3</sup> ·T	70	6,21	—1,5
Нихром (Ni—90 %, Cr—10 %)	8300	—	17,1+ +0,019 t	0,44	1100	0,13	+2,2
Платина	21 450	—	68—100	0,126	106	3,92	0,0
Серебро	10 500	—	426—314	0,223+ +0,049× ×10 <sup>-3</sup> ·T	14,7	4,1	—0,72
Хромель (Ni—89 %, Cr—9,8 %, Fe—1 %, Mn—0,2 %)	7600	15·10 <sup>-6</sup>	16+0,019 t	0,418	670	0,2	+2,91
Асбест листовой	1000—1300	—	0,157+ +0,00018 t	0,816	100	—	—
Кварцевое стекло	2210	0,7·10 <sup>-6</sup>	0,71 (—180 °С) 1,35+0,001 t	0,750 (100 °С)	10 <sup>6</sup> —10 <sup>12</sup>	—	—
Резина (твердая)	1200	—	0,160	1,4	10 <sup>9</sup> —10 <sup>11</sup>	—	—
Сталь 12Х18Н9Т	8000	16,6·10 <sup>-6</sup>	16 (100 °С) 27,6 (800 °С)	0,492	730	—	—
Стекло (пирекс)	2250	10·10 <sup>-6</sup>	1,0—1,55	0,833	10 <sup>7</sup> —10 <sup>12</sup>	—	—
Фарфор	2300—2400	3,8·10 <sup>-6</sup>	1,01+0,96× ×10 <sup>-3</sup> t	0,75—0,92	10 <sup>8</sup> —10 <sup>10</sup>	—	—
Фторопласт	2100—2300	—	24,7	1,05	10 <sup>12</sup> —10 <sup>15</sup>	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (глинозем)	3800	8,5·10 <sup>-6</sup>	28 (100 °С) 79 (1000 °С)	3,48 (100 °С) 1,30 (1000 °С)	10 <sup>6</sup> —10 <sup>18</sup>	—	—
MgO	3580	14·10 <sup>-6</sup>	36 (100 °С) 6,7 (1000 °С)	1,05 (100 °С) 1,27 (1000 °С)	10 <sup>4</sup> —10 <sup>14</sup>	—	—

Таблица П.25. Коэффициенты теплового расширения термометрических жидкостей в стекле,  $10^{-4} \text{ К}^{-1}$ 

Термометрическая жидкость и вид стекла	Средняя температура резервуара термометра и жидкости. °С											
	-180	-120	-80	-40	0	20	100	200	300	400	500	
Боросиликатное стекло:												
пентан	9,0	10,0	10,0	12,0	14,0	15,0	—	—	—	—	—	—
ртуть	—	—	—	—	1,64	1,64	1,64	1,67	1,74	1,82	1,95	—
Другие виды стекла:												
ртуть	—	—	—	—	1,58	1,58	1,58	1,59	1,64	—	—	—
ртутно-калиевый сплав	—	—	—	—	1,58	1,58	1,58	1,59	1,64	—	—	—
толуол	—	—	9,0	10,0	10,0	11,0	—	—	—	—	—	—
этанол	—	—	10,4	10,4	10,4	10,4	—	—	—	—	—	—
петролейный эфир	—	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	—	—	—	—	—	—
керосин	—	—	—	—	9,3	9,3	9,3	9,3	9,3	—	—	—

Таблица П.26. Монохроматические коэффициенты теплового излучения различных материалов при  $\lambda=0,65 \text{ мкм}$ 

Материал	Температура, °С	$\epsilon_{\lambda}$	Материал	Температура, °С	$\epsilon_{\lambda}$
Железо	1000	0,39	Платина жидкая	1800	0,38
Железо жидкое	1500	0,36	Чугун твердый	20	0,37
Марганец	20	0,59	Чугун жидкий	1400	0,40
Медь твердая	20	0,59	Хромель	20	0,35
Медь жидкая	20	0,11	Аюмель	20	0,37
Молибден твердый	1100	0,15	Алюминий оксид	20	0,22
Молибден твердый	1000	0,40	Алюминий оксид	1500	0,40
Молибден жидкий	2000	0,36	Железа оксид	20	0,70
Никель твердый	2500	0,33	Меди оксид	20	0,70
Никель жидкий	20	0,36	Никели оксид	20	0,90
Серебро твердое и жидкое	1500	0,37	Сталь хромоникелевая окисленная	20	0,85
Уголь (графит)	—	0,07	Сталь углеродистая окисленная	20	0,80
Уголь (графит)	1000	0,90	Чугун окисленный	20	0,70
Уголь (графит)	2000	0,85	Аюмель окисленный	20	0,87
Хром твердый	3000	0,81	Хромель окисленный	20	0,78
Хром жидкий	20	0,34	Фарфор	—	0,25—
Сталь углеродистая твердая	1900	0,39	Шамот	—	0,50
Сталь углеродистая жидкая	20	0,44	Шлак жидкий	—	0,70—
Платина твердая	1600	0,37		1650	0,80
	1500	0,30			0,65

Таблица П.27. Коэффициент полного теплового излучения (интегральный коэффициент теплового излучения) различных материалов

Материал	$t$ , °С	$\epsilon_T$
Алюминий: полированный	200—600	0,04—0,06
силыноксидный	100—600	0,20—0,33
Вольфрам	230—2230	0,54—0,31
нитъ	2800	0,39
Железо: полированное	425—1020	0,144—0,377
покрытое толстым слоем ржавчины	40	0,85
литое необработанное	925—1125	0,87—0,95
Сталь: листовая шлифованная	930	0,55
прокатанная окисленная	40	0,66
листовая шероховатая	40	0,80
расплавленная	1600—1800	0,28

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_T$
Чугун: полированный покрытый пленкой окисленный шероховатый расплавленый	200	0,21
	40	0,70—0,80
	40—250	0,95
Золото чистое полированное	1300—1400	0,29
	90—600	0,02—0,035
Далуль:	275	0,03
	20	0,06
полированная прокатанная туסקлая пластина	40—260	0,22
	200—600	0,61—0,59
Медь:	90	0,02
	40	0,05
полированная, слегка окисленная окисленная при нагреве до 600 °С черная окисленная расплавленная	200—600	0,57—0,55
	40	0,76
Никель:	1075—1275	0,16—0,13
	40—260	0,05—0,07
полированный окисленный проволока	40—260	0,35—0,49
	260—1100	0,10—0,19
Платина: электролитическая лента проволока	260—500	0,06—0,10
	540—1100	0,12—0,14
Серебро: полированное окисленное	200—1375	0,07—0,18
	40—540	0,01—0,03
Асбест картон Огнеупоры:	40—540	0,02—0,04
	40	0,96
слабо излучающие сильно излучающие	1000	0,75
	1000	0,85—0,90
Кирпич: динас шамот магнезит	1000	0,85
	1000	0,59
Фарфор глазурованный Глина огнеупорная Кварц Слюда	1000	0,38
	40	0,93
Стекло пирекс Вода, слой 0,1 мм и более Уголь:	90	0,91
	40—540	0,89—0,58
Нить сажа	40	0,75
	260—540	0,94—0,75
Обмазка из жидкого стекла с сажой	40	0,96
	1050—1450	0,53
	40	0,95
	100—225	0,96—0,95

Таблица П.28. Температура кипения воды при атмосферном давлении ( $t=0^\circ\text{C}$  и  $g=9,80665\text{ м/с}^2$ )

Атмосферное давление		Температура, °С	Атмосферное давление		Температура, °С	Атмосферное давление		Температура, °С
кПа	мм рт. ст.		кПа	мм рт. ст.		кПа	мм рт. ст.	
97,325	730	98,88	99,592	747	99,52	101,858	764	100,15
97,458	731	98,92	99,725	748	99,56	101,991	765	100,18
97,592	732	98,95	99,858	749	99,59	102,125	766	100,22
97,725	733	98,99	99,992	750	99,63	102,258	767	100,26
97,858	734	99,03	100,125	751	99,67	102,391	768	100,29
97,992	735	99,07	100,258	752	99,70	102,525	769	100,33
98,125	736	99,11	100,391	753	99,74	102,658	770	100,37
98,258	737	99,14	100,525	754	99,78	102,791	771	100,40
98,392	738	99,18	100,658	755	99,82	102,925	772	100,44
98,525	739	99,22	100,791	756	99,85	103,058	773	100,48
98,658	740	99,26	100,925	757	99,89	103,191	774	100,51
98,792	741	99,29	101,058	758	99,93	103,325	775	100,54
98,925	742	99,33	101,191	759	99,96	103,458	776	100,58
99,058	743	99,37	101,325	760	100,00	103,591	777	100,62
99,192	744	99,41	101,458	761	100,04	103,725	778	100,66
99,325	745	99,44	101,591	762	100,07	103,858	779	100,69
99,458	746	99,48	101,725	763	100,11	103,991	780	100,73

Таблица П.29. Поправки для приведения показаний барометра к нормальному ускорению свободного падения в зависимости от географической широты места наблюдения

Географическая широта	Поправки к показаниям барометра, приведенные к 0 °С					
	86,660 кПа	650 мм рт. ст.	93,325 кПа	700 мм рт. ст.	95,992 кПа	720 мм рт. ст.
20°	-0,179	-1,34	-0,193	-1,45	-0,199	-1,49
25	-0,151	-1,13	-0,163	-1,22	-0,167	-1,25
30	-0,119	-0,89	-0,128	-0,96	-0,132	-0,99
35	-0,081	-0,61	-0,089	-0,67	-0,092	-0,69
40	-0,044	-0,33	-0,048	-0,36	-0,049	-0,37
45	-0,004	-0,03	-0,005	-0,04	-0,005	-0,04
50	+0,035	+0,26	+0,039	+0,29	+0,039	+0,29
55	+0,073	+0,55	+0,080	+0,60	+0,083	+0,62
60	+0,109	+0,82	+0,119	+0,89	+0,123	+0,92
65	+0,143	+1,07	+0,153	+1,15	+0,159	+1,19
70	+0,171	+1,28	+0,184	+1,38	+0,189	+1,42

Продолжение табл. П.29

Географическая широта	Поправки к показаниям барометра, приведенные к 0 °С					
	98,658 кПа	740 мм рт. ст.	101,325 кПа	760 мм рт. ст.	103,991 кПа	780 мм рт. ст.
20°	-0,204	-1,53	-0,209	-1,57	-0,215	-1,61
25	-0,172	-1,29	-0,172	-1,29	-0,181	-1,36
30	-0,135	-1,01	-0,139	-1,04	-0,143	-1,07
35	-0,095	-0,71	-0,096	-0,72	-0,099	-0,74
40	-0,051	-0,38	-0,052	-0,39	-0,053	-0,40
45	-0,005	-0,04	-0,005	-0,04	-0,005	-0,04
50	+0,040	+0,30	+0,041	+0,31	+0,043	+0,32
55	+0,084	+0,63	+0,087	+0,65	+0,088	+0,66
60	+0,125	+0,94	+0,129	+0,97	+0,133	+1,00
65	+0,163	+1,22	+0,167	+1,25	+0,172	+1,29
70	+0,195	+1,46	+0,200	+1,50	+0,205	+1,54

Таблица П.30. Поправки для приведения показаний барометра к нормальному ускорению свободного падения в зависимости от высоты барометра над уровнем моря (поправки имеют отрицательный знак)

Высота над уровнем моря, м	Поправки к показаниям барометра, приведенные к 0 °С									
	999,99 кПа	999,99 мм рт. ст.	998,72 кПа	998,72 мм рт. ст.	997,45 кПа	997,45 мм рт. ст.	996,18 кПа	996,18 мм рт. ст.	994,91 кПа	994,91 мм рт. ст.
100										
200										
300										
400										
500										
600										
700								0,013	0,019	0,020
800								0,020	0,021	0,023
900								0,023	0,024	0,025
1000								0,025	0,027	0,028
1200								0,028	0,032	0,033
1400								0,033	0,037	0,039
1600								0,039	0,043	0,044
1800								0,044	0,048	0,048
2000								0,048	0,052	0,052
2500	0,052	0,39	0,045	0,34	0,044	0,33	0,045	0,34	0,047	0,35
3000	0,063	0,47	0,057	0,43	0,049	0,37	0,051	0,38	0,052	0,39

Высота над уровнем моря, м	Поправки к показаниям барометра, приведенные к 0 °С											
	90,659 кПа	680 мм рт. ст.	93,326 кПа	700 мм рт. ст.	95,992 кПа	720 мм рт. ст.	98,659 кПа	740 мм рт. ст.	101,325 кПа	760 мм рт. ст.	103,991 кПа	780 мм рт. ст.
100			0,003	0,02	0,003	0,02	0,003	0,02	0,003	0,02	0,003	0,02
200			0,007	0,05	0,007	0,05	0,007	0,05	0,007	0,05	0,007	0,05
300	0,008	0,06	0,009	0,07	0,009	0,07	0,009	0,07	0,009	0,07	0,009	0,07
400	0,012	0,09	0,012	0,09	0,012	0,09	0,012	0,09	0,012	0,09	0,012	0,09
500	0,015	0,11	0,016	0,12	0,016	0,12	0,016	0,12				
600	0,017	0,13	0,019	0,14	0,019	0,14	0,019	0,14				
700	0,020	0,15	0,020	0,15	0,021	0,16						
800	0,023	0,17	0,023	0,17	0,024	0,18						
900	0,025	0,19	0,027	0,20								
1000	0,028	0,21	0,029	0,22								
1200	0,035	0,26										
1400	0,040	0,30										
1600												
1800												
2000												
2500												
3000												

Таблица П.31. Поправки для приведения показаний барометра к его показаниям при температуре 0 °С (поправки имеют отрицательный знак)

Температу- ра, °С	Поправки к показаниям барометра																	
	93,326 кПа	700 мм рт. ст.	94,659 кПа	710 мм рт. ст.	95,992 кПа	720 мм рт. ст.	97,325 кПа	730 мм рт. ст.	98,659 кПа	740 мм рт. ст.	99,992 кПа	750 мм рт. ст.	101,325 кПа	760 мм рт. ст.	102,658 кПа	770 мм рт. ст.	103,991 кПа	780 мм рт. ст.
10	0,152	1,14	0,155	1,16	0,157	1,18	0,159	1,19	0,161	1,21	0,163	1,22	0,165	1,24	0,168	1,26	0,169	1,27
11	0,168	1,26	1,171	1,28	0,172	1,29	0,175	1,31	0,177	1,33	0,181	1,35	0,181	1,36	0,184	1,38	0,187	1,40
12	0,183	1,37	0,185	1,39	0,188	1,41	0,191	1,43	0,193	1,43	0,196	1,47	0,199	1,49	0,201	1,51	0,204	1,53
13	0,197	1,48	0,201	1,51	0,204	1,53	0,207	1,55	0,209	1,57	0,212	1,59	0,215	1,61	0,217	1,63	0,220	1,65
14	0,213	1,60	0,216	1,62	0,219	1,64	0,223	1,67	0,225	1,69	0,228	1,71	0,231	1,73	0,235	1,76	0,237	1,78
15	0,228	1,71	0,232	1,74	0,235	1,76	0,237	1,78	0,241	1,81	0,244	1,83	0,248	1,86	0,251	1,88	0,255	1,91
16	0,244	1,83	0,247	1,85	0,251	1,88	0,253	1,90	0,257	1,93	0,261	1,96	0,264	1,98	0,268	2,01	0,271	2,03
17	0,259	1,94	0,263	1,97	0,267	2,00	0,269	2,02	0,273	2,05	0,277	2,08	0,281	2,11	0,284	2,13	0,288	2,16
18	0,273	2,05	0,277	2,08	0,287	2,11	0,285	2,14	0,289	2,17	0,293	2,20	0,297	2,23	0,301	2,26	0,305	2,29
19	0,283	2,17	0,293	2,20	0,297	2,23	0,301	2,26	0,305	2,29	0,309	2,32	0,313	2,35	0,317	2,38	0,321	2,41
20	0,304	2,28	0,308	2,31	0,313	2,35	0,317	2,38	0,321	2,43	0,325	2,44	0,331	2,48	0,335	2,51	0,334	2,54
21	0,319	2,39	0,324	2,43	0,328	2,46	0,333	2,50	0,337	2,53	0,341	2,56	0,347	2,60	0,351	2,63	0,356	2,67
22	0,335	2,51	0,339	2,54	0,344	2,58	0,349	2,62	0,353	2,65	0,359	2,69	0,363	2,72	0,368	2,76	0,372	2,79
23	0,350	2,62	0,355	2,66	0,360	2,70	0,364	2,73	0,369	2,77	0,375	2,81	0,379	2,84	0,384	2,88	0,389	2,92
24	0,364	2,73	0,369	2,77	0,375	2,81	0,380	2,85	0,385	2,89	0,391	2,93	0,396	2,97	0,401	3,01	0,407	3,05
25	0,380	2,85	0,385	2,89	0,391	2,93	0,396	2,97	0,401	3,01	0,407	3,05	0,412	3,09	0,417	3,13	0,423	3,17
26	0,395	2,96	0,400	3,00	0,407	3,05	0,412	3,09	0,417	3,13	0,423	3,17	0,428	3,21	0,435	3,26	0,440	3,30
27	0,409	3,07	0,416	3,12	0,421	3,16	0,428	3,21	0,433	3,25	0,439	3,29	0,445	3,34	0,451	3,38	0,456	3,42
28	0,425	3,19	0,431	3,23	0,437	3,28	0,443	3,32	0,449	3,37	0,455	3,41	0,461	3,46	0,467	3,50	0,473	3,55
29	0,440	3,30	0,447	3,35	0,452	3,39	0,459	3,44	0,465	3,49	0,472	3,54	0,477	3,58	0,484	3,63	0,491	3,68
30	0,455	3,41	0,461	3,46	0,468	3,51	0,475	3,56	0,491	3,61	0,488	3,66	0,493	3,70	0,500	3,75	0,507	3,80

Таблица П.32. Плотность смеси этилового спирта с водой в зависимости от температуры

Объемная концентрация спирта, %	Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при температуре, °С								
	15	16	17	18	19	20	21	22	23
80	863,5	862,7	861,8	861,0	860,1	859,3	858,5	857,6	856,8
81	860,7	859,9	859,0	858,2	857,3	856,5	855,7	854,8	854,0
82	857,9	857,0	856,2	855,3	854,5	853,6	852,7	851,9	851,0
83	855,0	854,1	853,3	852,4	851,6	850,7	849,8	849,0	848,1
84	852,1	851,2	850,4	849,5	848,7	847,8	846,9	846,1	845,2
85	849,2	848,3	847,4	846,6	845,7	844,8	843,9	843,0	842,2
86	846,2	845,3	844,4	843,6	842,7	841,8	840,9	840,0	839,2
87	843,1	842,2	841,4	840,5	839,7	838,8	837,9	837,1	836,2
88	840,0	839,1	838,2	837,4	836,5	835,6	834,7	833,8	833,0
89	836,8	835,9	835,0	834,2	833,3	832,4	831,5	830,6	829,8
90	833,6	832,7	831,8	831,0	830,1	829,2	828,3	827,4	826,6
91	830,2	829,3	828,4	827,6	826,7	825,8	824,9	824,0	823,2
92	826,8	825,9	825,0	824,2	823,3	822,4	821,5	820,6	819,8
93	823,2	822,3	821,4	820,6	819,7	818,8	817,9	817,0	816,2
94	819,6	818,7	817,8	817,0	816,1	815,2	814,3	813,4	812,6
95	815,8	814,9	814,0	813,2	812,3	811,4	810,5	809,6	808,8
96	811,8	810,9	810,0	809,2	808,3	807,4	806,5	805,6	804,8
97	807,7	806,8	805,9	805,1	804,2	803,3	802,4	801,5	800,7
98	803,3	802,4	801,5	800,7	799,8	798,9	798,0	797,1	796,3
99	798,6	797,7	796,8	796,0	795,1	794,2	793,3	792,4	791,6
100	793,6	792,7	791,8	791,0	790,1	789,2	788,3	787,7	786,6

Таблица П.33. Плотность воды в зависимости от температуры и давления

Темпера- тура, °С	Плотность воды, кг/м <sup>3</sup> , при давлении <i>p</i> , МПа										
	0,1	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0
0	999,8	1002,8	1003,8	1004,7	1005,7	1006,7	1007,6	1008,7	1009,7	1010,6	1011,6
10	999,7	1002,6	1003,5	1004,4	1005,3	1006,2	1007,2	1008,2	1009,1	1010,0	1010,9
20	998,3	1001,0	1001,9	1002,8	1003,6	1004,5	1005,4	1006,3	1007,2	1008,1	1008,9
30	995,7	998,4	999,2	1000,1	1000,9	1001,8	1002,7	1003,5	1004,4	1005,2	1006,0
40	992,2	994,9	995,7	996,6	997,4	998,3	999,2	1000,0	1000,8	1001,7	1002,5
50	988,0	990,7	991,5	992,4	993,2	994,0	994,9	995,7	996,6	997,4	998,2
60	983,2	985,8	986,7	987,6	988,3	989,2	990,1	990,9	991,8	992,6	993,4
70	977,7	980,3	981,2	982,1	982,9	983,8	984,6	985,5	986,4	987,3	988,0
80	971,6	974,4	975,2	976,2	977,0	977,9	978,8	979,6	980,5	981,4	982,2
90	965,2	967,9	968,8	969,7	970,6	971,5	972,4	973,3	974,2	975,0	975,9
100		961,0	961,9	962,8	963,8	964,7	965,6	966,6	967,4	968,3	969,2
110		953,6	954,5	955,6	956,5	957,5	958,4	959,3	960,2	961,2	962,1
120		945,8	946,8	947,8	948,8	949,8	950,8	951,7	952,7	953,6	954,6
130		937,6	938,6	939,7	940,7	941,7	942,8	943,8	944,7	945,7	946,7
140		929,0	930,1	931,2	932,2	933,3	934,3	935,4	936,4	937,5	938,4
150		920,0	921,1	922,2	923,4	924,5	925,6	926,6	927,7	928,8	929,9
160		910,5	911,89	912,6	914,1	915,2	916,4	917,5	918,6	919,8	920,9
170		900,7	901,9	903,2	904,3	905,6	906,8	907,9	909,2	910,3	911,5
180		890,3	891,6	892,9	894,2	895,5	896,8	898,0	899,3	900,5	901,7
190		879,4	880,8	882,2	883,6	885,0	886,4	887,6	889,0	890,2	891,5

Температура, °С	Плотность воды, кг/м³, при давлении $p$ , МПа										
	0,1	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0
200		868,1	869,6	871,1	872,5	874,0	875,4	876,8	878,2	879,6	880,9
210		856,2	857,8	859,4	861,0	862,5	864,0	865,5	867,0	868,4	869,9
220		843,7	845,4	847,1	848,8	850,4	852,1	853,7	855,2	856,8	858,3
230		830,4	832,3	834,2	836,0	837,8	839,5	841,2	843,0	844,6	846,2
240		816,4	818,5	820,5	822,5	824,5	826,4	828,2	830,1	831,9	833,6
250		801,5	803,9	806,1	808,2	810,4	812,5	814,5	816,5	818,5	820,4
260		785,6	788,2	790,6	793,1	795,4	797,8	800,0	802,2	804,4	806,4
270		768,5	771,4	774,2	776,9	779,5	782,1	784,6	787,0	789,5	791,8
280			753,2	756,4	759,5	762,5	765,4	768,2	770,9	773,6	776,2
290			733,2	736,9	740,5	744,0	747,3	750,5	753,6	756,7	759,5
300				715,4	719,7	723,8	727,7	731,4	735,0	738,4	741,7
310				691,0	696,3	701,3	706,0	710,4	714,6	718,6	722,4
320					669,3	675,6	681,5	686,9	692,0	696,8	701,4
330						645,3	653,1	660,1	666,5	672,4	678,0
340							618,2	628,1	636,8	644,5	651,6
350								586,8	600,2	611,2	620,7
355								558,7	577,7	591,4	—
360									548,5	568,2	572,8
365									502,3	538,8	—
370										493,8	529,4

Таблица П.34. Плотность водяного пара в зависимости от температуры и давления

Давление, МПа	Плотность водяного пара при температуре, °С, кг/м³									
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
0,10	0,5896	0,5731	0,5577	0,5432	0,5294	0,5163	0,5040	0,4924	0,4812	0,4706
0,11		0,6313	0,6142	0,5981	0,5828	0,5685	0,5549	0,5420	0,5297	0,5179
0,12		0,6896	0,6707	0,6532	0,6365	0,6207	0,6057	0,5917	0,5780	0,5653
0,13		0,7479	0,7278	0,7082	0,6901	0,6729	0,6566	0,6414	0,6266	0,6127
0,14		0,8071	0,7843	0,7639	0,7440	0,7257	0,7077	0,6911	0,6752	0,6601
0,15			0,8418	0,8190	0,7981	0,7776	0,7587	0,7413	0,7241	0,7077
0,16			0,8993	0,8749	0,8518	0,8306	0,8104	0,7911	0,7728	0,7553
0,17			0,9560	0,9302	0,9058	0,8834	0,8613	0,8410	0,8217	0,8032
0,18			1,0139	0,9862	0,9588	0,9363	0,9132	0,8913	0,8703	0,8511
0,19			1,0716	1,0422	1,0147	0,9891	0,9643	0,9416	0,9191	0,8985
0,20				1,0984	1,0693	1,0419	1,0160	0,9259	0,9058	0,8865
0,22				1,2111	1,1786	1,1481	1,1194	1,0923	1,0667	1,0423
0,24					1,3243	1,2883	1,2547	1,2232	1,1934	1,1652
0,26					1,4380	1,3986	1,3618	1,3273	1,2948	1,2639
0,28						1,5094	1,4693	1,4318	1,3964	1,3629
0,30						1,6207	1,5773	1,5366	1,4984	1,4624
0,35						1,9066	1,8539	1,8050	1,7590	1,7164
0,40							2,0665	2,0133	1,9631	1,9161
0,45							2,1240	2,339	2,278	2,220
0,50							2,406	2,607	2,537	2,472
0,55								2,881	2,802	2,729
0,60								3,159	3,069	2,988
0,65									3,340	3,249
0,70									3,613	3,512
0,75									3,888	3,779
0,80										4,047
0,85										4,318
0,90										4,591
0,95										4,866
1,0										5,144
1,5										4,995

Давление, МПа	Плотность водяного пара при температуре, °С, кг/м³											
	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
0,10	0,4604	0,4506	0,4413	0,4323	0,4239	0,4156	0,4077	0,4002	0,3928	0,3858	0,3789	0,3724
0,11	0,5066	0,4960	0,4857	0,4757	0,4664	0,4572	0,4486	0,4401	0,4322	0,4244	0,4170	0,4098
0,12	0,5531	0,5411	0,5299	0,5192	0,5089	0,4990	0,4897	0,4805	0,4717	0,4632	0,4550	0,4470
0,13	0,5995	0,5865	0,5744	0,5627	0,5516	0,5408	0,5305	0,5206	0,5110	0,5020	0,4931	0,4845
0,14	0,6460	0,6321	0,6188	0,6064	0,5942	0,5828	0,5714	0,5608	0,5507	0,5405	0,5311	0,5219
0,15	0,6925	0,6775	0,6636	0,6498	0,6369	0,6246	0,6127	0,6010	0,5900	0,5794	0,5691	0,5593
0,16	0,7391	0,7231	0,7082	0,6935	0,6798	0,6662	0,6536	0,6414	0,6297	0,6180	0,6072	0,5966
0,17	0,7855	0,7686	0,7524	0,7375	0,7225	0,7082	0,6944	0,6817	0,6689	0,6570	0,6452	0,6341
0,18	0,8319	0,8143	0,7974	0,7806	0,7651	0,7502	0,7358	0,7220	0,7087	0,6959	0,6835	0,6716
0,19	0,8787	0,8598	0,8418	0,8244	0,8078	0,7924	0,7770	0,7622	0,7485	0,7348	0,7215	0,7092
0,20	0,9251	0,9051	0,8840	0,8630	0,8426	0,8226	0,8026	0,7826	0,7626	0,7426	0,7226	0,7026
0,22	1,0192	0,9970	0,9766	0,9560	0,9363	0,9163	0,9009	0,8834	0,8673	0,8511	0,8361	0,8217
0,24	1,1131	1,0888	1,0658	1,0437	1,0226	1,0024	0,9833	0,9643	0,9470	0,9294	0,9124	0,8969
0,26	1,2071	1,1808	1,1557	1,1316	1,1086	1,0867	1,0656	1,0454	1,0258	1,0072	0,9891	0,9718
0,28	1,3014	1,2729	1,2456	1,2197	1,1949	1,1711	1,1484	1,1265	1,1055	1,0852	1,0658	1,0470
0,30	1,3959	1,3652	1,3358	1,3079	1,2812	1,2556	1,2311	1,2076	1,1851	1,1633	1,1425	1,1223
0,35	1,6372	1,6008	1,5659	1,5330	1,5015	1,4712	1,4424	1,4144	1,3879	1,3624	1,3378	1,3141
0,40	1,8716	1,8295	1,7895	1,7513	1,7150	1,6801	1,6472	1,6152	1,5846	1,5552	1,5272	1,4999
0,45	2,115	2,066	2,021	1,978	1,935	1,896	1,859	1,826	1,795	1,765	1,735	1,699
0,50	2,354	2,299	2,248	2,199	2,152	2,108	2,066	2,025	1,986	1,949	1,914	1,879
0,55	2,596	2,536	2,478	2,424	2,372	2,323	2,276	2,231	2,188	2,147	2,108	2,070
0,60	2,840	2,773	2,710	2,650	2,593	2,539	2,487	2,438	2,391	2,345	2,302	2,260
0,65	3,086	3,012	2,943	2,877	2,814	2,756	2,699	2,646	2,594	2,544	2,497	2,452
0,70	3,334	3,253	3,178	3,106	3,038	2,974	2,912	2,853	2,797	2,744	2,692	2,643
0,75	3,583	3,495	3,413	3,336	3,262	3,192	3,125	3,062	3,002	2,944	2,888	2,835
0,80	3,834	3,738	3,650	3,565	3,486	3,411	3,339	3,271	3,206	3,145	3,086	3,028
0,85	4,087	3,984	3,888	3,796	3,712	3,631	3,555	3,482	3,412	3,346	3,282	3,222
0,90	4,340	4,230	4,127	4,031	3,939	3,852	3,771	3,693	3,618	3,547	3,480	3,415
0,95	4,598	4,478	4,367	4,264	4,167	4,075	3,987	3,905	3,826	3,750	3,678	3,609
1,0	4,857	4,728	4,610	4,498	4,396	4,297	4,205	4,117	4,032	3,953	3,876	3,804
1,5	7,553	7,321	7,112	6,920	6,743	6,579	6,427	6,281	6,146	6,017	5,893	5,777
2,0			9,794	9,497	9,225	8,969	8,741	8,532	8,333	8,143	7,968	7,800
2,5				12,250	11,850	11,490	11,170	10,870	10,600	10,350	10,180	9,887
3,0					14,670	14,170	13,720	13,330	12,960	12,630	12,320	12,030
4,0							19,330	18,640	18,030	17,480	16,990	16,540
5,0								24,67	23,670	22,820	22,070	21,390
6,0									30,15	28,79	27,65	26,67
7,0										35,70	33,94	32,49
8,0											41,24	39,06
9,0												46,68

Давле- ние, МПа	Плотность водяного пара при температуре °С, кг/м³														
	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450	
0,10	0,3660	0,3600	0,3541	0,3483	0,3428	0,3374	0,3322	0,3272	0,3222						
0,11	0,4027	0,3960	0,3896	0,3831	0,3771	0,3712	0,3655	0,3600	0,3546						
0,12	0,4396	0,4322	0,4250	0,4181	0,4115	0,4050	0,3987	0,3928	0,3868						
0,13	0,4762	0,4682	0,4606	0,4531	0,4458	0,4388	0,4322	0,4255	0,4191						
0,14	0,5128	0,5043	0,4960	0,4880	0,4803	0,4726	0,4653	0,4583	0,4515						
0,15	0,5498	0,5405	0,5316	0,5230	0,5147	0,5066	0,4988	0,4912	0,4838						
0,16	0,5865	0,5767	0,5672	0,5580	0,5491	0,5405	0,5319	0,5238	0,5160						
0,17	0,6234	0,6127	0,6028	0,5928	0,5834	0,5744	0,5653	0,5568	0,5485						
0,18	0,6601	0,6489	0,6382	0,6277	0,6180	0,6083	0,5988	0,5896	0,5807						
0,19	0,6969	0,6849	0,6738	0,6627	0,6523	0,6418	0,6321	0,6227	0,6131						
0,20	0,7337	0,7215	0,7092	0,6978	0,6868	0,6761	0,6653	0,6553	0,6456						
0,22	0,8077	0,7936	0,7806	0,7680	0,7558	0,7440	0,7321	0,7210	0,7102						
0,24	0,8810	0,8665	0,8518	0,8382	0,8244	0,8117	0,7987	0,7868	0,7752						
0,26	0,9551	0,9390	0,9234	0,9083	0,8936	0,8795	0,8658	0,8525	0,8396						
0,28	1,0289	1,0115	0,9950	0,9785	0,9625	0,9479	0,9328	0,9183	0,9050						
0,30	1,1029	1,0842	1,0661	1,0486	1,0318	1,0154	1,0000	0,9842	0,9699						
0,35	1,2913	1,2692	1,2481	1,2276	1,2077	1,1885	1,1700	1,1521	1,1347						
0,40	1,4738	1,4486	1,4243	1,4008	1,3780	1,3561	1,3348	1,3142	1,2943						
0,45	1,662	1,634	1,606	1,580	1,554	1,529	1,506	1,484	1,463	1,443	1,416	1,396	1,376	1,356	
0,50	1,846	1,815	1,784	1,754	1,725	1,698	1,671	1,645	1,620	1,596	1,572	1,549	1,527	1,506	
0,55	2,033	1,998	1,964	1,931	1,900	1,869	1,840	1,811	1,783	1,756	1,730	1,705	1,681	1,657	
0,60	2,220	2,182	2,144	2,109	2,074	2,041	2,008	1,977	1,947	1,918	1,889	1,862	1,834	1,809	
0,65	2,408	2,366	2,326	2,286	2,249	2,212	2,177	2,143	2,110	2,079	2,048	2,018	1,988	1,960	
0,70	2,596	2,550	2,507	2,465	2,424	2,384	2,346	2,310	2,274	2,240	2,206	2,174	2,143	2,112	
0,75	2,785	2,736	2,688	2,643	2,599	2,557	2,516	2,476	2,438	2,402	2,365	2,330	2,297	2,264	

Давление, МПа	Плотность водяного пара при температуре, °С, кг/м <sup>3</sup>													
	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
0,80	2,974	2,921	2,870	2,822	2,775	2,729	2,686	2,643	2,603	2,563	2,525	2,488	2,452	2,417
0,85	3,163	3,107	3,052	3,001	2,951	2,903	2,856	2,811	2,767	2,725	2,684	2,645	2,606	2,569
0,90	3,352	3,293	3,235	3,181	3,127	3,076	3,027	2,978	2,932	2,887	2,843	2,802	2,761	2,721
0,95	3,544	3,480	3,419	3,360	3,304	3,249	3,197	3,146	3,097	3,050	3,003	2,959	2,915	2,874
1,0	3,734	3,667	3,602	3,540	3,481	3,424	3,367	3,313	3,262	3,212	3,164	3,116	3,071	3,027
1,5	5,666	5,559	5,458	5,359	5,266	5,176	5,092	5,008	4,926	4,850	4,773	4,702	4,632	4,564
2,0	7,645	7,496	7,353	7,215	7,087	6,964	6,840	6,725	6,614	6,510	6,406	6,305	6,211	6,116
2,5	9,677	9,479	9,294	9,107	8,936	8,780	8,621	8,474	8,326	8,190	8,058	7,930	7,806	7,686
3,0	11,760	11,510	11,270	11,050	10,830	10,630	10,430	10,250	10,070	9,896	9,731	9,569	9,425	9,276
4,0	16,130	15,750	15,390	15,050	14,730	14,430	14,150	13,880	13,630	13,380	13,150	12,920	12,710	12,500
5,0	20,790	20,230	19,720	19,250	18,810	18,400	18,010	17,650	17,300	16,980	16,660	16,360	16,080	15,810
6,0	25,80	25,02	24,32	23,68	23,09	22,54	22,04	21,56	21,11	20,68	20,28	19,90	19,54	19,19
7,0	31,26	30,18	29,23	28,38	27,60	26,89	26,23	25,62	25,05	24,52	24,01	23,53	23,08	22,66
8,0	37,29	35,80	34,52	33,39	32,37	31,46	30,63	29,86	29,15	28,48	27,86	27,28	26,73	26,21
9,0	44,09	42,00	40,26	38,77	37,47	36,30	35,25	34,29	33,41	32,61	31,86	31,15	30,49	29,87
10	51,98	48,97	46,58	44,60	42,92	41,42	40,13	38,94	37,86	36,89	35,98	35,15	34,36	33,62
12		66,62	61,73	58,11	55,25	52,83	50,79	49,02	47,44	46,02	44,74	43,55	42,48	41,48
14			83,26	75,59	70,32	66,31	63,09	60,39	58,07	56,05	54,23	52,63	51,18	49,83
16				102,20	90,33	82,99	77,70	73,53	70,08	67,20	64,68	62,50	60,53	58,75
18					122,90	105,70	95,93	89,13	83,96	79,74	76,28	73,26	70,67	68,35
20						143,90	120,9	108,7	100,5	94,25	89,37	85,25	81,77	78,74
22							162,8	135,3	121,0	111,5	104,3	98,65	93,98	90,01
24							384,5	178,0	148,4	132,6	121,9	113,9	107,6	102,4
26							479,2	280,3	189,1	159,8	143,1	131,6	123,0	116,1
28							512,6	416,0	259,3	197,3	169,5	152,5	140,5	131,4
30							534,2	468,4	356,4	251,0	203,3	177,5	160,7	148,6

Продолжение табл. П.34

Давление, МПа	Плотность водяного пара при температуре, °С, кг/м <sup>3</sup>														
	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
6,0	18,86	18,54	18,23	17,94	17,66	17,39	17,13	16,88	16,64	16,40	16,18	15,96	15,74	15,54	15,34
7,0	22,25	21,86	21,49	21,13	20,79	20,46	20,14	19,84	19,55	19,26	18,99	18,73	18,47	18,22	17,98
8,0	25,72	25,25	24,81	24,38	23,97	23,58	23,21	22,85	22,50	22,16	21,84	21,53	21,23	20,93	20,66
9,0	29,28	28,73	28,20	27,69	27,21	26,75	26,32	25,89	25,49	25,10	24,73	24,37	24,02	23,68	23,36
10	32,94	32,28	31,67	31,08	30,52	29,98	29,48	28,99	28,53	28,08	27,65	27,24	26, 4	26,46	26,09
12	40,35	39,67	38,83	38,07	37,33	36,63	35,97	35,35	34,75	34,18	33,62	33,09	32,59	32,10	31,64
14	48,59	47,44	46,36	45,37	44,42	43,54	42,70	41,91	41,15	40,44	39,76	39,11	38,48	37,88	37,30
16	57,14	55,65	54,29	53,02	51,84	50,74	49,68	48,71	47,78	46,90	46,06	45,27	44,50	43,78	43,08
18	66,27	64,35	62,62	61,05	59,59	58,21	56,95	55,74	54,61	53,56	52,55	51,60	50,68	49,82	49,00
20	76,04	73,64	71,48	69,49	67,70	66,05	64,47	63,05	61,69	60,42	59,24	58,11	57,04	56,02	55,07
22	86,58	83,54	80,84	78,43	76,22	74,18	72,36	70,62	69,01	67,52	66,09	64,77	63,53	62,34	61,24
24	98,00	94,16	90,83	87,87	85,18	82,78	80,52	78,49	76,63	74,85	73,11	71,68	70,22	68,87	67,57
26	110,5	105,7	101,5	97,88	94,70	91,74	89,13	86,73	84,46	82,44	80,52	78,74	77,10	75,53	74,02
28	124,1	118,1	113,0	108,5	104,6	101,2	98,06	95,24	92,68	90,25	88,03	85,98	84,10	82,30	80,64
30	139,2	131,6	125,3	119,9	115,2	111,1	107,4	104,1	101,1	98,38	95,88	93,55	91,32	89,29	87,41

Таблица П.35. Плотность водного раствора едкого натра (каустика)

Массовая концентрация, г NaOH/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C				Массовая концентрация, г NaOH/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C			
	15	20	25	30		15	20	25	30
5	1056	1054	1052	1051	30	1331	1328	1325	1322
10	1111	1109	1107	1105	35	1383	1380	1377	1373
15	1166	1164	1162	1159	40	1434	1430	1426	1423
20	1222	1219	1216	1214	45	1482	1478	1474	1471
25	1277	1274	1271	1268	50	1528	1525	1522	1518

Таблица П.36. Плотность водного раствора едкого кали

Массовая концентрация, г KOH/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C				Массовая концентрация, г KOH/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C			
	15	20	25	30		15	20	25	30
5	1041	1040	1038	1036	35	1346	1343	1340	1337
10	1082	1080	1078	1076	40	1411	1408	1404	1400
15	1127	1125	1123	1121	45	1473	1470	1466	1462
20	1176	1174	1171	1168	50	1538	1534	1531	1528
25	1230	1227	1225	1222	55	1603	1600	1596	1592
30	1288	1285	1282	1279					

Таблица П.37. Плотность водного раствора соляной кислоты

Массовая концентрация, г HCl/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C				Массовая концентрация, г HCl/100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C			
	15	20	25	30		15	20	25	30
5	1024	1023	1022	1021	25	1126	1124	1122	1120
10	1048	1047	1046	1044	30	1152	1149	1146	1144
15	1075	1073	1071	1069	35	1177	1174	1171	1168
20	1100	1098	1096	1094	40	1202	1198	1194	1191

Таблица П.38. Плотность водного раствора азотной кислоты

Массовая концентрация, г HNO <sub>3</sub> /100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C				Массовая концентрация, г HNO <sub>3</sub> /100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C			
	15	20	25	30		15	20	25	30
5	1027	1026	1025	1024	60	1371	1367	1363	1360
10	1056	1054	1052	1051	70	1420	1413	1406	1399
20	1118	1115	1112	1110	80	1460	1452	1444	1437
30	1184	1180	1176	1173	90	1491	1483	1475	1467
40	1258	1253	1248	1244	95	1501	1493	1485	1477
50	1315	1310	1305	1300	100	1522	1513	1504	1495

Таблица П.39. Плотность водного раствора серной кислоты

Массовая концентрация, г H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C				Массовая концентрация, г H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /100 г	Плотность, кг/м³, при t, °C			
	15	20	25	30		15	20	25	30
5	1033	1032	1031	1029	60	1507	1498	1489	1481
10	1068	1066	1064	1062	70	1616	1611	1606	1602
20	1142	1139	1136	1133	80	1732	1727	1722	1717
30	1222	1219	1216	1212	90	1819	1814	1809	1804
40	1310	1303	1296	1288	95	1838,7	1833,7	1828,7	1823,6
50	1399	1395	1391	1387	100	1835,6	1830,5	1825,4	1820,5

Таблица П.40. Давление паров некоторых жидкостей в зависимости от температуры

Жидкость	Давление пара, кПа, при температуре, °C							
	0	20	40	60	80	100	120	140
Ацетон	8,93	24,6	56,2	111,8	207,9	359,9	588,4	915,0
Бензол	3,60	10,0	24,1	52,3	100,5	173,5	288,8	454,1
Метилловый спирт	3,95	12,8	34,7	83,3	172,6	338,3	613,9	1042
Сероуглерод	16,9	39,7	82,2	151,0	263,8	433,4	676,6	1010
Этиловый спирт	1,63	5,85	17,8	46,9	104,9	218,7	415,8	734,5
Этиловый эфир	24,7	58,9	118,6	222,6	386,4	627,6	—	—

Таблица П.41. Динамическая вязкость воды при атмосферном давлении и на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$
0	1788	130	217,8	260	105,9
10	1306	140	201,1	270	102,0
20	1004	150	186,4	280	98,1
30	801,5	160	173,6	290	94,2
40	653,3	170	162,8	300	91,2
50	549,4	180	153,0	310	88,3
60	469,9	190	144,2	320	85,3
70	406,1	200	136,4	330	81,4
80	355,1	210	130,5	340	77,5
90	314,9	220	124,6	350	72,6
100	282,5	230	119,7	360	66,7
110	259,0	240	114,8	370	56,9
120	237,4	250	109,9		

Номограмма П.42. Динамическая вязкость водяного пара

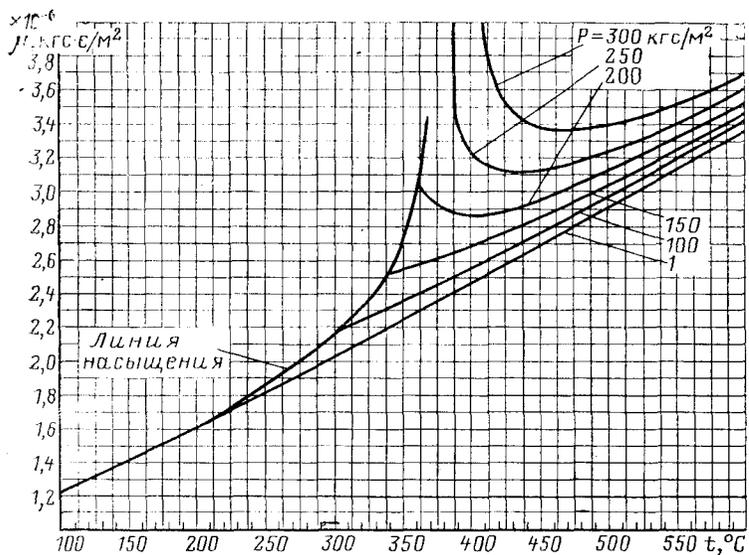
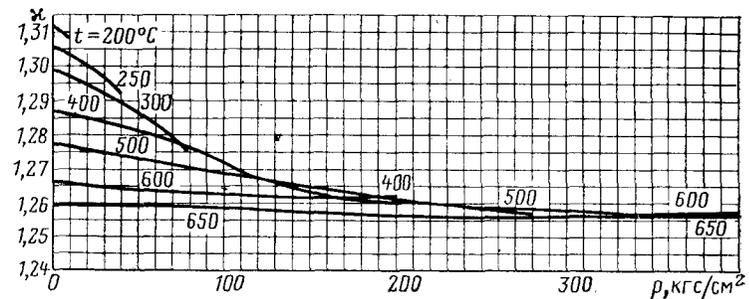


Таблица П.43. Плотность газов

Газ	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$		Газ	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	
	при $0^\circ\text{C}$ и $0,1013 \text{ МПа}$	при $20^\circ\text{C}$ и $0,1013 \text{ МПа}$		при $0^\circ\text{C}$ и $0,1013 \text{ МПа}$	при $20^\circ\text{C}$ и $0,1013 \text{ МПа}$
Азот	1,251	1,166	Метан	0,7168	0,6679
Бутан	2,703	2,519	Октан	5,030	4,687
Водород	0,0899	0,0837	Пентан	3,457	3,221
Воздух (сухой)	1,293	1,205	Пропан	2,010	1,872
Водяной пар	0,8041	0,7496	Сернистый газ	2,927	2,727
Гексан	3,845	3,583	Сероводород	1,539	1,434
Гептан	4,459	4,155	Окись углерода	1,250	1,165
Изобутан	2,673	2,491	Двуокись углерода	1,977	1,842
Изопентан	3,22	3,000	Хлор	3,214	2,995
Кислород	1,429	1,331	Этан	1,356	1,263

Номограмма П.44. Показатель адиабаты перегретого водяного пара



306 Таблица П.45. Значения вспомогательной величины  $C$  при различных значениях модуля диафрагмы  $m$  и номинального перепада давления  $\Delta p_H^*$

$m$	$\Delta p_H^*$ , кгс/м <sup>2</sup>					$m$	$\Delta p_H^*$ , кгс/м <sup>2</sup>				
	10	16	25	40	63		10	16	25	40	63
0,05	0,095	0,122	0,154	0,193	0,240	0,31	0,62	0,78	0,98	1,24	1,55
0,06	0,110	0,140	0,175	0,220	0,280	0,32	0,64	0,81	1,02	1,29	1,62
0,07	0,125	0,160	0,200	0,251	0,325	0,33	0,66	0,84	1,06	1,33	1,67
0,08	0,145	0,182	0,230	0,296	0,370	0,34	0,68	0,87	1,08	1,38	1,73
0,09	0,167	0,210	0,262	0,330	0,430	0,35	0,71	0,90	1,13	1,43	1,79
0,10	0,190	0,240	0,303	0,380	0,490	0,36	0,74	0,94	1,17	1,48	1,87
0,11	0,208	0,260	0,332	0,420	0,540	0,37	0,77	0,97	1,22	1,53	1,92
0,12	0,227	0,290	0,361	0,460	0,580	0,38	0,79	0,99	1,25	1,58	1,98
0,13	0,248	0,310	0,392	0,500	0,630	0,39	0,81	1,03	1,29	1,63	2,03
0,14	0,270	0,340	0,428	0,540	0,680	0,40	0,84	1,07	1,33	1,67	2,11
0,15	0,290	0,370	0,465	0,590	0,730	0,42	0,88	1,12	1,40	1,74	2,23
0,16	0,310	0,390	0,490	0,620	0,780	0,44	0,94	1,18	1,48	1,87	2,37
0,17	0,330	0,410	0,520	0,650	0,820	0,46	0,98	1,26	1,57	1,98	2,49
0,18	0,350	0,440	0,550	0,700	0,880	0,48	1,03	1,32	1,64	2,08	2,62
0,19	0,370	0,460	0,590	0,740	0,930	0,50	1,10	1,38	1,73	2,21	2,77
0,20	0,390	0,490	0,620	0,790	0,990	0,52	1,15	1,47	1,82	2,32	2,92
0,21	0,410	0,520	0,650	0,820	1,03	0,54	1,22	1,54	1,91	2,43	3,08
0,22	0,430	0,540	0,680	0,860	1,08	0,56	1,27	1,62	2,01	2,56	3,22
0,23	0,450	0,570	0,720	0,910	1,13	0,58	1,35	1,71	2,12	2,70	3,41
0,24	0,480	0,600	0,760	0,960	1,19	0,60	1,43	1,81	2,25	2,85	3,62
0,25	0,500	0,630	0,790	1,010	1,25	0,62	1,50	1,87	2,34	2,98	3,75
0,26	0,520	0,660	0,830	1,060	1,31	0,64	1,55	1,96	2,43	3,10	3,90
0,27	0,540	0,680	0,860	1,080	1,35	0,66	1,64	2,07	2,57	3,25	4,10
0,28	0,560	0,700	0,885	1,120	1,40	0,68	1,73	2,18	2,72	3,47	4,33
0,29	0,580	0,730	0,910	1,160	1,44	0,70	1,83	2,30	2,87	3,65	4,58
0,30	0,600	0,760	0,950	1,200	1,50						

Продолжение табл. П.45

$m$	$\Delta p_H^*$ , кгс/м <sup>2</sup>					$m$	$\Delta p_H^*$ , кгс/м <sup>2</sup>				
	100	160	250	400	630		100	160	250	400	630
0,05	0,30	0,38	0,48	0,61	0,77	0,31	1,96	2,48	3,12	3,95	4,94
0,06	0,35	0,45	0,56	0,71	0,89	0,32	2,03	2,55	3,22	4,10	5,12
0,07	0,41	0,51	0,64	0,81	1,03	0,33	2,11	2,65	3,33	4,25	5,30
0,08	0,47	0,59	0,74	0,93	1,17	0,34	2,18	2,75	3,45	4,40	5,50
0,09	0,53	0,67	0,84	1,07	1,33	0,35	2,26	2,85	3,58	4,55	5,70
0,10	0,61	0,75	0,94	1,20	1,49	0,36	2,34	2,95	3,71	4,70	5,90
0,11	0,67	0,84	1,04	1,33	1,65	0,37	2,42	3,05	3,83	4,85	6,10
0,12	0,73	0,92	1,14	1,45	1,80	0,38	2,49	3,15	3,95	5,00	6,30
0,13	0,79	1,00	1,24	1,57	1,96	0,39	2,57	3,25	4,06	5,15	6,50
0,14	0,86	1,08	1,35	1,70	2,13	0,40	2,65	3,35	4,18	5,30	6,70
0,15	0,93	1,16	1,45	1,83	2,30	0,42	2,81	3,55	4,40	5,60	7,00
0,16	0,99	1,24	1,55	1,95	2,46	0,44	2,97	3,75	4,68	6,00	7,50
0,17	1,05	1,32	1,65	2,07	2,62	0,46	3,14	3,95	4,95	6,30	7,90
0,18	1,11	1,40	1,75	2,20	2,78	0,48	3,31	4,15	5,20	6,60	8,30
0,19	1,17	1,48	1,86	2,33	2,93	0,50	3,49	4,40	5,50	7,00	8,80
0,20	1,23	1,56	1,96	2,46	3,09	0,52	3,68	4,65	5,80	7,40	9,30
0,21	1,30	1,64	2,06	2,60	3,25	0,54	3,87	4,90	6,10	7,70	9,80
0,22	1,37	1,72	2,16	2,73	3,41	0,56	4,07	5,15	6,40	8,10	10,3
0,23	1,44	1,80	2,27	2,86	3,58	0,58	4,27	5,40	6,80	8,50	10,8
0,24	1,51	1,89	2,38	3,00	3,76	0,60	4,48	5,70	7,20	9,00	11,4
0,25	1,58	1,98	2,49	3,15	3,94	0,62	4,69	6,00	7,45	9,40	11,8
0,26	1,65	2,07	2,60	3,28	4,12	0,64	4,91	6,20	7,80	9,80	12,3
0,27	1,71	2,15	2,70	3,42	4,28	0,66	5,17	6,50	8,20	10,2	12,8
0,28	1,77	2,23	2,80	3,55	4,44	0,68	5,46	6,90	8,70	10,8	13,7
0,29	1,83	2,31	2,90	3,68	4,60	0,70	5,78	7,30	9,20	11,5	14,5
0,30	1,90	2,40	3,01	3,81	4,77						

m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>					m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>				
	0,10	0,16	0,25	0,40	0,63		0,10	0,16	0,25	0,40	0,63
0,05	0,96	1,22	1,55	1,95	2,45	0,31	6,26	7,90	9,95	12,65	15,9
0,06	1,12	1,48	1,75	2,20	2,80	0,32	6,50	8,20	10,3	13,1	16,5
0,07	1,28	1,74	2,05	2,50	3,25	0,33	6,75	8,50	10,65	13,5	17,1
0,08	1,47	2,00	2,30	2,90	3,70	0,34	7,00	8,80	11,0	14,0	17,7
0,09	1,67	2,25	2,65	3,30	4,15	0,35	7,25	9,10	11,4	14,5	18,3
0,10	1,87	2,50	3,00	3,70	4,65	0,36	7,50	9,40	11,8	15,0	18,9
0,11	2,07	2,75	3,30	4,10	5,15	0,37	7,70	9,70	12,2	15,5	19,5
0,12	2,27	3,00	3,60	4,50	5,65	0,38	7,90	10,0	12,6	15,95	20,1
0,13	2,47	3,25	3,90	4,90	6,15	0,39	8,15	10,3	13,0	16,4	20,8
0,14	2,68	3,50	4,25	5,30	6,65	0,40	8,40	10,7	13,5	17,0	21,6
0,15	2,87	3,75	4,60	5,70	7,15	0,42	8,90	11,2	14,1	17,8	22,5
0,16	3,07	4,00	4,90	6,10	7,65	0,44	9,40	11,8	14,8	18,8	23,8
0,17	3,27	4,25	5,20	6,50	8,15	0,46	9,90	12,4	15,6	19,9	25,0
0,18	3,48	4,50	5,50	6,95	8,65	0,48	10,4	13,0	16,5	21,0	26,3
0,19	3,70	4,75	5,85	7,40	9,15	0,50	11,0	13,7	17,5	22,1	27,8
0,20	3,91	5,00	6,20	7,85	9,65	0,52	11,6	14,4	18,5	23,5	29,5
0,21	4,12	5,25	6,55	8,30	10,15	0,54	12,2	15,1	19,5	24,7	31,3
0,22	4,35	5,50	6,90	8,70	10,65	0,56	12,8	15,9	20,5	25,8	32,8
0,23	4,55	5,75	7,25	9,10	11,20	0,58	13,5	16,7	21,5	27,2	34,5
0,24	4,78	6,00	7,60	9,55	11,75	0,60	14,2	17,5	22,5	28,7	36,2
0,25	5,00	6,27	7,90	10,0	12,3	0,62	14,8	18,4	23,5	29,8	37,8
0,26	5,20	6,55	8,20	10,4	12,9	0,64	15,5	19,3	24,5	31,0	39,5
0,27	5,40	6,82	8,55	10,8	13,5	0,66	16,3	20,3	25,5	32,6	41,2
0,28	5,60	7,10	8,90	11,2	14,1	0,68	17,3	21,5	27,2	34,7	43,0
0,29	5,80	7,37	9,25	11,7	14,7	0,70	18,3	23	29,0	36,5	45,5
0,30	6,05	7,65	9,60	12,2	15,3						

Продолжение табл. П.45

m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>					m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>				
	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3		1,0	1,6	2,5	4,0	6,3
0,05	3,10	3,9	4,9	6,2	7,7	0,31	20,05	25,3	31,7	40,1	50,4
0,06	3,70	4,5	5,7	7,1	9,3	0,32	20,8	26,2	32,9	41,5	52,3
0,07	4,30	5,2	6,5	8,2	10,9	0,33	21,55	27,1	34,1	43,0	54,2
0,08	4,90	6,0	7,5	9,3	12,4	0,34	22,30	28,0	35,3	44,5	56,1
0,09	5,50	6,8	8,5	10,5	13,9	0,35	23,05	29,0	36,5	46,0	58,0
0,10	6,10	7,6	9,5	11,7	15,4	0,36	23,80	30,0	37,7	47,5	59,9
0,11	6,70	8,4	10,5	13,0	16,9	0,37	24,55	31,0	38,9	49,0	61,8
0,12	7,30	9,2	11,5	14,3	18,4	0,38	25,3	32,0	40,1	50	63,7
0,13	7,90	10,0	12,5	15,6	19,9	0,39	26,05	33,0	41,3	52,0	65,6
0,14	8,50	10,8	13,5	16,9	21,4	0,40	26,8	34,0	42,5	53,5	67,5
0,15	9,10	11,6	14,5	18,2	23,0	0,42	28,2	36,0	44,8	56,5	71,0
0,16	9,70	12,4	15,5	19,5	24,6	0,44	29,8	38,0	47,3	59,5	75,0
0,17	10,30	13,2	16,5	20,8	26,2	0,46	31,5	40,0	49,8	63	79
0,18	10,90	14,0	17,5	22,1	27,8	0,48	33,3	42,0	52,5	66,5	83
0,19	11,50	14,8	18,5	23,4	29,4	0,50	35,1	44,2	55,5	70,5	88
0,20	12,10	15,6	19,5	24,7	31,0	0,52	37,2	46,5	58,5	74,5	93
0,21	12,70	16,4	20,6	26,1	32,7	0,54	39,3	49,0	61,5	78,5	98
0,22	13,30	17,2	21,7	27,5	34,4	0,56	41,2	51,5	64,5	82,5	103
0,23	13,90	18,1	22,8	28,9	36,1	0,58	43,1	54,0	68,0	86,5	108
0,24	14,60	19,0	23,9	30,3	37,8	0,60	45,0	57,0	71,5	90,5	113
0,25	15,30	19,9	25,0	31,7	39,5	0,62	47,0	60,0	75,0	94,5	118
0,26	16,0	20,8	26,1	33,1	41,3	0,64	49,0	63,0	78,5	98,5	123
0,27	16,9	21,7	27,2	34,5	43,1	0,66	51,5	66,0	82,5	102,5	128
0,28	17,7	22,6	28,3	35,9	44,9	0,68	54,2	69,0	87	108	136
0,29	18,5	23,5	29,4	37,3	46,7	0,70	57,0	73,0	92	115	145
0,30	19,3	24,4	30,5	38,7	48,5						

Таблица П.46. Значения вспомогательной величины  $C$  при различных значениях модуля диафрагмы  $m$  и номинального перепада давления  $\Delta p_H^*$ 

$m$	$\Delta p_H, \text{ кгс/м}^2$					$m$	$\Delta p_H, \text{ кгс/м}^2$				
	10	16	25	40	63		10	16	25	40	63
0,05	0,153	0,197	0,245	0,31	0,39	0,30	0,96	1,22	1,52	1,92	2,40
0,06	0,175	0,223	0,278	0,35	0,44	0,31	1,00	1,26	1,57	1,98	2,48
0,07	0,202	0,257	0,320	0,41	0,51	0,32	1,03	1,30	1,62	2,04	2,56
0,08	0,232	0,295	0,368	0,47	0,59	0,33	1,07	1,34	1,68	2,12	2,65
0,09	0,270	0,342	0,425	0,54	0,68	0,34	1,11	1,39	1,74	2,19	2,76
0,10	0,313	0,397	0,495	0,62	0,78	0,35	1,16	1,45	1,81	2,27	2,85
0,11	0,337	0,425	0,532	0,67	0,85	0,36	1,19	1,49	1,87	2,35	2,97
0,12	0,365	0,463	0,580	0,73	0,93	0,37	1,22	1,53	1,92	2,42	3,04
0,13	0,400	0,500	0,627	0,79	1,00	0,38	1,26	1,58	1,97	2,49	3,12
0,14	0,443	0,545	0,685	0,86	1,09	0,39	1,28	1,62	2,02	2,56	3,20
0,15	0,470	0,595	0,750	0,94	1,18	0,40	1,32	1,66	2,07	2,62	3,28
0,16	0,502	0,635	0,800	1,01	1,27	0,42	1,40	1,75	2,20	2,78	3,50
0,17	0,530	0,670	0,850	1,07	1,33	0,44	1,47	1,85	2,30	2,95	3,67
0,18	0,560	0,710	0,900	1,13	1,42	0,46	1,55	1,95	2,43	3,11	3,87
0,19	0,600	0,750	0,960	1,19	1,49	0,48	1,64	2,06	2,57	3,28	4,10
0,20	0,630	0,800	1,010	1,26	1,58	0,50	1,72	2,18	2,71	3,47	4,35
0,21	0,655	0,830	1,06	1,32	1,65	0,52	1,81	2,30	2,86	3,64	4,55
0,22	0,690	0,870	1,10	1,37	1,72	0,54	1,90	2,40	3,00	3,80	4,80
0,23	0,725	0,910	1,15	1,43	1,81	0,56	1,98	2,51	3,15	4,00	5,03
0,24	0,760	0,960	1,21	1,51	1,89	0,58	2,07	2,62	3,29	4,20	5,25
0,25	0,790	1,02	1,27	1,57	1,99	0,60	2,15	2,73	3,41	4,36	5,50
0,26	0,820	1,04	1,31	1,63	2,06	0,62	2,27	2,90	3,61	4,62	5,58
0,27	0,850	1,08	1,36	1,69	2,14	0,64	2,40	3,06	3,80	4,83	5,61
0,28	0,890	1,12	1,41	1,77	2,22	0,65	2,46	3,12	3,87	4,90	5,62
0,29	0,920	1,17	1,47	1,83	2,31						

Продолжение табл. П.46

$m$	$\Delta p_H, \text{ кгс/м}^2$					$m$	$\Delta p_H, \text{ кгс/м}^2$				
	100	160	250	400	630		100	160	250	400	630
0,05	0,49	0,62	0,77	0,98	1,23	0,30	3,04	3,80	4,75	6,05	7,60
0,06	0,56	0,71	0,88	1,12	1,40	0,31	3,14	3,95	4,92	6,25	7,80
0,07	0,64	0,82	1,02	1,28	1,62	0,32	3,24	4,10	5,07	6,45	8,10
0,08	0,74	0,94	1,17	1,47	1,85	0,33	3,36	4,25	5,27	6,70	8,40
0,09	0,86	1,08	1,34	1,68	2,13	0,34	3,48	4,40	5,45	6,90	8,70
0,10	0,99	1,25	1,54	1,93	2,46	0,35	3,60	4,55	5,65	7,15	9,00
0,11	1,07	1,34	1,67	2,10	2,66	0,36	3,73	4,70	5,87	7,45	9,30
0,12	1,17	1,45	1,81	2,28	2,88	0,37	3,85	4,85	6,04	7,65	9,60
0,13	1,26	1,57	1,95	2,46	3,14	0,38	3,98	5,00	6,23	7,87	9,90
0,14	1,37	1,70	2,12	2,67	3,40	0,39	4,07	5,10	6,37	8,07	10,2
0,15	1,48	1,85	2,30	2,90	3,68	0,40	4,17	5,25	6,50	8,3	10,4
0,16	1,59	2,00	2,46	3,12	3,98	0,42	4,44	5,60	6,95	8,8	11,2
0,17	1,68	2,10	2,61	3,30	4,23	0,44	4,68	5,95	7,35	9,3	11,7
0,18	1,78	2,23	2,77	3,50	4,47	0,46	4,93	6,30	7,75	9,8	12,3
0,19	1,88	2,36	2,95	3,70	4,73	0,48	5,20	6,65	8,17	10,3	12,9
0,20	2,00	2,50	3,12	3,95	4,98	0,50	5,47	7,00	8,63	10,8	13,6
0,21	2,09	2,61	3,27	4,15	5,24	0,52	5,77	7,40	9,05	11,4	14,3
0,22	2,18	2,73	3,42	4,35	5,48	0,54	6,07	7,75	9,50	12,0	15,0
0,23	2,28	2,85	3,58	4,53	5,70	0,56	6,33	8,10	10,0	12,5	15,8
0,24	2,38	3,00	3,74	4,75	5,95	0,58	6,60	8,50	10,4	13,1	16,6
0,25	2,50	3,15	3,92	4,95	6,25	0,60	6,85	8,70	10,8	13,6	17,3
0,26	2,59	3,27	4,07	5,15	6,50	0,62	7,25	9,30	11,5	14,4	18,4
0,27	2,70	3,40	4,25	5,35	6,75	0,64	7,63	9,70	12,0	15,2	19,3
0,28	2,79	3,53	4,40	5,55	7,00	0,65	7,80	9,80	12,2	15,5	19,7
0,29	2,90	3,65	4,57	5,75	7,25						

m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>					m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>				
	0,10	0,16	0,25	0,40	0,63		0,10	0,16	0,25	0,40	0,63
0,05	1,55	1,95	2,45	3,10	3,75	0,30	9,60	12,1	15,1	19,3	24,1
0,06	1,75	2,24	2,76	3,5	4,45	0,31	9,85	12,4	15,6	19,8	24,9
0,07	2,03	2,57	3,18	4,05	5,07	0,32	10,2	12,8	16,2	20,4	25,8
0,08	2,32	2,98	3,67	4,7	5,90	0,33	10,6	13,3	16,7	21,2	26,6
0,09	2,67	3,43	4,25	5,4	6,70	0,34	10,8	13,7	17,3	21,8	27,3
0,10	3,09	3,95	4,87	6,2	7,80	0,35	11,3	14,2	17,9	22,7	28,2
0,11	3,34	4,28	5,30	6,7	8,50	0,36	11,7	14,7	18,6	23,4	29,3
0,12	3,63	4,63	5,75	7,3	9,10	0,37	12,0	15,2	19,2	24,2	30,2
0,13	3,95	5,00	6,25	7,9	9,90	0,38	12,4	15,7	19,7	24,9	31,2
0,14	4,30	5,45	6,80	8,6	10,8	0,39	12,7	16,1	20,3	25,7	32,0
0,15	4,65	5,90	7,40	9,3	11,7	0,40	13,1	16,6	20,8	26,2	32,9
0,16	5,00	6,35	7,95	10,1	12,6	0,42	13,8	17,6	22,0	27,8	35,0
0,17	5,30	6,70	8,50	10,7	13,3	0,44	14,6	18,6	23,2	29,5	36,9
0,18	5,63	7,10	8,95	11,3	14,0	0,46	15,4	19,6	24,5	31,2	38,8
0,19	5,95	7,55	9,45	11,9	14,9	0,48	16,3	20,6	25,8	32,8	41,0
0,20	6,30	8,00	10,0	12,7	15,8	0,50	17,2	21,8	27,2	34,5	43,0
0,21	6,55	8,35	10,5	13,2	16,7	0,52	18,1	22,9	28,6	36,2	45,3
0,22	6,90	8,70	11,0	13,8	17,3	0,54	19,0	23,9	30,0	38,0	47,5
0,23	7,20	9,10	11,4	14,4	18,2	0,56	19,9	25,2	31,5	40,0	49,8
0,24	7,55	9,5	12,0	15,1	19,0	0,58	20,8	26,2	33,0	42,0	52,5
0,25	7,90	9,95	12,6	15,8	19,8	0,60	21,7	27,3	34,5	44,0	55,0
0,26	8,25	10,3	13,0	16,4	20,8	0,62	23,0	29,0	36,3	46,5	58,5
0,27	8,50	10,8	13,4	17,2	21,5	0,64	24,1	30,4	37,8	48,2	61,5
0,28	8,80	11,2	13,9	17,7	22,3	0,65	24,7	31,2	38,5	49,0	63,0
0,29	9,10	11,6	14,5	18,3	23,2						

m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>					m	$\Delta p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>				
	0,1	1,6	2,5	4,0	6,3		1,0	1,6	2,5	4,0	6,3
0,05	4,90	6,2	7,7	9,7	12,1	0,30	30,3	38,5	47,8	60,5	77
0,06	5,60	7,1	8,9	11,2	14,0	0,31	31,4	39,9	49,5	63	80
0,07	6,40	8,2	10,2	12,8	16,2	0,32	32,5	41,2	51,0	65	82,5
0,08	7,40	9,5	11,7	14,7	18,7	0,33	33,5	42,5	53,0	67,5	85,0
0,09	8,50	10,9	13,4	17,1	21,5	0,34	34,7	44,0	54,5	69,5	87,5
0,10	9,80	12,4	15,4	19,7	24,5	0,35	35,9	45,5	56,5	72,5	90,5
0,11	10,7	13,4	16,8	21,4	26,8	0,36	37,0	47,0	58,5	75,0	94,0
0,12	11,6	14,6	18,3	23,3	29,0	0,37	38,1	48,3	60,5	77,5	97,0
0,13	12,5	15,9	19,8	25,2	31,4	0,38	39,4	50,0	62,5	80	100
0,14	13,5	17,3	21,7	27,3	34,2	0,39	40,5	51,5	64,3	82	102,5
0,15	14,8	18,8	23,5	29,7	37,2	0,40	41,6	52,5	66,0	84	105
0,16	15,9	20,1	25,2	32	39,5	0,42	44,1	56,0	70,2	89,5	112
0,17	17,0	21,4	26,8	34	42,5	0,44	46,6	59,0	74,5	94	118
0,18	18,0	22,7	28,3	36	44,8	0,46	49,0	62,5	79,0	99	125
0,19	19,1	23,9	30,0	38	47,5	0,48	51,6	65,5	83,0	104	130
0,20	20,2	25,4	31,8	40	50,1	0,50	54,0	69,0	87,0	109	137
0,21	21,2	26,8	33,4	42	52,5	0,52	57,0	72,5	91,0	115	144
0,22	22,2	27,8	35,0	44	55,0	0,54	60,0	76,0	96,0	120	152
0,23	23,1	29,2	36,4	46	57,5	0,56	63,5	80,0	100,0	127	159
0,24	24,1	30,5	38,0	48	60,0	0,58	66,5	83,5	106	133	168
0,25	25,2	32,0	39,9	50	63,0	0,60	69,5	87,0	110	138	176
0,26	26,2	33,2	41,6	52	66,0	0,62	73,5	92,0	117	147	186
0,27	27,2	34,5	43,0	54	68,5	0,64	77,0	96,5	122	153	193
0,28	28,1	35,7	44,5	56	71,0	0,65	78,5	98,5	124	155	196
0,29	29,1	37,0	46,2	58	74,0						

Таблица П.47. Поправочный множитель на расширение материала трубопровода и сужающего устройства

Температура, °С	Материал					
	Сталь 20, 20М, 15ХМА, 15М, 12МХ	Сталь Х23Н13, Х18Н25С2	Сталь 1Х18Н9Т	Бронза	Чугун, сталь Х17, Х17Н9	Сталь Х6СМ, Х7СМ, Х55
20	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
40	1,00020	1,00026	1,00032	1,00037	1,00017	1,00018
60	1,00045	1,00053	1,00064	1,00073	1,00037	1,00041
80	1,00070	1,00081	1,00097	1,00107	1,00057	1,00064
100	1,00095	1,00110	1,00130	1,00141	1,00077	1,00087
120	1,00120	1,00140	1,00163	1,00176	1,00097	1,00110
140	1,00145	1,00171	1,00197	1,00212	1,00118	1,00133
160	1,00171	1,00203	1,00232	1,00247	1,00140	1,00157
180	1,00197	1,00236	1,00267	1,00283	1,00162	1,00182
200	1,00224	1,00271	1,00302	1,00318	1,00185	1,00207
220	1,00251	1,00309	1,00338	1,00355	1,00208	1,00233
240	1,00279	1,00350	1,00373	1,00392	1,00233	1,00260
260	1,00307	1,00390	1,00409	1,00430	1,00258	1,00287
280	1,00336	1,00430	1,00444	1,00467	1,00285	1,00313
300	1,00365	1,00470	1,00480	1,00505	1,00312	1,00340
320	1,00394	1,00511	1,00516	1,00544	1,00340	1,00367
340	1,00423	1,00552	1,00551	1,00584	1,00368	1,00395
360	1,00452	1,00593	1,00587	1,00623	1,00397	1,00423
380	1,00481	1,00634	1,00622	1,00663	1,00427	1,00452
400	1,00510	1,00675	1,00658	1,00703	1,00457	1,00482
420	1,00541	1,00716	1,00693	1,00746	1,00488	1,00513
440	1,00572	1,00757	1,00728	1,00789	1,00520	1,00543
460	1,00603	1,00798	1,00763	1,00833	1,00552	1,00574
480	1,00634	1,00839	1,00798	1,00876	1,00587	1,00604
500	1,00665	1,00880	1,00833	1,00920	1,00623	1,00635
520	1,00699	1,00923	1,00868	—	—	1,00665
540	1,00730	1,00966	1,00904	—	—	1,00693
560	1,00764	1,01010	1,00939	—	—	1,00720
580	1,00798	1,01052	1,00975	—	—	1,00743
600	1,00833	1,01095	1,01010	—	—	1,00765

Таблица П.48. Коэффициенты теплопроводности газов и жидкостей при нормальном давлении

Газ или жидкость	Температура, °С	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)	Газ или жидкость	Температура, °С	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)
Азот (газ)	0	24,2	Аргон (жидкий)	-183	6
Азот (жидкий)	-193	8	Бензол (газ)	0	9,2
Аммиак (жидкий)	20	25	Бензол (жидкий)	30	162
Аргон (газ)	0	16,5	Водяной пар	0	15
			Вода (жидкая)	0	569

Продолжение табл. П.48

Газ или жидкость	Температура, °С	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)	Газ или жидкость	Температура, °С	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)
Вода (жидкая)	30	167	Метан (газ)	0	30,7
Водород (газ)	0	172	Метан (жидкий)	-170	208
Водород (жидкий)	-250	118	Метилловый спирт (газ)	0	9,5
Воздух (газ)	0	24,4	Метилловый спирт (жидкий)	30	203
Воздух (жидкий)	-200	163	Натрий	130	84 000
Гелий (газ)	0	142	Неон (газ)	0	46,4
Гелий (жидкий)	-270	21,4	Неон (жидкий)	-243	92
Глицерин	30	283	Нефть	20	133
Двуокись углерода (газ)	0	14,8	Пропан	50	21
Двуокись углерода (жидкая)	-53	11	Ртуть	-23	6800
Калий	100	48 000	Толуол	30	134
Керосин	20	116	Трансформаторное масло	20	111
Кислород (газ)	0	24,5	Фенол	30	144
Кислород (жидкий)	-193	161	Этиловый спирт (газ)	0	12,9
Криптон (газ)	0	8,9	Этиловый спирт (жидкий)	30	162
Литий	200	46 000			
Мазут	30	143			

Таблица П.49. Относительная магнитная восприимчивость некоторых газов

Газ	$\chi$	Газ	$\chi$
Кислород O <sub>2</sub>	1	Двуокись азота NO <sub>2</sub>	0,0616
Азот N <sub>2</sub>	0,004	Двуокись углерода	0,0057
Аммиак NH <sub>3</sub>	0,0057	СО <sub>2</sub>	—
Аргон Ar	0,0059	Закись азота N <sub>2</sub> O	0,0205
Ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,0068	Метан CH <sub>4</sub>	0,0068
Воздух	0,21	Неон Ne	0,0022
Водород H <sub>2</sub>	0,0011	Окись азота NO	0,362
Водяные пары H <sub>2</sub> O	0,004	Хлор Cl <sub>2</sub>	0,0041
Гелий He	0,00057		

Таблица П.50. Относительные диэлектрические проницаемости некоторых веществ (при 0 °С и 101,325 кПа)

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
<b>Газы</b>			
Азот	1,00061	Водород	1,00026
Аммиак	1,0072	Воздух	1,00059
Водяной пар	1,0078	Гелий	1,00007

Продолжение табл. П.50

Вещество	$\epsilon$	Вещество	$\epsilon$
Двуокись азота	1,002	Нефть	2,3—3,0
Закись азота	1,00114	Сероуглерод	2,60
Кислород	1,00055	Трансформаторное масло	2,2—2,5
Метан	1,00094	Этиловый спирт	27,80
Окись углерода	1,00069	<b>Твердые вещества</b>	
Сернистый газ	1,009	Винипласт	4,1
Углекислый газ	1,00096	Каучук синтетический	2,4
Хлористый водород	1,003	Кварц	4,5
<b>Жидкости</b>		Лед	3,1
Азот ( $T=70$ К)	1,45	Оргстекло	3,0—3,6
Ацетон	21,50	Парафин	2,2—2,8
Бензол	2,30	Полиэтилен	2,2
Вода	81,00	Резина мягкая	2,7
Водород ( $T=15$ К)	1,25	Стекло	4—10
Гелий ( $T=4$ К)	1,05	Текстолит	2—6
Глицерин	55,20	Фторопласт-4	2,0—2,1
Керосин	2,10	Эбонит	4,0—4,5
Кислород ( $T=70$ К)	1,53	Эпоксидные смолы	3,5—3,9
Метиловый спирт	31,20		

Таблица П.51. Акустические свойства жидкостей

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура $t$ , °С	Скорость звука $c$ , м/с	Температурный коэффициент $\Delta c/\Delta t$ , м/(с·°С)	Акустическое сопротивление $\rho \cdot c \cdot 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Адиабатная сжимаемость $\beta \cdot 10^9$ , Па <sup>-1</sup>
Азот	815	-197	869	-10	708	1,630
Аргон	1404	-186	837	-8,7	1175	1,020
Ацетон	792	20	1192	-5,5	944	0,890
Бензол	878	20	1326	-5,2	1164	0,649
Вода	997	25	1487	+2,5	1482	0,447
Вода (тяжелая)	1104	25	1399	+2,8	1544	0,463
Вода (морская)	1025	17	1510	—	1548	—
Водород	355	-253	1127	—	400	2,218
Гексан	654	20	1083	—	708	1,304
Гелий	125	-269,1	231,4	-21,5	28	12,790
Гептан	684	20	1162	—	795	1,080
Глицерин	1261	20	1923	-1,8	2425	0,214
Дихлорэтан	1253	20	1034	-4,6	1296	0,746
Керосин	825	35	1295	—	1068	0,745
Кислород	1143	-183,6	911	-8,3	1041	1,072
Метиловый спирт	792	20	1123	-3,3	889	1,000

Продолжение табл. П.51

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура $t$ , °С	Скорость звука $c$ , м/с	Температурный коэффициент $\Delta c/\Delta t$ , м/(с·°С)	Акустическое сопротивление $\rho \cdot c \cdot 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Адиабатная сжимаемость $\beta \cdot 10^9$ , Па <sup>-1</sup>
Октан	703	20	1197	—	841	0,993
Пентан	621	20	1008	—	626	1,584
Ртуть	13 595	20	1451	-0,46	19 726	0,034
Сероуглерод	1263	20	1158	-3,2	1462	0,590
Толуол	866	20	1328	—	1150	0,655
Трансформаторное масло	895	32,5	1425	-3,8	1275	0,558
Четыреххлористый углерод	1535	20	938	-3,0	1440	0,714
Этиловый спирт	789	20	1180	-3,6	931	0,911

Таблица П.52. Ослабление гамма-излучения веществами

Показатель	Вещество						
	Алюминий	Бетон	Вода	Воздух	Железо	Свинец	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2700	2300	1000	1,290	7850	11 300	
Коэффициент линейного ослабления, 10 <sup>3</sup> мм <sup>-1</sup>	Co <sup>60</sup>	14,9	13,2	6,3	0,007	42,0	66
	Cs <sup>137</sup>	20,2	17,2	8,6	0,021	57,6	122

Таблица П.53. Концентрации некоторых газов и пыли, максимально допустимые в атмосфере рабочих помещений в СССР

Газы, пары	мг/л	Газы, пары	мг/л
Акролеин	0,0007	Ацетон	0,2
Аммиак	0,02	Бензин (топливный)	0,1
Амилацетат	0,1	Бензол	0,02
Амилловый спирт	0,1	Бутиловый спирт	0,2
Анилин	0,003	Бутилацетат	0,2
Арсин, мышьяковистый водород	0,0003	Водород хлористый	0,01
Ацетальдегид	0,005	Водород цианистый	0,0003
		Винилацетат	0,01

Газы, пары	мг/л	Газы, пары	мг/л
Гексаметилендиамин	0,001	Сильван (2-метилфуран)	0,001
Гидразин и его производные	0,0001	Скипидар	0,3
Дивинил	0,1	Стирол	0,05
Диметиламин	0,001	Тетранитрометан	0,0003
Дихлорбензол	0,02	Тетрахлорпентаан	0,001
Дихлорэтан	0,01	Тетраэтилсвинец	0,000005
Дихлорэтилен	0,05	Толуол	0,05
Изопропиламинат	0,005	Толуилдендиизоцианат	0,0005
Йод	0,001	Тринитротолуол	0,001
Камфора	0,003	Углеводороды	0,3
Капролактан	0,003	Уксусная кислота	0,005
Керосин	0,3	Фенол	0,005
Ксилол	0,05	Фенилметилхлорсилан	0,001
Лигроин	0,3	Формальдегид	0,001
Метилацетат	0,1	Фосфор желтый	0,00003
Метилакрилат	0,02	Фосфористый водород	0,0001
Метиловый спирт	0,05	Фосген	0,0005
Метиленхлорид	0,05	Фториды	0,001
Монобутиламин	0,01	Фтористый водород	0,0005
Монометиламин	0,005	Фурфурол	0,01
Монохлорстирол	0,05	Хлор	0,001
Нафталин	0,02	Хлорбензол	0,05
Нитропроизводные бензола	0,003	Хлорметилтрихлорсилан	0,001
Нитрохлорпроизводные бензола	0,001	Хлорированный дифенилоксид	0,0005
Нитроэтан	0,03	Циклогексанон	0,01
Озон	0,0001	Четыреххлористый углерод	0,02
Окислы азота	0,005	Этилацетат	0,2
Окись углерода	0,02	Этиленоксид	0,001
Пиколины (смесь изомеров)	0,005	Этиловый спирт	1,0
Пиридин	0,005	Эпихлоргидрин	0,001
Пропилацетат	0,2		
Ртуть	0,00001		
Сероводород, сероуглерод	0,01		
Серная кислота, серный ангидрид	0,001		

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения.
2. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы.— 3-е изд. М.: Энергия, 1978. 702 с.
3. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1973. 190 с.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей.— 4-е изд. М.: Наука, 1969. 572 с.
5. ГОСТ 11.004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.
6. ГОСТ 11.006-74. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим.
7. ГОСТ 8.009-72. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения.
8. Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1972. 391 с.
9. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств.— 3-е изд. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.
10. ГОСТ 8.157-75. Шкалы температурные практические.
11. СТ СЭВ 1059-78. Термометры термоэлектрические рабочие. Общие технические требования.
12. Андреев А. А. Автоматические электронные показывающие, регистрирующие и регулирующие приборы.— 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1981. 261 с.
13. Гордов А. Н. Основы пирометрии.— 2-е изд. М.: Metallургия, 1971. 471 с.
14. Нормирующие преобразователи для работы с термометрами и термометрами сопротивления: Экспресс-информация СЦНТИ ОРГРЭС, 1974, № 82 (261). 51 с.
15. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества.— 3-е изд. Л.: Машиностроение, 1975. 775 с.
16. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными

сужающими устройствами: РД 50-213-80. М.: Изд-во стандартов, 1982. 320 с.

17. **Кремлевский П. П.** Измерение расхода многофазных потоков. Л.: Машиностроение, 1982. 214 с.

18. **Краснощеков Е. А., Сукомел А. С.** Задачник по теплопередаче. — 3-е изд. М.: Энергия, 1975. 278 с.

19. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. 708 с.

20. **Кантере В. М., Казаков А. В., Кулаков М. В.** Потенциметрические и титрометрические приборы. М.—Л.: Машиностроение, 1970. 303 с.

21. **Макаров А. К., Свердлин В. М.** Приборы для измерения рН. М.: Энергия, 1970. 92 с.

22. **Павленко В. А.** Газоанализаторы. М.—Л.: Машиностроение, 1965. 295 с.

23. **Туричин А. М.** Электрические измерения неэлектрических величин. — 4-е изд. М.: Энергия, 1966. 690 с.

24. **Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.** Теплопередача. — 3-е изд. М.: Энергия, 1975. 485 с.

25. **Краткий справочник химика.** — 7-е изд. М.: Химия, 1964. 559 с.

26. **Берлинер М. А.** Измерение влажности. — 2-е изд. М.: Энергия, 1973. 399 с.

27. **Иванова Г. М., Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергоатомиздат, 1984. 232 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### Часть первая. ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

Глава первая. Метрология . . . . .	5
Глава вторая. Измерение температуры . . . . .	18
Глава третья. Измерение давления . . . . .	43
Глава четвертая. Измерение уровня . . . . .	50
Глава пятая. Измерение расхода . . . . .	57
Глава шестая. Анализ состава сред . . . . .	66

### Часть вторая. РЕШЕНИЯ И ОТВЕТЫ

Глава первая. Метрология . . . . .	77
Глава вторая. Измерение температуры . . . . .	96
Глава третья. Измерение давления . . . . .	141
Глава четвертая. Измерение уровня . . . . .	153
Глава пятая. Измерение расхода . . . . .	165
Глава шестая. Анализ состава сред . . . . .	190

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1. Значения нормальной функции распределения

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt . . . . . 218$$

Таблица П.2. Значения коэффициентов  $t_p$  распределения Стьюдента и величины  $t_p / \sqrt{n}$  . . . . . 219

Таблица П.3. Значения критерия  $\chi^2$  при доверительной вероятности  $p$  . . . . . 220

Таблица П.4. Значения функции  $A(\omega^2)$  в зависимости от  $\omega^2$  . . . . . 221

Таблица П.5. Предельные значения нормированных отклонений опытного распределения от значений теоретического распределения для заданных доверительных вероятностей (по Колмогорову) . . . . . 221

Таблица П.6. Градуировочная характеристика медь-копелевой термопары для диапазона температур $-200 \div +100$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	222	температур $-200 \div +200$ °С градуировок 100 М и 10 М	276
Таблица П.7. Градуировочная характеристика медь—медноникелевой термопары, тип Т, в диапазоне температур $-200 \div +400$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	223	Таблица П.21. Градуировочная характеристика медных термопреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона температур $-50 \div +200$ °С градуировки 50 М	277
Таблица П.8. Градуировочная характеристика железо—медноникелевой термопары, тип J, в диапазоне температур $-200 \div +900$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	226	Таблица П.22. Градуировочная характеристика платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур $-200 \div +650$ °С градуировки 21 ( $R_0 = 46$ Ом)	279
Таблица П.9. Градуировочная характеристика хромель—копелевой термопары в диапазоне температур $-50 \div +800$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	230	Таблица П.23. Градуировочная характеристика медных термопреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона температур $-50 \div +180$ °С градуировки 23 ( $R_0 = 53$ Ом, $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$ 1/°С)	282
Таблица П.10. Градуировочная характеристика никельхром—медноникелевой термопары, тип Е, в диапазоне температур $-100 \div +900$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	234	Таблица П.24. Теплофизические и электрические свойства некоторых материалов, применяемых в термометрах сопротивления и термоэлектрических термометрах	284
Таблица П.11. Градуировочная характеристика никельхром—никельалюминиевой (хромель—алюмелевой) термопары, тип К, в диапазоне температур $-200 \div +1300$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	238	Таблица П.25. Коэффициенты теплового расширения термометрических жидкостей в стекле, $10^{-4}$ К <sup>-1</sup>	286
Таблица П.12. Градуировочная характеристика платинородий (10 %)—платиновой термопары, тип S, в диапазоне температур $0-1600$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	244	Таблица П.26. Монохроматические коэффициенты теплового излучения различных материалов при $\lambda = 0,65$ мкм	287
Таблица П.13. Градуировочная характеристика платинородий 30 %)—платинородиевой (6 %) термопары, тип В, в диапазоне температур $300 \div 1800$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	249	Таблица П.27. Коэффициенты полного теплового излучения (интегральный коэффициент теплового излучения) различных материалов	287
Таблица П.14. Градуировочная характеристика вольфрамрений (5 %) — вольфрамрениевой (20 %) термопары в диапазоне температур $0-2500$ °С (по СТ СЭВ 1059-78)	256	Таблица П.28. Температура кипения воды при атмосферном давлении ( $t = 0$ °С и $g = 9,80665$ м/с <sup>2</sup> )	289
Таблица П.15. Основные параметры термопреобразователей сопротивления	265	Таблица П.29. Поправки для приведения показаний барометра к нормальному ускорению свободного падения в зависимости от географической широты места наблюдения	290
Таблица П.16. Допустимое отклонение сопротивления $R_0$ термопреобразователя при 0 °С в процентах номинального значения	265	Таблица П.30. Поправки для приведения показаний барометра к нормальному ускорению свободного падения в зависимости от высоты барометра над уровнем моря (поправки имеют отрицательный знак)	291
Таблица П.17. Отношение сопротивления термопреобразователей при 100 °С к сопротивлению при 0 °С	265	Таблица П.31. Поправки для приведения показаний барометра к его показаниям при температуре 0 °С (поправки имеют отрицательный знак)	293
Таблица П.18. Градуировочные характеристики платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур $-260 \div +1100$ °С градуировок 100 П, 10 П и 1 П	266	Таблица П.32. Плотность смеси этилового спирта с водой в зависимости от температуры	294
Таблица П.19. Градуировочные характеристики платиновых термопреобразователей сопротивления типа ТСП для диапазона температур $-260 \div +1100$ °С градуировок 500 П, 50 П и 5 П	271	Таблица П.33. Плотность воды в зависимости от температуры и давления	295
Таблица П.20. Градуировочные характеристики медных термопреобразователей сопротивления типа ТСМ для диапазона		Таблица П.34. Плотность водяного пара в зависимости от температуры и давления	297
		Таблица П.35. Плотность водного раствора едкого натра (каустика)	302
		Таблица П.36. Плотность водного раствора едкого кали	302
		Таблица П.37. Плотность водного раствора соляной кислоты	302
		Таблица П.38. Плотность водного раствора азотной кислоты	302

Таблица П.39. Плотность водного раствора серной кислоты . . .	303
Таблица П.40. Давление паров некоторых жидкостей в зависимости от температуры . . . . .	303
Таблица П.41. Динамическая вязкость воды при атмосферном давлении и на линии насыщения . . . . .	304
Номограмма П.42 Динамическая вязкость водяного пара . . . . .	304
Таблица П.43. Плотность газов . . . . .	305
Номограмма П.44. Показатель адиабаты перегретого водяного пара . . . . .	305
Таблица П.45. Значения вспомогательной величины $C$ при различных значениях модуля диафрагмы $m$ и номинального перепада давления $\Delta p_n^*$ . . . . .	306
Таблица П.46. Значения вспомогательной величины $C$ при различных значениях модуля сопла $m$ и номинального перепада давления $\Delta p_n^*$ . . . . .	310
Таблица П.47. Поправочный множитель на расширение материала трубопровода и сужающего устройства . . . . .	314
Таблица П.48. Коэффициенты теплопроводности газов и жидкостей при нормальном давлении . . . . .	314
Таблица П.49. Относительная магнитная восприимчивость некоторых газов . . . . .	315
Таблица П.50. Относительные диэлектрические проницаемости некоторых веществ (при 0 °С и 101,325 кПа) . . . . .	315
Таблица П.51. Акустические свойства жидкостей . . . . .	316
Таблица П.52. Ослабление гамма-излучения веществами . . . . .	317
Таблица П.53. Концентрации некоторых газов и пыли, максимально допустимые в атмосфере рабочих помещений в СССР . . . . .	317
Список литературы . . . . .	319

Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С.

К 89 Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам: Учеб. пособие для вузов.— 2-е изд., доп. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 328 с. В пер.: 1 р. 10 к. 14000 экз.

Сборник составлен в соответствии с программой курса «Теплотехнические измерения и приборы» по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». Все задачи снабжены решениями. Каждой главе предшествует обобщенный теоретический материал, необходимый для правильного методологического подхода к решению задач. Первое издание вышло в 1978 г., второе дополнено справочными таблицами, необходимыми для решения задач.

Для студентов энергетических вузов. Книга может быть использована инженерами-теплоэнергетиками, как справочное пособие.

К 2303010000-019 155-85  
051(01)-85

ББК 31.32  
6П2.2

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

### ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ ВЫПУСТИТ В 1985 ГОДУ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:

Устройства теплотехнических измерений и автоматического управления электростанций/Н. Г. Барыкова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Мухин и др.; Под ред. Н. Г. Барыковой. — 2-е изд., перераб. — 26 л., ил. — (В пер.): 1 р. 60 к. 10 000 экз.

Описаны средства контроля и управления теплотехническими процессами. Приведены основные понятия электротехники и электроники, рассмотрены электрические и электронные схемы усиления и преобразования сигналов, применяемые в автоматических системах управления. Первое издание вышло в 1975 г., второе издание переработано с учетом изменений в области средств контроля и управления.

Является практическим пособием для программированного обучения рабочего персонала цехов автоматки и теплотехнических измерений тепловых электростанций как с помощью обучающих машин, так и без них.

План 1985 года № 178

Клюев А. С., Лебедев А. Т., Новиков С. И. Наладка автоматических систем регулирования барабанных паровых котлов. — 20 л., ил. — (В пер.): 1 р. 30 к. 12 000 экз.

Приведены теоретические основы расчета автоматических систем регулирования, знание которых необходимо для определения параметров настройки регуляторов и систем в целом. Рассмотрены методы определения статических и динамических характеристик систем регулирования питания, температуры перегретого пара, разрежения, расхода воздуха и тепловой нагрузки, а также статическая и динамическая настройки этих систем. Описана наладка систем регулирования, приведены примеры оформления технической документации. В приложении даны программы расчета на ЭВМ одноконтурных и каскадных автоматических систем регулирования.

Для инженерно-технического эксплуатационного персонала электростанций, работников ремонтных и наладочных организаций.

План 1985 г. № 160

Сафонов А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям: Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., перераб. — 15,5 л., ил. — (В пер.): 70 к. 15 000 экз.

Приведены задачи по вопросам энергетической теплофикации, теплового потребления и режимов отпуска теплоты, гидравлического и теплового расчетов, теплофикационного оборудования ТЭЦ, тепловых пунктов и сетей. Все задачи снабжены подробными решениями. В начале каждой главы приведены основные расчетные формулы. Предыдущее издание вышло в 1968 г. При подготовке третьего издания устаревшие задачи заменены новыми.

Для студентов теплотехнических специальностей энергетических вузов и факультетов.

План 1985 г. № 166

**Николай Дмитриевич Кузнецов**  
**Владимир Сергеевич Чистяков**

### **СБОРНИК ЗАДАЧ И ВОПРОСОВ ПО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ПРИБОРАМ**

Редактор **Н. И. Смирнов**  
Редактор издательства **Т. И. Мушинска**  
Художественный редактор **В. А. Гозак-Хозак**  
Технический редактор **О. Д. Кузнецова**  
Корректор **Л. С. Тимохова**  
ИБ № 891

Сдано в набор 15.06.84. Подписано в печать 30.01.85. Т-06116. Формат 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага типографская № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 17,22. Усл. кр.-отт. 17,22. Уч.-изд. л. 24,27. Тираж 14 000 экз. Заказ № 882. Цена 1 р. 10 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7