В.И. Назаров

Теплотехнические измерения и приборы

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов
учреждений высшего образования
по специальностям
«Паротурбинные установки атомных
электрических станций», «Тепловые электрические
станции», «Автоматизация и управление
теплоэнергетическими процессами»,
«Промышленная теплоэнергетика»*

Минск
«Вышэйшая школа»
2017

УДК 621.18.08(075.8)
ББК 31.32-5я73
Н19

Рецензенты: кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» (заведующий кафедрой кандидат технических наук *Д.С. Карпович*); заведующий кафедрой электротехники учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» кандидат технических наук, доцент *В.А. Ковалев*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Назаров, В. И.

Н19 Теплотехнические измерения и приборы : учеб. пособие / В. И. Назаров. – Минск : Вышэйшая школа, 2017. – 280 с. : ил.
ISBN 978-985-06-2801-5.

Приведены основы метрологии и использования измерительной техники, подробно изложены вопросы измерения температуры, давления и разности давлений, измерения расхода и уровня жидкостей. Рассмотрены принципы действия приборов (в том числе самых современных) для измерения вышеназванных параметров. Большое внимание уделено измерению состава и качества газов, различным типам газоанализаторов; представлены основы теории передачи информации средствами измерения. Каждый раздел завершают контрольные вопросы и задачи с примерами решения.

Для студентов дневной и заочной форм обучения по теплоэнергетическим специальностям.

УДК 621.18.08(075.8)
ББК 31.32-5я73

Учебное издание

Назаров Владимир Иванович

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебное пособие

Редактор *Е.В. Савицкая*. Художественный редактор *Т.В. Шабунько*. Технический редактор *Н.А. Лебедевич*. Корректор *Т.В. Кульнис*. Компьютерная верстка *А.Н. Бабенковой*.

Подписано в печать 05.10.2017. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «NewtonC». Офсетная печать. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 14,7. Тираж 300 экз. Заказ 1198.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013. Пр. Победителей, 11, 220004, Минск. e-mail: market@vshph.com http://vshph.com

Республиканское унитарное предприятие «СтройМедиаПроект». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/42 от 13.02.2014. Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, Минск.

ISBN 978-985-06-2801-5

© Назаров В.И., 2017
© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технологические процессы современных теплоэнергетических объектов требуют контроля большого числа параметров. Поэтому вопросам обеспечения надежного и достоверного контроля за ходом технологического процесса в настоящее время уделяется исключительное внимание. Без достоверных значений параметров и автоматического контроля за этими значениями нельзя управлять технологическими и теплоэнергетическими процессами и агрегатами, без средств измерения невозможна автоматизация. Особенно большое значение приобретают вопросы обеспечения высокой достоверности измеряемых параметров в связи с задачами комплексной автоматизации теплоэнергетических процессов. В учебном пособии изложены основные разделы по курсу «Теплотехнические измерения и приборы». Для закрепления теоретического материала в каждый раздел включены контрольные вопросы и задачи. Расположение материала соответствует структуре учебной программы изучаемого курса. Предлагаемые задачи и вопросы предусматривают знание основных принципов, методов и наиболее распространенных средств, применяемых для измерения теплотехнических параметров.

Учебное пособие разработано с учетом широкого распространения в последнее время микропроцессорной техники, расширения номенклатуры используемых средств измерений.

Издание необходимо для освоения курса «Теплотехнические измерения и приборы» и будет полезным при изучении курсов «Теплотехнические измерения и основы автоматического регулирования», «Контрольно-измерительные приборы и измерения», «Автоматизированные системы управления на ТЭС», «Автоматизация водоподготовки и водно-химических режимов».

Автор выражает благодарность О.Н. Малиновской за помощь в подготовке рукописи.

Автор

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЯХ

1.1. Понятие об измерении

Измерением называется процесс получения опытным путем числового соотношения между измеряемой величиной и некоторым значением, принятым за единицу сравнения.

Если y – измеряемая величина, a – единица измерения, а c – числовое значение измеряемой величины в принятой единице, то результат измерения величины y можно получить по следующей формуле:

$$y = ca. \tag{1.1}$$

Уравнение (1.1) является уравнением измерения.

По способу получения числового значения искомой величины измерения можно разделить на два вида – прямые и косвенные.

К ***прямым измерениям*** относятся те, результаты которых находят непосредственно из опытных данных. При этом значение искомой величины получается либо путем непосредственного сравнения ее с мерами, либо посредством измерительных приборов, градуированных в соответствующих единицах.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (например, гиря есть мера веса).

При прямых измерениях результат выражается непосредственно в тех же единицах, что и измеряемая величина:

$$y = z. \tag{1.2}$$

Здесь z – результат непосредственного измерения (например, измерение длины осуществляется метром, температуры – термометром, давления – манометром).

К ***косвенным измерениям*** относятся те, результат которых получается на основании прямых измерений нескольких других величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью.

В общем виде искомая величина y может быть определена некоторой функциональной зависимостью:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n). \tag{1.3}$$

Здесь $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – значения величин, измеряемых прямым способом (например, определение расхода газа по перепаду давления на сужающем устройстве).

Косвенные измерения применяются в технике и научных исследованиях в тех случаях, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно путем прямого измерения или когда косвенное измерение позволяет получить более точные результаты.

В зависимости от назначения и предъявляемой к ним точности измерения делятся на ***лабораторные*** и ***технические***.

Под **принципом измерения** понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

1.2. Понятия о средствах измерения

Средствами измерений называют технические средства, предназначенные для измерений и имеющие нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменной (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Основными видами средств измерений являются меры, измерительные приборы и преобразователи.

Измерительным прибором называют средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительным преобразователем называют техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измеряющее сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

1.3. Основные понятия о метрологических характеристиках средств измерений

1.3.1. Основные определения

Погрешность измерения – отклонение результата измерения, т.е. величины, найденной путем ее измерения, от истинного значения измеряемой физической величины.

Под *истинным значением физической величины* понимают такое ее значение, которое идеальным образом отразило бы в количественном

и качественном отношениях соответствующее свойство объекта измерения.

Погрешность измерения вызывается несовершенством средств измерений, непостоянством условий наблюдения и субъективными ошибками наблюдателя. На практике вместо истинного значения приближенно принимают действительное значение (находится экспериментально). Погрешности показаний средств измерений бывают абсолютные, относительные или приведенные.

Абсолютная погрешность (Δy) измерительного прибора определяется разностью между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta y = y_{\text{п}} - y, \tag{1.4}$$

где $y_{\text{п}}$ – показания прибора; y – действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность (ε) измерительного прибора есть отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению физической величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y}. \tag{1.5}$$

Приведенная погрешность (δ) измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению:

$$\delta = \frac{\Delta y}{y_{\text{н}}} \cdot 100\%, \tag{1.6}$$

где $y_{\text{н}}$ – нормирующее значение.

Нормирующее значение принимается равным:

- для средств измерений с односторонней шкалой – верхнему пределу измерений;
- для средств измерений с двусторонней шкалой – арифметической сумме модулей верхнего и нижнего пределов измерений;
- для средств измерений с безнулевой шкалой – разности верхнего и нижнего пределов, т.е. диапазону измерений.

Погрешности средств измерений разделяют также на основные и дополнительные.

Основной погрешностью средства измерений называется его погрешность при использовании в нормальных условиях. Под *пределом допускаемой основной погрешности* понимают наибольшую (без учета знака)

основную погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению. Такую погрешность называют допускаемой основной погрешностью.

Нормальными условиями применения средств измерений являются условия, при которых величины, называемые влияющими (температура воздуха, влажность, атмосферное давление и т.д.), имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. В качестве нормальных принимают следующие значения:

$$t_{\text{окр.воздуха}} = 20\ ^\circ\text{C};\ P_{\text{атм}} = 101{,}3\ \text{кПа};\ \text{относительная влажность} - 60\%.$$

Дополнительной называют погрешность, возникающую при отклонении влияющих величин за пределы, установленные для нормальных их значений.

В зависимости от характера причин, вызывающих появление погрешностей измерения, их принято разделять на случайные, систематические и грубые.

Под ***случайной погрешностью*** понимают погрешность измерения, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Она может быть количественно определена с помощью теории вероятностей и методов статистики.

Систематическая погрешность – это погрешность измерения, остающаяся постоянной (аддитивная составляющая) или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины (мультипликативная составляющая). Если систематическая погрешность известна, то она может быть исключена путем внесения *поправки*. Поправка равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком.

Грубой погрешностью является погрешность измерения, которая существенно превышает ожидаемую при данных условиях. Причина грубой погрешности – ошибки наблюдателя или неисправности устройств измерения.

Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называется **точностью измерения.**

Класс точности (K) средства измерений является обобщенной его характеристикой, связанной с пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также с другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Чаще всего класс точности принимают численно равным допускаемой приведенной основной погрешности, выражаемой в процентах:

$$K = \frac{\Delta y}{y_{\text{н}}} \cdot 100\% = \delta. \qquad (1.7)$$

Класс точности выбирается из ряда: $1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где $n = 1; 0; -1; -2$ и т.д.

Вариация показаний (V) – наибольшая полученная экспериментально разность между повторными показаниями прибора при повышении величины и при ее понижении в одной и той же точке шкалы:

$$V = \frac{y_б - y_м}{y_н} \cdot 100\%, \tag{1.8}$$

где $y_б$ – значение показаний прибора при повышении величины; $y_м$ – значение показаний прибора при понижении измеряемой величины.

Причинами вариаций показаний в приборах являются люфты, трение и т.д.

Чувствительность (S) средства измерения – отношение изменения сигнала на выходе (Δy) к вызывающему его изменению измеряемой величины (Δx):

- $S = \dfrac{\Delta y}{\Delta x}$ – для прибора с линейной характеристикой;
- $S = \lim\limits_{\Delta x \to 0} \left| \dfrac{\Delta y}{\Delta x} \right| = \dfrac{dy}{dx}$ – для прибора с нелинейной характеристикой.

Порог чувствительности прибора – наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать перемещение указателя.

1.3.2. Оценка погрешностей при технических измерениях

Точность результата *прямого измерения* с помощью измерительного прибора прямого действия можно найти из выражения

$$\delta_п = (\delta + \delta_{и.п} + \delta_м), \tag{1.9}$$

где δ – предел допускаемой основной погрешности применяемого измерительного прибора, %; $\delta_{и.п}$ – изменение показаний данного прибора, вызванное отклонением влияющих величин за пределы, установленные для нормальных значений или для нормальной области значений; $\delta_м$ – методическая погрешность, %.

Изменение показаний $\delta_{и.п}$ определяется по формуле

$$d_{и.п} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \delta_{и.пi}^2}, \tag{1.10}$$

где $\delta_{и.пi}$ – изменение показаний прибора, вызванное отклонением i-й влияющей величины, %.

Прямые технические измерения могут производиться измерительным комплектом, включающим как минимум два элемента. Для каждого элемента, входящего в измерительный комплект или канал, метрологические характеристики задаются в объеме, позволяющем найти предел допускаемой погрешности результата измерений. Суммирование пределов допускаемых погрешностей, особенно при большом числе последовательно включенных элементов, дает завышенную оценку предела погрешности, поскольку вероятность совпадения знаков погрешностей и их предельных значений у всех элементов системы невелика. В связи с этим допускаемая погрешность измерительной системы, состоящей из n элементов, оценивается как

$$\delta = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}.$$

Эта оценка справедлива, если погрешности независимы и носят случайный характер. Если в погрешности преобладает систематическая составляющая, то допускаемая погрешность измерительной системы

$$\delta = \pm 1{,}1\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}.$$

Оценка результата *косвенного измерения* при наименее благоприятном случае (максимальная абсолютная погрешность):

$$\Delta y = \left(\left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2\right| + \ldots + \left|\frac{\partial f}{\partial x_n}\Delta x_n\right|\right) = \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_i\right|, \qquad (1.11)$$

где Δx_i – абсолютная погрешность прямого однократного измерения величины x_i.

Тогда максимальную относительную погрешность можно оценить как

$$\delta_y = 100\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\Delta x_i\right|. \qquad (1.12)$$

Так как нельзя ожидать, что неблагоприятный случай будет часто встречаться, при оценке точности результата измерения целесообразно производить квадратичное суммирование:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2}; \qquad (1.13)$$

$$\delta_y = 10\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\Delta x_i\right)^2}. \qquad (1.14)$$

1.3.3. Оценка и учет случайных погрешностей

Случайные погрешности являются результатом воздействия большого числа факторов, не зависящих друг от друга. Каждый из этих факторов оказывает малое влияние на результаты измерения, однако суммарное действие всех факторов может быть значительным. К числу этих факторов относятся влияние температуры на те или иные части измерительного прибора, вибрация, обратимые изменения характеристик измерительного преобразователя, например в результате гистерезиса, трения в опорах измерительных приборов и т.п. Погрешности отдельных измерений имеют разброс как по величине, так и по знаку. Хотя эти погрешности точно определить нельзя, их можно оценить и охарактеризовать с помощью статистических методов. При многократных измерениях одной и той же величины и наличии случайных погрешностей результаты измерений также являются случайными величинами. Они будут полностью описаны с вероятностной точки зрения, если задана функция распределения вероятностей $F(x)$, характеризующая вероятность p появления тех или иных значений x: $F(x) = p[x_i \leqslant x]$. Функция $F(x)$ является монотонно нарастающей: $F(-\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$, $dF(x)/dx \geqslant 0$. Часто для характеристики случайной величины используется производная функция распределения $f(x) = dF(x)/dx$, называемая *плотностью распределения*.

В практике измерений при большом числе опытов ($n > 20$) используется *нормальный закон описания функции распределения*. Он представляет собой двухпараметрический закон, для которого определено аналитическое выражение плотности:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp(-(x - m_x)^2/(2\sigma^2)), \qquad (1.15)$$

где m_x – наиболее вероятное значение измеряемой величины X, которое оценивается как среднее арифметическое результатов n измерений x_1, x_2, x_3,..., x_n по формуле

$$m_x = (x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_n)/n = \sum_{i=1}^{n} x_i/n. \qquad (1.16)$$

Чем больше число измерений n, тем ближе m_x к истинному значению измеряемой величины. В формуле (1.15) σ является *средним квадратическим отклонением* случайной величины:

$$\sigma = \left\{ \left[(x_1 - m_x)^2 + \ldots + (x_n - m_x)^2 \right] / (n-1) \right\}^{0,5} = \\ = \left[\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - m_x)^2 / (n-1) \right]^{0,5}. \qquad (1.17)$$

Случайные погрешности для каждого результата измерения запишем в виде

$$\Delta_i = x_i - m_x. \qquad (1.18)$$

Они представляют центрированную случайную величину, для которой

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^{i=n} \Delta_i^{\,2} / (n-1) \right]^{0,5}, \; f(\Delta) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-\Delta^2/(2\sigma^2)}. \qquad (1.19)$$

Значения функции нормального распределения находят по выражению (1.19) численными методами (в табл. 1.1 приведены для значений аргумента $z = \Delta/\sigma$).

Таблица 1.1

Значения нормальной функции распределения

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
1	2	3	4	5	6	7	8
–0,00	0,5000	–1,30	0,0968	0,00	0,5000	1,30	0,9032
–0,05	0,4801	–1,35	0,0885	0,05	0,5199	1,35	0,9115
–0,10	0,4602	–1,40	0,0808	0,10	0,5398	1,40	0,9192
–0,15	0,4404	–1,45	0,0735	0,15	0,5596	1,45	0,9265
–0,20	0,4207	–1,50	0,0668	0,20	0,5793	1,50	0,9332
–0,25	0,4013	–1,55	0,0606	0,25	0,5987	1,55	0,9394
–0,30	0,3821	–1,60	0,0548	0,30	0,6179	1,60	0,9452
–0,35	0,3632	–1,65	0,0495	0,35	0,6368	1,65	0,9505
–0,40	0,3446	–1,70	0,0446	0,40	0,6554	1,70	0,9554
–0,45	0,3264	–1,75	0,0401	0,45	0,6736	1,75	0,9599
–0,50	0,3085	–1,80	0,0359	0,50	0,6915	1,80	0,9641
–0,55	0,2912	–1,85	0,0322	0,55	0,7088	1,85	0,9678
–0,60	0,2743	–1,90	0,0288	0,60	0,7257	1,90	0,9712
–0,65	0,2578	–1,95	0,0256	0,65	0,7422	1,95	0,9744

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
–0,70	0,2420	–2,00	0,0228	0,70	0,7580	2,00	0,9772
–0,75	0,2266	–2,20	0,0139	0,75	0,77734	2,20	0,9861
–0,80	0,2119	–2,40	0,0082	0,80	0,7881	2,40	0,9918
–0,85	0,1977	–2,60	0,0047	0,85	0,8023	2,60	0,9953
–0,90	0,1841	–2,80	0,0026	0,90	0,8159	2,80	0,9974
–0,95	0,1711	–3,00	0,0014	0,95	0,8289	3,00	0,9986
–1,00	0,1587	–3,20	0,0007	1,00	0,8413	3,20	0,9993
–1,05	0,1469	–3,40	0,0003	1,05	0,8531	3,40	0,9997
–1,10	0,1357	–3,60	0,0002	1,10	0,8643	3,60	0,9998
–1,15	0,1251	–3,80	0,0001	1,15	0,8749	3,80	0,9999
–1,20	0,1151			1,20	0,8849		
–1,25	0,1056			1,25	0,8944		

Согласно графикам нормального распределения (рис. 1.1, *а*)

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^{z} f(z)dz = 1/(\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{z} e^{-z^2/2}dz.$$

Графики плотности распределения $f(\Delta)$ (рис. 1.1, *б*) показывают, что увеличение σ приводит к снижению максимума плотности распределения и растягиванию функции, поскольку

$$1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\Delta^2/(2\sigma^2)}d\Delta = 1.$$

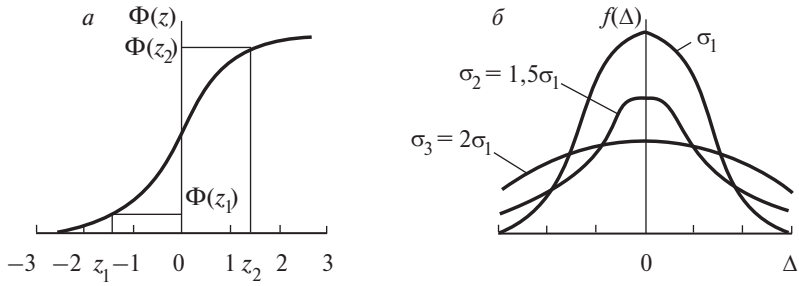

Рис. 1.1. Графики нормального распределения (*а*) и плотности распределения (*б*)

Для результатов измерений случайной величины x имеем $F(x) = F(\Delta) = \Phi(z)$. С использованием данных табл. 1.1, зная m_x и σ, можно ответить на вопросы:

- какова вероятность появления результата измерения меньше x_1;
- какова вероятность появления результата больше x_2;
- какова вероятность появления результата измерений в интервале $x_1 \ldots x_2$?

Если $z_1 = (x_1 - m_x) / \sigma$, $z_2 = (x_2 - m_x) / \sigma$, то $p[x \leqslant x_2] = \Phi(z_1)$, $p[x > x_2] = 1 - \Phi(z_2)$, $p[x_1 < x \leqslant x_2] = \Phi(z_2) - \Phi(z_1)$. При нормальном распределении случайных погрешностей 68 погрешностей из 100 ($p = 0{,}68$) по модулю меньше σ, 95 погрешностей ($p = 0{,}95$) меньше 2σ и только три погрешности из тысячи ($p = 0{,}997$) будут иметь значения по модулю больше 3σ. Интервал, в котором результаты измерений $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ находятся с заданной вероятностью, называется толерантным. Число, ограничивающее этот интервал, обозначают как t_p. В рассмотренном примере значения t_p равны соответственно 1, 2 и 3. В связи с малой вероятностью появления погрешностей больше 3σ ($p = 0{,}003$) погрешности по модулю указанной величины обычно относят к промахам и исключают из ряда результатов измерений.

Для среднего значения результатов измерений m_x среднее квадратичное значение отклонения от истинного значения $\sigma_{mx} = \sigma / \sqrt{n}$. Чем больше проведено измерений, тем ближе среднее значение к истинному значению измеряемой величины. Для характеристики отклонения среднего значения от истинного вводится понятие доверительного интервала. Доверительный интервал откладывается в обе стороны от среднего значения ряда измерений $m_x \pm \varepsilon_p$ и охватывает истинное значение X с заданной доверительной вероятностью p:

$$\varepsilon_p = t_p \, \sigma_{mx} = t_p \, \sigma / \sqrt{n}. \qquad (1.20)$$

Таким образом, с доверительной вероятностью p истинное значение измеряемой величины лежит в пределах доверительного интервала $m_x \pm \varepsilon_p$, но его нельзя точно указать.

Все рассмотренные выражения справедливы для большого числа однородных измерений, когда имеет место нормальный закон распределения погрешностей. В этом заключается особенность измерения случайных величин. При малом числе измерений для оценки доверительного интервала используется распределение Стьюдента, в котором значения t зависят не только от доверительной вероятности, но и от числа произведенных измерений. Значения $t_{p(n-1)}$ в функции вероятности и числа произведенных измерений $(n - 1)$ приведены в табл. 1.2. Таким образом, при числе измерений менее 20...30 для оценки дове-

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЯХ 4

1.1. Понятие об измерении 4
1.2. Понятия о средствах измерения 5
1.3. Основные понятия о метрологических характеристиках средств измерений 5
1.3.1. Основные определения 5
1.3.2. Оценка погрешностей при технических измерениях 8
1.3.3. Оценка и учет случайных погрешностей 10

Примеры решения задач 14
Вопросы и задания для самопроверки 15

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ 17

2.1. Термометры 20
2.1.1. Термометры расширения 20
2.1.2. Манометрические термометры 21
2.1.3. Термометры сопротивления 22
2.1.4. Термоэлектрические термометры 25
2.2. Новые конструкции термоэлектрических преобразователей 28
2.3. Пирометры 30
2.4. Тепловизоры 37
2.5. Особенности измерения температуры на АЭС 38

Примеры решения задач 40
Вопросы и задания для самопроверки 42

ГЛАВА 3. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ 45

3.1. Милливольтметры 45
3.2. Потенциометры 48
3.3. Измерительные мосты 52
3.3.1. Уравновешенные мосты 52
3.3.2. Неуравновешенные мосты 55
3.4. Логометры 57
3.5. Нормирующие преобразователи 58

3.5.1. Нормирующие преобразователи термо-ЭДС 58
3.5.2. Нормирующие преобразователи термометров сопротивления 61
3.6. Видеографические регистраторы 62

Примеры решения задач 63
Вопросы и задания для самопроверки 67

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ 69

4.1. Жидкостные приборы 71
4.2. Приборы с упругими чувствительными элементами 74
4.3. Тензометрические приборы 79
4.4. Современные конструкции датчиков давления 83
4.5. Особенности измерения давления на АЭС 85

Примеры решения задач 86
Вопросы и задания для самопроверки 88

ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА 90

5.1. Методы измерения расхода 90
5.2. Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве 90
5.3. Электромагнитные расходомеры 96
5.4. Ультразвуковые расходомеры 98
5.5. Вихревые расходомеры 102
5.6. Корреляционные расходомеры 105
5.7. Напорные трубки и расходомеры типа Annubar 106
5.8. Кориолисовы расходомеры 108
5.9. Неучитываемые погрешности измерения расхода среды 110
5.10. Особенности измерения расхода среды на АЭС 114

Примеры решения задач 115
Вопросы и задания для самопроверки 120

ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКИХ И СЫПУЧИХ ТЕЛ 121

6.1. Контактные уровнемеры 121
6.1.1. Поплавковые и буйковые уровнемеры 121
6.1.2. Волноводные уровнемеры 124
6.1.3. Емкостные уровнемеры 125
6.2. Бесконтактные уровнемеры 126
6.2.1. Акустические и ультразвуковые уровнемеры 126
6.2.2. Радарные уровнемеры 127

6.3. Измерение уровня воды в барабанном котле 130
6.4. Современные конструкции высокоточных интеллектуальных датчиков гидростатического давления (уровня) 133
6.5. Особенности измерения уровня среды на АЭС 134

Примеры решения задач 135
Вопросы и задания для самопроверки 138

ГЛАВА 7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ГАЗОВ 139

7.1. Термомагнитные газоанализаторы 139
7.2. Термокондуктометрические газоанализаторы 142
7.3. Оптико-акустические газоанализаторы 144
7.4. Электрохимический газоанализатор на твердом электролите 146
7.5. Термохимические газоанализаторы 148
7.6. Оптоэлектронные газоанализаторы 150

Примеры решения задач 152
Вопросы и задания для самопроверки 160

ГЛАВА 8. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЯ 161

8.1. Основы теории передачи информации 161
8.2. Системы дистанционной передачи информации 163
8.3. Цифровые системы передачи данных 166
8.3.1. RS-протоколы передачи данных 166
8.3.2. Протокол передачи данных HART 169

Примеры решения задач 173
Вопросы и задания для самопроверки 175

ПРИЛОЖЕНИЕ 176

ЛИТЕРАТУРА 277