

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,  
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ  
Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»

**Т.П. Михайленко, А.Ю. Лисица, Ю.В. Шахов**

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ**

Харьков «ХАИ» 2012

УДК 621.1.002.56(075.8)  
М69

Розглянуто основні методи та засоби вимірювань, які застосовуються при проведенні теплотехнічних експериментів. Висвітлено методику вимірювань температури, тиску, витрати та інших величин. Описано похибки вимірювань, способи їх зменшення, переваги та недоліки окремих методів і засобів вимірювань.

Для студентів теплотехнічних спеціальностей, інженерів і науковців, які займаються експериментальним дослідженням теплоенергетичних процесів в енерготехнологічних установках.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.Л. Шубенко;  
д-р техн. наук, проф. В.А. Потапов

**Михайленко, Т.П.**

М69 Теплотехнические измерения и приборы [Текст]: учеб. пособие / Т.П. Михайленко, А.Ю. Лисица, Ю.В. Шахов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 124 с.

Рассмотрены основные методы и средства измерений, применяемые при проведении теплотехнических экспериментов. Освещена методика измерения температуры, давления, расхода и других величин. Описаны погрешности измерения, способы их уменьшения, преимущества и недостатки отдельных методов и средств измерений.

Для студентов теплотехнических специальностей, инженеров и научных работников, занимающихся экспериментальным исследованием теплоэнергетических процессов в энерготехнологических установках.

Ил. 58. Табл. 5. Библиогр.: 9 назв.

**УДК 621.1.002.56(075.8)**

© Михайленко Т.П., Лисица А.Ю.,  
Шахов Ю.В., 2012

© Национальный аэрокосмический  
университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование — наиболее широко используемое средство получения новых научных результатов. Современный эксперимент сопровождается обычно использованием энергоемкого оборудования, дорогостоящей измерительной аппаратуры и ЭВМ. Следовательно, его постановка связана с затратой значительных материальных средств и ресурсов. Поэтому эксперимент должен быть тщательно подготовлен, чтобы получить необходимую информацию на достаточно качественном уровне в наиболее короткие сроки и с наименьшей затратой средств.

При экспериментальном исследовании обычно выявляется зависимость основных характеристик параметров явления от многих факторов. При достаточно широком диапазоне изменения этих факторов возникает необходимость проведения большого числа опытов при различном их сочетании. Математические методы планирования и анализа эксперимента позволяют выбрать для исследования минимальное число режимов, обеспечивающих получение надежной информации об изучаемом явлении.

Использование ЭВМ при подготовке и проведении экспериментов, а также при обработке и обобщении их результатов способствует повышению производительности труда исследователей. На основе ЭВМ создаются автоматизированные системы поиска и обработки научной информации, ставятся теоретические исследования с численным решением систем уравнений. ЭВМ используются для планирования эксперимента, обработки опытных данных и автоматизации экспериментальных исследований.

По результатам экспериментального исследования после их обработки получают информацию об изменении важнейших характеристик при различном сочетании влияющих факторов или краевых условий. Обработка этих результатов на основе теории подобия или теории локального моделирования с последующей корреляцией обобщенных параметров (чисел подобия) позволяет получить зависимости, пригодные не только для исследованных режимов, но и для режимов, подобных изученным. Такая обработка расширяет область применения полученных результатов.

Закономерности явлений, определяющие рабочий процесс объекта техники, которые выявлены на основе теоретических или экспериментальных исследований, могут быть использованы для оптимизации конструктивных и режимных параметров разрабатываемых реальных технических устройств.

Наиболее выгодное сочетание параметров может быть найдено и экспериментальным путем на основе теории оптимального планирования эксперимента. Для отыскания экстремума критерия оптимальности

конструкции разработан ряд методов, например метод наискорейшего спуска, симплексный метод и другие, которые реализуются с помощью ЭВМ.

Определяющая роль в решении задач обеспечения эффективности, надежности и безопасной эксплуатации энерготехнологического оборудования принадлежит информационно-измерительным системам. Базой любой современной информационно-измерительной системы являются измерительные устройства, позволяющие получать измерительную информацию о режимных параметрах теплоэнергетических процессов. Вопросы организации измерений, выбора средств измерений и измеряемых параметров тесно связаны со спецификой теплоэнергетических процессов и должны быть решены на стадии проектирования соответствующих энерготехнологических установок, т. е. инженер-теплоэнергетик, участвующий в проектировании энерготехнологической установки, должен иметь соответствующие знания методов измерения различных физических величин и навыки их применения.

Цель учебного пособия — отразить информацию по основным методам измерений и схемам измерительных устройств, а также методике обработки экспериментальных данных.

Объекты изучения — датчики, преобразователи и приборы для измерения давления, температуры, расхода, плотности, теплопроводности и других теплофизических свойств жидкостей и газов.

Предметом изучения являются: методы измерения; принципы действия датчиков, преобразователей и приборов для измерения теплофизических свойств жидкостей и газов; обработка результатов измерений; анализ и выбор датчиков и приборов для использования на конкретном объекте.

## Глава 1

### ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

#### 1.1. Виды, методы и средства измерений

**Измерение** — это опытное определение численного значения физической величины в принятых единицах с помощью специальных технических средств. Под результатом измерения понимается численное значение физической величины в принятых единицах, полученное путем измерения.

Технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, называют **средствами измерений**.

Основными видами средств измерения являются:

- меры;
- измерительные приборы;
- измерительные преобразователи;
- измерительные устройства;
- информационные измерительные системы.

**Мера** — это средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины определенного размера, выраженного в принятых единицах. Например, гиря — мера массы.

**Измерительный прибор** — средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия.

По *характеру показаний* различают такие измерительные приборы:

- показывающие — допускающие только отсчитывание показаний;
- регистрирующие — если в приборах предусмотрена возможность регистрации показаний, *к примеру, самописец*.

По *форме представления показаний* измерительные приборы подразделяют на следующие:

- аналоговые приборы, представляющие информацию в виде непрерывной функции измеряемой величины;
- цифровые приборы, представляющие информацию в виде отдельных дискретных сигналов в цифровой форме.

**Измерительный преобразователь** — это средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для обработки, хранения, дальнейшего преобразования или передачи, но не доступной для непосредственного восприятия. *Измерительные преобразователи в зависимости от их назначения и выполняемых функций подразделяют на первичные, промежуточные, передающие, масштабные и др.*

**Измерительное устройство** — это средство измерения,

включающее в себя измерительные приборы и измерительные преобразователи.

**Информационная измерительная система** — средство измерения с автоматическими многоканальными измерениями и контролем, а в некоторых случаях и с обработкой информации по заданному алгоритму.

**Средства измерения** в зависимости от их назначения разделяют на три категории:

- рабочие;
- образцовые;
- эталоны.

*Рабочими* называют средства измерения, предназначенные для повседневных измерений. Их подразделяют, в свою очередь, на лабораторные (средства измерения повышенной точности) и технические.

*Образцовые* средства измерений предназначены для поверки и градуировки рабочих мер, измерительных приборов и преобразователей.

*Эталон* используют для воспроизводства и хранения единиц измерения с наивысшей точностью, достижимой на данном уровне развития науки и техники.

**Измерения** в зависимости от назначения и предъявляемых требований к точности результатов подразделяют на такие:

- лабораторные;
- технические.

*Лабораторные измерения* отличаются повышенной точностью и производятся при выполнении научно-исследовательских работ, а также при поверках измерительных приборов.

*Технические измерения* обладают относительно невысокой точностью и выполняются для контроля работы различных устройств.

По способу получения численного значения искомой величины измерения подразделяют на три вида:

- прямые;
- косвенные;
- совместные или совокупные.

При **прямых** измерениях результат получают непосредственно по показаниям средств измерения. (*Измерение длины линейкой, температуры — термометром, давления — манометром и т.д.*)

При **косвенных** измерениях результат находят на основании известной зависимости между определяемой величиной и некоторыми другими величинами, которые, в свою очередь, находят с помощью прямых, а иногда и косвенных, совместных или совокупных измерений. (*Определение расхода жидкости с помощью сужающегося устройства.*)

При **совместных** и **совокупных** измерениях искомые величины определяют в результате решения системы уравнений. При этом числовые коэффициенты и некоторые члены уравнений, входящие в эту систему, находят в результате прямых или косвенных измерений.

Отличие между совместными и совокупными измерениями заключается в том, что в первом случае при определении искомой величины измеряют несколько других разноименных величин, а во втором — несколько других одноименных величин.

Примером совместных измерений является определение коэффициентов, характеризующих зависимость сопротивления резистора от температуры. Значения этих коэффициентов находят по результатам измерений сопротивления и температуры, выполненных при различных значениях температуры резистора. Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь из набора путем сравнения массы различных сочетаний гирь этого набора с известной массой одной или нескольких гирь другого набора.

Любое измерение базируется на каких-либо физических явлениях. Совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, называется **принципом измерения**, а набор приемов использования средств и принципов измерения — **метод измерений**.

Различают два основных метода измерения:

- метод непосредственной оценки;
- метод сравнения с мерой.

**Метод непосредственной оценки** заключается в определении искомой величины по отсчетному устройству измерительного прибора.

**Метод сравнения с мерой** состоит в том, что измеряемую величину сопоставляют со значением, воспроизводимым соответствующей мерой.

Сравнение может быть непосредственным (метод противопоставления) или через другие величины, однозначно связанные с измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой (метод опосредованного сравнения или метод замещения).

По способу проведения измерения метод сравнения с мерой подразделяют на такие:

- нулевой;
- разностный (дифференциальный);
- метод совпадения.

**Нулевой метод** заключается в том, что эффект воздействия измеряемой величины полностью уравнивается эффектом воздействия известной величины (*измерение массы тела на рычажных весах с уравниванием ее калиброванными грузами*).

В **разностном методе** полного уравнивания не происходит, и разность между сравниваемыми величинами оценивается измерительным прибором. Значение измеряемой величины определяется не только значением, воспроизводимым мерой, но и показаниями прибора.

**Метод совпадений** состоит в том, что уровень сигнала, связанного со значением искомой величины, сопоставляется с уровнем такого же сигнала, определяемого соответствующей мерой. По степени совпадения уровней этих сигналов судят о значении измеряемой величины.

## 1.2. Метрологические характеристики средств измерений

Для того чтобы определить погрешность измерения, технические средства, с помощью которых оно выполняется, должны иметь нормированные метрологические характеристики (характеристики, позволяющие судить о точности результатов измерения).

**Метрологическими характеристиками** называют характеристики средств измерений, которые дают возможность судить об их пригодности для измерения в определенном диапазоне с определенной точностью.

1. Одной из основных метрологических характеристик средств измерения является **диапазон измерений**, для измерительных преобразователей — **диапазон преобразования**.

Внутри диапазона измерения связь между сигналами на выходе  $y$  и входе  $x$  средств измерения определяется функциональной зависимостью

$$y = f(x),$$

называемой **статической характеристикой** средств измерения.

Статическая характеристика  $y$  показывающих приборов зафиксирована шкалой, поэтому иногда ее называют **уравнением шкалы прибора**.

Чувствительностью средства измерения называется величина  $S$ , определяемая по соотношению

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx}.$$

2. Важнейшими метрологическими характеристиками являются **погрешности средств измерений** и нормы для них.

Часто оперируют **приведенными погрешностями**, которые представляют собой отношение абсолютной погрешности средства измерений к диапазону его измерения или преобразования.

Для всех средств измерения устанавливаются пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей.

**Пределом допускаемой основной погрешности** называют наибольшую (без учета знака) основную погрешность средства измерений, при которой оно еще будет признано годным и допущено к эксплуатации.

**Пределом допускаемой дополнительной погрешности** называют наибольшую (без учета знака) дополнительную погрешность средства измерения, при которой оно еще будет признано годным и допущено к эксплуатации.

Средствам измерений присваиваются **классы точности**, условное обозначение которых совпадает с выраженным в процентах значением

приведенной допускаемой основной погрешности. Класс точности обозначается числом из ряда  $k = (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6) \cdot 10^n$ , где  $n=1; 0; -1; -2 \dots$ .

Средства измерений, имеющие несколько диапазонов измерения, могут иметь несколько классов точности.

**3.** Важными метрологическими характеристиками средств измерения являются **порог чувствительности измерительного прибора** или преобразователя и **вариация**.

**Порог чувствительности** — наименьшее изменение значения измеряемой величины, способное вызвать малейшее доступное для регистрации изменение показания измерительного прибора или выходного сигнала преобразователя.

**Вариация** измерительного прибора или преобразователя — наибольшая разность в показаниях прибора или наибольшая разность между выходными сигналами преобразователя, соответствующая одному и тому же значению входного сигнала, но полученная в одном случае при плавном увеличении, а в другом — при плавном уменьшении значения измеряемой величины.

Рассмотренные выше метрологические характеристики средств измерений позволяют оценить их пригодность для измерений величин, не меняющихся во времени (в статических условиях). В исследовательской практике очень часто возникает необходимость в измерении (или преобразовании) величин, меняющихся во времени. Результаты таких измерений искажены дополнительной погрешностью, которая возникает только при измерении меняющихся во времени величин (в динамических условиях) и называется динамической погрешностью.

**4. Динамическая погрешность** — разность между погрешностью средств измерений в динамических условиях и соответствующей погрешностью в статических условиях.

Причиной появления динамической погрешности является инертность средств измерения. Вследствие этой инертности происходит запаздывание в показаниях или регистрации мгновенных значений измеряемой величины.

Мгновенное значение динамической погрешности  $\Delta$  определяется выражением  $\Delta = y_0 - y$ , где  $y$  — показание идеального прибора, у которого отсутствует динамическая погрешность;  $y_0$  — показание реального прибора.

Характер динамического преобразования сигнала описывается линейным дифференциальным выражением вида

$$a_n \frac{d^n y}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{d\tau} + a_0 y =$$

$$= b_m \frac{d^m x}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{d\tau} + b_0 y, \quad (1.1)$$

где  $\tau$  — время;  $x$ ,  $y$  — функции, описывающие изменение во времени входного и выходного сигналов.

Порядок дифференциального уравнения (1.1) и значения коэффициентов  $a$  и  $b$  разные для различных средств измерений и различных условий их применения. Дифференциальное уравнение полностью характеризует свойства средств измерений, если определены значения входящих в него коэффициентов.

В результате интегрального преобразования дифференциальное уравнение может быть сведено к алгебраическому уравнению, содержащему комплексные переменные. Соотношение между комплексными переменными, характеризующими выходной и входной сигналы, определяется **передаточной функцией**.

Рассмотрим случай, когда при  $x = 0$  выполняются такие условия:

$$\frac{d^n y}{d\tau^n} = \frac{d^{n-1} y}{d\tau^{n-1}} = \dots = y = \frac{d^m x}{d\tau^m} = \frac{d^{m-1} x}{d\tau^{m-1}} = \dots = x = 0. \quad (1.2)$$

Применяя к уравнению (1.1) при начальных условиях (1.2) интегральное преобразование Лапласа, получаем:

$$A(s)Y(s) = B(s)X(s). \quad (1.3)$$

Здесь  $X(s)$ ,  $Y(s)$  — изображения функций  $X$  и  $Y$  соответственно;  $s$  — некоторая комплексная величина:  $s = \xi + i\eta$ , где  $i = \sqrt{-1}$ .

Тогда комплексные величины  $A(s)$ ,  $B(s)$  определяются равенствами

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0,$$

$$B(s) = b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0.$$

Запишем уравнение (1.3) в другом виде:

$$Y(s) = W(s)X(s), \quad (1.4)$$

где  $W(s)$  — передаточная функция.

**Передаточная функция** определяет характер динамического преобразования сигнала и полностью характеризует динамические свойства линейных средств измерений. Использование передаточной функции удобно в тех случаях, когда вид дифференциального уравнения не меняется в

зависимости от условий применения средств измерений, а постоянные коэффициенты, входящие в уравнение (1.1), от этих условий зависят.

Кроме дифференциального уравнения и передаточной функции при известном изменении сигнала на входе изменение сигнала на выходе можно полностью определить совокупностью **частотных характеристик**, включающей в себя амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики. Частотные характеристики описывают реакцию средств измерений на гармонические воздействия.

**Амплитудно-частотной характеристикой** (АЧХ) средства измерений  $A^*(\omega)$  называется зависимость отношения амплитуд выходного  $A_y$  и входного  $A_x$  сигналов от частоты колебаний  $\omega$ :

$$A^*(\omega) = \frac{A_y(\omega)}{A_x(\omega)}.$$

**Фазочастотной характеристикой** (ФЧХ) средства измерений  $\varphi(\omega)$  называется зависимость сдвига по фазе  $\varphi$  между входными и выходными колебаниями от частоты колебаний:

$$\varphi(\omega) = \varphi_y(\omega) - \varphi_x(\omega),$$

где  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  — начальная фаза входных и выходных колебаний.

Частотные характеристики могут быть получены экспериментальным и теоретическим способом.

**При экспериментальном определении частотных характеристик** на вход средства измерений подаются колебания фиксированной амплитуды и различной частоты. Фиксируя амплитуды выходного сигнала и сдвиг по фазе между входным и выходным сигналами для различных частот, получают искомые характеристики.

**Теоретическое определение частотных характеристик** основано на использовании передаточной функции. Применяя подстановку  $S = i\omega$ , получаем

$$W(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)}.$$

Выражение, определяющее комплексную величину  $W(i\omega)$ , записанную в показательной форме, имеет вид

$$W(i\omega) = A^*(\omega)e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1.5)$$

Как следует из выражения (1.5), величина  $W(i\omega)$  объединяет обе рассмотренные выше характеристики: амплитудно-частотную характеристику  $A^*(\omega)$  и фазочастотную характеристику  $\varphi(\omega)$ .

Зависимость  $W(i\omega) = \varphi(\omega)$  называется **комплексной частотной характеристикой** или **амплитудно-фазовой характеристикой** средств измерений.

Типичный вид амплитудно-фазовой характеристики на комплексной плоскости  $\xi, \eta$  представлен на рис. 1.1.

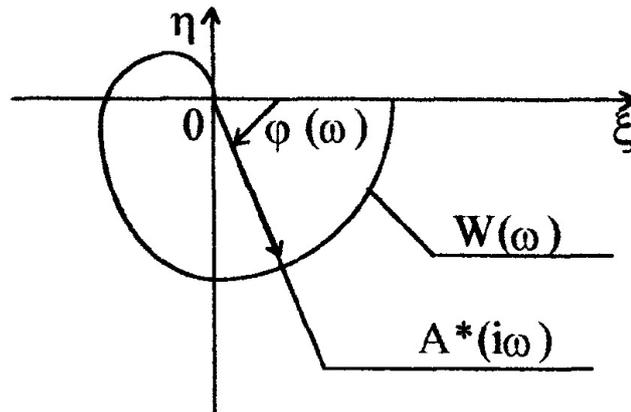


Рис. 1.1. Амплитудно-фазовая характеристика средств измерений

С помощью частотных характеристик можно не только определить динамическую погрешность, но и в целом оценить пригодность средств измерений для решения той или иной конкретной задачи. В частности, с помощью амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик можно установить область нормальной работы средств измерений, рабочую полосу пропускания частот.

**Рабочей полосой пропускания частот** называют диапазон частот, в котором отклонение параметров амплитудно-частотной характеристики  $A^*(\omega)$  и фазочастотной характеристики  $\varphi(\omega)$  от их значений, соответствующих  $\omega = 0$ , не превышает допустимых значений.

Для оценки динамических свойств средств измерений применяют также параметры, определяемые по переходным характеристикам.

**Переходной характеристикой** называют реакцию средств измерений на единичное ступенчатое воздействие. Переходная характеристика с апериодической (а) и колебательной (б) формой процесса представлена на рис. 1.2.

**Динамические свойства средств измерений** характеризуются следующими параметрами:

1) **временем запаздывания**  $\tau_H$  — отрезком времени от момента подачи сигнала  $t_0$  до начала заметного изменения выходной величины;

- 2) *постоянной времени*  $\tau_{п}$ , определяемой как отрезок времени под касательной, проведенной в точке перегиба переходной характеристики;
- 3) *временем переходного процесса*  $T$ , т.е. временем от момента подачи входного сигнала до момента, когда выходная величина достигнет значения, отличающегося от стационарного не более чем на величину  $\delta$ ;
- 4) *периодом колебаний*  $\tau_{к}$  (для колебательной формы процесса);
- 5) *первым выбросом выходной величины*, представляющим собой отношение амплитуды  $A_1$  к диапазону измерения;
- 6) *степенью затухания*  $\psi = 1 - \frac{A_3}{A_1}$ .

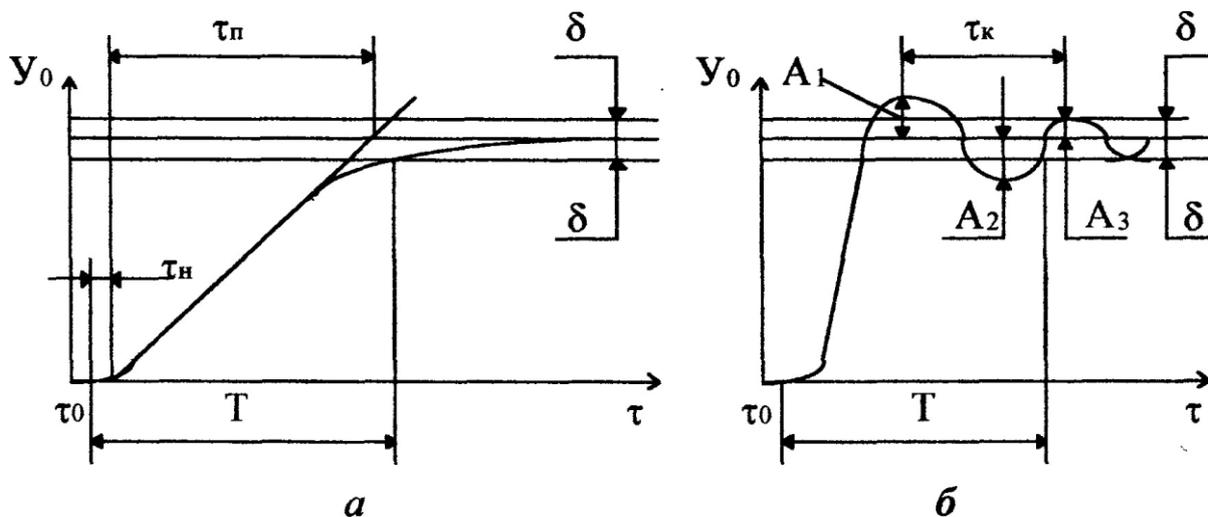


Рис. 1.2. Переходные характеристики средств измерений:

а — аperiodическая форма процесса; б — колебательная форма процесса

В отдельности эти параметры не дают полной информации о динамических свойствах средств измерений, поэтому при изучении вопроса о возможности применения того или иного средства измерения перечень динамических параметров следует выбирать с учетом назначения и условий применения средств измерений.

### 1.3. Электрические методы измерения физических величин

Для измерения физической величины неэлектрической природы электрическим методом ее необходимо преобразовать в электрическую величину.

Преобразователи физических величин в электрические подразделяются на такие группы:

1. **Генераторные** — в которых напряжение возникает при измерении. Они не требуют внешних источников напряжения. К ним относятся термоэлектрические, пьезоэлектрические, индукционные преобразователи.

2. **Параметрические** — для работы которых требуются внешние источники напряжения. К ним относят реостатные, терморезисторные, тензорезисторные, емкостные, индуктивные преобразователи.

В **термоэлектрических преобразователях** осуществляется преобразование температуры в термоэлектродвижущую силу (термоЭДС); их действие основано на термоэлектрических явлениях, открытых Зеебеком (1821 г.).

Термопара состоит из двух разнородных проводников и измеряет разность температур между холодным и горячим спаем.

Принцип действия **пьезоэлектрического преобразователя** основан на пьезоэлектрическом эффекте — при приложении механического усилия к кристаллу пьезоэлектрика на его гранях возникает электрический заряд, пропорциональный этому усилию.

Эти преобразователи применяются для измерения переменных во времени сил (до 10 кН) и давлений (до 100 МПа) в диапазоне частот от 0,5 Гц до 100 кГц.

**Достоинства:** малые габариты, простота конструкции, возможность измерения параметров быстро изменяющихся процессов.

**Индукционный преобразователь** в большинстве случаев представляет собой сочетание постоянного магнита и подвижной катушки (рис.1.3).



ЭДС на выходе

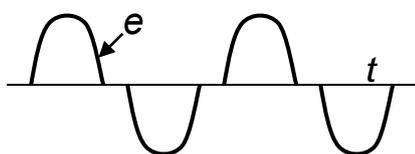


Рис. 1.3. Индукционный преобразователь

Под действием входной величины (линейного или углового перемещения) катушка меняет положение в магнитном поле, вследствие чего в ней индуцируется ЭДС.

**Достоинства:** высокая точность (погрешность 0,2...0,5%), хорошая линейность, высокая чувствительность позволяют измерять малые перемещения, скорости и ускорения, изменяющиеся с частотой 15...30 кГц.

Преобразователи с вращающейся катушкой широко используются в приборах для измерения скорости вращения — тахометрах.

**Реостатный преобразователь** (рис. 1.4) представляет собой реостат особой конструкции, движок которого перемещается под воздействием входной измеряемой величины (линейное или угловое перемещение); при этом изменяется сопротивление  $R=f(x)$ .

**Достоинства:** наличие широкой возможности для функционального преобразования подбором зависимости  $R=f(x)$  изменяя шаг намотки.

Действие **терморезисторных преобразователей** основано на зависимости активного электрического сопротивления проводника от его температуры. Терморезистор позволяет преобразовать изменение входной величины (температуры) в изменение выходной величины (электрического сопротивления).

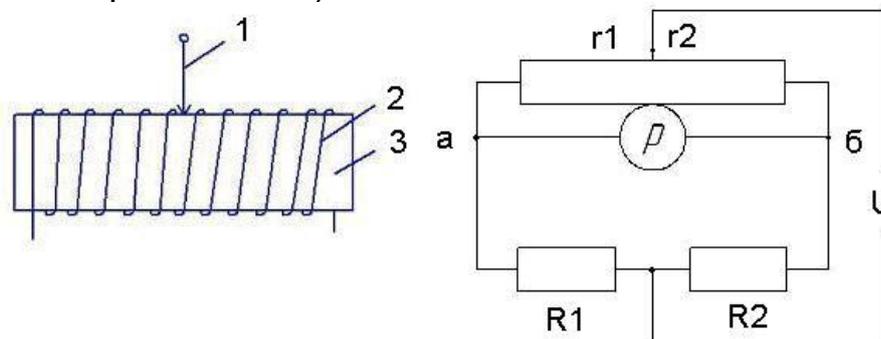


Рис. 1.4. Реостатный преобразователь

**Тензочувствительный преобразователь (тензорезистор)** используется для преобразования входной величины — относительной деформации упругого элемента в выходную величину — относительное изменение электрического сопротивления преобразователя. Схема такого преобразователя представлена на рис. 1.5.

Тензорезисторы бывают **проволочные, фольговые** и **полупроводниковые**. Наиболее распространенным является проволочный тензорезистор. Он представляет собой зигзагообразную решетку из тонкой проволоки (диаметром 0,02 — 0,03 мм) с контактами из металлической фольги.

Тензорезисторы применяются для измерения быстроизменяющихся упругих деформаций с частотой порядка десятков килогерц.

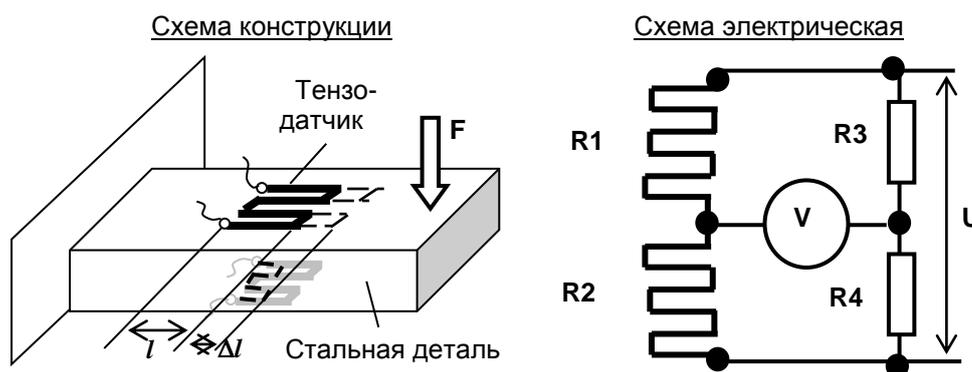


Рис. 1.5. Тензочувствительный преобразователь

Действие **емкостного преобразователя** основано на изменении электрической емкости под влиянием входной величины. Электрическая емкость  $C$  между двумя параллельными плоскими проводящими пластинами площадью  $s$ , разделенными малым зазором  $\delta$ , приблизительно

выражается формулой  $C = \frac{\epsilon S}{\delta}$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды между пластинами. Изменение любой величины —  $\epsilon$ ,  $S$  или  $\delta$  — под действием входной величины преобразуется в изменение выходной величины — электрической емкости  $C$ .

*Используются для измерения малых и больших линейных и угловых перемещений, для измерения и контроля уровня жидкостей, влажности твердых и сыпучих материалов, толщины изоляционных материалов и т. п.*

**Индуктивный преобразователь** представляет собой катушку индуктивности (рис.1.6). Входная величина  $x$  — линейное (или угловое) перемещение — оказывает воздействие на параметры катушки, от которых зависит ее индуктивность.

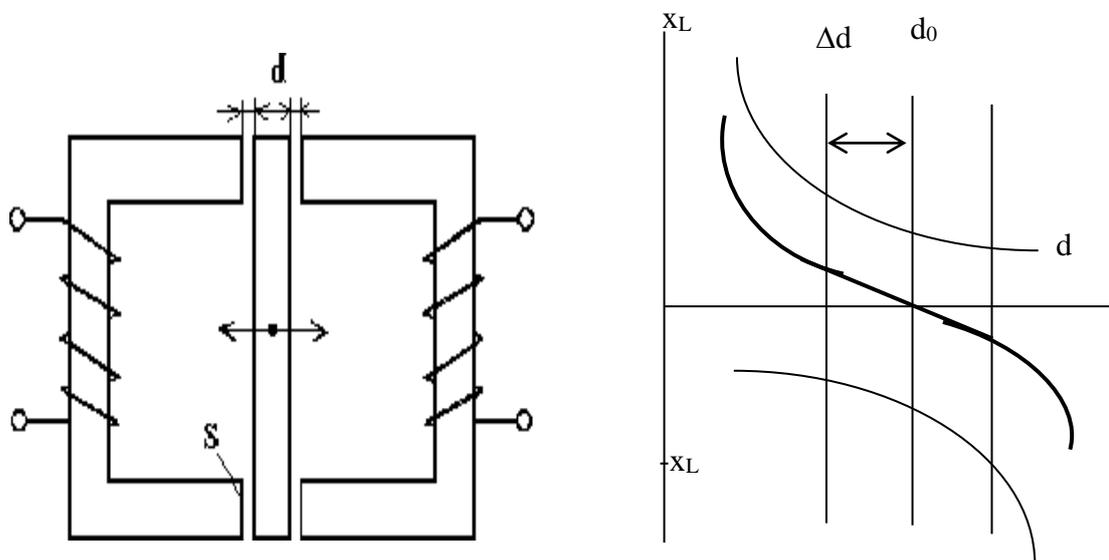


Рис. 1.6. Индуктивный преобразователь

#### 1.4. Измерение основных электрических величин

Для измерения электрических величин используются методы как непосредственной оценки, так и сравнения. Измеряется сила тока, напряжение, индуктивность, частота. Для этого используются амперметры, вольтметры, потенциометры и т.д.

В цифровых измерительных приборах и преобразователях осуществляется преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную форму — в код (преобразователь аналог — код), одной дискретной величины в другую (преобразователь код — код) и дискретной величины в непрерывную (преобразователь код — аналог). Преобразованная в соответствующую кодовую форму измерительная информация передается в отсчетное или регистрирующее устройство либо для ввода в ЭВМ или информационно-измерительную систему.

## Глава 2

### ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 2.1. Общие сведения о погрешностях эксперимента

Под **точностью** эксперимента понимают его качество, отражающее близость полученных результатов к истинному значению искомой величины. Точность эксперимента тем выше, чем меньше его погрешность.

Разность между результатом эксперимента  $x$  и истинным значением искомой величины  $X$  называют **абсолютной погрешностью эксперимента**:

$$\Delta = x - X. \quad (2.1)$$

Погрешность, выраженную в долях или процентах действительного значения искомой величины, называют **относительной погрешностью**:

$$\delta = \Delta / X. \quad (2.2)$$

В зависимости от свойств погрешности подразделяют на случайные, систематические, грубые.

**Случайной** называется погрешность, обусловленная действием ряда причин, меняющихся случайным образом от эксперимента к эксперименту. На нее невозможно оказать влияние. В то же время в результате большого числа экспериментов могут быть выявлены некоторые закономерности, присущие этому типу погрешностей.

**Систематической** называется погрешность, которая при повторных экспериментах остается постоянной или изменяется закономерным образом. В зависимости от источника возникновения различают следующие разновидности систематических погрешностей:

- методические;
- инструментальные;
- субъективные.

Методические погрешности обусловлены приближенностью математического описания исследуемого явления и возможной приближенностью методов их решения, возможным несоответствием

условий проведения измерений тем условиям, для которых эти соотношения получены, и т. д.

Методические погрешности не зависят от точности применяемых при проведении эксперимента средств измерения.

Инструментальные погрешности определяются точностью используемых средств измерения. Различают:

— основную погрешность средств измерения — погрешность в условиях, принятых за нормальные;

— дополнительные погрешности, вызванные отклонением влияющих параметров (давления, температуры, влажности окружающей среды и т. д.) за пределы области нормальных значений.

Субъективные погрешности обусловлены индивидуальными особенностями человека, выполняющего измерения в процессе эксперимента.

**Грубой** называется погрешность эксперимента, существенно превышающая погрешность, оправданную характером и условиями его проведения, а также свойствами используемых средств измерения.

## 2.2. Оценка погрешности прямых измерений

### **Инструментальная погрешность**

Методика определения погрешности прибора приводится в его паспорте. Для характеристики большинства приборов часто используют понятие приведенной погрешности, равной абсолютной погрешности в процентах диапазона шкалы измерений. По приведенной погрешности приборы разделяются на классы точности. Класс точности указан на панели прибора и может принимать следующий ряд значений: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 — прецизионные; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 — технические приборы.

Наибольшая абсолютная инструментальная погрешность

$$\Delta_{и} = K \cdot A / 100, \quad (2.3)$$

где  $K$  — класс точности;  $A$  — наибольшее значение шкалы прибора.

Из формулы (2.3) следует, что относительная погрешность будет минимальной, если измеряемая величина дает отброс стрелки индикатора на всю шкалу. Поэтому для оптимального использования прибора его предел выбирают так, чтобы значение измеряемой величины попадало в конец шкалы.

В метрологии кроме формулы (2.3) используются и другие, более сложные определения инструментальной погрешности и связанного с ней класса точности, особенно для приборов с неравномерными шкалами.

Инструментальная погрешность приборов для измерения линейных размеров указана на самом приборе в виде абсолютной погрешности или в виде цены деления. Если на приборе не указан ни класс точности, ни

абсолютная погрешность, то она принимается равной половине цены наименьшего деления.

Для приборов с цифровым отсчетом измеряемых величин метод вычисления погрешности приводится в паспортных данных прибора. Если эти данные отсутствуют, то в качестве абсолютной погрешности принимается значение, равное половине последнего цифрового разряда индикатора.

Инструментальную погрешность невозможно уменьшить статистической обработкой отсчетов.

Примеры считывания со шкал приборов показаны на рис. 2.1. — 2.6.

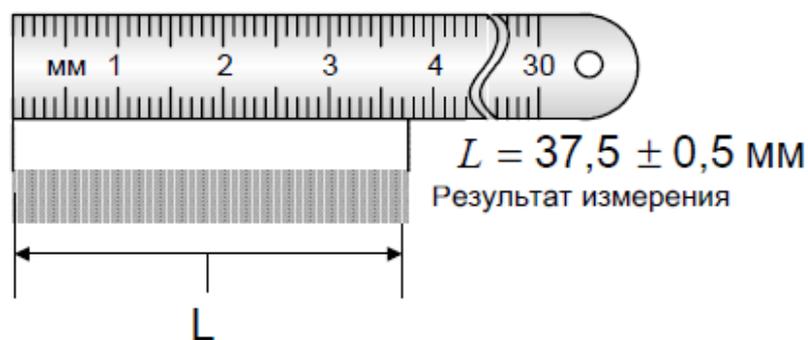


Рис. 2.1. Измерительная линейка

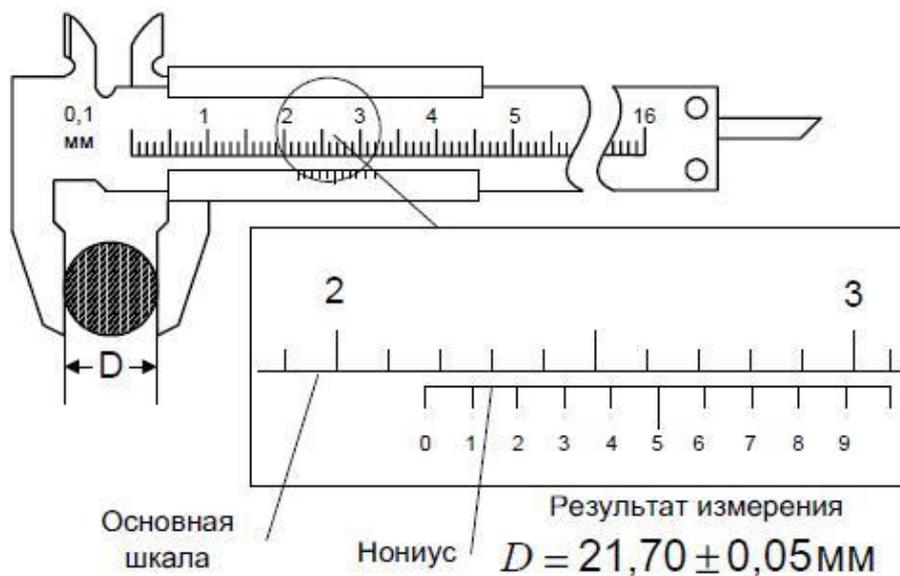


Рис. 2.2. Штангенциркуль

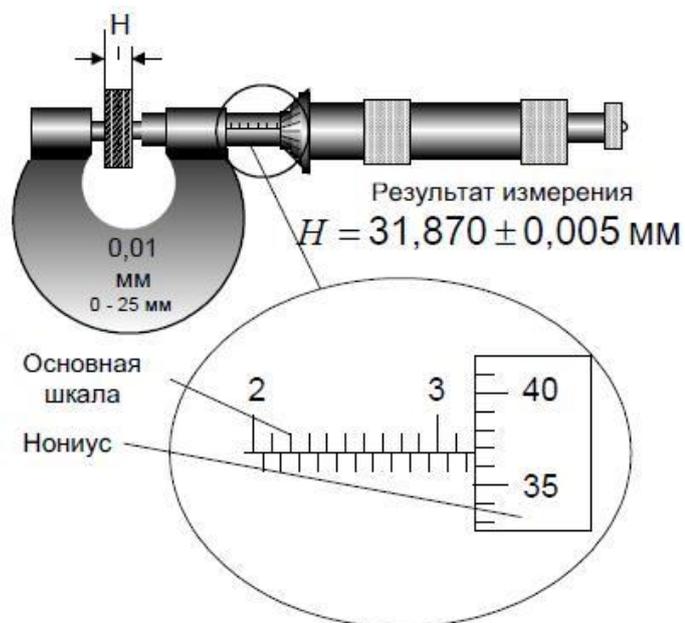


Рис. 2.3. Микрометр



Рис. 2.4. Амперметр

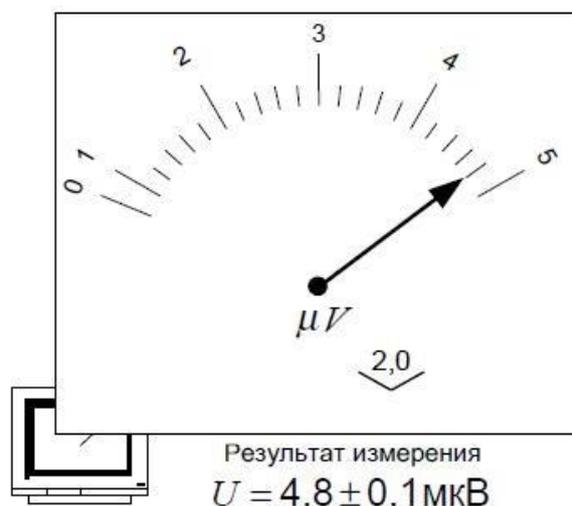
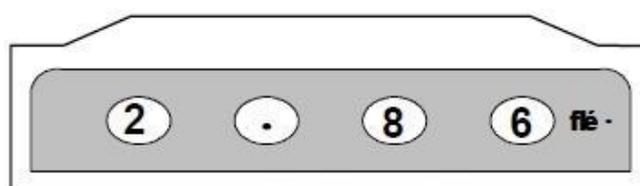


Рис. 2.5. Вольтметр



Результат измерения  
 $R = 2,860 \pm 0,005 \text{ кОм}$

Рис. 2.6. Цифровой омметр

**Случайная погрешность**

При наличии случайных погрешностей наблюдаемые значения измеряемой величины при многократных измерениях случайным образом рассеяны относительно ее истинного значения. В этом случае действительное значение находят как наиболее вероятное из серии отсчетов, а погрешность характеризуют шириной интервала, который с заданной вероятностью покрывает истинное значение.

Наилучшей оценкой истинного значения величины  $X$  является выборочное среднее значение

$$\bar{x} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}, \quad (2.4)$$

где  $x_n$  — отсчет величины;  $X$  и  $N$  — число отсчетов.

Для оценки разброса отсчетов при измерении используется выборочное среднее квадратическое отклонение отсчетов

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}}. \quad (2.5)$$

Выборочное среднее является случайной величиной, и его разброс относительно истинного значения измеряемой величины оценивается выборочным средним квадратическим отклонением среднего значения

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (2.6)$$

Среднее квадратическое отклонение среднего из  $N$  отсчетов в  $\sqrt{N}$  раз меньше среднего квадратического отклонения одного отсчета.

**Доверительным интервалом** называется интервал, который с заданной степенью достоверности включает в себя истинное значение измеряемой величины:

$$\bar{x} - \Delta, \quad \bar{x} + \Delta. \quad (2.7)$$

**Доверительной вероятностью (надежностью)** результата серии наблюдений называется вероятность  $\alpha$ , с которой истинное значение измеряемой величины входит в доверительный интервал.

Случайную составляющую погрешности принято выражать как полуширину доверительного интервала. Размер доверительного интервала обычно задают в виде кратного  $\bar{\sigma}$  значения.

Тогда случайная составляющая погрешности многократных измерений

$$\Delta_{\text{сл}} = t_a \cdot \bar{\sigma}, \quad (2.8)$$

где  $t_a$  — безразмерный коэффициент доверия (коэффициент Стьюдента).

Коэффициент доверия показывает, во сколько раз необходимо увеличить среднее квадратическое отклонение среднего, чтобы при заданном числе измерений получить заданную надежность их результата. Коэффициент доверия сложным образом зависит от надежности и числа измерений, и его значение определяют по статистическим таблицам (прил. 1).

При расчете случайной погрешности задаются надежностью измерений, которую (в зависимости от целей измерений и требований к ним) принимают равной 0,9; 0,95; 0,96; 0,98; 0,99; 0,997; 0,999.

Чем больше доверительная вероятность, тем надежнее оценка интервала и, соответственно, тем шире его границы.

Полная погрешность  $\Delta$  прямых измерений равна квадратичной сумме инструментальной  $\Delta_{\text{и}}$  и случайной  $\Delta_{\text{сл}}$  составляющих:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{\text{и}}^2 + \Delta_{\text{сл}}^2}. \quad (2.9)$$

### **Промахи**

Обработку прямых измерений рекомендуется начинать с проверки отсчетов на наличие промахов. Существует много критериев выявления и отбрасывания промахов, но ни один из них не является универсальным. Выбор критерия зависит от цели измерений, но решение отбросить какие-то данные, в конечном счете, всегда субъективно.

Сформулируем так называемый **критерий Шовене**. Из полученного ряда, содержащего  $N$  отсчетов, выбирается аномальный отсчет  $X_k$  и вычисляется модуль его отклонения от среднего значения в долях выборочного среднего квадратического отклонения:

$$Z = \frac{X_k - \bar{X}}{\sigma}. \quad (2.10)$$

Затем вычисляется вероятность этого отклонения, а также ожидаемое число  $n$  измерений, которые дадут отсчеты, имеющие отклонение  $Z$  не меньшее, чем испытываемый. Если получено  $n < 0,5$  (при округлении до целого  $n = 0$ ), то отсчет  $X_k$  считается промахом. Эту процедуру можно изменить и вычислить ожидаемое число  $M$  отсчетов, среди которых будет хотя бы один аномальный.

Если  $M > N$ , то отсчет  $x_k$  считается промахом. Связь между  $M$  и  $Z$  приведена в прил. 3.

### **Алгоритм обработки прямых измерений**

1. Определить инструментальную погрешность.
2. Вычислить среднее значение серии измерений (2.4).
3. Вычислить среднее квадратическое отклонение отсчета (2.5).  
Если промах устранен, то перейти к п. 5, иначе — к п. 4.
4. Проверить отсчеты на наличие промаха:
  - отобрать аномальный отсчет;
  - вычислить его относительное отклонение — (2.10);
  - определить ожидаемое число отсчетов, среди которых может быть аномальный (прил. 3);
  - если это число больше числа отсчетов, то исключить аномальный отсчет и перейти к п. 2, иначе перейти к п. 5.
5. Вычислить выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения (2.6).
6. Определить коэффициент доверия для заданной надежности и полученного числа отсчетов (прил. 1).
7. Вычислить случайную погрешность (2.7).
8. Вычислить полную погрешность (2.8).
9. После округлений результат обработки измерений записать в форме

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x), \quad \delta = (\Delta x / \bar{x}) \cdot 100\%, \quad \alpha. \quad (2.11)$$

#### **Пример 2.1.** Обработка прямых измерений

Термометром измерено 10 отсчетов температуры  $t$  в материале. Термометр, класс точности которого  $K = 2,5$ , имеет максимальное значение шкалы  $t = 200$  °С. Результаты измерений представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t$	145	140	145	105	130	150	150	155	175	160

Обработать результаты измерений, обеспечив 98%-ную надежность оценки температуры.

*Решение.*

Вычисляем инструментальную погрешность:

$$\Delta_a = K \cdot A / 100 = 2,5 \cdot 200 / 100 = 5 \text{ °С.}$$

При доверительной вероятности  $\alpha = 98\%$  и количестве отсчетов  $N = 10$  коэффициент доверия  $t_{98;10} = 2,8$  (прил. 1).

$$\text{Находим среднее значение: } \bar{t} = \frac{\sum_{n=1}^N t_n}{N}, \bar{t} = 146 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вычисляем среднее квадратическое отклонение отсчетов:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (t_n - \bar{t})^2}{N-1}}, \sigma_t = 18,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Проверяем отсчеты на наличие промахов.

Аномальным отсчетом является отсчет № 4. Вычисляем нормированное отклонение  $t_4$  от среднего значения:

$$Z = \frac{t_4 - \bar{t}}{\sigma} = \frac{105 - 146}{18,6} = 2,17.$$

Согласно данным прил. 3, количество опытов, при котором полученный отсчет нельзя считать промахом, равно 17. Это число больше, чем  $N = 10$ . Следовательно, отсчет  $t_4 = 105 \text{ }^\circ\text{C}$  является промахом и его нужно удалить из обрабатываемого ряда.

Новый ряд отсчетов температуры ( $N = 9$ ,  $t_{98;9} = 2,9$ ) представлен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t$	145	140	145	130	150	150	155	175	160

Вычисляем новое среднее значение  $\bar{t} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Находим среднее квадратическое отклонение  $\sigma_t = 12,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определяем случайную составляющую погрешности:

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{\sqrt{N}} = \frac{12,7}{\sqrt{9}} = 4,23 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta_t = t_{\alpha;N} \cdot \bar{\sigma}_t = 2,9 \cdot 4,23 = 12,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вычисляем абсолютную и относительную погрешности:

$$\Delta t = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta t^2} = \sqrt{5^2 + 12,2^2} = 13 \text{ }^\circ\text{C} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\delta_t = \frac{\Delta t}{\bar{t}} = \frac{10}{150} = 6,6 \text{ } \%$$

После округлений результат измерения напряжения записываем в таком виде:  $t = 150 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\delta = 7 \text{ } \%$ ;  $\alpha = 98 \text{ } \%$ .

### 2.3. Объединение результатов серии измерений

Иногда необходимо объединить результаты нескольких серий прямых измерений одной и той же физической величины. Эту задачу можно решить следующим образом.

Пусть результаты  $M$  измерений представлены в виде  $x = \bar{x}_1 \pm \Delta x_1$ ,  $x = \bar{x}_2 \pm \Delta x_2$ ,  $x = \bar{x}_M \pm \Delta x_M$ .

Наилучшее значение  $\bar{x}$  и его погрешность  $\Delta x$  вычисляются как

$$\bar{x} = \frac{\sum_{m=1}^M w_m \cdot x_m}{\sum_{m=1}^M w_m}, \quad \Delta x = \left( \frac{\sum_{m=1}^M w_m}{\sum_{m=1}^M w_m} \right)^{-1/2}, \quad (2.12)$$

где  $w_m = \frac{1}{(\Delta x_m)^2}$  — статистический вес каждой серии измерений.

Объединение результатов серии прямых измерений рассмотрим на примере 2.2.

#### **Пример 2.2.**

В трех различных условиях измерено сопротивление одного и того же проводника. Результаты измерений представлены в таком виде:  $R_1 = 11 \pm 2 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 12 \pm 2 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 10 \pm 3 \text{ Ом}$ . Необходимо объединить эти измерения.

*Решение.*

Находим статистический вес (вклад) каждого измерения,  $1/\text{Ом}^2$ :

$$w_1 = \frac{1}{(\Delta R_1)^2} = \frac{1}{2^2} = 0,25;$$

$$w_2 = \frac{1}{(\Delta R_2)^2} = \frac{1}{2^2} = 0,25;$$

$$w_3 = \frac{1}{(\Delta R_3)^2} = \frac{1}{3^2} = 0,11.$$

Определяем новую оценку сопротивления:

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{\bar{R}_1 \cdot w_1 + \bar{R}_2 \cdot w_2 + \bar{R}_3 \cdot w_3}{w_1 + w_2 + w_3} = \\ &= \frac{11 \cdot 0,25 + 12 \cdot 0,25 + 10 \cdot 0,11}{0,25 + 0,25 + 0,11} = 11,2 \text{ Ом.}\end{aligned}$$

Находим новую оценку погрешности:

$$\Delta R = \frac{1}{\sqrt{w_1 + w_2 + w_3}} = \frac{1}{\sqrt{0,25 + 0,25 + 0,11}} = 1,28 \text{ Ом.}$$

Результат совместной оценки сопротивления:  $R = 11 \pm 1 \text{ Ом.}$

## 2.4. Обработка косвенных измерений

Пусть  $u = f(x, y, \dots)$  — функциональная зависимость между измеряемой величиной  $u$  и величинами  $x, y, \dots$ , значения которых найдены прямыми измерениями. Действительное значение  $\bar{u}$  определяется как

$$\bar{u} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots). \quad (2.13)$$

Получим выражение для погрешности  $\Delta u$ . Если зафиксировать значения всех аргументов, кроме одного, например  $x$ , то приращение функции при изменении ее аргумента имеет вид

$$\Delta_x u = f(\bar{x} + \Delta x, \bar{y}, \dots) - f(\bar{x}, \bar{y}, \dots). \quad (2.14)$$

Если значение  $\Delta x$  мало, то в интервале  $[\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x]$  функцию  $u = f(x)$  можно считать линейной и

$$\Delta_x u = (df / dx) \Delta x. \quad (2.15)$$

Величина  $\Delta_x u$  характеризует погрешность  $\Delta u$ , обусловленную погрешностью  $\Delta x$ . Аналогично определяются составляющие погрешности  $\Delta u$ , вносимые другими аргументами. Полная погрешность  $\Delta u$  косвенных измерений  $u$  вычисляется с помощью либо квадратичного суммирования, либо суммирования по модулю ее составляющих, вносимых каждым аргументом:

$$\Delta u = \sqrt{(\Delta_x)^2 + (\Delta_y)^2 + \dots}; \quad (2.16)$$

$$\Delta u = |\Delta x| + |\Delta y| + \dots \quad (2.17)$$

Соотношение (2.16) применяется в том случае, когда выполняются два условия. Во-первых, погрешность аргументов обусловлена влиянием многих факторов, среди которых нет преобладающего фактора. Во-вторых, погрешности аргументов статистически не связаны. В остальных случаях используется соотношение (2.17). Однако правило суммирования (2.17) часто приводит к завышенному значению погрешности косвенных измерений.

Например, пусть значение сопротивления на участке цепи постоянного тока определяется по результатам прямых измерений тока и напряжения на этом участке. Если погрешность измерения тока и напряжения обусловлена влиянием многих факторов (температуры, внутренних сопротивлений амперметра и вольтметра, электрических наводок, нестабильности источника питания и др.), то при суммировании погрешностей лучше использовать формулу (2.16). Если погрешность прямых измерений обусловлена в основном случайным изменением внутреннего сопротивления — источника питания, то лучше применить формулу (2.17).

Соотношения (2.13 — 2.16) позволяют использовать два алгоритма обработки косвенных измерений. В одном из них необходимо найти аналитические выражения для частных производных, в другом — используются только численные методы. В прил. 3 приведены формулы для вычисления погрешности первым способом для некоторых часто встречающихся на практике функциональных связей.

### ***Алгоритм обработки косвенных измерений***

1. По известной зависимости измеряемой величины от её аргументов, значения которых найдены с помощью прямых измерений, вычислить действительное значение функции (2.13).
2. Вычислить составляющие погрешности как приращения функции по каждому аргументу (2.14) или найти частные производные по всем аргументам и вычислить составляющие погрешности (2.15).
3. Вычислить полную погрешность функции (2.16), (2.17).
4. После округлений результат обработки измерений записать в такой форме:

$$u = (\bar{u} \pm \Delta u); \quad \delta = (\Delta u / \bar{u}) \cdot 100\%; \quad \alpha.$$

***Пример 2.3.*** Обработка результатов косвенных измерений.

Прямыми измерениями найдены значения массы  $m$ , радиуса  $R$  и линейной скорости  $v$  равномерного вращения по окружности

материальной точки. Необходимо оценить значение центробежной силы  $F$ , действующей на материальную точку:

$$m = 310 \pm 6 \text{ г}; R = 104 \pm 5 \text{ мм}; v = 30 \pm 1 \text{ м/с}; F = \frac{mv^2}{2}.$$

*Решение.*

Рассмотрим три способа расчета погрешности косвенных измерений.

**1. Алгоритм, в котором используется вычисление производных измеряемой величины по её аргументам.**

Вычисляем среднее значение силы:

$$\bar{F} = \frac{\bar{m}\bar{v}^2}{2} = \frac{0,31 \cdot 30^2}{2} = 2683 \text{ Н} \approx 2,68 \text{ кН}.$$

Находим частные производные и вычисляем их значения при средних значениях аргументов:

$$\frac{\partial F}{\partial m} = \frac{\bar{v}^2}{R} = \frac{30^2}{104} = 8,65 \text{ Н/г};$$

$$\frac{\partial F}{\partial R} = -\frac{\bar{m}\bar{v}^2}{R^2} = -\frac{310 \cdot 30^2}{104^2} = -25,8 \text{ Н/мм};$$

$$\frac{\partial F}{\partial v} = -\frac{2 \cdot \bar{m} \cdot \bar{v}}{R} = \frac{2 \cdot 310 \cdot 30}{104} = 179 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Вычисляем составляющие погрешности от каждого аргумента:

$$\Delta F_m = \left| \frac{\partial F}{\partial m} \right| \cdot \Delta m = 8,65 \cdot 6 = 51,9 \text{ Н};$$

$$\Delta F_R = \left| \frac{\partial F}{\partial R} \right| \cdot \Delta R = 25,8 \cdot 5 = 129 \text{ Н};$$

$$\Delta F_v = \left| \frac{\partial F}{\partial v} \right| \cdot \Delta v = 179 \cdot 1 = 179 \text{ Н}.$$

Находим полную абсолютную погрешность:

$$\Delta F = \sqrt{\Delta F_m^2 + \Delta F_R^2 + \Delta F_v^2} = \sqrt{51,9^2 + 129^2 + 179^2} = 227 \text{ Н} \approx 0,2 \text{ кН}.$$

Вычисляем полную погрешность относительную:  $\delta F = \frac{\Delta F}{\bar{F}} = \frac{0,2}{2,7} = 7\%$ .

После округления записываем результат косвенных измерений:

$$F = 2,7 \pm 0,2 \text{ кН}, \quad \delta F = 7 \%$$

## **2. Алгоритм, в котором используется вычисление приращений измеряемой величины по её аргументам.**

Определяем среднее значение силы:

$$\bar{F} = \frac{\bar{m} \cdot \bar{v}^2}{2} = \frac{0,31 \cdot 30^2}{2} = 2683 \text{ Н} \approx 2,68 \text{ кН}.$$

Вычисляем приращения функции по её аргументам:

$$\begin{aligned} \Delta F_m &= |F(m + \Delta m, R, v) - F(m, R, v)| = \\ &= \left| \frac{(0,31 + 0,006) \cdot 30^2}{0,104} - 2683 \right| = 51,6 \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_R &= |F(m, R + \Delta R, v) - F(m, R, v)| = \\ &= \left| \frac{0,31 \cdot 30^2}{0,104 + 0,005} - 2683 \right| = 123 \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_v &= |F(m, R, v + \Delta v) - F(m, R, v)| = \\ &= \left| \frac{0,31 \cdot (30 + 1)^2}{0,104} - 2683 \right| = 182 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Находим полную абсолютную погрешность:

$$\Delta F = \sqrt{\Delta F_m^2 + \Delta F_R^2 + \Delta F_v^2} = \sqrt{51,6^2 + 123^2 + 182^2} = 226 \text{ Н} \approx 0,2 \text{ кН}$$

Находим полную относительную погрешность:  $\delta F = \frac{\Delta F}{\bar{F}} = \frac{0,2}{2,7} = 7\%$ .

После округления записываем результат косвенных измерений

$$F = 2,7 \pm 0,2 \text{ кН}, \quad \delta F = 7 \%$$

## **3. Алгоритм, в котором используется сложение абсолютных величин погрешностей.**

Вычисляем среднее значение силы:

$$\bar{F} = \frac{\bar{m} \cdot \bar{v}^2}{2} = \frac{0,31 \cdot 30^2}{2} = 2683 \text{ Н} \approx 2,68 \text{ кН.}$$

Определяем относительные погрешности аргументов:

$$\delta m = \frac{\Delta m}{\bar{m}} = \frac{6}{310} = 0,019 \approx 2\%;$$

$$\delta R = \frac{\Delta R}{\bar{R}} = \frac{5}{104} = 0,048 \approx 5\%;$$

$$\delta v = \frac{\Delta v}{\bar{v}} = \frac{1}{30} = 0,033 \approx 3\%.$$

Вычисляем относительную погрешность функции по формулам прил. 2:

$$\delta F = \delta m + \delta R + 2\delta v = 2 + 5 + 2 \cdot 3 = 13\%.$$

Находим абсолютную погрешность функции:

$$\Delta F = F \cdot \delta F = 2,68 \cdot 0,13 = 0,349 \text{ Н.}$$

После округления записываем результат косвенных измерений:

$$F = 2,7 \pm 0,3 \text{ кН, } \delta F = 11\%.$$

## 2.5. Правила округления приближенных чисел

**Незначащими** цифрами числа называются нули в начале десятичных дробей, меньших 1, и нули в конце числа, заменившие цифры, отброшенные после округления. Остальные цифры называются **значащими**.

**Сомнительной** цифрой результата измерения называется цифра, стоящая в разряде, соответствующем старшему разряду со значащей цифрой в значении погрешности. Цифры, стоящие слева от сомнительной, называются **верными**, а стоящие справа — **неверными**.

Например, числа  $586 \pm 6$ ;  $0,00234 \pm 0,00002$ ;  $1,00 \pm 0,03$ ;  $2000 \pm 30$  содержат по три значащие цифры. При округлении числа  $299793 \pm 1$  до значения  $3 \cdot 10^5$  допущена погрешность 207. Поэтому в полученном числе сотни являются сомнительной цифрой и, следовательно, последние два нуля — незначащие.

Погрешность обычно выражается одной значащей цифрой и лишь при особо ответственных измерениях — двумя.

### **Округление погрешности и действительного значения**

**Погрешность** округляется до одной значащей цифры. Эта цифра является сомнительной, т.к. значение погрешности не имеет верных цифр.

**Действительное значение** округляется до цифры, разряд которой равен разряду значащей цифры погрешности. Последняя цифра действительного значения — сомнительная, остальные цифры — верные.

При особо точных измерениях погрешность округляется до двух значащих цифр, если первая из них меньше четырех, и до одной цифры, если первая цифра больше трех. Иногда в качестве второй цифры оставляют 0 или 5.

### ***Запись чисел, считанных со шкалы прибора***

В числовом значении измеряемой величины, считанном со шкалы прибора, записываются только верные цифры и сомнительная цифра, разряд которой определяется по значению инструментальной погрешности прибора.

### ***Округление чисел***

Лишние цифры у чисел, не имеющих дробных частей, заменяются нулями, а у десятичных дробей просто отбрасываются. Если заменяемая нулем или отбрасываемая цифра старшего разряда меньше 5, то оставшиеся цифры не изменяются. Если указанная цифра больше 5, то последняя оставшаяся цифра увеличивается на 1. Если заменяемая нулем или отбрасываемая цифра равна 5, то округление производится следующим образом: последняя цифра в числе, которое округляется, остается без изменения, если она четная, и увеличивается на 1, если эта цифра нечетная.

### ***Округление при вычислениях***

При записи результатов промежуточных вычислений сохраняется одна запасная цифра — цифра, стоящая справа от сомнительной. При сложении и вычитании приближенных чисел разряд сомнительной цифры результата совпадает со старшим из разрядов сомнительных цифр слагаемых. Результат умножения и деления содержит столько значащих цифр, сколько их в исходном с наименьшим количеством значащих цифр. При возведении в степень (извлечении корня) приближенного числа результат должен иметь столько значащих цифр, сколько их в основании (подкоренном выражении). При логарифмировании в мантиссе сохраняется столько значащих цифр, сколько их в исходном числе.

### ***Квадратичное суммирование***

Если при квадратичном суммировании одно из чисел меньше другого в 3 и более раз, то им можно пренебречь.

Приведем примеры округления результатов измерений (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Запись до округления	Запись после округления
$123357 \pm 678$ А/м	$123400 \pm 700$ А/м
$123357 \pm 678$ В	$123,4 \pm 0,7$ кВ
$237,46 \pm 0,13$ мм	$237,5 \pm 0,1$ мм
$0,00283 \pm 0,00034$ кг	$(2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ кг
$1,045 \pm 0,000003$ с	$1,045000 \pm 0,000003$ с
$359623 \pm 307$ с	$(359,6 \pm 0,3) 10^3$ с
$0,000000047 \pm 0,0000000098$ м	$50 \pm 10$ нм
$67,89 \cdot 10^{-7} \pm 49,3 \cdot 10^{-8}$ А	$6,8 \pm 0,5$ мкА
$589 \pm 0,69$ Н	$589,0 \pm 0,7$ Н
$589 \pm 0,078$ Н	$589,00 \pm 0,08$ Н

## Глава 3

### ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ВАКУУМА

#### 3.1. Классификация средств измерения давления и вакуума

Измерение давления широко используется в научных исследованиях, а также в различных областях промышленности. Давление характеризует работу отдельных систем, агрегатов, узлов, а также ход термо- и газодинамических процессов в энергетических установках. С помощью измеренного давления или разности давлений можно определить скорость, а также расход жидкости, газа или пара.

**По назначению** приборы давления подразделяются на такие:

- манометры избыточного или абсолютного давления (для измерения избыточного или абсолютного давления);
- барометры (для измерения барометрического давления атмосферного воздуха);

- вакуумметры (для измерения разности между барометрическим и абсолютным давлением, когда значение абсолютного давления меньше барометрического);
- мановакуумметры (для измерения как избыточного давления, так и вакуумметрического);
- дифференциальные манометры (для измерения разности давлений);
- микроманометры (для измерения малых разностей давлений).

**По принципу действия** средства измерения давления и разрежения подразделяют на следующие группы:

- жидкостные (измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости);
- грузопоршневые (измеряемое давление уравнивается массой груза и поршня);
- деформационные (действие основано на использовании зависимости упругой деформации и усилия, создаваемого чувствительным элементом, от давления);
- электрические (действие основано на свойствах отдельных веществ изменять свои электрические параметры под действием давления);
- электроразрядные (используется зависимость ионного тока от давления);
- теплоэлектрические (основаны на зависимости теплопроводности газового слоя от давления).

В системе СИ за единицу давления принят паскаль,  $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ . Он связан с другими единицами измерения давления следующим образом:

- 1 мм рт. ст. = 133,32 Па;
- 1 мм в. ст. = 1 кг/м<sup>2</sup> = 9,81 Па;
- 1 Бар = 10<sup>5</sup> Па;
- 1 атм = 101300 Па;
- 1 ат = 1 кг/см<sup>2</sup> = 98100 Па.

### 3.2. Жидкостные приборы давления

**Жидкостные приборы давления** по конструктивному признаку делятся на U-образные и чашечные. Схемы U-образного и чашечного манометров представлены на рис. 3.1, 3.2.

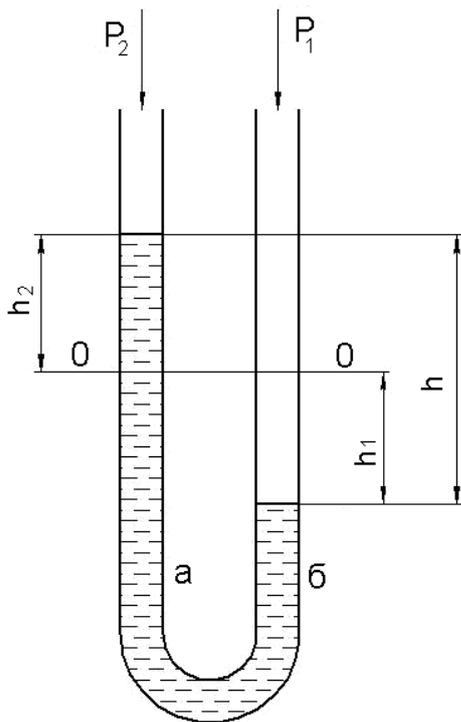


Рис. 3.1. Схема U-образного манометра

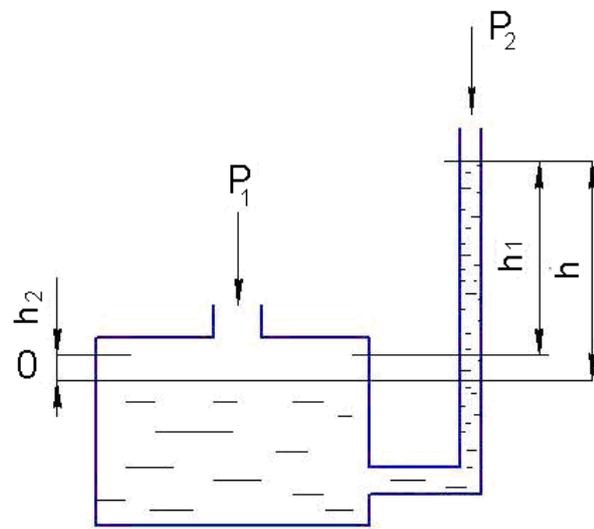


Рис. 3.2. Схема чашечного манометра

Жидкостные приборы давления применяются в качестве манометров для определения избыточного давления до 0,1 МПа, вакуумметров — вакуума до 10 Па, дифференциальных манометров для измерения разности давлений от 0,1 МПа до 0,4 кПа, микроманометров для измерения небольших разностей давления до 1 кПа.

Жидкостные приборы давления используются в качестве как рабочих, так и контрольных, а также образцовых манометров и вакуумметров.

Жидкостные U-образные манометры изготавливаются из стеклянных трубок ( $d = 6 \dots 10$  мм), заполненных наполовину рабочей жидкостью (ртутью, водой, спиртом, маслом).

В жидкостных приборах измеряется давление или разность давлений

$$p = \Delta p = \rho g h, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  — местное ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $h$  — высота столба жидкости, мм.

Высота столба жидкости, входящая в соотношение (3.1), при использовании U-образного манометра определяется из соотношения  $h = h_1 + h_2$ , где  $h_1$ ,  $h_2$  — высота столба жидкости в одном и другом коленах, мм.

При использовании чашечного манометра  $h = h_1 [1 + (F_1 / F_2)]$ , где  $F_1$ ,  $F_2$  — площади сечения трубок в узком и широком сосудах соответственно;  $h_1$  — высота столба жидкости в узком сосуде.

В чашечных приборах с наклонной трубкой  $h_1 = l \sin \alpha$ , где  $l$  — длина трубки;  $\alpha$  — угол ее наклона.

Погрешность отсчета давления по шкале U-образного и чашечного приборов составляет  $\pm 2$  и  $\pm 1$  мм соответственно. Микроманометры имеют класс точности 0,5 и 1,0.

### 3.3. Грузопоршневые манометры

**Грузопоршневые манометры** относятся к средствам измерения давления высокой точности и используются в основном для градуировки и поверки манометров при давлениях до 250 МПа. Принципиальная схема грузопоршневого манометра представлена на рис.3.3.

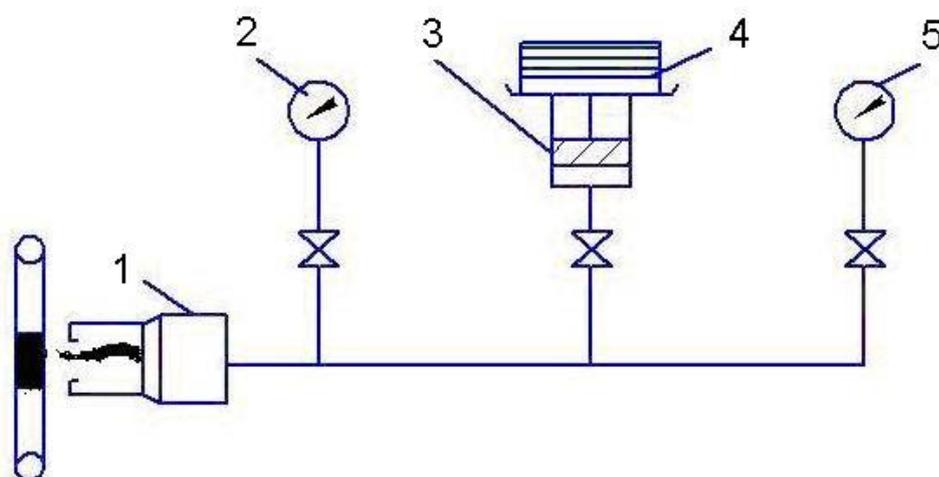


Рис. 3.3. Принципиальная схема грузопоршневого манометра

С помощью ручного пресса (поршня) 1 создается давление, которое измеряется поверяемыми манометрами 2 и 5. Это давление уравнивается давлением поршня 3, нагруженного калиброванными грузами 4. Давление может быть вычислено с помощью формулы  $p = (G_0 + G_r) / F$ , где  $G_0$  — сила тяжести поршня с тарелкой;  $G_r$  — сила тяжести калиброванных грузов;  $F$  — рабочая площадь поршня.

В качестве рабочей жидкости применяют керосин (до 0,25 МПа), трансформаторное масло (до 25 МПа) и касторовое масло (до 250 МПа).

### 3.4. Деформационные приборы давления

Действие деформационных приборов давления основано на зависимости деформации или изгибающего момента упругих

чувствительных элементов от давления. Давление определяется перемещением или усилием, развиваемым чувствительными элементами.

Деформационные приборы давления используют для измерения давления, разности давлений, разрежения (вакуума) в диапазоне от 50 Па до 1000 МПа.

Их изготавливают в виде манометров избыточного давления, манометров абсолютного давления, вакуумметров, мановакуумметров, дифманометров.

Деформационные приборы давления можно подразделить на две группы:

1. **Приборы давления прямого действия**, у которых перемещение упругого элемента, обусловленное воздействием измеряемого давления или разности давлений, преобразуется в перемещение отсчетного устройства для показания либо показания и записи измеряемой величины, или измерения и сигнализации, или только сигнализации об отклонении измеряемого давления от заданного значения. Эти приборы обладают простотой устройства и эксплуатации, имеют невысокую стоимость благодаря чему нашли широкое распространение в различных областях техники.

2. **Приборы давления, имеющие передающие преобразователи с унифицированными (стандартными) выходными сигналами** переменного, постоянного тока или пневматическим сигналом. Они выпускаются как с отсчетным устройством, так и без него. Приборы этого вида предназначены для работы с взаимозаменяемыми вторичными показывающими приборами, самопишущими приборами, разного рода регуляторами и информационно-измерительными системами.

Чувствительными элементами деформационных приборов давления являются пластины, мембраны, мембранные коробки, сильфоны и трубчатые пружины.

Плоские пластины используют в пьезокварцевых, емкостных, индуктивных и других приборах для измерения давления.

Мембранная коробка представляет собой две спаянные или сваренные гофрированные мембраны. Блоки мембранных коробок являются основным видом чувствительного элемента в дифманометрах.

Сильфоны — тонкостенные трубки с поперечной гофрировкой, используются для измерения избыточного давления до 60 МПа, вакуумметрического давления от 0,06 до 0,1 МПа, разности давлений до 0,025 МПа и абсолютного давления до 2,5 МПа.

Трубчатые пружины (пружины Бурдона), выполняемые преимущественно в виде одновитковых с центральным углом 200 — 270°, эллиптического или плоскоовального сечения, применяют для измерения вакуумметрического давления от 0,06 до 0,1 МПа, избыточного давления

до 160 МПа. Схема манометра с трубчатой пружиной показана на рис. 3.4.

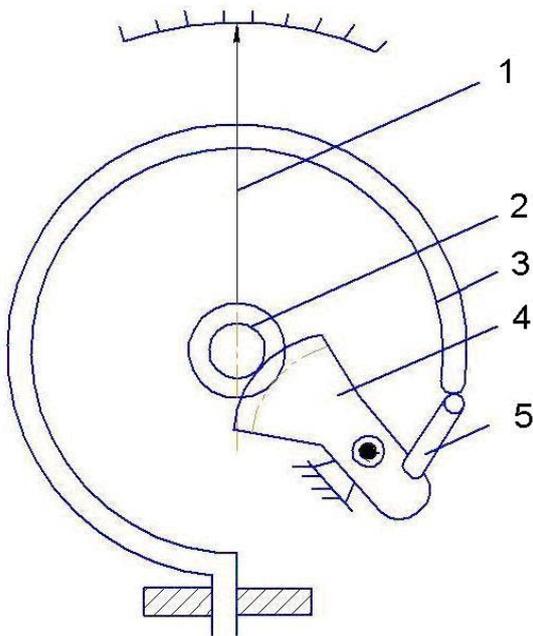


Рис. 3.4. Схема манометра с трубчатой пружиной

Перемещение свободного конца пружины 3 через поводок 5 передается на стрелку 1 с помощью секторного передаточного механизма, содержащего сектор 4 и зубчатое колесо 2. Прибор включает в себя концентрическую и равномерную шкалу с центральным углом 270°.

Упругие чувствительные элементы имеют недостаток, связанный с упругими свойствами материалов, из которых они изготовлены. В результате этого их работа может сопровождаться явлениями гистерезиса и упругого последействия.

Явление упругого последействия проявляется в том, что стрелка деформационного прибора, находившегося определенное время под нагрузкой, не сразу после ее снятия возвращается на нулевую отметку.

Явления гистерезиса и упругого последействия проявляются одновременно. На практике учитывается совместное действие этих явлений, называемое практическим гистерезисом. Гистерезис влияет на

погрешность прибора и оценивается величиной  $\delta_r^* = \frac{\Delta\delta_{\max}}{\delta_{\max}} \cdot 100\%$ , где

$\Delta\delta_{\max}$  — максимальная разность перемещений точки упругого элемента при одинаковом давлении, полученном при повышении и понижении давления;  $\delta_{\max}$  — максимальное перемещение упругого элемента.

### 3.5. Электрические датчики давления

В большинстве случаев деформационные приборы давления обеспечивают измерение давления как по диапазону, так и по точности. Однако эти приборы не могут быть использованы для измерения сверхвысоких давлений, глубокого вакуума, а также давлений с высокой частотой пульсаций. Для этих целей широко используются электрические методы измерения давления с помощью электрических датчиков или преобразователей давления. Действие этих средств измерения основано на использовании зависящих от давления электрических свойств тела. Так, для измерения давления могут быть

использованы электростатический заряд, возникающий при деформации кристаллов, изменение электрического сопротивления проводника, индуктивности или емкости под воздействием давления.

**Пьезоэлектрические преобразователи давления.** Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на использовании пьезоэлектрического эффекта. При деформации кристалла пьезоэлектрика на его поверхности появляются электростатические заряды. В приборах давления в качестве пьезоэлектрического преобразователя обычно используется кварц ( $\text{SiO}_2$ ). Его пьезоэлектрические свойства практически не зависят от температуры в пределах от 20 до 400 °С.

На рис. 3.5 показана схема чувствительного элемента пьезокварцевого манометра. Две кварцевые пластины 4 и 6, обращенные к токосъемной пластине 5 сторонами одинаковой полярности и лежащие в опорах 3 и 7, зажаты между колпачком 9 и плоской мембраной 2. Для равномерного распределения нагрузки на поверхности кварцевых пластин предусмотрен шарик 8.

Давление, подводимое с помощью штуцера, вначале воспринимается мембраной 2, а затем кварцевыми пластинами 4 и 6. Появляющийся на их гранях положительный заряд отводится через опоры на заземленный корпус преобразователя, а отрицательные заряды с помощью пластины 5 и проводника 10 подводятся к измерительному устройству, включающему электронный усилитель и магнитоэлектрический осциллограф.

Пьезокварцевый прибор давления позволяет измерять быстропеременные давления в диапазоне частот от 0,5 Гц до 100 кГц при давлениях до 100 МПа.

**Датчики манометров сопротивления.** Эти датчики основаны на изменении электрического сопротивления некоторых веществ (полупроводников, манганина, платины, вольфрама, константана и др.) под действием приложенного к ним давления.

Сам преобразователь представляет собой проволочный резистор (катушку), размещенный в металлическом корпусе, на одном конце которого имеется штуцер для подвода давления, а на другом — выводные проводники, которые подсоединяются к измерительному прибору (потенциометру, измерительному мосту).

**Измерительные тензопреобразователи.** Работа их основана на зависимости электрического сопротивления упругого тела от его деформации. Он работает обычно совместно с одним из видов упругих

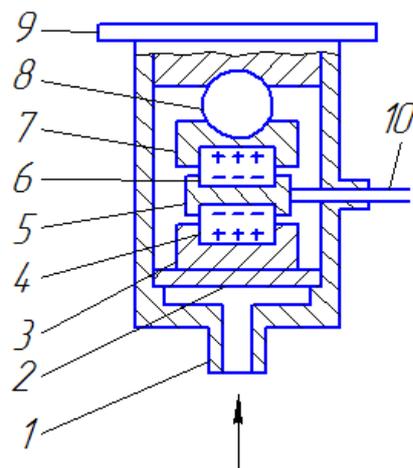


Рис. 3.5. Схема преобразователя пьезокварцевого манометра

чувствительных элементов (плоской мембраной, трубчатой пружиной и т. д.) и применяется для получения выходного сигнала, удобного для дистанционной передачи на вход в измерительное устройство давления.

**Емкостный датчик давления** представляет собой электрический конденсатор, у которого одна обкладка выполнена в форме неподвижного электрода, другая — в форме подвижного. В качестве подвижного электрода обычно используется плоская мембрана, которая под воздействием давления изменяет расстояние между электродами, а следовательно, и емкость конденсатора.

Приборы с емкостными датчиками давления обычно используют для измерения вакуума в диапазоне давлений от 0,1 Па до 0,1 МПа.

**Индуктивные датчики** обладают высоким быстродействием, применяются для измерения давления в нестационарных и быстро протекающих процессах. Мерой измеряемого давления является изменение индуктивного сопротивления катушки датчика. Индукционный датчик работает совместно с упругим чувствительным элементом — плоской мембраной.

Воздушный зазор между мембраной и сердечником катушки входит в магнитную цепь датчика и определяет индуктивное сопротивление последнего. Изменение воздушного зазора зависит от обусловленного давлением прогиба мембраны.

### 3.6. Приборы для измерения вакуума

Измерение **вакуума**, т.е. измерение давления разреженного газа, производится с помощью вакуумметров. По принципу действия вакуумметры разделяются на следующие типы:

1. **Жидкостные вакуумметры** (U-образные жидкостные вакуумметры и компрессионные приборы давления).
2. **Деформационные вакуумметры** (пружинные, мембранные и сильфонные).
3. **Теплоэлектрические вакуумметры** (термопарные вакуумметры и вакуумметры сопротивления).
4. **Электроразрядные вакуумметры** (ионизационные, магнетронные ионизационные, магнитные электроразрядные).

**Жидкостные U-образные приборы давления** используются для измерения давления от 0,1 МПа до 500 Па.

**Компрессионные ртутные вакуумметры** относятся к жидкостным приборам давления с предварительным сжатием. Давление в вакуумметре измеряется разностью уровней ртути  $h$  в сообщающихся сосудах, но в отличие от U-образного манометра в компрессионном вакуумметре в одном из сосудов газ предварительно сжимается и поэтому величиной  $h$  измеряется давление сжатого газа, значение которого в

соответствии с законом Бойля—Мариотта будет в  $\xi$  раз больше давления в вакуумной системе. Здесь  $\xi$  — степень сжатия.

В компрессионном вакуумметре давление измеряется в диапазоне от 4000 до 0,01 Па. Одной из особенностей является то, что он не позволяет вести процесс непрерывного измерения давления при его изменении, измеряет абсолютное давление и употребляется в качестве контрольного и образцового прибора для поверки и градуировки других приборов.

**Теплоэлектрические вакуумметры** (3.6) применяются для измерения давления в диапазоне от 70 до 0,13 Па.

Действие основано на зависимости теплопроводности ограниченного слоя разреженного газа от давления.

Чувствительным элементом теплоэлектрического вакуумметра является тонкая металлическая нить накала, размещаемая в стеклянном баллоне, куда подводится измеряемое давление. Нить нагревается электрическим током и охлаждается разреженной средой. Выделяемая нитью джоулева теплота частично отводится в результате теплопроводности материала через концы нити, частично рассеивается ее поверхностью в результате радиационного теплообмена, частично отводится газом.

Таким образом, уравнение теплового баланса вакуумметра имеет вид

$$I^2R = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

где  $I^2R$  — джоулева теплота;  $Q_1$  — теплота, отводимая в результате теплопроводности материала через концы нити;

$Q_2$  — теплота, рассеиваемая с поверхности нити в результате радиационного теплообмена;  $Q_3$  — теплота, отводимая газом.

Величины  $Q_1$  и  $Q_2$  не зависят от давления, а величина  $Q_3$  зависит от давления; величина  $Q_3$  прямо пропорциональна давлению:

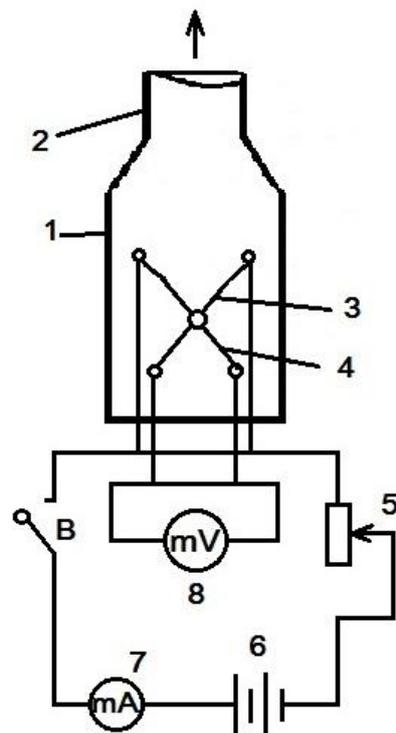


Рис. 3.6. Схема теплоэлектрического вакуумметра:  
1 — баллон; 2 — горловина;  
3 — нить накала; 4 — хромель-копелевая термопара; 5 — реостат; 6 — батарея; 7 — миллиамперметр; 8 — милливольтметр

$$Q_3 = c \frac{\sigma(T_H - T_\sigma)}{\sqrt{\mu}} p, \quad (3.2)$$

где  $c$  — постоянный коэффициент;  $\sigma$  — коэффициент аккомодации;  $\mu$  — относительная молекулярная масса;  $p$  — измеряемое давление;  $T_H$ ,  $T_\sigma$  — температуры нити накала и стенок стеклянного баллона.

Уравнение (3.2) получено при условии, когда средняя длина свободного пробега молекул больше или соизмерима с характерным линейным размером датчика — диаметром нити. Этим условиям удовлетворяет давление  $p < 70$  Па, т.е.  $p = 70$  Па является верхним пределом измерения теплоэлектрического вакуумметра.

С уменьшением давления  $p$  тепловой поток  $Q_3$ , отводимый газом, уменьшается и при  $p < 0,13$  Па достигает столь малого значения, что по сравнению с  $Q_1$  и  $Q_2$  им можно пренебречь. Значение  $p = 0,13$  Па является нижним пределом измерения прибора.

Различают два метода работы теплового вакуумметра:

- метод постоянной температуры нити (измеряемое давление определяется по току накала);
- метод постоянного тока (измеряемое давление определяется по температуре нити).

В зависимости от способа измерения температуры нити различают **термопарные вакуумметры** и **вакуумметры сопротивления**.

Недостатками теплоэлектрического вакуумметра являются: узкий диапазон измеряемого давления, относительно большая инерционность (до 20 с), зависимость показаний от рода газа и состояния поверхности нити.

**Ионизационные электроразрядные вакуумметры.** Действие **ионизационных** вакуумметров, относящихся к категории электроразрядных, основано на зависимости ионного тока от давления

$$p = \frac{I_{и}}{kI_{э}},$$

где  $p$  — давление;  $k$  — чувствительность прибора;  $I_{и}$  — ионный ток;  $I_{э}$  — электронный ток.

Диапазон измерений давления —  $0,1 \dots 7 \cdot 10^{-6}$  Па. Основным элементом ионизационного вакуумметра является вакуумметрическая лампа. Наиболее широкое распространение получили вакуумметрические лампы типа ЛМ-2 (рис. 3.7, а) и лампы Баярда—Альперта (рис. 3.7, б).

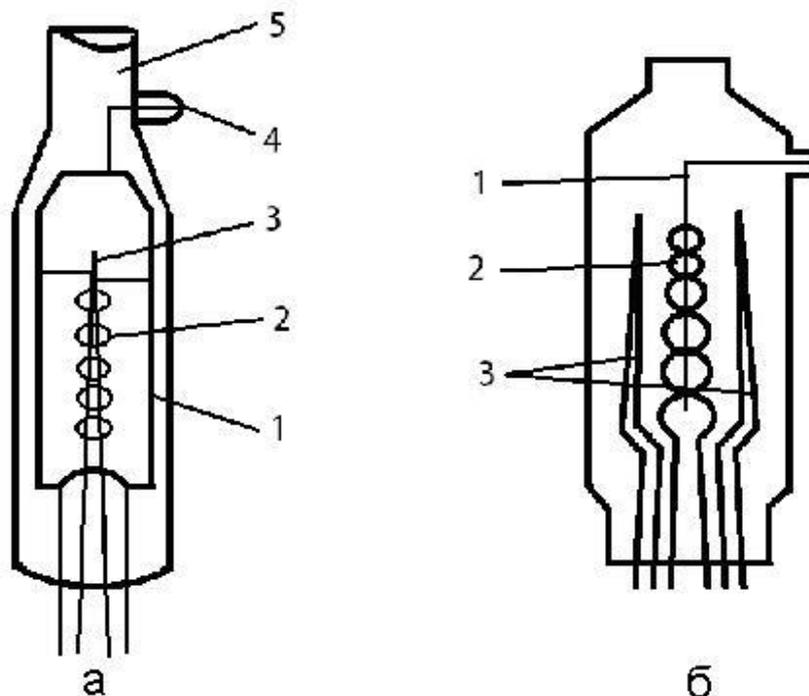


Рис. 3.7. Схема устройства лампы ионизационного вакуумметра:  
 1 — анод; 2 — сетка; 3 — катод; 4 — вывод анода; 5 — стеклянный корпус

Лампа ЛМ-2 может работать по схеме с внутренним (рис. 3.8, а) и внешним (рис. 3.8, б) коллектором. В схеме с *внутренним коллектором* сетка, на которую подается отрицательное напряжение до 25 В, является самым коллектором. На аноде поддерживается положительное напряжение порядка 200 В. Электроны при своем движении от катода к аноду сталкиваются с молекулами газа, ионизируют его. Положительные ионы оседают на сетке, образуя ионный ток, который измеряется микроамперметром.

При работе лампы по схеме с *внешним коллектором* анод является коллектором, а функции анода выполняет сетка.

В качестве основных преимуществ прибора можно отметить малую инерционность и линейную градуировочную характеристику. Несмотря на это, ионизационный вакуумметр может давать большие погрешности при измерении низкого давления, при воздействии внешних электрических и магнитных полей на прибор, а также возможно перегорание катода в области относительно высокого давления.

**Магнетронный ионизационный вакуумметр** является улучшенной модификацией ионизационного вакуумметра. Чувствительность магнетронного ионизационного вакуумметра в  $1,25 \cdot 10^6$  раз больше, чем ионизационного. Он позволяет измерить давление от 0,1 до  $1,3 \cdot 10^{-12}$  Па. В магнетронном ионизационном вакуумметре используется холодный катод, а более высокая чувствительность прибора

достигается воздействием магнитного поля на процесс эмиссии электронов.

**Магнитный электроразрядный вакуумметр.** Его принцип действия основан на зависимости разрядного тока от давления. Вакуумметрическая лампа, состоящая из двух плоских катодов и установленного между ними кольцеобразного анода, размещена между полюсами постоянного магнита.

**Преимущества:** простота электрической схемы включения лампы вакуумметра.

**Недостатки:** имеет сравнительно узкий диапазон измеряемого давления (от 0,13 до  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па), а зависимость тока от давления является линейной не во всем диапазоне измеряемого давления.

**Инверсно-магнетронный вакуумметр** представляет собой дальнейшее усовершенствование магнитного электроразрядного вакуумметра.

Инверсно-магнетронный вакуумметр позволяет измерять давление от 0,13 до  $1,33 \cdot 10^{-10}$  Па.

**Радиоактивный вакуумметр.** В нем ионизация газа осуществляется с помощью  $\alpha$ -частиц, испускаемых радиоактивным источником. Позволяет измерять давление от 0,1 МПа до 0,1 Па.

Лампа радиоактивного вакуумметра состоит из цилиндрического анода, внутренняя поверхность которого покрыта радиоактивным веществом, и коллектора, выполненного в виде стержня и размещенного на оси анода. Между анодом и коллектором поддерживается небольшая разность потенциалов ( $\sim 75$  В), под действием которой образованные  $\alpha$ -частицами положительные ионы перемещаются и оседают на коллекторе, образуя ионный ток, пропорциональный давлению. Следует отметить, что ионный ток очень мал ( $10^{-15}$  А).

**Преимущества:** стабильность работы при изменении температуры окружающей среды, неограниченный срок эксплуатации, линейный характер тарировочной зависимости.

**Недостатки:** для измерения тока требуются усилители с очень большим коэффициентом усиления.

### 3.7. Требования к системам измерения давления и вакуума

Установка приборов давления, место отбора давления и длина соединительных трубопроводов должны удовлетворять определенным требованиям, гарантирующим нормальную работу измерительных систем и исключая появление дополнительных погрешностей при измерении.

1. Измерение давления или разности давлений должно осуществляться с помощью приемных устройств давления, выполненных либо в форме трубок полного напора, либо в форме специальных

отверстий на стенке трубопровода или емкости. При этом приемное устройство не должно вносить заметных возмущений в поток.

2. Приборы давления должны устанавливаться таким образом, чтобы на их чувствительный элемент не оказывал добавочного давления столб жидкости, находящийся в соединительных трубопроводах. Чтобы исключить влияние температуры измеряемой среды на показания прибора, к последнему должна быть подведена измеряемая среда, предварительно охлажденная до температуры окружающего воздуха. Это достигается подбором длины соединительных трубок: увеличение длины способствует уменьшению разницы между температурой окружающей среды и температурой среды, в которой измеряется давление. Соединительная линия выполняется обычно из металлических труб диаметром 4 ... 10 мм и длиной не более 50 мм.

3. При измерении давления водяного пара и горячей воды перед прибором давления устанавливается кольцеобразный сильфон, выполняющий функции водяного затвора, где пар конденсируется, а конденсат охлаждается до температуры окружающей среды. Поверка нуля, подключение контрольного прибора давления, а также продувка соединительной линии должны осуществляться с помощью трехходового крана, устанавливаемого между прибором и сильфоном. При давлениях больше 10 МПа у места отбора давления должен быть установлен аварийный запорный вентиль.

4. Измерение давления в агрессивных средах должно осуществляться с помощью разделительных сосудов, которые устанавливаются непосредственно в месте измерения давления. Разделительный сосуд может иметь разделительную эластичную мембрану, однако использование мембраны вносит дополнительную погрешность в пределах 1 ... 2 %.

5. При измерении нестационарных давлений необходимо обращать внимание на частотные характеристики пульсаций прибора и измеряемого давления. Собственная частота измерительного датчика должна быть выше, чем частота пульсаций давления.

6. Для обеспечения условий непрерывного или периодического удаления газоздушных пузырей или капель конденсата, образующихся в соединительных линиях, которые заполнены соответственно жидкостью или газом, соединительные линии должны быть проложены с уклоном.

## Глава 4

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 4.1. Температурные шкалы

**Температура** — это параметр теплового состояния, представляющий собой физическую величину, которая характеризует степень нагретости тела.

*Непосредственно измерить температуру тела невозможно; она измеряется косвенным путем с использованием температурной зависимости какого-либо физического свойства термометрического тела.* В качестве **термометрических** используются тела, у которых удобные для непосредственного измерения физические свойства однозначно зависят от температуры (например, объемное расширение ртути, изменение давления совершенных газов и т. п.).

При измерении температуры какого-либо тела термометрическое тело должно быть с ним в тепловом контакте. В этом случае с течением времени наступает тепловое равновесие между ними, т.е. температура этих тел выравнивается. Способ, при котором измеряемая температура тела определяется по совпадающей с ней температурой термометрического тела, называется **контактным способом**. Возможные расхождения между этими значениями температуры составляют методическую погрешность контактного способа измерения температуры.

*В природе нет рабочих тел (веществ), термометрические свойства которых удовлетворяли бы предъявляемым требованиям во всем диапазоне измерения температуры.* Поэтому температуру, измеряемую термометром, шкала которого построена на допущении линейной температурной зависимости термометрических свойств какого-либо тела, называют **условной температурой**, а шкалу — **условной температурной шкалой**.

Примером условной температурной шкалы является стоградусная температурная **шкала Цельсия**, получившая наиболее широкое распространение из числа старых условных температурных шкал. В ней принят линейный закон температурного расширения ртути, а в качестве основных точек шкалы используются точка таяния льда ( $0^{\circ}\text{C}$ ) и точка кипения воды ( $100^{\circ}\text{C}$ ) при давлении 760 мм рт.ст.

**Термодинамическая температурная шкала**, предложенная Кельвином, основана на втором законе термодинамики и не зависит от термометрических свойств тела, что позволяет построить шкалу, задействовав только одну реперную точку.

Построение шкалы основывается на следующих положениях термодинамики: если в прямом обратимом цикле Карно к рабочему телу подводится теплота  $Q_1$  от источника с высокой температурой  $T_1$  и отводится теплота  $Q_2$  к источнику с низкой температурой  $T_2$ , то отношение  $T_1/T_2$  равно отношению  $Q_1/Q_2$  независимо от природы рабочего тела. Эта зависимость и позволяет построить шкалу, задействовав только одну постоянную или реперную точку с температурой  $T_0$ . Пусть температура источников теплоты  $T_2 = T_0$ , а  $T_1 = T$ , причем  $T$  не известна. Если между этими источниками осуществить прямой обратимый цикл Карно и измерить количество подводимой  $Q_1$  и отводимой  $Q_2$  теплоты, то неизвестную температуру можно определить по формуле

$$T = T_0 \frac{Q_1}{Q_2}.$$

В качестве единственной реперной точки для **Международной термодинамической температурной шкалы** (1954 г.) принята тройная точка воды, и ей присвоено значение температуры  $+273,16$  К (точно). Выбор этой точки объясняется тем, что она может быть воспроизведена с высокой точностью — погрешность не превысит  $0,0001$  К, что значительно меньше погрешности воспроизведения точек таяния льда и кипения воды.

**Кельвин (К)** — единица термодинамической температурной шкалы, которая определяется как  $1/273,16$  часть температурного интервала между тройной точкой воды и абсолютным нулем. Такой выбор единицы обеспечивает равенство единиц в термодинамической и стоградусной шкалах: температурный интервал в  $1$  К равен интервалу в  $1$  °С.

Ввиду того, что определение температуры путем осуществления прямого обратимого цикла Карно с измерением подводимой и отводимой теплоты сложно и затруднительно, для практических целей на основе термодинамической температурной шкалы установлена **Международная практическая температурная шкала** МПТШ-68 (1968 — год ее принятия). С помощью этой шкалы можно измерить температуру в диапазоне от  $13,81$  до  $6300$  К. Она максимально приближена к Международной термодинамической температурной шкале. МПТШ-68 базируется на основных реперных точках и на эталонных приборах, градуированных по этим точкам.

Температура по термодинамической и практической температурным шкалам может быть выражена в Кельвинах (К), когда она отсчитывается от абсолютного нуля (обозначается символом Т), и в градусах Цельсия (°С), когда она отсчитывается от точки таяния льда (обозначается символом t). Связь между этими температурами выражается формулой

$$T = t + 273,15.$$

Поскольку точка таяния льда на 0,01 К ниже тройной точки воды, то 0 °С соответствует 273,15 К.

## **4.2. Средства измерения температуры контактным способом**

**По принципу действия** контактные термометры подразделяются на такие:

3. Жидкостно-стеклянные — термометры, основанные на тепловом расширении вещества.
4. Манометрические — термометры, основанные на измерении давления вещества.
5. Термоэлектрические термометры (или термопары) — термометры, основанные на температурной зависимости термоЭДС.
6. Электрические термометры сопротивления — термометры, основанные на температурной зависимости электрического сопротивления вещества, представляют собой .
7. Дилатометрические и биметаллические — термометры, основанные на использовании свойства твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры.

### **4.2.1. Жидкостный стеклянный термометр**

Жидкостный стеклянный термометр представляет собой тонкостенный стеклянный резервуар для термометрической жидкости, соединенный с капилляром, с которым жестко связана температурная шкала. Эти термометры применяются для измерения температуры от – 200 до +750°С.

В качестве термометрической жидкости используют ртуть и некоторые органические жидкости (толуол, этиловый спирт, керосин и т. п.).

Наибольшее распространение получили ртутные термометры. Они применяются в широком диапазоне температур — от -35 до +750 °С.

Они также широко используются для градуирования других видов термометров, особенно лабораторных.

**Преимущества:**

- простота конструкции и обращения;
- низкая стоимость;
- достаточно высокая точность измерения.

*Недостатки:*

- большая тепловая инерция;
- невозможность измерения температуры на расстоянии;
- хрупкость стекла.

#### **4.2.2. Манометрический термометр**

Манометрические термометры представляют собой замкнутую герметичную термосистему (рис. 4.1). Она состоит из термобаллона 3, манометрической пружины 1 и соединяющего их капилляра 2.

Действие термометра основано на температурной зависимости давления газа или жидкости, заполняющих герметичную термосистему, или на температурной зависимости упругости насыщенного пара в парожидкостных (конденсационных) термометрах.

Манометрические термометры выпускаются как технические приборы для измерения температуры от  $-150$  до  $+600^{\circ}\text{C}$  в зависимости от природы термометрического вещества (со специальным заполнением до  $1000^{\circ}\text{C}$ ).

Широко распространены манометрические термометры с электрическим сигнализирующим устройством (электроконтактные). Они предназначены для измерения температуры жидкостей и газов, кроме того, для управления внешними электрическими цепями от сигнализирующих устройств термометров.

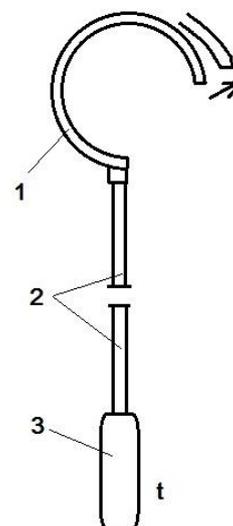


Рис. 4.1. Манометрический термометр

#### **4.2.3. Термоэлектрический термометр**

Термоэлектрический термометр (термопара) основан на температурной зависимости контактных термоЭДС в цепи из двух разнородных термоэлектродов. При этом происходит преобразование температуры в электрический сигнал — ЭДС.

Термоэлектрические термометры широко применяют в диапазоне температур от  $-200$  до  $+2500^{\circ}\text{C}$ .

Размеры точки тела, в которой измеряется температура, определяются размером рабочего спая термопары. Чем меньше размеры спая, тем меньше его тепловая инерция, но тем сложнее изготовление.

Согласно закону Вольта в замкнутой цепи из нескольких разнородных термоэлектродов с одинаковой температурой во всех переходных спаях

термоток не возникает. В соответствии с этим из рассмотрения цепей из двух (А,В) и из трех (А,В,С) термоэлектродов можно получить

$$e_{AB}(t) = e_{AC}(t) - e_{BC}(t),$$

где  $e(t)$  — контактная термоЭДС между двумя соответствующими электродами.

Таким образом, можно получить контактную термоЭДС между двумя электродами (А,В), если известны термоЭДС этих электродов по отношению к третьему электроду (С).

Обычно при изучении термоэлектродных материалов определяют его контактную термоЭДС в рабочем диапазоне температур по отношению к электроду из платины, которую можно получить в чистом виде. Располагая такими данными, можно вычислить температурную зависимость термоЭДС для любой пары термоэлектродов.

В настоящее время для измерения температур используются термопары, представленные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные типы термопар

Тип термопары	Обозначение	Диапазон, °С	Примечание
Хромель-копель	ТХК	-200...+750	
Хромель-алюмель	ТХА	-200...+1300	
Медь-константан		-200...+350	Нестандартная
Платинородий-платина	ТПП	0...+1600	
Платинородий (30% родия)-платинородий (6% родия)	ТПР	+300...+1800	
Вольфрамрений (5% рения)-вольфрамрений (20% рения)	ТВР	0...+2500	

По **конструктивному признаку** термопары подразделяются на такие:

- открытые (с открытым спаем);
- закрытые (с защитным кожухом, они более инерционные).

При подключении измерительного прибора к термопарной цепи возможны две схемы:

- 1) с разрывом одного из термоэлектродных проводов (рис. 4.2, а);
- 2) с разрывом холодного спая термопары (рис. 4.2, б).

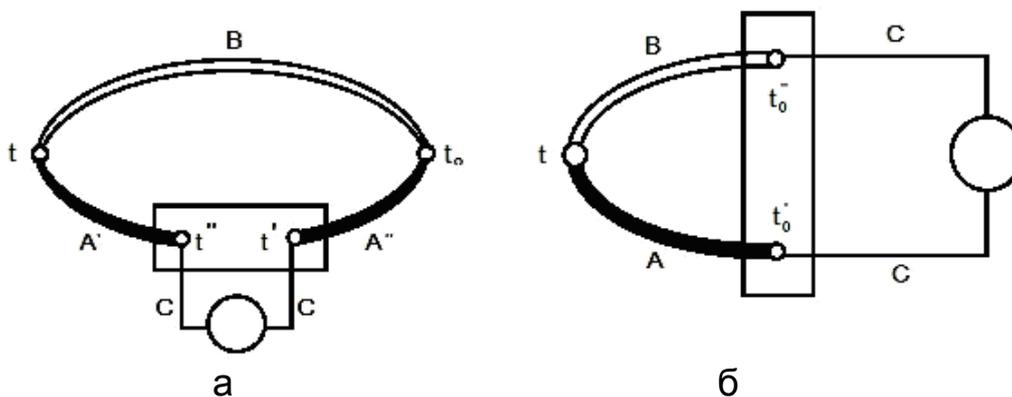


Рис. 4.2. Схемы подключения измерительного прибора к термопарной цепи

Для измерения малой разности температуры часто используется термобатарей, состоящая из нескольких последовательно соединенных термопар. Такая термобатарей называется **гипертермопарой**. Она позволяет повысить точность измерения в результате увеличения выходного сигнала в  $n$  раз, где  $n$  — число термопар в термобатарее.

Анализ влияния на измеряемую термоЭДС  $E_{AB}(t, t_0)$  подключения в термопарную цепь третьего электрода (С) показывает, что для исключения возможного искажения измеряемой термоЭДС в термопарной цепи необходимо и достаточно термостатировать переходные к третьему электроду спаи этой цепи. Одинаковые температуры переходных спаев  $t_1 = t_2$  в цепи схемы на рис. 4.2, а могут иметь любое значение. В цепи схемы на рис. 4.2, б целесообразно, чтобы одинаковые температуры  $t_{01} = t_{02}$  имели значение, равное температуре холодного спая  $t_0$ . Тогда эти переходные спаи выполняют функцию холодного спая.

Отсюда следует, что измерительный прибор, во внутренней электрической цепи которого вполне возможны соединения из разнородных материалов (переходные спаи), при выполнении измерений должен находиться в однородном температурном поле. Из этого можно сделать важный вывод, имеющий отношение к изготовлению спаев: способ изготовления спаев термопарной цепи не влияет на измеряемую термоЭДС, если в момент измерения во всех точках спая, включая места соединений разнородных материалов, температура одинакова.

ТермоЭДС в термопарной цепи можно измерить методом как **непосредственной оценки** (милливольтметром), так и **сравнения** (потенциометром).

Необходимо отметить, что при измерении милливольтметром появляется методическая погрешность, обусловленная падением потенциалов измерительной цепи из-за протекания по ней электрического тока. Поэтому разность потенциалов на клеммах милливольтметра, которую измеряет и показывает прибор, не совпадает с измеряемой

термоЭДС. Чтобы уменьшить эту погрешность до пренебрежимо малого значения, милливольтметры выпускаются с большим внутренним сопротивлением.

В практике измерения температуры встречаются измерительные системы, содержащие большое число термоэлектрических термометров, которые, как правило, подключают к одному измерительному прибору с помощью одного или нескольких переключателей. Каждый переключатель позволяет поочередно подключать к прибору до 20 термопар. Чтобы при измерении термоЭДС исключить взаимное влияние термопар от разных переключателей, все неиспользуемые переключатели устанавливают в нулевое положение. При этом термопары отключены от прибора.

*Преимущества:*

- позволяют измерять температуру с достаточной степенью точности в отдельных точках тела или среды;
- обладают малой тепловой инерцией;
- могут быть легко и просто изготовлены в условиях исследовательской лаборатории.

#### **4.2.4. Электрические термометры сопротивления**

Электрические термометры сопротивления (рис. 4.3) основаны на температурной зависимости электрического сопротивления термометрического вещества и широко применяются для измерения температуры от  $-200$  до  $+750$  °С, а в отдельных случаях — до  $+1000$  °С.

Чувствительный элемент термометра — это терморезисторный преобразователь, который позволяет преобразовать изменение температуры в изменение сопротивления.

Терморезистором может быть любой проводник с известной температурной зависимостью сопротивления. Однако к материалу терморезистора предъявляются строгие требования:

- высокая химическая стойкость в условиях работы преобразователя;
- линейная зависимость сопротивления от температуры с достаточно высоким значением самого сопротивления и коэффициента его изменения от температуры;
- стабильность и воспроизводимость температурной зависимости сопротивления.

Наиболее полно этим требованиям отвечают чистые металлы. Сплавы имеют более слабую температурную зависимость сопротивления.

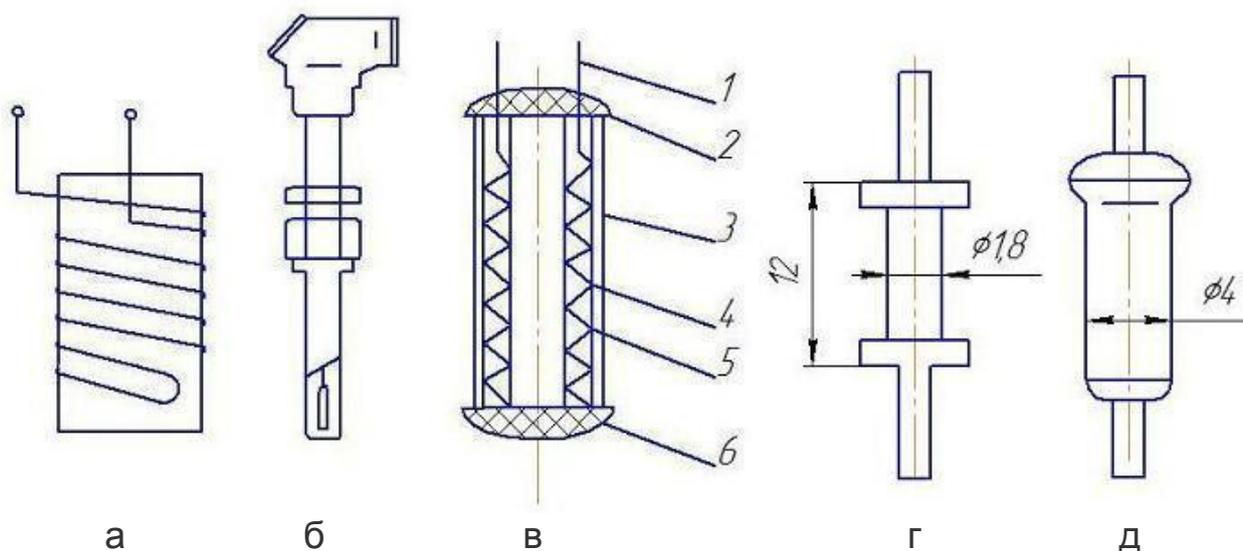


Рис. 4.3. Термометры сопротивления:

а, б — с медным терморезистором; в — с платиновым терморезистором;  
г, д — с полупроводниковыми терморезисторами

В качестве материала для терморезистора используют такие чистые металлы, как Pt, Cu и некоторые другие (Ni, Fe, W, Mo); кроме того, могут быть использованы и некоторые полупроводниковые материалы. Основной показатель термометра сопротивления – отношение сопротивления при 100 °С к сопротивлению при 0 °С ( $W_{100}=R_{100}/R_0$ ). В технике измерений широкое распространение получили термометры сопротивления, представленные в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Стандартные типы термометров сопротивления

Тип	Обозначение	Диапазон	$W_{100}$
Медный	ТСМ 50М	-50...+200	1,426
Медный	ТСМ 50М	-190...+200	1,428
Медный	ТСМ 100М	-50...+200	1,426
Медный	ТСМ 100М	-190...+200	1,428
Платиновый	ТСМ 50П	-200...+750	1,385
Платиновый	ТСМ 50П	-200...+750	1,391
Платиновый	ТСМ 100П	-200...+750	1,385
Платиновый	ТСМ 100П	-200...+750	1,391

Чистая платина, для которой отношение сопротивления при 100 °С к сопротивлению при 0 °С составляет 1,3925, в наибольшей степени удовлетворяет основным требованиям по химической стойкости,

стабильности и воспроизводимости физических свойств и занимает особое место в терморезисторах для измерения температуры. Платиновые термометры сопротивления используются для интерполяции Международной температурной шкалы в диапазоне от  $-259,34$  до  $+630,74$  °С. В этом диапазоне температур платиновый термометр сопротивления превосходит по точности измерения термоэлектрический термометр.

Термометры сопротивления по **конструктивному признаку** подразделяются на такие:

- погружные (измерение температуры в потоке);
- поверхностные (измерение температуры на поверхности тела).

*Преимущества:*

- высокая степень точности измерения температуры;
- возможность применения стандартной градуировочной шкалы во всем диапазоне измерения;
- электрическая форма выходного сигнала.

*Недостатки:*

- требуются высокочувствительные и точные приборы из-за малого значения температурного коэффициента электрического сопротивления;
- невозможно измерить температуру в отдельной точке тела или среды из-за значительных размеров чувствительного элемента;
- для измерения электрического сопротивления требуется посторонний источник электропитания.

#### **4.2.5. Дилатометрические и биметаллические термометры**

Дилатометрические и биметаллические термометры основаны на зависимости линейной деформации тела от температуры. В основном используются в качестве первичных измерительных преобразователей в системах автоматического регулирования температуры.

В дилатометрических термометрах в качестве чувствительного элемента используется металлическая трубка, внутри которой закреплен стержень из металла с меньшим коэффициентом линейного расширения. В биметаллических термометрах чувствительный элемент — термобиметаллическая пластина из двух металлов, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения, с разным коэффициентом линейного расширения

### **4.3. Оптические методы измерения температуры**

**Пирометрами излучения**, или просто **пирометрами**, называют приборы для измерения температуры тел по тепловому излучению. Измерение температуры тел пирометрами основано на использовании законов и свойств теплового излучения.

Особенностью методов пирометрии является то, что информация об измеряемой температуре передается неконтактным способом. Благодаря этому удается избежать искажений температурного поля объекта измерений, так как не требуется непосредственного соприкосновения термодатчика с телом.

Основной величиной, воспринимаемой глазом исследователя или приемниками теплового излучения пирометров, является интенсивность или яркость излучения тела. Спектральная интенсивность излучения представляет собой поток лучистой энергии, испускаемой в бесконечно малом интервале длин волн в данном направлении элементарной площадкой в пределах единичного телесного угла. Этот угол отнесен к проекции указанной площадки на плоскость, которая перпендикулярна направлению излучения.

**По характеру получения информации** различают следующие пирометры:

- для локального измерения температуры участка поверхности тела;
- для анализа температурных полей (это положено в основу работы тепловизоров).

**По принципу действия** пирометры для локального измерения температуры разделяют на такие:

- 1) яркостные;
- 2) цветные;
- 3) радиационные.

#### **4.3.1. Яркостные пирометры**

Действие яркостных пирометров основано на использовании зависимости спектральной плотности излучения (или спектральной яркости) тела от его температуры. Применяются они для измерения температуры от 1000 до 6000 К.

Яркостные пирометры, используемые в видимой части спектра излучения с регистрацией сигнала с помощью глаз исследователя, называются **оптическими пирометрами**. Они являются наиболее простыми в обслуживании и широко применяются для измерения температуры. В случае, когда чувствительным элементом является фотоэлемент, такие пирометры называются **фотоэлектрическими**. Применение фотоэлемента позволяет исключить субъективную составляющую погрешности и использовать эти приборы в системах автоматического регулирования и автоматизации экспериментов.

Поскольку энергия, излучаемая реальными телами, меньше энергии излучения абсолютно черного тела, при измерении действительной температуры тела  $T_D$  яркостные пирометры покажут более низкую яркостную температуру  $T_Y$ .

Под **яркостной температурой** понимается такая условная температура, при которой абсолютно черное тело для данной длины волны имеет такую же спектральную интенсивность излучения  $E_{\lambda_0}$ , что и реальное тело при его действительной температуре  $T_d$ . Таким образом,

$$E_{\lambda}(T_d) = E_{\lambda_0}(T_j).$$

Связь яркостной температуры  $T_j$  с действительной температурой  $T_d$  находится с помощью законов излучения:

— закона излучения Вина (для малых значений произведения  $\lambda T$ )

$$E_{\lambda_0} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные Планка;  $\lambda$  — длина волны;  $T$  — температура;

— закона Планка (для больших значений произведения  $\lambda T$ )

$$E_{\lambda_0} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}.$$

Для вывода расчетного соотношения воспользуемся законом излучения Вина с учетом выражения для спектральной степени черноты тела

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda_0}(T_j)}{E_{\lambda_0}(T_d)}.$$

Тогда получим соотношение

$$\varepsilon_{\lambda} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_d}}} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_j}}}, \quad \text{или} \quad \varepsilon_{\lambda} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_d}}} = \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_j}}},$$

после логарифмирования которого имеем

$$\ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} + \frac{c_2}{\lambda T_d} = \frac{c_2}{\lambda T_j}.$$

Перенесем в левую часть обратные значения температур, а все остальные члены — в правую часть:

$$\frac{1}{T_d} - \frac{1}{\lambda T_j} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}.$$

Обозначим величину в правой части через коэффициент  $\alpha = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}$ , который будет постоянным для заданной длины волны, тогда расчетное соотношение для определения действительной температуры имеет вид

$$T_d = T_j + \frac{\alpha T_j^2}{1 - \alpha T_j}. \quad (4.1)$$

Таким образом, для определения **действительной температуры**  $T_d$  необходимо измерить **яркостную температуру**  $T_j$  и знать **спектральную степень черноты тела**  $\varepsilon_\lambda$  при длине волны, на которой производилось измерение.

Выражение (4.1) применимо в области распространения закона излучения Вина. При измерении температуры в области больших значений произведения  $\lambda T$  для получения зависимости между  $T_d$  и  $T_j$  следует использовать закон Планка.

Для измерения яркостной температуры в видимой части спектра широко используются оптические пирометры с исчезающей нитью переменного и постоянного накала. Схема такого пирометра представлена на рис. 4.4.

Фокусирование изображения объекта измерения 1 на плоскость нити лампы 4 осуществляется с помощью объектива 2. Окуляр 6, предназначенный для наблюдения нити лампы на фоне изображения объекта измерения, используется для получения резкого изображения нити, которое через диафрагму 7 воспринимается наблюдателем 8.

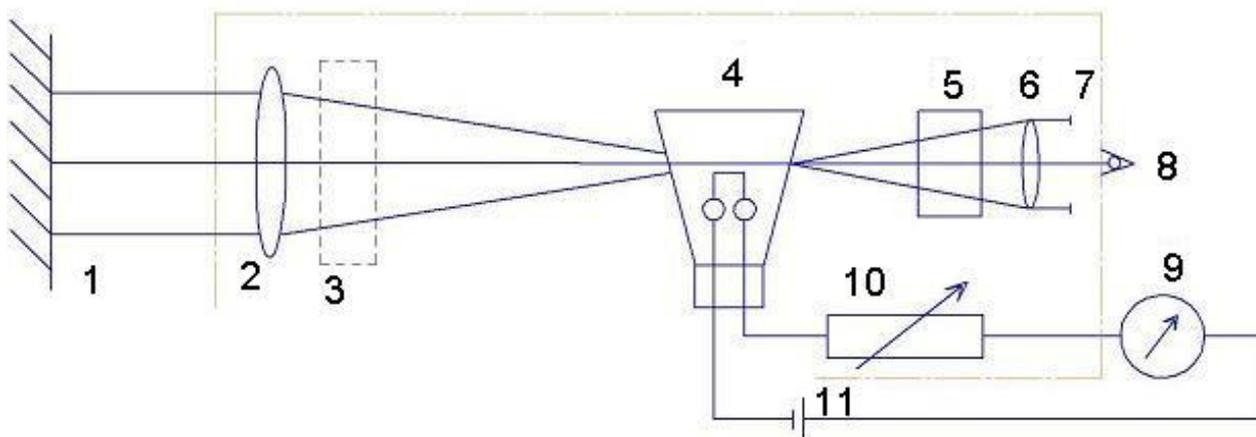


Рис. 4.4. Оптический яркостный пирометр ОППИР-017:

- 1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — ослабляющий (дымчатый) фотофильтр;  
 4 — нить накала лампы; 5 — красный светофильтр; 6 — окуляр; 7 — диафрагма;  
 8 — глаз наблюдателя; 9 — миллиамперметр; 10 — реостат; 11 — батарея

Для выделения достаточно узкой спектральной области излучения применяют стеклянный красный светофильтр 5, обеспечивающий выделение участка с эффективной длиной волны около 0,65 мкм. Для облегчения наводки и фокусировки объектива и окуляра, особенно при небольшой яркости объекта измерения, этот светофильтр может быть выведен из поля зрения — его можно установить на место непосредственно перед измерением.

Стабильность характеристик пирометрической лампы с вольфрамовой нитью обеспечивается, если температура нити не превышает 1700 К. Поэтому при измерении более высокой температуры перед лампой устанавливают ослабляющий (дымчатый) светофильтр 3.

Питание лампы осуществляется от батареи 11. Сила тока регулируется переменным сопротивлением 10 и определяется с помощью миллиамперметра 9, шкала которого обычно градуируется в градусах яркостной температуры.

*В момент достижения равенства спектральных плотностей излучения объекта измерения и нити лампы вершина нити исчезает на фоне свечения тела.*

При использовании **лампы переменного накала** ее нить является переменным эталоном интенсивности излучения — последняя зависит от силы протекающего через нить тока. Таким образом, сила тока является мерой яркостной температуры.

При использовании **лампы постоянного накала** ее нить имеет постоянную температуру. В этом случае выравнивание интенсивностей излучения осуществляется с помощью нейтрального (ослабляющего) клина переменной толщины, пропускательную способность которого

можно непрерывно изменять путем его поступательного движения. Яркостная температура тела определяется положением клина.

Отсутствие в настоящее время полных сведений о значениях степени черноты тел в различных интервалах длин волн создает серьезные трудности для пересчета яркостной температуры, измеренной пирометром второй разновидности, на действительную. Поэтому эти пирометры используют главным образом для контроля температуры, когда знание действительной температуры необязательно.

Одной из разновидностей яркостных пирометров являются **фотографические пирометры**. В них фиксация изображения объекта и эталона осуществляется на фотопленке, а их фотометрическое сравнение выполняется визуальным методом или с помощью приборов, измеряющих плотность почернения фотопленки, которые называются денсиметрами. Погрешности измерения температуры фотоэлектрическими пирометрами имеют те же причины, что и при измерении оптическими пирометрами.

#### 4.3.2. Цветовые пирометры

Принцип действия цветковых пирометров, называемых также пирометрами спектрального отношения, основан на использовании зависимости отношения спектральных плотностей излучения, измеренных в двух достаточно узких спектральных интервалах ( $E_{\lambda_1}$ ,  $E_{\lambda_2}$ ), от температуры излучающего тела. Эти приборы применяются для автоматического измерения температур в диапазоне 1000 ... 3000 К.

Назвали эти пирометры цветовыми потому, что в видимой части спектра изменение длины волны при фиксированной температуре тела сопровождается изменением его цвета.

Цветовая температура реального тела  $T_{\text{ц}}$  представляет собой такую температуру абсолютно черного тела, при которой отношение интенсивностей излучения  $E_{\lambda_{01}}/E_{\lambda_{02}}$  равно отношению  $E_{\lambda_1}/E_{\lambda_2}$  реального тела, имеющего действительную температуру  $T_{\text{д}}$  для тех же длин волн.

Таким образом,

$$\frac{E_{\lambda_{01}}(T_{\text{ц}})}{E_{\lambda_{02}}(T_{\text{ц}})} = \frac{E_{\lambda_1}(T_{\text{д}})}{E_{\lambda_2}(T_{\text{д}})} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} E_{\lambda_{01}}(T_{\text{д}})}{\varepsilon_{\lambda_2} E_{\lambda_{02}}(T_{\text{д}})}.$$

По аналогии с яркостными пирометрами используем выражение закона излучения Вина для  $E_{\lambda_{01}}$  и  $E_{\lambda_{02}}$ , после сокращения и логарифмирования получаем расчетное соотношение

$$\frac{1}{T_{\text{ц}}} - \frac{1}{T_{\text{д}}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2(\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}. \quad (4.2)$$

Таким образом, для определения **действительной температуры тела**  $T_{\text{д}}$  необходимо измерить его **цветовую температуру**  $T_{\text{ц}}$  и знать **спектральную степень черноты** тела  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$  в узких **спектральных интервалах длин волн**  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Если спектральная степень черноты в данном участке спектра не зависит от длины волны, т.е.  $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$ , то цветовая температура тела  $T_{\text{ц}}$  равна действительной температуре  $T_{\text{д}}$ . В этом случае цветовые пирометры не требуют введения поправок, обычных для оптических и радиационных пирометров.

Для тел, у которых спектральная степень черноты  $\varepsilon_{\lambda}$  изменяется с длиной волны, цветовая температура  $T_{\text{ц}}$  может быть больше и меньше действительной  $T_{\text{д}}$ . Необходимо отметить, что в видимой части спектра зависимость  $\varepsilon_{\lambda}$  от длины волны  $\lambda$  для большинства тел слабая, и поэтому для этих тел разность между температурами  $T_{\text{ц}}$  и  $T_{\text{д}}$  мала. Как и в случае с яркостными пирометрами, при измерении температуры в области больших значений произведения  $\lambda T$  для установления связи между цветовой и действительной температурами следует использовать закон Планка.

Цветовые пирометры бывают **двухканальными** (для измерения спектральных плотностей излучения используют два приемника излучения) и **одноканальными** (отношение плотностей излучения измеряется одним фотоэлементом, который поочередно освещается излучением с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ).

Схема одноканального пирометра показана на рис. 4.5.

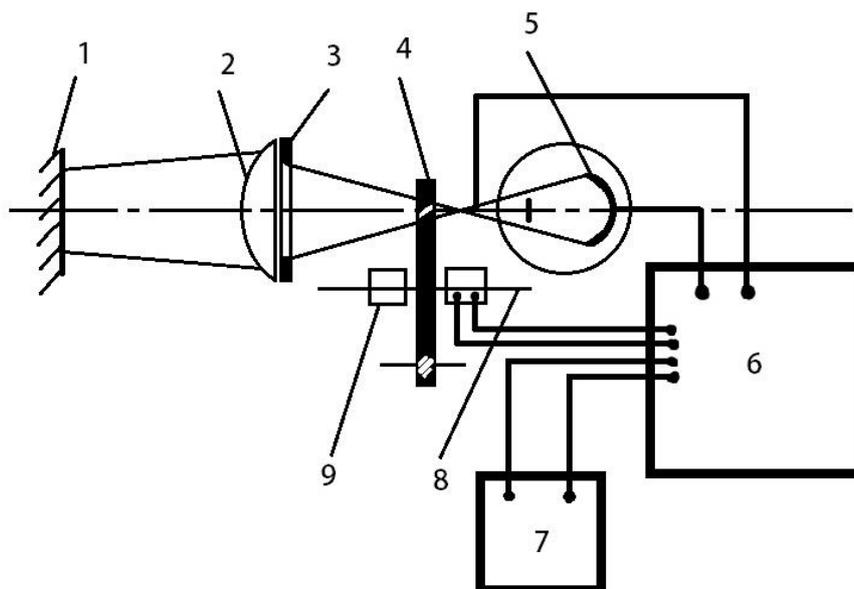


Рис. 4.5. Одноканальный цветовой пирометр ЦЕП-3:  
 1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — диафрагма;  
 4 — obtюратор; 5 — фотоэлемент; 6 — усилитель; 7 — потенциометр;  
 8 — синхронный коммутатор; 9 — электродвигатель

Излучение от объекта измерения 1 через объектив 2, диафрагму 3 и obtюратор 4, вращаемый электродвигателем 9, поступает на фотоэлемент 5. Obtюратор представляет собой диск с двумя отверстиями, в одном из которых установлен красный светофильтр КФ, а в другом — синий СФ. При вращении obtюратора на фотоэлемент попеременно попадает излучение спектральных плотностей, соответствующих красному и синему интервалам длин волн. Сигналы фотоэлемента (импульсы фототока), пропорциональные спектральным плотностям излучения  $E_{\lambda 1}$ ,  $E_{\lambda 2}$ , через усилитель 6 подаются на автоматический потенциометр 7. Синхронный коммутатор 8 позволяет усилителю 6 «различать цвет» входного сигнала.

Цветовые пирометры имеют более низкую чувствительность, чем яркостные, в особенности при высокой температуре, но при их использовании поправки на температуру, связанные с отличием свойств реальных тел от свойств абсолютно черного тела, получаются меньшими, чем при использовании других методов.

### 4.3.3. Радиационные пирометры

Радиационные пирометры, называемые также пирометрами полного излучения, — это приборы для измерения температуры по интегральной интенсивности (яркости) излучения тела. Они используются для измерения температуры от 20 до 3500 °С. Эти приборы имеют меньшую чувствительность, чем яркостные и цветковые, но измерения радиационными методами технически более простые.

Радиационные пирометры измеряют не действительную температуру тела  $T_d$ , а условную температуру, называемую радиационной  $T_p$ . Эта температура представляет собой такую температуру абсолютно черного тела  $T_p$ , при которой его интегральная интенсивность излучения  $E_0$  во всем диапазоне длин волн от 0 до  $\infty$  равна интегральной интенсивности излучения реального тела  $E$  при действительной температуре  $T_d$ , т.е.  $E_0(T_p) = E(T_d)$ .

В соответствии с законом Стефана—Больцмана поверхностная плотность потока интегрального излучения  $E$  связана с температурой  $T$  для серого тела зависимостью  $E = C_0 \left(\frac{T_p}{100}\right)^4$ , где  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Подставив это выражение в (4.3), получим  $C_0 \left(\frac{T_p}{100}\right)^4 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T_d}{100}\right)^4$ .

Тогда расчетное соотношение имеет вид  $T_d = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}$ , где  $\varepsilon$  — интегральная степень черноты тела (для абсолютно черного тела  $\varepsilon = 1$ ).

Радиационные пирометры состоят из телескопа, приемника интегрального излучения, вторичного прибора и вспомогательных устройств. Оптическая система телескопа концентрирует энергию излучения тела на приемник интегрального излучения, степень нагрева которого (температура) и выходной сигнал пропорциональны падающей энергии излучения и определяют радиационную температуру тела.

В качестве приемника излучения (чувствительного элемента) чаще всего используют термобатареи из нескольких последовательно соединенных термопар. Наряду с термобатареями в качестве приемников интегрального излучения могут быть использованы и другие теплочувствительные элементы, например болометры, в которых излучение от объекта измерения нагревает чувствительный к температуре резистор. Изменение температуры резистора является мерой радиационной температуры.

Оптические системы телескопов радиационных пирометров могут быть двух видов:

- рефракторная — с собирающей линзой (рис. 4.6, а);
- рефлекторная — с вогнутым зеркалом (рис. 4.6, б).

В качестве вторичных приборов, регистрирующих сигнал приемника излучения, используют показывающие самопишущие и регистрирующие приборы. Шкала вторичных приборов обычно градуируется в градусах радиационной температуры.

Для исключения погрешностей, обусловленных нагревом корпуса

пирометра (телескопа) из-за теплообмена его с окружающей средой и в результате поглощения излучения от объекта измерения, телескопы радиационных пирометров могут быть снабжены различными системами температурной компенсации.

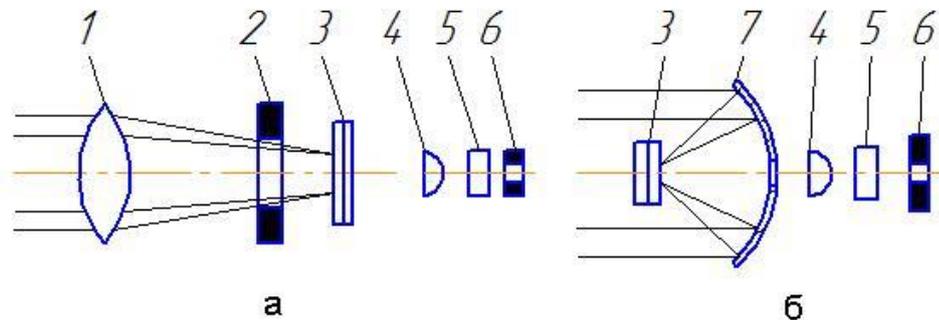


Рис. 4.6. Оптические системы телескопов радиационных пирометров: а — с рефракторной оптической системой; б — с рефлекторной оптической системой; 1 — объектив; 2 — диафрагма; 3 — приемник излучения; 4 — окуляр; 5 — красный или дымчатый светофильтр; 6 — диафрагма; 7 — зеркало

Эти приборы имеют меньшую чувствительность, чем яркостные и цветные, но измерения радиационными методами часто удается осуществить технически проще.

#### 4.3.4. Тепловизоры

Измерение низких температур (ниже 400...500 °С) обычными яркостными и цветными пирометрами в видимой части спектра осуществить практически невозможно. В соответствии с законом Планка интенсивность излучения при низких температурах и длинах волн, меньших 0,7 мкм, становится настолько малой, что измерить ее чрезвычайно трудно. В инфракрасной же области спектра ( $\lambda=0,76...1000$  мкм) интенсивность излучения значительно выше.

Современные средства позволяют трансформировать невидимое инфракрасное излучение тел в видимое и создавать приборы нового типа — тепловизоры, которые обеспечивают визуализацию теплового поля нагретых объектов. Для современных тепловизоров характерны большое разнообразие схем и конструкций, широкий диапазон областей их применения. Диапазон температур, измеряемых современными тепловизорами, составляет от -20 до 900 °С.

Рассмотрим принцип получения изображения теплового поля в тепловизионных приборах на примере схемы тепловизора с оптико-механическим сканированием (рис. 4.7).

Инфракрасное излучение от объекта исследования попадает в приемную оптическую систему 1, в которую входит сканирующее устройство 2. Сканирующее устройство обеспечивает последовательный просмотр поверхности объекта по заданному закону узким оптическим

лучом с угловым размером  $\delta$ . Обзор происходит в пределах углов зрения  $\alpha$  и  $\beta$ . Таким образом, сканирующее устройство последовательно направляет на приемник излучения 3 изображение отдельных элементов объекта исследования. В тех случаях, когда приемник излучения 3, преобразующий энергию инфракрасного излучения (ИК-сигнал) в электрический сигнал, состоит из нескольких элементов, поочередное подключение их к усилителю электрического сигнала 5 осуществляется с помощью коммутирующего устройства 4. На заключительном этапе усиленный сигнал подается на индикатор изображения 6 (видеомонитор), где формируется видимое изображение объекта.

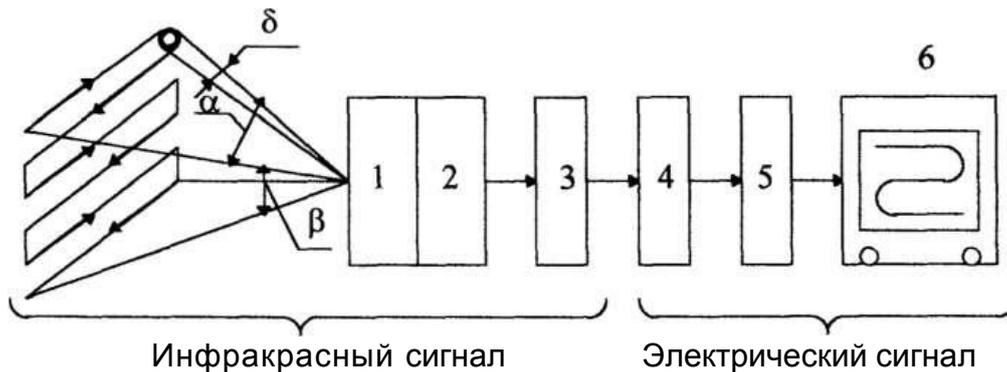


Рис. 4.7. Структурная схема тепловизора

Рассмотрим основные элементы тепловизоров.

Оптическая система концентрирует излучения на приемник и повышает его энергетическую освещенность, при этом параметры оптической системы определяют поле зрения тепловизора. В тепловизионных приборах возможно применение зеркальной, линзовой и зеркально-линзовой оптических систем. Линзы оптических систем тепловизоров изготавливаются из материалов, пропускающих инфракрасное излучение. В современных тепловизорах используется спектральный диапазон длин волн 3...5 мкм и 8...12 мкм. Сменные объективы с различными фокусными расстояниями дают возможность согласовать поле зрения тепловизора с задачами измерения — изображение объекта, поступающее на приемник излучения, может быть уменьшенным (в приборах для наблюдения крупных объектов) или увеличенным (в телевизионных микроскопах).

Для создания видимого изображения теплового поля тепловизоры снабжены системами сканирования (развертки), с помощью которой осуществляется просмотр всего объекта наблюдения. Частота кадров изображения определяет пригодность данного типа тепловизора для определения нестационарных температурных полей, а, кроме того, она определяет и геометрическое разрешение тепловизора, поскольку тесно связана с постоянной времени приемника излучения. Сканирование осуществляется с помощью механических и оптико-механических систем. В современных тепловизорах применяют сканирующие устройства

пассивного типа, выполняющие развертку по заранее заданной неизменной программе.

Неотъемлемой частью тепловизоров являются приемники излучения, преобразующие энергию инфракрасного излучения в электрический сигнал. Типом применяемого приемника излучения в первую очередь определяется спектральный диапазон чувствительности тепловизора, скорость развертки и связанные с ней частота кадров и число точек изображения. Действие приемников излучения основано на различных физических явлениях. Приемники, в которых тепловое воздействие падающего потока излучения приводит к изменению электрических или иных свойств, называют тепловыми. К ним относятся болометры, термоэлементы и пироэлектрические приемники.

Приемники, в которых имеет место прямое взаимодействие между падающими фотонами и электронами материала приемника, называют фотонными. К ним относятся фотоэлементы и фотоумножители, фоторезисторы, приемники с р-п-переходом.

Создание быстродействующих сканирующих тепловизоров обеспечено с помощью полупроводниковых фотоприемников. Полупроводниковые приемники излучения обладают высокой чувствительностью в характерном для тепловизоров диапазоне длин волн при низких температурах (4...90 К) и потому нуждаются в криогенных системах охлаждения.

При использовании многоэлементных приемников излучения последовательное считывание информации осуществляется с помощью коммутирующих устройств, работа которых может быть обеспечена световым или электронным лучом.

Тепловизоры обычно имеют черно-белые или цветные видеомониторы и устройства аналоговой или цифровой обработки изображения.

Как и в случае применения яркостных, цветовых и радиационных пирометров, действительная температура объекта исследования с помощью тепловизоров в настоящее время может быть определена только при известном значении степени черноты поверхности объекта.

Поскольку определение оттенков черно-белого изображения на экране тепловизора затруднительно, в тепловизорах предусмотрена возможность выделения изотерм. Устройства, обеспечивающие эту возможность, позволяют последовательно определять изотермы, соответствующие разным температурам.

С помощью устройства для выделения изотерм можно достаточно точно определить уровень сигнала, соответствующего температуре исследуемой области объекта, и уровень сигнала, соответствующего температуре некоторого эталонного излучателя (с известной температурой и степенью черноты), а затем с помощью градуировочных зависимостей или номограмм можно определить и действительную температуру объекта.

Если степень черноты поверхности близка к 1, то можно, определив поток излучения объекта, непосредственно определить и его температуру. В случае, если степень черноты поверхности объекта известна и может быть принята постоянной в пределах исследуемой области, можно измерить температуру какого-либо участка поверхности объекта с помощью пирометра и этот участок использовать в качестве эталона.

## Глава 5

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ, РАСХОДА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

В настоящее время в исследовательской практике для определения скорости потоков жидкости и газа наиболее широкое распространение получили *пневмометрический* и *термоанемометрический* методы.

#### 5.1. Пневмометрический метод измерения скоростей

Пневмометрический метод измерения скоростей широко распространен в практике экспериментальных исследований благодаря своей простоте и доступности.

При малых скоростях течения среды (число Маха  $M < 0,3$ ), когда можно не учитывать ее сжимаемость, уравнение Бернулли для идеальной жидкости имеет вид

$$p + \frac{\rho w^2}{2} = p^*,$$

где  $p^*$ ,  $p$  — полное давление (давление торможения) и статическое давление;  $\rho$ ,  $w$  — плотность и скорость потока.

Уравнение Бернулли для идеальной жидкости лежит в основе пневмометрического метода определения скорости несжимаемого потока. Из этого уравнения следует, что

$$w = \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho}}.$$

Таким образом, для определения скорости потока в рассматриваемой точке необходимо знать полное давление  $p^*$ , статическое давление  $p$  и плотность потока  $\rho$ .

Для измерения полного давления  $p^*$  используется насадок Пито, представляющий собой круглую трубку, ось которой совпадает с

направлением потока, а открытый конец 1 направлен против потока (рис. 5.1). Другой конец трубки 2 присоединяется к манометру.

Для измерения статического давления  $p$  используют устройство другой конструкции, называемое насадком Прандтля (рис. 5.2). В нем для отбора потока предусмотрены отверстия или щели на боковой поверхности, расположенные на значительном расстоянии от носка насадка. В этом случае, как показала практика, давление, воспринимаемое в щелях и отверстиях, равно статическому давлению невозмущенного потока.

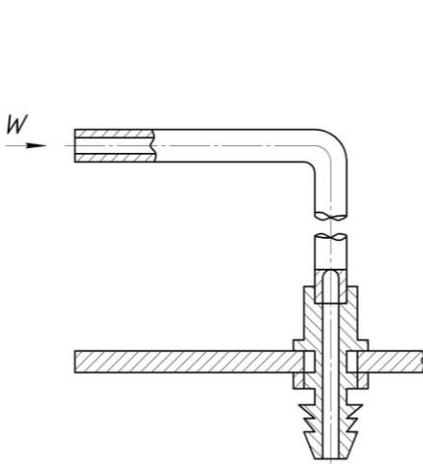


Рис. 5.1. Насадок Пито

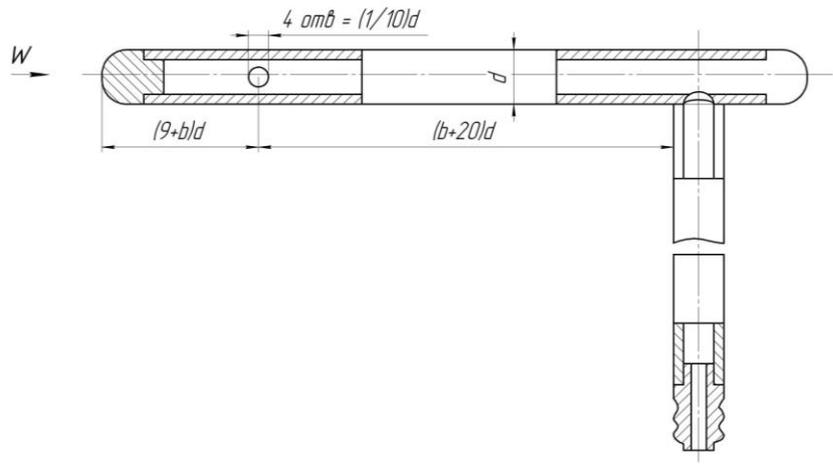


Рис. 5.2. Насадок Прандтля

Плотность потока  $\rho$  может быть определена по известному уравнению состояния или уравнению Клапейрона—Менделеева

$$\rho = \frac{p}{RT},$$

где  $R$  — газовая постоянная потока;  $T$  — температура потока в рассматриваемой точке.

Для определения скорости потока часто применяют зонды, представляющие собой комбинацию насадков статического и полного давления. Широко используют насадок Пито—Прандтля, изображенный на рис. 5.3.

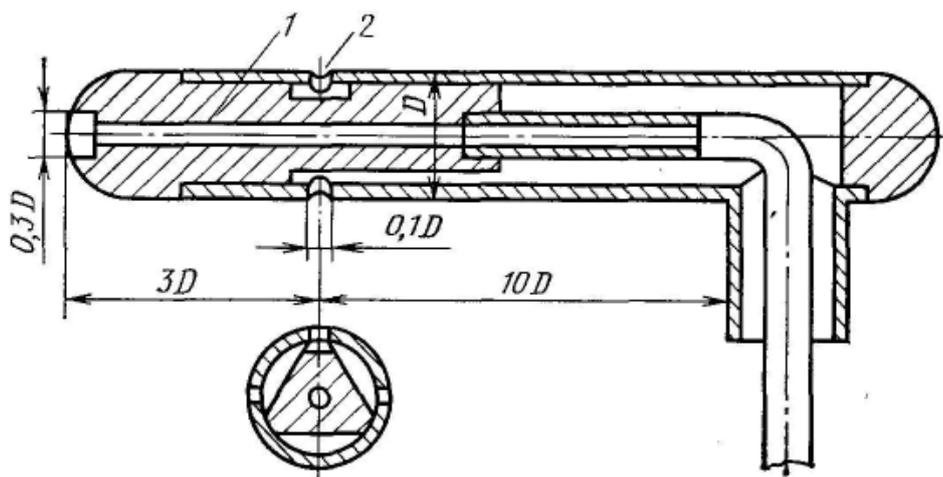


Рис. 5.3. Комбинированный насадок Пито—Прандтля

Продольное отверстие 1 насадка воспринимает полное давление, а отверстия 2 на боковой поверхности цилиндрического корпуса — статическое давление. Таким насадком можно измерять давление в газовых потоках с числами Маха не более 0,85.

Нижний предел скорости, измеряемой пневмометрическим методом, ограничивается чувствительностью микроманометров и обычно составляет 4 ... 6 м/с.

Как бы удачно ни была выполнена конструкция комбинированного зонда, динамическое давление измеряется им не вполне точно. Индивидуальные особенности насадка принято характеризовать поправочным коэффициентом  $\xi$ , который учитывает отличие истинного динамического напора от воспринятого насадком. С учетом этого уравнение для определения скорости потока  $w$  приобретает вид

$$w = \xi \sqrt{\frac{2(p^* - p)}{\rho}}$$

Для тщательно изготовленных комбинированных насадков типа насадка Пито—Прандтля поправочный коэффициент  $\xi$ , постоянен и близок к 1 в широком диапазоне чисел Рейнольдса  $Re$ . В случае, если насадок изготовлен с отклонением от рекомендуемых размеров и геометрии, то его необходимо тарировать в целях определения поправочного коэффициента. Сущность тарировки заключается в сравнении давлений, измеренных тарируемым и эталонным насадками, помещаемыми в те же условия, что и тарируемый. Обычно тарировка насадков проводится в аэродинамических трубах.

В реальных условиях работы насадки обтекаются не идеальной жидкостью, а вязкой. Однако многочисленными опытами установлено, что при больших числах Рейнольдса вязкость не оказывает влияния на показания насадков. При малых значениях  $Re$  поправка на влияние

вязкости, найденная экспериментально, для цилиндрического насадка выражается зависимостью  $\xi = 1 + \frac{5,6}{Re}$ .

В этой зависимости в качестве характерного размера для числа  $Re$  принят радиус приемного отверстия насадка, выполненного в виде тонкостенной трубки.

На показания насадков Пито и Прандтля может оказывать влияние угол скоса потока относительно оси насадка, если его значение превысит  $10 \dots 15^\circ$ . При углах скоса, меньше указанного диапазона, его влияние на измеряемые давления с помощью насадков Пито и Прандтля незначительно.

Направление потока в свободных струях (не ограниченных стенками со всех сторон) или каналах с прозрачными стенками можно определить с помощью шелковой или хлопчатобумажной нити. Достаточно просто и точно направление потока может быть определено с помощью насадка Пито на основе зависимости полного давления, воспринимаемого приемным отверстием, от направления набегающего потока. Для этого насадок помещают в поток, вращают его вокруг оси и по максимальным показаниям манометра ориентировочно определяют направление потока. Затем насадок поворачивают так, чтобы ось приемного отверстия была установлена под углом  $40 \dots 45^\circ$  к ориентировочно определенному направлению потока. В этом положении насадок наиболее чувствителен к углу атаки потока. По лимбу фиксируется угловое положение насадка, а по манометру — давление. Затем поворачивают насадок в противоположную сторону, проходя максимум давления, и находят второе положение насадка, в котором давление будет равно ранее зафиксированному. Тогда направление потока будет совпадать с направлением биссектрисы угла поворота насадка от первого до второго положения.

Для измерения направления двумерного потока пользуются насадком с двумя отверстиями, которые расположены симметрично относительно продольной оси насадка. Измерения можно проводить двумя методами:

- 1) прямым;
- 2) косвенным.

**При прямом методе измерения** к приемным отверстиям насадка подсоединяют дифференциальный манометр, а сам насадок устанавливают в координатник, позволяющий производить его вращение в плоскости изменения вектора скорости. Вращая насадок, добиваются такого его положения, при котором перепад давления, фиксируемого манометром, равен нулю. В этом случае ось насадка, являющаяся биссектрисой угла между отверстиями, будет совпадать с направлением скорости потока. Таким образом, при этом методе измерений направление скорости определяется непосредственно.

Прямой метод измерения при тщательном изготовлении координатников и насадка дает возможность измерить угол атаки потока с погрешностью около  $\pm(0,1...0,2^\circ)$  и не зависит от чисел Маха ( $M$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ).

На практике не всегда удобно и возможно поворачивать насадок. Тогда используют **косвенный метод измерения направления потока**. По этому методу насадок устанавливают в определенное положение, ориентированное по началу отсчета или оси канала, в котором движется поток жидкости или газа, и передвигают без вращения в намеченные области измерения. Так как в разных точках направление потока уже не будет симметричным относительно отверстий, то по манометру будут отмечены некоторые разности давлений. По разности этих давлений и тарировочной кривой данного насадка определяют углы скоса потока и, соответственно, направление потока. Предварительную тарировку насадка производят в аэродинамической трубе. Сущность тарировки заключается в установлении функциональной зависимости между перепадом давлений в отверстиях и углом скоса потока при различных скоростных напорах. Косвенный метод измерения требует менее сложного оборудования и меньших затрат времени на измерения, чем прямой метод. Недостатками косвенного метода являются меньшая точность по сравнению с прямым методом измерения и необходимость предварительной тарировки.

При измерении направления вектора скорости в трехмерном пространстве в одном насадке располагают четыре приемных отверстия, плоскости которых взаимно перпендикулярны. Вращая насадок в двух перпендикулярных плоскостях, проходящих через его центр, можно определить направление в трехмерном потоке прямым методом. В случаях, когда насадок невозможно поворачивать, измерения проводят косвенным методом. Наиболее целесообразно проводить измерения, совмещая прямой и косвенный методы измерения, когда один угол скоса определяется вращением, а второй — по показаниям манометра.

При больших скоростях, соответствующих  $M > 0,3$ , измерение скорости потока имеет свои особенности. В этом случае необходимо учитывать сжимаемость потока, и поэтому при измерениях таких скоростей следует использовать уравнение Бернулли для сжимаемого газа

$$w = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT^* \left[ 1 - \left( \frac{p}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (5.1)$$

где  $T^*$  — термодинамическая температура потока или температура торможения;  $k$  — показатель адиабаты.

При скоростях потока, соответствующих  $M > 0,85$ , на цилиндрической части насадка с полусферической головкой появляются местные сверхзвуковые зоны со скачками уплотнения, расположенными впереди приемных отверстий, которые вносят искажения в результаты измерения

статического давления  $p$ . Для уменьшения этих искажений при измерении высокоскоростных потоков приемные отверстия насадка смещают вниз по потоку и используют насадки с удлиненной головкой конической или оживальной (спрофилированной дугами окружности) формы.

При измерении сверхзвуковых скоростей потока (при  $M > 1$ ) перед насадком возникает скачок уплотнения. В этом случае полное и статическое давления, измеренные с помощью насадков, не совпадают с их значениями в невозмущенном сверхзвуковом потоке, а определяются состоянием потока за скачком уплотнения. Поэтому использование соотношения (5.1) затруднительно, так как необходимо определить величины полного давления  $p^*$  и статического давления  $p$  в невозмущенном потоке по измеренным соответствующим значениям  $p_0^*$  и  $p_0$  за прямым скачком уплотнения или по измеренным соответствующим значениям  $p_1^*$  и  $p_1$  за косым скачком уплотнения.

Между числом Маха в невозмущенном сверхзвуковом потоке и любой парой величин из ряда давлений  $p^*$ ,  $p$ ,  $p_0^*$ ,  $p_0$ ,  $p_1^*$ ,  $p_1$  существует зависимость, определяемая известными газодинамическими соотношениями. Поэтому, измерив любую такую пару величин, можно решить задачу определения числа  $M$  и соответствующую ему скорость  $W$ , используя соотношение

$$W = \sqrt{\frac{kRT^*}{1 - \frac{k-1}{2}M^2}}$$

Для измерения полного давления  $p_0^*$  после прямого скачка уплотнения насадок должен иметь затупленную форму головки, а диаметр приемного отверстия должен быть значительно меньше наружного диаметра насадка с тем, чтобы это отверстие целиком находилось за прямым скачком уплотнения.

Для измерения статического давления  $p$  следует применять насадок с заостренной конической или оживальной головкой. Обычно в сверхзвуковых потоках полное и статическое давления измеряют различными насадками. В этом случае необходимо насадки устанавливать так, чтобы в точке измерения скорости потока находился носик насадка полного давления и через эту точку проходила плоскость расположения отверстий статического давления.

Для измерения полного  $p_1^*$  и статического давлений после косоугольного скачка уплотнения  $p_1$  используют насадок, имеющий форму клина с соответствующими приемными отверстиями.

Полное давление в сверхзвуковом потоке обычно измеряют трубкой Пито в дозвуковой части аэродинамической трубы в предположении, что поток ускоряется изоэнтропически, т.е. без потерь тепла через стенки трубы.

Поверхность измерительных насадков для сверхзвуковых потоков тщательно обрабатывается и полируется. Приемные отверстия не должны иметь заусенцев и неровностей. Необходимо, чтобы угол заострения головки насадка статического давления был меньше предельного угла, при котором возникает отсоединенная волна на конусе.

Насадки для измерения скоростей, близких скорости звука ( $M=1$ ), не должны иметь площадь поперечного сечения более 0,1% от площади канала, например, аэродинамической трубы, поскольку иначе измеряемая скорость будет существенно отличаться от действительной из-за сужения насадком поперечного сечения канала.

## 5.2. Термоанемометрический метод измерения скорости потока

Принцип действия **термоанемометра** основан на зависимости, существующей между электрическим сопротивлением или температурой нагретого проводника, помещенного в поток, и скоростью его обтекания. Чувствительным элементом термоанемометра является проволочный или пленочный датчик, который нагревается электрическим током. Термоанемометр с проволочным датчиком изображен на рис. 5.4.

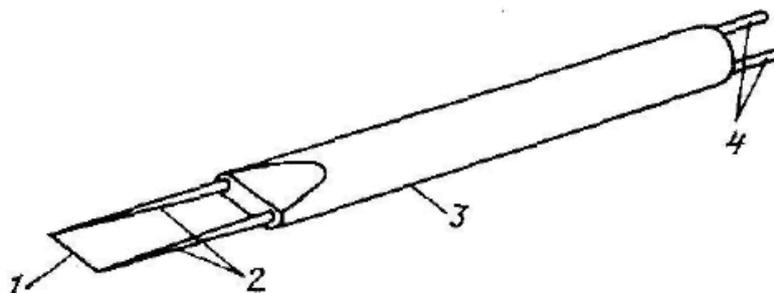


Рис. 5.4. Термоанемометр с проволочным датчиком:

1 — нагреваемая нить; 2 — поддерживающие стойки; 3 — корпус; 4 — выводы

Проволочный датчик используется при измерениях в изотермических условиях, а также при температурах потока до  $500^{\circ}\text{C}$ . Пленочные датчики применяются в газовых потоках, имеющих температуру более  $500^{\circ}\text{C}$ , а также для измерений в потоках с большими скоростными напорами.

Материалом нити в проволочном датчике является вольфрам, платина или платиновые сплавы (платинородий, платиноиридий). Диаметр нити составляет 1 ... 15 мкм, а длина между стойками — 0,5 ... 5 мм. Для обеспечения разности температур между потоком и нитью производится ее нагрев путем пропускания электрического тока.

Теплота, выделяемая в чувствительном элементе датчика при прохождении электрического тока, отводится от него в результате естественной и вынужденной конвекции, излучения и теплопроводности.

Для определения скорости потока  $w$ , обтекающего нить, необходимо знать для каждого случая **силу тока**, протекающего через нить датчика, и **сопротивление нити**. На практике с помощью специальных электрических схем стараются одну из указанных величин поддерживать постоянной, в то время как другая изменяется вместе с изменением скорости потока.

В зависимости от того, какая величина поддерживается постоянной, различают два метода измерения скорости термоанемометром:

- метод постоянной силы тока;
- метод постоянной температуры.

**Метод постоянной силы тока** состоит в том, что нить датчика нагревается постоянным по величине током, а скорость определяется по изменению электрического сопротивления. При воздействии потока на нить вследствие увеличения коэффициента теплоотдачи происходит возрастание температуры нити, что приводит к изменению ее сопротивления.

В **методе постоянной температуры** (метод постоянного сопротивления) температура нити датчика, а следовательно, и ее сопротивление сохраняются постоянными, а скорость определяется по изменению силы тока, требующейся для поддержки постоянной температуры (сопротивления) нити датчика. В этом случае тепловая инерция нити очень мала, что обеспечивает более точные измерения по сравнению с режимом постоянного тока.

Тарировку термоанемометров осуществляют в аэродинамических трубах, при этом нить располагают перпендикулярно усредненной скорости потока  $W_{\text{ср}}$ . Одновременно в потоке размещают насадок Пито—Прандтля и определяют известным пневмометрическим методом скорость потока  $W$ . Для каждого значения  $W$  определяют усредненное по времени значение падения напряжения на нити  $E_{\text{ср}}$  и зависимость  $E_{\text{ср}}=f(w)$ .

При выполнении измерений необходимо обеспечить равенство температуры среды той температуре, при которой проводилась тарировка, так как отклонение температуры потока на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  от условий тарировки приводит к погрешностям в определении скорости на  $2\%$ .

При измерениях нить термоанемометра устанавливается перпендикулярно вектору средней скорости потока и по падению напряжения на нити находят значение скорости  $W$ , используя тарировочную зависимость.

### 5.3. Измерение расходов жидкостей и газов

В научных исследованиях часто возникает необходимость в измерении расхода среды, т. е. количества среды, которая протекает через сечение канала в единицу времени.

Для измерения расхода используют такие приборы, как **расходомеры** и **счетчики количества текучей среды**.

**Расходомеры** позволяют определить расход вещества в любой момент времени, а следовательно, и количество вещества за любой промежуток времени.

**Счетчики количества** измеряют суммарное количество среды, протекающей через сечение канала, за некоторый промежуток времени (смена, сутки). По их показаниям можно вычислить расход в виде средней величины за данный промежуток времени.

Расходомеры бывают:

- переменного перепада давления;
- постоянного перепада давления;
- тахометрические;
- калориметрические;
- электромагнитные;
- ультразвуковые.

**Электромагнитные расходомеры** (рис. 5.5) применяют для измерения расхода агрессивных и загрязненных токопроводящих жидкостей.

Принцип действия основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому наведенная в проводнике ЭДС пропорциональна скорости его движения в магнитном поле. Роль проводника выполняет токопроводящая жидкость.

**Ультразвуковые расходомеры** (рис. 5.6) предназначены для измерения расхода жидкостей. Они обладают большим быстродействием, позволяют замерять расходы в потоках, параметры которых изменяются с частотой до 10 кГц, а также очень малые расходы.

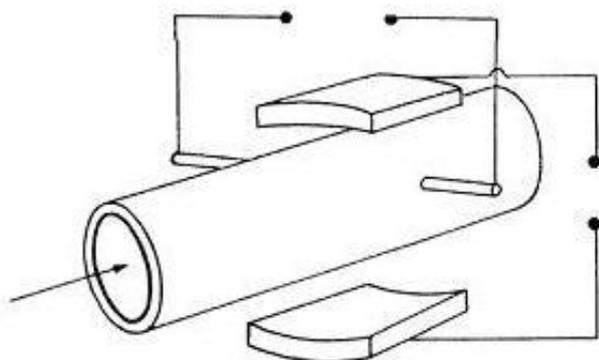


Рис. 5.5. Электромагнитный расходомер

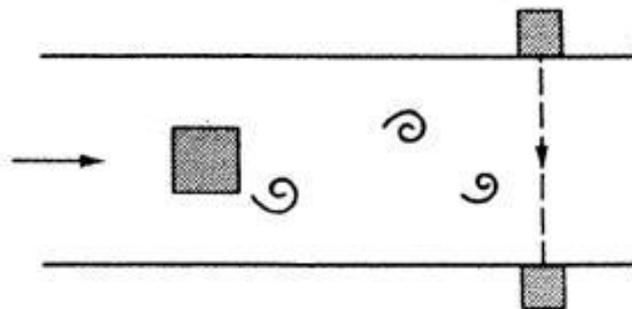


Рис. 5.6. Ультразвуковой расходомер

**Расходомеры переменного перепада давления.** Здесь функции датчика осуществляют суживающие устройства, которые выполняются в форме диафрагм (рис. 5.7, а), сопел Вентури (рис. 5.7, б), суживающих сопел (рис. 5.7, в, г).

Специальные устройства, установленные в трубопроводе, создают местное сужение, где поток ускоряется, а давление понижается. Полученная таким путем разность давлений на местном сопротивлении является мерой скорости потока, а следовательно, расхода вещества, протекающего через это сужение.

Для получения надлежащей точности измерения к суживающим устройствам предъявляют определенные требования. Поток измеряемой среды должен заполнять все поперечное сечение трубопровода. На входе в суживающее устройство поток должен быть установившимся. Для этих целей до и после него размещают прямые участки трубопроводов определенной длины.

Различают **стандартные** и **нестандартные** суживающие устройства.

Выпускают стандартные диафрагмы и сопла с диаметром от 50 мм до 1,6 м. При этом погрешность измерения составляет 1 — 2%.

Нестандартные суживающие устройства, расходные характеристики которых могут быть определены расчетным путем, не дают достоверных результатов. Поэтому после их установки на месте необходима индивидуальная тарировка.

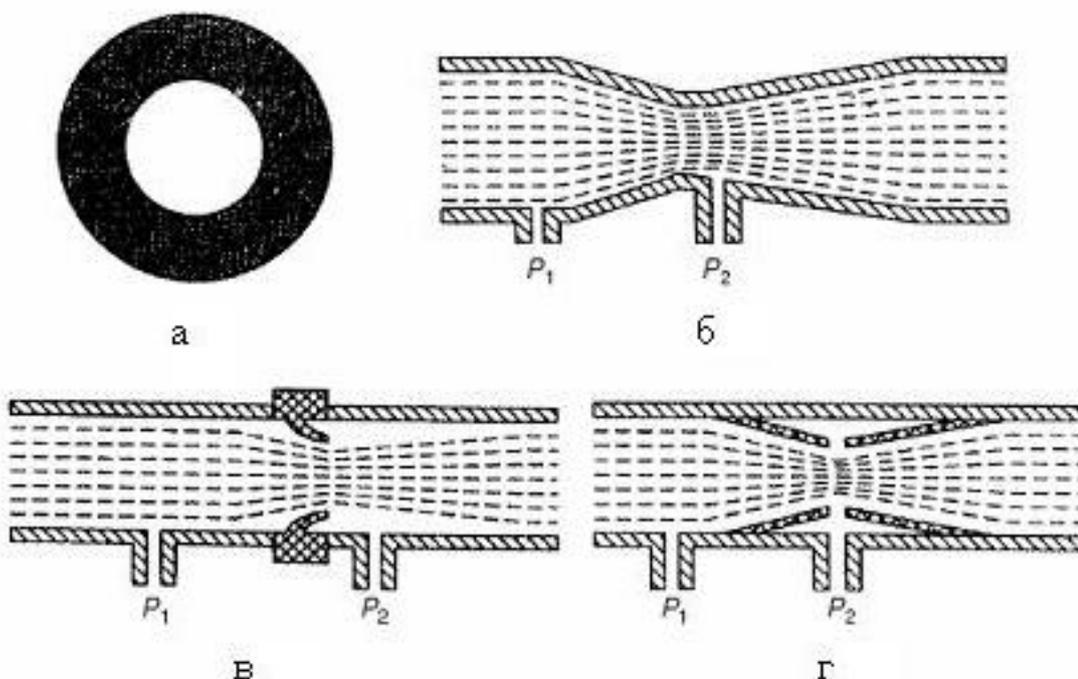


Рис. 5.7. Суживающие устройства

**Расходомеры постоянного перепада давления.** Чувствительным элементом расходомера является подвижное тело, выполненное в

форме поплавка или ротора. Чувствительный элемент размещается в вертикальном канале переменного сечения, через который пропускается измеряемая среда. Под воздействием гидродинамических сил чувствительный элемент перемещается вверх, причем проходное сечение увеличивается в прямой зависимости от возрастания расхода, а перепад среднего статического давления сохраняется при этом постоянным. По перемещению чувствительного элемента можно определить расход измеряемой среды.

Среди расходомеров постоянного перепада давления распространение получили **ротаметры** (рис. 5.8). Они выпускаются со стеклянным (РС) или металлическим корпусом (РМ).

Ротаметрами можно измерять очень малые расходы порядка 0,0025 м<sup>3</sup>/ч по воде и 0,006 м<sup>3</sup>/ч по воздуху при давлениях в пределах 1,6 ... 6,4 МПа. Ротаметры имеют класс точности 1,5 и 2,5.

Ротаметр имеет стеклянную расширяющуюся кверху коническую трубку, внутри которой помещен чувствительный элемент (ротор). В верхней части ротора выполнены косые прорезы, придающие ему вращательное движение и тем самым обеспечивающие центровку и устойчивое положение ротора на оси трубки в процессе работы прибора.

Измеряемая ротаметром среда подводится к трубке снизу. Под воздействием потока жидкости или газа ротор поднимается вверх до тех пор, пока площадь проходного сечения между ротором и стенкой трубки не достигнет размера, достаточного для прохождения всего количества измеряемой среды. В этом случае подъемная сила, действующая на ротор, будет уравновешена массой ротора, вследствие чего ротор займет вполне определенное положение в трубке.

Объемный расход  $V$  в ротаметре определяется из равенства

$$V = \alpha \cdot F_K \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент расхода, зависящий от формы ротора и числа Рейнольдса ( $Re$ );  $F_K$  — площадь сечения в кольцевом зазоре между трубкой и ротором на линии отсчета показаний прибора;  $\Delta P$  — разность средних статистических давлений до и после ротора;  $\rho$  — плотность измеряемой среды.

В последнем уравнении все величины правой части, за исключением  $F_K$ , постоянны. Изменяется только площадь  $F_K$ , которая пропорциональна высоте подъема ротора  $h$ . Иными словами, объемный расход  $V$

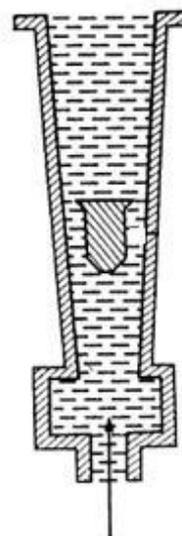


Рис. 5.8. Ротаметр

пропорционален высоте  $h$ , которая на стеклянных ротаметрах определяется визуально по нанесенной шкале давлений на внешней поверхности трубки и отсчитывается по положению верхней грани ротора.

Ротаметры со стеклянной трубкой предназначены для измерения объемного расхода газов и прозрачных жидкостей при давлениях, не превышающих 0,6 МПа для жидкостей и 0,4 МПа для газов.

Градуировка ротаметров, предназначенных для работы с газами, производится на воздухе при  $T=293$  К и  $P=0,01$  МПа, а для работы с жидкостями — на воде при  $T=293$  К. Градуировочная кривая и соответствующая таблица прикладываются к паспорту прибора.

**Тахометрические счетчики-расходомеры** применяют для измерения количества и расхода жидкости и газа в диапазоне от 0,015 до 2500 м<sup>3</sup>/ч и выше. Их работа основана на использовании зависимости угловой скорости чувствительного элемента (вертушки-турбинки, крыльчатки и др.) от средней скорости измеряемого потока. Основная погрешность измерения составляет 0,5 %, а при индивидуальной тарировке — 0,1 ... 0,2 %.

Различают **скоростные** (турбинные, шариковые) и **объемные** (ротационные, с овальными шестернями, барабанные и др.) тахометрические счетчики-расходомеры.

**Скоростные** турбинные (рис.5.9) и шариковые расходомеры преобразуют частоту вращения чувствительного элемента прибора в электрические импульсы.

Их работа основана на использовании зависимости угловой скорости чувствительного элемента (вертушки, крыльчатки и др.) от средней скорости измеряемого потока. Основная погрешность измерения составляет 0,5 %, а при индивидуальной тарировке — 0,1 ... 0,2 %.

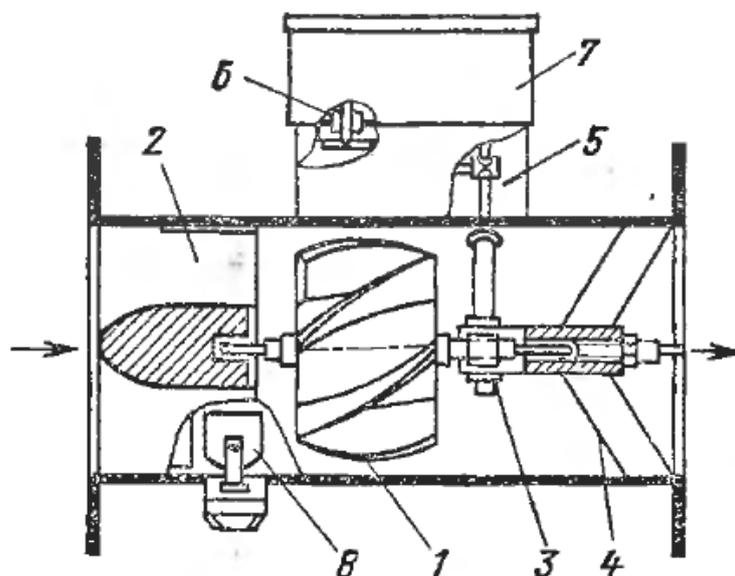


Рис. 5.9. Скоростной расходомер:

1 — вертушка; 2 — струевыпрямитель; 3 — червячная пара; 4 — кронштейн;  
5 — камера передаточного механизма; 6 — передаточная ось; 7 — счетный механизм;  
8 — регулятор

В **объемных** тахометрических счетчиках при прохождении жидкости через прибор его рабочим элементом отсекаются заведомо известные объемы измеряемой среды, число которых суммируется счетным механизмом и передается на счетный указатель.

Объемные тахометрические счетчики позволяют вести измерение количества жидкостей в широком диапазоне вязкостей с допустимой погрешностью не более 0,5 %.

**Калориметрические расходомеры** используют для измерения массового расхода жидкости и газа. Действие их основано на зависимости перепада температуры от подведенного количества теплоты и средней скорости потока измеряемой среды.

Калориметрический расходомер имеет очень простую схему; она содержит электронагреватель и два термометра, установленных до и после нагревателя.

С помощью электронагревателя создается перепад температуры в потоке, который поддерживается обычно постоянным. Мерой расхода является мощность, потребляемая нагревателем. Ее значение пропорционально средней скорости потока, а следовательно, расходу среды.

Калориметрические расходомеры могут быть использованы для измерения расхода газа в достаточно широком диапазоне изменения его, в том числе малых расходов до  $10^{-4}$  м<sup>3</sup>/ч. Погрешность измерения составляет от 0,5 до 1 %.

#### **5.4. Измерение малых расходов жидкостей и газов**

Для измерения малых расходов жидкостей и газов могут быть использованы различные средства, среди которых наибольшее распространение получили:

- 7) расходомеры постоянного перепада давления;
- 8) тахометрические счетчики-расходомеры;
- 9) калориметрические расходомеры;
- 10) нестандартные суживающие устройства.

Расходомерами постоянного перепада давления можно измерять очень малые расходы около 0,0025 м<sup>3</sup>/ч по воде и 0,006 м<sup>3</sup>/ч по воздуху при давлениях в пределах 1,6...6,4 МПа.

Тахометрические счетчики-расходомеры используют для измерения расхода жидкости и газа в широком диапазоне — 0,015...2500 м<sup>3</sup>/ч.

Калориметрические расходомеры используют для измерения расхода газа в широком диапазоне его изменения, в том числе малых расходов до

$10^4$  м<sup>3</sup>/ч, а также движущегося газа в трубках диаметром 2...3 мм. Погрешность измерения составляет от 0,5 до 1 %.

Нестандартные суживающие устройства (например, диафрагмы) применяют в научно-исследовательской практике для измерения малых расходов. В этом случае диафрагмы размещают в трубопроводах небольшого диаметра ( $D < 50$  мм) и обязательно подвергают индивидуальной тарировке совместно с прибором давления и соответствующими элементами трубопроводов.

## Глава 6

### ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ

#### 6.1. Физические основы оптических методов наблюдения в газовых потоках

Оптическими называются методы, основанные на использовании физических явлений, связанных с электромагнитным излучением видимого диапазона (0,366 ... 0,78 мкм), распространяющимся в прозрачных газовых и жидких средах.

Оптические исследования газодинамических потоков могут вестись следующими методами:

1. Методы проходящего света — характеристики исследуемого потока определяются путем измерения изменений амплитуды и фазы световой волны, прошедшей через исследуемую область

потока. Ими определяют изменения плотности или показатель преломления света в среде.

2. Методы, основанные на рассеивании света на инородных частицах в потоке. В отличие от методов проходящего света здесь обычно поля излучения и приема пересекаются в исследуемом пространстве под определенным углом.

Основной оптический параметр любого чистого газа — показатель преломления  $n$  — можно связать с плотностью  $\rho$  с помощью соотношения Гладстона—Дейла

$$\frac{(n-1)}{\rho} = k,$$

где  $k$  — постоянная. Для воздуха при нормальных условиях  $k = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Рассмотрим задачу о прохождении луча света через некоторую область 1, показатель преломления которой в направлении координатных осей  $x$  и  $y$  отличается от показателя преломления окружающей среды (рис. 6.1).

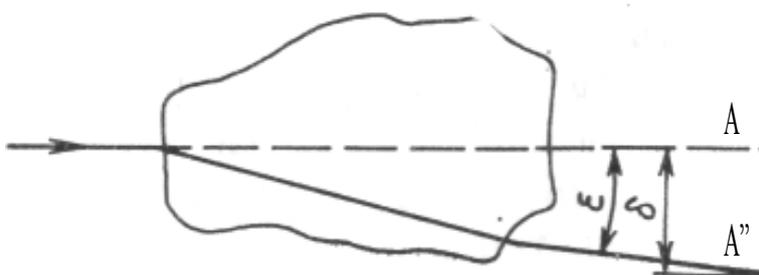


Рис. 6.1. Прохождение света через оптическую неоднородность

Луч света после прохождения области 1 должен отклоняться от первоначального направления. Поведение луча после прохождения через неоднородность фиксируется в плоскости экрана 2 тремя измеряемыми параметрами: **смещением**  $\delta$  между точками  $A$  и  $A'$ ; **углом отклонения**  $\xi$  луча от первоначального направления; **временем запаздывания**  $\tau$  прихода луча в точку  $A'$  (по более длинному оптическому пути) по отношению к времени прихода луча в точку  $A$ .

Запаздывание  $\tau$  пропорционально показателю преломления  $n$ , отклонение луча  $\xi$  — первой производной  $n$  по координате, смещение  $\delta$  — второй производной.

На регистрации этих параметров световой волны базируются три основных метода оптической визуализации неоднородностей плотности в газодинамическом потоке:

- прямой теневой — определяет смещение  $\delta$ ;
- шлирен-метод Теплера — определяет отклонение луча  $\xi$ ;

- интерференционный — определяет запаздывание  $\tau$ .

## 6.2. Прямой теневой метод

Прямой теневой метод позволяет определить вторую производную показателя преломления. Его применяют при изучении ударных явлений, связанных с резким изменением показателя преломления, таких, как ударные, детонационные волны и т.д.

Модель прямого теневого метода представлена на рис. 6.2. Между точечным источником света 1 и экраном 2 помещается исследуемая неоднородность (шлира) 3 с границами раздела АВ, параллельными плоскости ху, имеющая в направлении оси z бесконечно малую толщину.

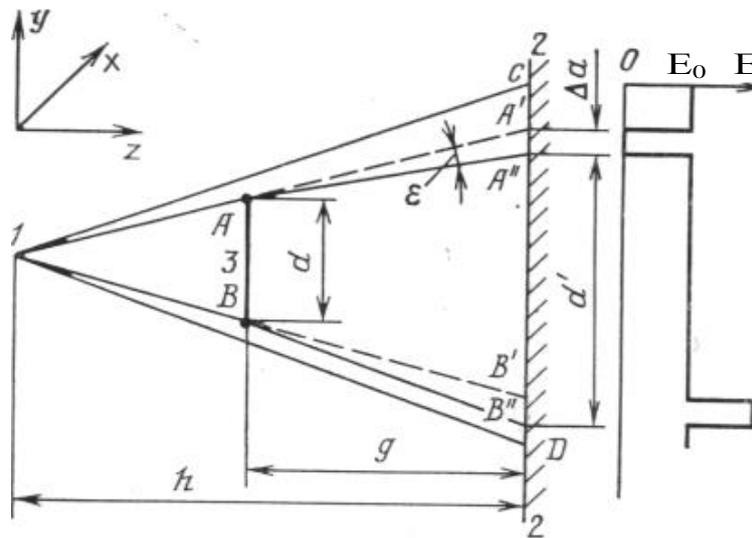


Рис. 6.2. Модель прямого теневого метода:  
1 — точечный источник света; 2 — экран;  
3 — исследуемая неоднородность

Если показатель преломления на всем протяжении шлиры постоянен, то свет от источника 1 после прохождения неоднородности не будет претерпевать отклонений. Если градиент показателя преломления  $\frac{\partial n}{\partial z}$  на всем протяжении шлиры остается постоянным, то все лучи отклонятся на одинаковый угол. В этом случае освещенность изображения неоднородности остается равномерной, за исключением крайних его участков. Такое отклонение лучей наблюдается, если вместо неоднородности 3 поместить оптический клин АВ с малым углом. Лучи, проходящие через клин АВ, преломляются и освещают участок экрана А''В'' вместо участка А'В'. Но на часть этого участка А'В'', а именно на В'В'', падают лучи, прошедшие мимо клина АВ, а на участок А'А'' свет не падает совсем. Если начальную освещенность экрана до введения клина обозначить  $E_0$ , то после введения клина будем наблюдать перераспределение освещенности.



Рис. 6.3. Модель шлирен-метода:

- 1 — точечный источник света; 2 — диафрагма;  
 3 — исследуемый объем; 4 — экран; 5 — нож Фуко;  
 6, 8 — линзы; 7 — оптическая неоднородность

При отсутствии в объеме 3 оптических неоднородностей на все точки экрана 4 от источника 1 через осветительную щель 2 и линзы 8 и 6 проходит свет одинаковой интенсивности  $E$ , которая во всех точках экрана 4 одинакова при любом положении ножа 5. Если же на пути лучей между линзами 8 и 6 появляется какая-либо оптическая неоднородность 7, то часть лучей, отклоненных шлирой вниз по координате  $y$ , будет задержана ножом, что приведет к местному изменению освещенности экрана.

Изменение освещенности  $\Delta E$  на экране будет

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta a}{a} = \frac{f \operatorname{tg} \varepsilon}{a},$$

где  $a$  — расстояние от кромки ножа до оптической оси;  $\Delta a$  — смещение лучей света по отношению к ходу лучей без оптической неоднородности;  $f$  — фокусное расстояние линзы 6;  $\varepsilon$  — угол отклонения лучей шлирой.

Можно считать, что освещенность в каждой точке поля изображения на экране с точностью до 1 % пропорциональна расстоянию ножа до оптической оси. При этих условиях для вычисления  $E$  используется выражение

$$E = \eta (B/t^2) ba,$$

где  $\eta$  — коэффициент, учитывающий потери в стекле линз 8 и 6 на отражение и поглощение;  $B$  — яркость источника света;  $b$  — размер источника света;  $t$  — расстояние от ножа 5 до экрана 4.

Угол отклонения может быть определен путем измерения освещенности в определенной точке экрана. Если показатель преломления изменяется только по оси  $y$ , то угол отклонения лучей  $\varepsilon$  связан с  $n$  соотношением

$$\varepsilon_y = \frac{1}{n_0} \int_0^L \frac{\partial n}{\partial y} dz,$$

где  $L$  — путь прохождения света в исследуемой среде.

#### 6.4. Интерферометрический метод

Интерференция света (рис. 6.4) наблюдается при взаимодействии двух или нескольких световых пучков, исходящих из одного источника

света и прошедших оптические пути разной длины. В зависимости от разности длин путей при их взаимодействии получается либо их взаимное усиление, либо ослабление.

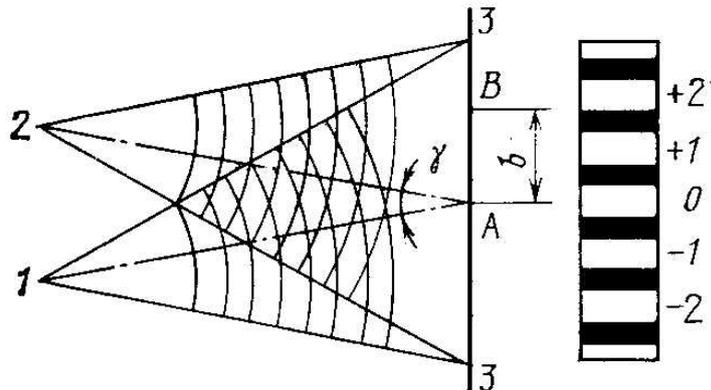


Рис. 6.4. Интерференция света

**Интерферометрический метод** основан на разделении амплитуды света монохроматического источника на два когерентных луча (**опорный** и **рабочий**), которые после прохождения заданного пути могут давать интерференционные эффекты. Модель интерферометрического метода изображена на рис. 6.5.

В практических схемах интерферометров основным способом получения двух пространственно разделенных когерентных пучков света является способ амплитудного деления волны от одного источника света с помощью плоскопараллельных стеклянных пластин. В последнее время в интерферометрах в качестве источника света используются лазеры с излучением в видимом диапазоне длин волн. Лазеры обладают высокой степенью когерентности и испускают практически монохроматическое излучение.

Излучение лазера 1 расщепляется с помощью полупрозрачного зеркала 2 на два луча: один с помощью зеркала 3 направляется на рабочий участок 4, другой с помощью зеркала 7 и полупрозрачного зеркала 5 — на экран 6. Полупрозрачное зеркало 5 собирает оба луча на экран, где и наблюдается интерференционная картина.

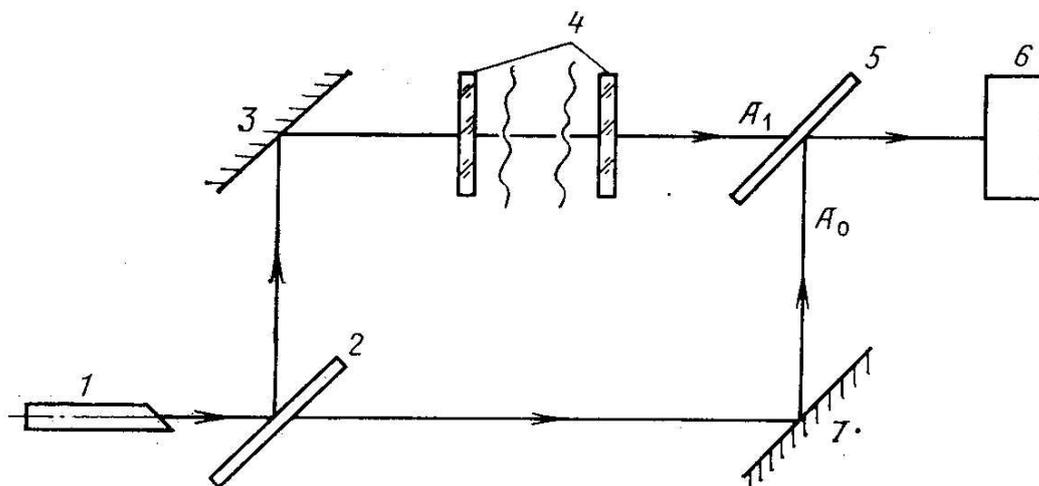


Рис. 6.5. Модель интерферометрического метода:  
 1 — лазер; 2, 5 — полупрозрачные зеркала;  
 3, 7 — зеркала; 4 — рабочий участок; 6 — экран

Интерференционная картина получается в результате взаимодействия опорного пучка света лазера  $A_0$ , имеющего постоянную фазу излучения по всему полю, и сигнального пучка  $A_1$ , *изменение фазы электромагнитных колебаний в котором пропорционально изменению плотности в потоке.*

Зная параметры состояния газа на входе в сопло, можно определить их в любой точке. Например, плотность газа в точке  $m$  может быть определена следующим образом:

$$\rho = \rho_{\infty} - (\lambda / (kL)) \bar{s}, \quad \bar{s} = N - (s / p),$$

где  $p$  — период полос настройки;  $s$  — расстояние от полосы, на которой известно значение плотности газа  $\rho$  до точки  $m$ ;  $\lambda$  — длина волны лазерного луча;  $k = 2,27 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг — постоянная в соотношении Гладстона—Дейла;  $N$  — число интерференционных полос от точки с известными параметрами до точки  $m$ .

Интерферометры оказываются более чувствительными к малым изменениям показателя преломления, чем теневые приборы, и позволяют обнаруживать изменения показателя преломления порядка  $10^{-7}$  —  $10^{-8}$ .

### 6.5. Лазерная анемометрия

В основу лазерной анемометрии положен сформулированный Христианом Доплером в 1842 году в работе «О цветном свете двойных звезд и некоторых других небесных тел» принцип, согласно которому частота регистрируемого излучения зависит от скорости относительного движения источника и приемника. Этот эффект, названный эффектом Доплера, свойственен любым волновым процессам, включая

распространение акустических и электромагнитных волн. В оптическом диапазоне электромагнитных волн эффект Доплера был экспериментально подтвержден в 1868 г. У. Хаггинсом в результате астрономических наблюдений. В лабораторных условиях эффект Доплера впервые наблюдал А. Белопольский в 1900 г., используя систему вращающихся зеркал.

Важнейшим практическим применением эффекта Доплера является измерение скорости различных движущихся объектов путем регистрации изменений частоты рассеянного ими излучения. В настоящее время этот метод, называемый лазерной доплеровской анемометрией, широко используется в различных областях науки и техники для исследований самых различных потоков — от микроциркуляции крови в капиллярах человека до гиперзвуковых газовых потоков в реактивных двигателях.

Принцип действия лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) заключается в следующем. Движущийся объект облучают пучком лазерного излучения от неподвижного источника. Это излучение отражается от объекта и регистрируется неподвижным приемником. Вследствие эффекта Доплера частота излучения, попадающего на приемник, будет отличаться от частоты излучения неподвижного источника на некоторую величину, пропорциональную скорости движения объекта относительно источника и приемника.

Частота колебаний световой волны очень велика и для видимого света имеет величину порядка  $10^{15}$  Гц. В настоящее время практически невозможно непосредственно измерить столь высокую частоту оптических колебаний с точностью, достаточной для обнаружения доплеровского сдвига частоты (ДСЧ). Поэтому для определения величины доплеровского сдвига частоты применяют метод оптического смешения. На фотоприемник направляются одновременно две световые волны, имеющие различные частоты. В результате интерференции этих волн интенсивность света на поверхности фотоприемника изменяется с частотой, равной разности частот колебаний этих волн.

Фотоприемник преобразует световое излучение в переменный электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна интенсивности светового излучения на его поверхности в каждый момент времени. Таким образом, частота электрического сигнала фотоприемника оказывается равной величине ДСЧ и прямо пропорциональной скорости движения объекта. Для измерения частоты сигнала фотоприемника используются различные радиотехнические методы. В настоящее время для обработки сигналов в лазерных доплеровских анемометрах применяются цифровые методы.

Пусть монохроматический источник света 1 (рис. 6.6) испускает волну с круговой частотой  $\omega_0$  и волновым вектором  $k_0$ . Свет, падая на движущуюся со скоростью  $u$  частицу 2, рассеивается во все стороны. Рассеянная волна с волновым вектором  $k_s$  будет иметь частоту  $\omega_s$ .

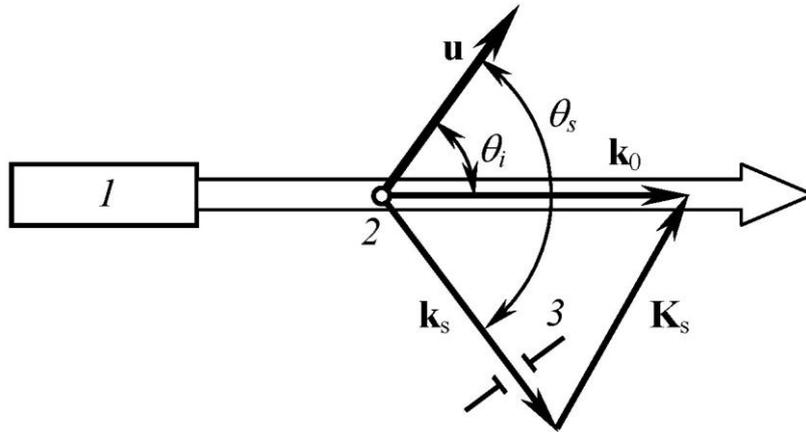


Рис. 6.6. Рассеяние лазерного излучения движущейся частицей

Установим связь между частотами  $\omega_s$  и  $\omega_0$ . Поскольку частица движется, то она воспринимает частоту падающей на нее волны не  $\omega_0$ , а некоторую другую  $\omega'$ , которая согласно эффекту Доплера в нерелятивистском случае будет

$$\omega' = \omega_0 \left[ 1 - \left( \frac{u}{c} \right) \cos \Theta_i \right], \quad (6.1)$$

где  $u$  — скорость частицы;  $c$  — скорость света;  $\Theta_i$  — угол между направлением распространения волны и направлением движения частицы.

Частота рассеянной волны, которую будет воспринимать неподвижный приемник 3, выражается формулой, обратной (6.1):

$$\omega_s = \frac{\omega'}{\left[ 1 - \left( \frac{u}{c} \right) \cos \Theta_s \right]}, \quad (6.2)$$

где  $\Theta_s$  — угол между направлением распространения волны и направлением движения частицы.

Подставляя (6.1) в (6.2), находим

$$\omega_s = \omega_0 \frac{1 - \left( \frac{u}{c} \right) \cos \Theta_i}{1 - \left( \frac{u}{c} \right) \cos \Theta_s}. \quad (6.3)$$

Предположив  $u/c \ll 1$ , разложим знаменатель дроби в (1.3) в степенной ряд:

$$\omega_s = \omega_0 \left( 1 - \frac{u}{c} \cos \Theta_i \right) \left[ 1 - \frac{u}{c} \cos \Theta_s + \left( \frac{u}{c} \cos \Theta_s \right)^2 + \dots \right].$$

Оставляя только члены, линейные относительно скорости  $u$ , получаем окончательное выражение для частоты рассеянной волны

$$\omega_s = \omega_0 \left[ 1 - \frac{u}{c} (\cos \Theta_i - \cos \Theta_s) \right]. \quad (6.4)$$

Из (1.4) можно получить выражение для сдвига частоты рассеянной волны  $\omega_D$ , обусловленного эффектом Доплера:

$$\omega_D = \omega_s - \omega_0 = -\omega_0 (\cos \Theta_i - \cos \Theta_s) \frac{u}{c}, \quad (6.5)$$

или, положив  $f_D = \frac{\omega_D}{2\pi}$  и  $\frac{2\pi n}{\lambda} = \frac{\omega_0}{c}$ , получим

$$f_D = \frac{n}{\lambda} (\cos \Theta_s - \cos \Theta_i) u, \quad (6.6)$$

где  $n$  — показатель преломления среды, окружающей частицу;  $\lambda$  — длина волны в вакууме падающего излучения;  $\Theta_i$  — угол между направлением распространения падающей волны и скоростью частицы;  $\Theta_s$  — угол между направлением рассеяния и скоростью частицы;  $u$  — скорость движения частицы.

Соотношение (6.5) можно записать и в другом виде, если ввести волновые векторы падающей волны  $k_0$  и рассеянной волны  $k_s$ . Учитывая,

что  $|k_0| = \frac{\omega_0}{c}$ ,  $|k_s| = \frac{\omega_s}{c}$  и изменение частоты мало, т.е.  $|k_0| \approx |k_s|$ , имеем

$$\omega_d = (k_s - k_0)u = K_s u. \quad (6.7)$$

При рассеянии света на движущейся частице доплеровский сдвиг частоты однозначно определяется скалярным произведением разностного вектора  $k_s$  падающей и рассеянной волн и вектора скорости частицы. Тогда (6.6) примет вид

$$f_d = \frac{2 \cdot n}{\lambda} \cdot u \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos \varphi, \quad (6.8)$$

где  $\beta$  — угол между направлениями падающей и рассеянной волн;  
 $\varphi$  — угол между разностным вектором  $k_S$  и вектором скорости.

Для того чтобы получить информацию о движении исследуемого объекта, необходимо измерить величину доплеровского сдвига частоты рассеянного излучения.

Оценим величину доплеровского сдвига частоты оптического излучения. Пусть исследуемый объект представляет собой частицу, движущуюся в потоке воды  $u = 10$  мм/с. Частица облучается излучением красного гелий-неонового (He-Ne) лазера с длиной волны  $\lambda = 633$  нм, а показатель преломления воды  $n = 1,33$ . Согласно формуле (6.6), наибольший доплеровский сдвиг частоты будет иметь место в случае, когда  $\Theta = \pi$ , а  $\varphi = 0$ , то есть когда свет отражается от частицы в направлении, противоположном направлению падающей волны, а направление движения частицы совпадает с направлением падающей волны. Величина ДСЧ в этом случае  $f_D = 4,4 \times 10^4$  Гц, а частота колебаний световой волны длиной 633 нм составляет  $f_0 = c / \lambda = 5 \times 10^{14}$  Гц.

Итак, вследствие эффекта Доплера частота зондирующего лазерного излучения изменится всего на одну десятиллиардную часть!

Для детектирования столь малой разности частот применяют метод смешения излучения на квадратичном фотодетекторе. Свет может быть представлен как распространяющиеся в пространстве колебания электрического и магнитного поля, то есть электромагнитные волны. Эти волны переносят энергию. Интенсивностью света называют количество энергии, переносимой световой волной за единичный интервал времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению ее распространения. Интенсивность световой волны прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний электрического поля. Большинство приемников оптического излучения, в том числе глаз человека, фотографическая пленка, различные фотоэлектрические детекторы, регистрируют именно интенсивность падающего на них света, усредняя ее по некоторому интервалу времени, значительно превышающему период колебаний электрического поля. Поскольку выходной сигнал таких приемников будет пропорционален квадрату амплитуды колебаний электрического поля световой волны, их называют квадратичными фотодетекторами.

Пусть в одну точку такого детектора приходят две монохроматические световые волны с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , которые различаются на небольшую

величину. Электрические поля  $E_1$  и  $E_2$  этих волн изменяются во времени по гармоническому закону и определяются соотношениями

$$E_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 t), E_2 = A_2 \cos(2\pi f_2 \tau + \delta), \quad (6.9)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды колебаний первой и второй волн соответственно;  $\delta$  — некоторая начальная разность фаз колебаний;  $\tau$  — время. Регистрируемые фотодетектором интенсивности каждой из этих волн по отдельности составляют

$$I_1 = A_1^2, I_2 = A_2^2. \quad (6.10)$$

Они не зависят от времени, так как приемник усредняет колебания за интервал времени, который намного больше периода колебаний. Однако, попадая на детектор одновременно, эти волны интерферируют между собой. Иными словами, их электрические поля складываются друг с другом, а интенсивность суммарных колебаний, пропорциональная среднему квадрату амплитуды, определяется соотношением

$$I_3 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[2\pi(f_2 - f_1)t + \delta] \quad (6.11)$$

Таким образом, детектор будет регистрировать интенсивность, изменяющуюся во времени с частотой, равной разности частот падающих на детектор волн. Это возможно в случае, когда интерферирующие волны когерентны, то есть разность фаз  $\delta$  не зависит от времени. Если падающие на детектор волны не когерентны,  $\delta$  за время усреднения многократно скачкообразно изменяется случайным образом, пробегая все значения от 0 до  $2\pi$ . При этом среднее значение косинуса в третьем слагаемом формулы (6.11) становится равным 0. В этом случае интерференции света не наблюдается, а детектор регистрирует интенсивность, равную сумме интенсивностей падающих на него волн.

Как отмечалось выше, информация о скорости движения объекта содержится в частоте сигнала фотодетектора. Как правило, сигнал фотодетектора в ЛДА представляет собой сложный сигнал, содержащий множество колебаний с различными частотами. Поэтому для того, чтобы определить частоты доплеровского сдвига, необходимо исследовать частотный спектр этого сигнала. Частотным спектром электрического сигнала называется зависимость средней мощности этого сигнала от частоты. Для исследования спектрального состава сигнала можно преобразовать сигнал в цифровую форму, использовать аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а затем построить оценки спектра мощности с помощью ЭВМ с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

## Глава 7

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

#### 7.1. Методы измерения теплового потока

Измерение тепловых потоков необходимо при исследовании рабочих процессов машин и аппаратов, определении тепловых потерь и исследовании условий теплообмена поверхностей с потоками газа или жидкости.

Методы измерения тепловых потоков и реализующие их устройства чрезвычайно разнообразны. По принципу измерения теплового потока все методы можно разделить на две группы.

##### **8. Энтальпийные методы.**

С помощью энтальпийных методов плотность теплового потока определяется по изменению энтальпии воспринимающего тепло тела.

В зависимости от способа фиксирования этого изменения энтальпийные методы подразделяются на такие:

- калориметрический метод;
- электрометрический метод;
- метод, использующий энергию фазового перехода вещества;
- термоэлектрический метод;
- пневматический метод и др.

##### **9. Методы, основанные на решении прямой задачи теплопроводности.**

Прямая задача теплопроводности заключается в отыскании температуры тела, удовлетворяющей дифференциальному уравнению теплопроводности и условиям однозначности.

В этих методах плотность теплового потока определяется по градиенту температуры на поверхности тела. Среди них различают:

- метод вспомогательной стенки;
- тепломеры с поперечной составляющей потока;
- градиентный метод.

Кроме методов двух указанных групп применяются и другие методы измерения теплового потока, основанные на разнообразных физических явлениях и эффектах. Это и методы, основанные на фотоэлектрических и радиометрических эффектах, и оптический метод, основанный на определении конвективного теплового потока по углу отклонения луча, пропорциональному градиенту температуры в вязком подслое, и методы, основанные на решении обратной задачи теплопроводности.

Однако за исключением методов, основанных на решении обратной задачи теплопроводности, указанные методы не имеют столь широкого практического применения, как энтальпийные методы и методы, основанные на решении прямой задачи теплопроводности.

Цель решения обратной задачи теплопроводности — отыскание граничных условий, в том числе и плотности теплового потока, по имеющейся информации о температуре внутренних точек в теле. Обратные задачи представляют собой типичный пример некорректно поставленных задач, а их решение сопряжено в первую очередь с трудностями разработки алгоритмов, дающих возможность получать достаточно точные результаты, так как произвольно малые отклонения входных данных могут вызвать большие изменения результатов решения. Решение обратной задачи теплопроводности возможно только на быстродействующих ЭВМ с большой памятью.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы измерения тепловых потоков. Перед рассмотрением методов необходимо отметить, что при измерении тепловых потоков с помощью соответствующих датчиков значения этих потоков определяются с некоторой погрешностью. Составляющие этой погрешности обусловлены:

- конкретными особенностями датчика;
- его конструктивным несовершенством;
- искажениями, вносимыми самим датчиком в значения измеряемого теплового потока, например, из-за изменения температуры поверхности датчика по сравнению с температурой поверхности стенки.

Первые две составляющие погрешности индивидуальны для каждого метода и датчика теплового потока, а последняя носит общий характер.

**Калориметрический метод** основан на том, что измеряемый тепловой поток подводится к какому-либо телу и расходуется на изменение его энтальпии, которое может быть измерено по изменению температуры тела. В качестве тепловоспринимающего тела чаще всего используются: среди газов — воздух, среди жидкостей — вода, среди твердых тел — медь.

Плотность теплового потока  $q$  в калориметрическом методе рассчитывается по формуле

$$q = \frac{\rho c V (\bar{T} - \bar{T}_H) - Q_{\text{пот}} \tau}{F \tau}, \quad (7.1)$$

где  $\rho$  — плотность вещества тела;  $m$  — теплоемкость вещества тела;  $V$  — объем тепловоспринимающего тела;  $F$  — площадь тепловоспринимающей поверхности;  $\tau$  — время измерения;  $\bar{T}_H, \bar{T}$  — среднеинтегральная температура тела в начале и в конце измерения

соответственно;  $Q_{\text{пот}}$  — тепловой поток, отражающий потери в элементы конструкции, окружающую среду через изоляцию и др.

При использовании в качестве тепловоспринимающего тела движущихся жидкости или газа в формуле (7.1) следует сделать замену  $\rho \cdot V/\tau = G$ , где  $G$  — массовый расход жидкости или газа.

В этом методе весьма важно правильно измерить среднеинтегральную температуру  $\bar{T}$ , что связано с известными трудностями, т.к. там, где подводится или отводится тепло, температура неизбежно распределена неравномерно.

Для измерения среднеинтегральной температуры жидкости или газа либо организуют их тщательное перемешивание, либо, что чаще, измеряют температуру в нескольких точках поперечного сечения потока с последующим ее усреднением.

При измерении среднеинтегральной температуры в твердом теле термопары располагают в том месте, где температура наиболее близка или равна среднеинтегральной температуре. Например, при линейном изменении температуры по толщине пластины, взятой в качестве тепловоспринимающего тела, термопару следует располагать в среднем сечении пластины.

Устройства, использующие в качестве тепловоспринимающего тела потоки жидкости или газа, обычно применяют для измерения теплового потока в стационарном режиме, а устройства с твердым телом — в нестационарном режиме. Поэтому в последнем случае плотность теплового потока может быть определена как по изменению среднеинтегральной температуры в соответствии с формулой (7.1), так и с помощью ее производной по времени:

$$q = \rho c \frac{V}{F} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{\text{пот}}}{F}. \quad (7.2)$$

Если расчет  $q$  выполняется по формуле (7.2), то в некоторых случаях место установки термопары не имеет большого значения, как при использовании формулы (7.1). Такой случай имеет место при измерении конвективного теплового потока, когда температура окружающей среды  $T_f$  является линейной функцией времени. В этом случае, начиная с некоторого момента времени  $\tau = \tau_H$ , наступает регулярный режим второго рода, характеризуемый постоянством градиента температуры во времени для всех точек тела, т.е. при  $\tau > \tau_H$ ,  $dT/d\tau = \text{const}$ . При этом чем меньше размеры твердого тела, тем меньше  $\tau_H$  и тем скорее наступает этот режим.

Для примера рассмотрим схему пластинчатого калориметра (рис. 7.1). В нем медная пластинка 3 толщиной 2 мм, являющаяся основным

чувствительным элементом, с помощью четырех стеклянных капилляров 4 крепится к текстолитовому основанию 5. Между пластинкой 3 и медным корпусом 2 оставляется воздушный зазор. Температура пластинки 3 измеряется медьконстантановой термопарой 1, а плотность теплового потока рассчитывается по формуле (7.2).

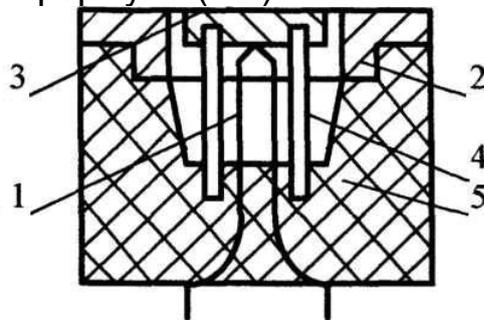


Рис. 7.1. Схема пластинчатого калориметра

Для уменьшения погрешностей в устройствах, основанных на калориметрическом методе, конструктивно их выполняют так, чтобы потери тепла исключить или свести к минимуму. Изоляция тепловоспринимающего тела от корпуса осуществляется с помощью термоцемента, керамики или пластмассы.

Дополнительные потери тепла, а следовательно, и погрешности в измерении  $q$  возможны в результате конвекции и обратного излучения с нагреваемой поверхности тепловоспринимающего тела.

Для того, чтобы датчик не вносил заметных искажений в значения измеряемого потока, суммарные термические сопротивления и радиационные характеристики при внесении датчика и без него должны оставаться неизменными.

При исследовании конвективных тепловых потоков расположение датчика, например, на поверхности стенки вызывает местное увеличение термического сопротивления, что приводит к увеличению температуры поверхности датчика по сравнению с температурой поверхности стенки, если тепловой поток направлен в стенку. Изменение температуры поверхности теплообмена приводит к изменению конвективного теплового потока.

При измерении конвективных тепловых потоков дополнительные погрешности возникают также из-за того, что датчик установлен не строго заподлицо с поверхностью.

При измерениях радиационных тепловых потоков изменения температуры поверхности датчика по сравнению с температурой поверхности стенки приводят к меньшим погрешностям, чем при измерениях конвективных тепловых потоков.

Дополнительные погрешности при измерениях радиационных тепловых потоков могут быть вызваны пренебрежением отличия спектральных характеристик измеряемого теплового излучения и излучения источника, использовавшегося при тарировке датчика.

Общую погрешность измерения теплового потока можно снизить благодаря правильному выбору геометрических и теплофизических параметров датчика, тщательному исполнению и аккуратному монтажу его на поверхности теплообмена.

Электрометрический метод часто используют для исследования интенсивности теплоотдачи. Плотность теплового потока  $q$  для участка с поверхностью теплообмена  $F$  вычисляют в этом методе по соотношению

$$q = \frac{(I \cdot \Delta u - Q_{\text{пот}})}{F}, \quad (7.3)$$

где  $I$  — сила тока на участке;  $\Delta u$  — падение напряжения на участке;  $Q_{\text{пот}}$  — тепловые потери.

Электрический ток пропускают либо непосредственно через опытный участок (пластину, трубу и т.д.), либо через электрический нагреватель, смонтированный в опытный участок.

Значение  $Q_{\text{пот}}$  определяют в тарировочных опытах из соотношения (7.3) при наложении на поверхность теплообмена тепловой изоляции. В этом случае  $q \approx 0$  и тепловые потери однозначно определяются подводимой электрической энергией.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  рассчитывается по соотношению

$$\alpha = \frac{q}{T_w - T_f},$$

где  $T_w$  — температура поверхности, измеряемая термомпарами;  $T_f$  — температура воздуха.

## 7.2. Градиентный метод измерения тепловых потоков

В этом методе искомая величина  $q$  находится по температурному градиенту на поверхности теплообмена:

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0}. \quad (7.4)$$

Температурное поле, необходимое для определения температурного градиента на поверхности теплообмена, может быть найдено по распределению температуры на поверхности стенки, участвующей в теплообмене. Это поле можно измерить с помощью термпар, место заделки которых показано на рис. 7.2.

Термопарные провода 1 подводят к месту крепления спая на

поверхности стенки 3 по фрезерованным канавкам 2, которые заподлицо с поверхностью заделывают в зависимости от температурного режима термоцементом или эпоксидной смолой. Для исключения утечки тепла по термопарным проводам их стараются располагать по изотермическим поверхностям.

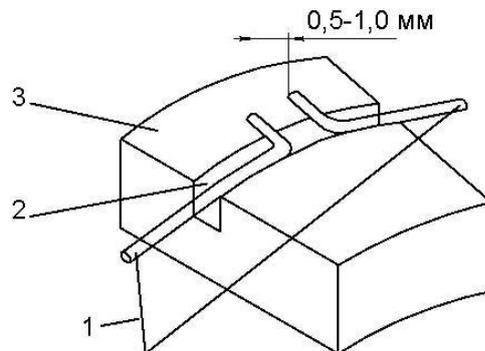


Рис. 7.2. Место заделки термопары

В качестве термопарных проводов могут быть использованы провода из нихрома и константана диаметром 0,2 мм с изоляцией из термостойкой эмали. Для таких электродов размеры канавки, в которую их укладывают, обычно составляют 0,4x0,4 мм. Зачищенные концы термоэлектродов длиной 1 мм приваривают точечной сваркой в двух пазах размером 0,2x0,2 мм на расстоянии 0,5 — 1 мм друг от друга. Таким образом, горячий спай термопары оказывается разнесенным на расстояние 0,5 — 1 мм. После заделки термопар поверхность тщательно зачищают.

Температурное поле внутри стенки при известной температуре на ее границах может быть найдено аналитическим или численным методом. Аналитическая запись температурного поля в стенках, даже имеющих правильную форму, и его численный расчет оказываются практически возможными при одно- и двумерном поле.

Градиентный метод позволяет проводить измерения локальных значений теплового потока при произвольном изменении температуры и тепловой нагрузки вдоль поверхности теплообмена в стационарных и нестационарных условиях. Этот метод можно использовать для исследования теплоотдачи и в случае, когда в стенках канала выделяется тепло. При градиентном методе требуется большой объем вычислений при обработке опытных данных, что невозможно без использования ЭВМ.

Для примера рассмотрим использование градиентного метода в исследовании теплоотдачи в соплах при нестационарных условиях теплообмена. Схема продольного сечения сопла показана на рис. 7.3.

Сопло с толщиной стенки 15 мм изготовлено из стали 1X18H9T. На внутренней, наружной и торцевых поверхностях были заделаны нихром-константановые термопары, которые на рис. 7.3 отмечены крестиками. Показания их в расчетном алгоритме аппроксимировались по координате и времени определенными функциями.

Задав форму сопла параметрически набором двух функций — прямой  $y = a \cdot x + b$  и окружности  $y = y_0 \pm \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}$ , для каждой внутренней расчетной точки можно получить выражение для расчета нестационарной температуры в таком виде:

$$T_{i,j}^{\Delta\tau} = \left[ 1 - \frac{\Delta\tau \cdot \left( A + \frac{BT_{i,j}}{2} \right)}{(C + DT_{i,j})V_{i,j} \cdot \rho_b} \left( \frac{S_{i,j}^{ab}}{\Delta x_{i,j}^-} + \frac{S_{i,j}^{cd}}{\Delta x_{i,j}^+} + \frac{S_{i,j}^{ad}}{\Delta y_j^-} + \frac{S_{i,j}^{bc}}{\Delta y_j^+} \right) \right] \times$$

$$\times T_{i,j} + \frac{\Delta\tau}{(C + DT_{i,j})V_{i,j} \rho_b} \left[ \frac{\left( A + \frac{BT_{i-1,j}}{2} \right) S_{i,j}^{ab}}{\Delta x_{i,j}^-} T_{i-1,j} + \right.$$

$$\left. + \frac{\left( A + \frac{BT_{i+1,j}}{2} \right) S_{i,j}^{cd}}{\Delta x_{i,j}^+} T_{i+1,j} + \frac{\left( A + \frac{BT_{i-1,j}}{2} \right) S_{i,j}^{ad}}{\Delta y_j^-} T_{i-1,j} + \frac{\left( A + \frac{BT_{i+1,j}}{2} \right) S_{i,j}^{bc}}{\Delta y_j^+} T_{i+1,j} \right],$$

где  $T_{i,j}$ ,  $T_{i,j}^{\Delta\tau}$  — температура в точках  $i, j$  в моменты времени  $T$  и  $T + \Delta T$ ;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — шаги по координатам;  $A, B, C, D$  — коэффициенты в формулах для теплопроводности и теплоемкости;  $\rho_b$  — плотность вещества стенки;  $S_{i,j}^{ab}, S_{i,j}^{cd}, S_{i,j}^{ad}, S_{i,j}^{bc}$  — площади поверхностей, образованных вращением вокруг оси симметрии сопла линий  $ab, ad, bc, cd$ , соответственно;  $\Delta T$  — шаг по времени.

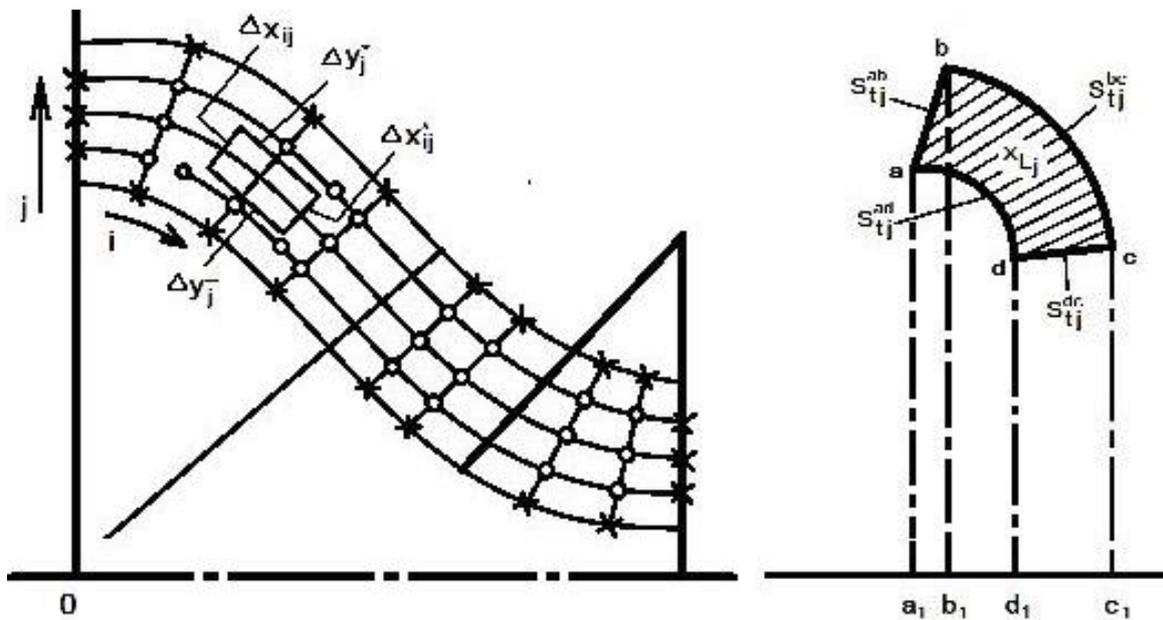


Рис. 7.3. Схема продольного сечения сопла с разбивкой стенки на элементарные объемы

Поверхность и объем тел вращения определяются выражениями

$$S = 2 \cdot \Pi \int_{X_1}^{X_2} y \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx, \quad V = \Pi \int_{X_1}^{X_2} y^2 dx.$$

Подставляя в эти выражения конкретные функции  $y=f(x)$ , описывающие профиль сопла, легко получить выражения для расчета  $S$  и  $V$ . Вычислив температурное поле в узлах расчетной сетки, можно определить температурные градиенты и плотности теплового потока:

$$q_i = \left( A + \frac{B}{2} T_{i,j=0} \right) \frac{T_{i,j=0} - T_{i,j=1}}{\Delta y}. \quad (7.6)$$

С точки зрения повышения точности вычисления целесообразно градиент температуры  $\partial T / \partial n$  вычислять не по конечно-разностному выражению, а по интерполяционной формуле Лагранжа

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = T_0 \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} + T_1 \frac{n_2}{n_1 (n_1 - n_2)} + T_2 \frac{n_1}{n_2 (n_2 - n_1)},$$

где  $T_0, T_1, T_2$  — температуры в нулевой (на поверхности теплообмена), первой и второй точках, расположенных по нормали к поверхности;  $n_1, n_2$  — координаты первой и второй точек.

### 7.3. Раздельное измерение составляющих теплового потока

Часто конвективный и радиационный теплообмены протекают одновременно. При измерениях рассмотренными методами, как правило, определяется результирующий тепловой поток  $q$ , состоящий из конвективной  $q_{\text{конв}}$  и радиационной  $q_{\text{рад}}$  составляющих. Иногда целесообразно отдельно определять и анализировать эти составляющие теплового потока. Так, применение воздушной завесы позволяет отделить чисто радиационную составляющую теплового потока от конвективной. Сущность метода состоит в замене в пристенном слое высокотемпературного теплоносителя, который является излучающей средой и омывает датчик, воздухом. Если температуру завесы поддерживать на уровне температуры датчика, то последний измерит радиационную составляющую теплового потока.

При выключенной завесе идентичности температуры и степени черноты поверхности датчика с соответствующими характеристиками стенки показания датчика соответствуют полному тепловому потоку к стенке. Однако устройство воздушной завесы обычно усложняет конструкцию датчика тепловых потоков.

В качестве датчиков радиационной составляющей часто используют радиометры направленного излучения. Принцип их работы основан на том, что поток излучения через прозрачную защитную пластину падает на линзу, которая концентрирует излучение на чувствительную поверхность приемника излучения — термобатареею, состоящую из 10 термопар, соединенных последовательно.

Для более полного поглощения излучения "горячие" спаи термопар зачернены либо электролитическим способом, либо путем напыления сажи или оксидов металлов. "Холодные" спаи термопар образуются приваркой их свободных концов к тонким металлическим пластинкам, расположенным вне зоны облучения. Выводы термобатарееи соединяют с измерительным прибором. Предварительно радиометр градуируют.

Поглощательная способность черненных покрытий близка к единице, поэтому приемные поверхности термобатарееи можно считать абсолютно черными. Чтобы исключить конвективную составляющую теплового потока, применяется продувка радиометра нейтральным газом — азотом. Погрешность измерения существенно зависит от количества и качества продувочного газа и надежности градуировки прибора.

Другим методом разделения радиационной и конвективной составляющих теплообмена является метод, в котором используют два датчика с различными степенями черноты их рабочих поверхностей.

Пренебрегая обратным излучением, для каждого из датчиков воспринимаемый тепловой поток  $q$  можно представить в виде суммы:

$$q = q_{\text{конв}} + q_{\text{рад}} = q_{\text{конв}} + \varepsilon \cdot q_{\text{пад}}, \quad (7.7)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности датчика;  $q_{\text{пад}}$  — падающий радиационный поток.

Если предположить, что конвективные потоки, измеряемые обоими датчиками тепловых потоков, равны, то, применяя уравнение (7.7) для двух датчиков с известными степенями черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , получаем значения падающего радиационного потока и конвективной составляющей:

$$q_{\text{пад}} = \frac{(q_1 - q_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}; \quad q_{\text{конв}} = \frac{(\varepsilon_2 \cdot q_1 - \varepsilon_1 \cdot q_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — измеренные датчиками значения тепловых потоков.

Погрешности этого метода зависят от погрешностей измерения  $q_1$  и  $q_2$  и отношения степеней черноты  $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ . При сближении степеней черноты поверхностей датчиков погрешность определения обеих составляющих резко возрастает. Метод двух датчиков дает удовлетворительные результаты при выполнении условия  $\varepsilon_2/\varepsilon_1 < 0,2$ .

## Глава 8

### МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

#### 8.1. Измерение влажности материалов

Методы измерения влажности делятся на **прямые** (производится непосредственное разделение материала на сухое вещество и влагу) и **косвенные** (измеряется величина, функционально связанная с влажностью материала).

**Прямые методы** включают в себя ряд методов, приведенных далее.

**Метод высушивания** (термогидравлический), заключающийся в воздушно-тепловой сушке образца материала до достижения равновесия с окружающей средой. Это равновесие условно считается равнозначным полному удалению влаги, что определяется путем двух последовательных взвешиваний исследуемого образца.

Методические погрешности:

— при высушивании органических материалов наряду с потерями гигроскопической влаги происходит потеря летучих компонентов; одновременно при сушке в воздухе имеет место поглощение кислорода вследствие окисления вещества, а иногда и термическое разложение пробы;

— прекращение сушки соответствует не полному удалению влаги, а равновесию между давлением водяных паров в материале и давлением водяных паров в воздухе;

— удаление связанной влаги в коллоидных материалах невозможно без разрушения коллоидальной частицы и не достигается при высушивании;

— в некоторых веществах в ходе сушки образуется водонепроницаемая корка, препятствующая дальнейшему удалению влаги.

*Дистилляционный метод*, при котором образец подогревается в сосуде с определенным количеством жидкости, не смешивающейся с водой. Выделяющиеся пары воды вместе с парами жидкости подвергаются отгонке и, проходя через холодильник, конденсируются в измерительном сосуде, где измеряется объем или масса воды.

*Экстракционный метод* основан на извлечении влаги из исследуемого образца водопоглощающей жидкостью и определении характеристик жидкого экстракта, зависящих от его влагосодержания, плотности, показателя преломления, температуры кипения или замерзания и т. д.

*Химические методы* — это обработка образца реагентом, вступающим в химическую реакцию только с влагой, содержащейся в образце. Количество воды в образце определяется по количеству жидкого или газообразного продукта реакции.

***Косвенные методы*** включают в себя:

**1. Механические методы**, основанные на измерении изменяющихся с влажностью механических характеристик твердых материалов.

**2. Методы, основанные на измерении неэлектрических свойств материалов**, которые подразделяются на такие:

— *радиометрические методы*, которые базируются на способах исследования состава, структуры и свойств вещества, использующих взаимодействие различных видов электромагнитных колебаний и ядерных излучений с исследуемым веществом;

— *метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР)*, основанный на резонансном поглощении радиочастотной энергии ядрами атомов водорода (протонами) воды при помещении влажного материала в постоянное магнитное поле;

— *оптические методы*, основанные на зависимости оптических свойств материалов от их влагосодержания (для твердых материалов используется инфракрасная и видимая области спектра);

— *теплофизические методы*, которые основаны на зависимости от влажности материала его теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности).

**3. Электрические методы измерения влажности**, основой

которых является зависимость от влажности параметров, характеризующих поведение влажных материалов в электрических полях.

**Электрические методы** бывают **кондуктометрические** (основанные на измерении электрической проводимости материала) и **методы СВЧ-влажнометрии** (основанные на измерении характеристик поля стоячих волн, прошедших через влажный материал волн).

## 8.2. Измерение влажности воздуха

**Влажность** — это мера, характеризующая содержание водяных паров в воздухе.

Величину, измеряемую количеством водяного пара (в граммах), содержащегося в  $1\text{ м}^3$  воздуха, называют **абсолютной влажностью воздуха**.

**Относительная влажность воздуха** показывает выраженную в процентах долю, которую составляет плотность пара, содержащегося в данный момент в воздухе, от плотности насыщенного пара для этой же температуры. Относительная влажность воздуха можно определить из соотношения

$$\varphi = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{s\text{H}_2\text{O}}(T)} \cdot 100\%,$$

где  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  — парциальное давление водяных паров в воздухе;

$p_{s\text{H}_2\text{O}}(T)$  — давление насыщения пара при температуре воздуха.

Для измерения влажности воздуха применяются различные подходы, а следовательно, и различные измерительные приборы. Среди них можно выделить:

### 1. Психрометрическое измерение влажности воздуха.

Психрометрический метод основан на зависимости интенсивности испарения с водной поверхности от дефицита насыщения водяного пара соприкасающегося с ней воздуха.

Психрометры состоят из двух вентилируемых датчиков температуры, причем один из датчиков увлажняется с помощью пропитанной влагой ткани. Проходящие потоки воздуха в зависимости от своей температуры и содержания влаги отдают окружающему воздуху определенное количество водяного пара. Увлажненный температурный датчик охлаждается вследствие испарения.

Разница температур (психрометрическая разница температур) между датчиками температур и есть значение относительной влажности воздуха.

### 2. Гигрометрическое измерение влажности воздуха.

Гигрометры и гигрографы используют для измерения влажности воздуха. Они основаны на гигроскопических свойствах волоса или специальным образом обработанного синтетического волокна, которые растягиваются с увеличением влажности воздуха.

Зависящее от влажности изменение длины волоса фиксируется с помощью точных приборов и сообщается стрелке или самописцу.

В отличие от натурального синтетический волос выдерживает большие температуры (0 ... 110 °С) и менее чувствителен к загрязнению. Поэтому в промышленности преимущественно используются приборы с синтетическим волосом.

Гигрометрическое свойство волоса применяется также в датчиках влажности и гигростатах, которые преобразуют значение удлинения волоса в зависимости от влажности воздуха в сигналы тока / напряжения / сопротивления.

### **3. Емкостное измерение влажности воздуха.**

Емкостный датчик для измерения влажности воздуха основан на зависимости емкости конденсатора от влажности — изменение емкости конденсатора пропорционально изменению относительной влажности воздуха.

## **Глава 9**

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ**

#### **9.1. Классификация теплофизических свойств веществ**

Теплофизические свойства подразделяются на две группы:

1. **Равновесные**, являющиеся функциями состояния физических тел. Они бывают *термическими* (плотность, давление, температура и, с некоторой условностью, поверхностное натяжение) и *калорическими* (внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, энергии Гиббса и Гельмгольца, теплоемкости).
2. **Транспортные** (переносные) — теплопроводность, вязкость, диффузия.

#### **9.2. Определение плотности твердых тел, жидкости и газов**

**Метод гидростатического взвешивания.** Образец подвешивается на весах на тонкой проволоке. При первом взвешивании

определяется вес образца в воздухе  $G_1$ , при втором — вес образца  $G_2$  в жидкости (обычно в воде), при третьем — вес проволоки  $G_3$ , погруженной в ту же жидкость.

Плотность образца

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{G_1}{G_1 + G_3 - G_2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}) + \rho_{\text{возд}}.$$

Ошибка при тщательных измерениях находится в пределах 0,001 — 0,0001%.

**Метод пикнометра** широко применяется для определения плотности сыпучих материалов, которые не растворяются в жидкости.

Пикнометр — сосуд (стеклянный, кварцевый и др.) с трубкой для заполнения его жидкостью. На трубке обычно наносится риска, фиксирующая некоторый объем пикнометра.

Для лабораторных измерений разработаны пикнометры вместимостью от 1 до 100 см<sup>3</sup> (ГОСТ 22524-77).

При использовании метода пикнометра выполняются три взвешивания. При первом взвешивании определяется вес исследуемого сыпучего материала  $G_1$  в воздухе, при втором — вес пикнометра  $G_2$ , заполненного жидкостью до риски. Перед третьим взвешиванием исследуемый сыпучий материал загружается в пикнометр, а излишки жидкости удаляются так, чтобы ее уровень находился напротив риски; затем определяется вес пикнометра  $G_3$ .

Плотность исследуемого сыпучего материала

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{G_1}{G_1 + G_2 - G_3} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}) + \rho_{\text{возд}}.$$

Для измерения *плотности жидкостей* используются *ареометры* (денситометры) — приборы, принцип действия которых основан на зависимости выталкивающей силы жидкости от ее плотности.

Для технических измерений используются ареометры двух типов:

1. *Ареометр постоянного объема*. При измерениях вытесняется всегда один и тот же объем жидкости. В жидкостях с различной плотностью при этом необходима различная масса ареометра. Таким образом, масса ареометра однозначно связывается с плотностью.

2. *Ареометр переменного объема*. Масса ареометра остается постоянной, но в жидкостях различной плотности он погружается на различную глубину, вытесняя различный объем. Объем вытесненной жидкости однозначно связан с плотностью исследуемой жидкости.

Для ареометров переменного объема используются два типа градуировок: для определения плотности чистых жидкостей шкала градуируется в единицах плотности, для определения концентрации жидких растворов шкала градуируется в процентах (в объемных или массовых долях).

**Метод пьезометра переменного объема.** Пьезометр — сосуд, способный выдерживать полное давление в опыте. Обычно объем пьезометра точно измеряется. Наиболее совершенный вариант этого метода был разработан для исследования сжимаемости газов. Однако он пригоден и для исследования плотности жидкости.

Суть метода сводится к следующему. Определенная масса жидкости или газа изотермически сжимается в пьезометре до точно известного объема  $V_{ж}$ . Количество жидкости в пьезометре во время опыта остается постоянным; объем, занимаемый жидкостью, меняется с изменением давления. Плотность определяется как  $\rho = m / V_{ж}$ .

**Метод пьезометра постоянного объема.** В сосуд известного постоянного объема  $V_{п}$  вводят известное количество жидкости  $m_{ж}$  при заданных давлении  $p$  и температуре  $T$ . Эти измерения позволяют определить плотность жидкости из выражения  $\rho = m_{ж} / V_{п}$  и отнести полученный результат к давлению и температуре опыта. Переход к новому состоянию вещества осуществляют путем последовательных выпусков части его массы.

### 9.3. Определение поверхностного натяжения

Существующие методы определения поверхностного натяжения разделяются на статические и динамические.

**Динамические методы** (поверхностных волн, колеблющихся струй и т. д.) применяются не часто. Широкое распространение нашел **метод максимального давления в газовых пузырьках или каплях** (рис. 9.1).

В жидкость, имеющую плотность  $\rho_1$ , выдавливается через капилляр радиусом  $R$  пузырек (капля) другой жидкости с плотностью  $\rho_2$ . В процессе выдавливания будет зафиксирован момент, когда давление достигнет максимального значения  $p_{\max}$ .

В соответствии с теорией метода

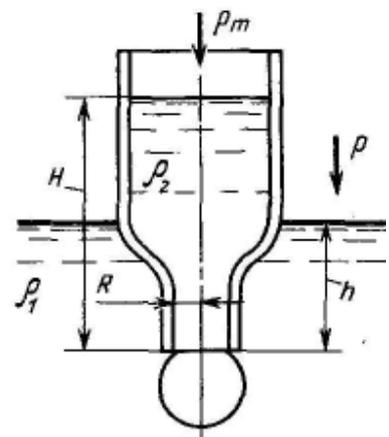


Рис. 9.1. Схема метода максимального давления в

$$\sigma = \frac{1}{2} R p_{\text{макс}} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{g(\rho_1 - \rho_2)R}{p_{\text{макс}}} - \frac{1}{3} \left[ \frac{g(\rho_1 - \rho_2)R}{p_{\text{макс}}} \right]^2 \right\},$$

пузырьке

где  $R$  — радиус капилляра;  $\rho_1$  — плотность жидкости, в которую выдавливается пузырек;  $\rho_2$  — плотность исследуемой жидкости;  $p_{\text{макс}}$  — максимальное давление в процессе выдавливания пузырька.

**Метод капиллярного поднятия** позволяет определить комплекс  $\sigma \cos \theta$  (рис. 9.2).

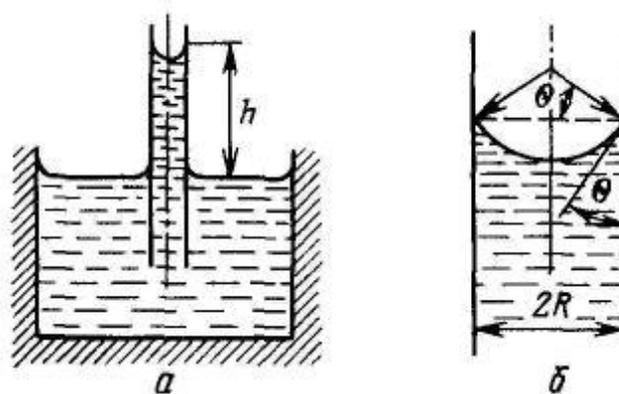


Рис. 9.2. Схема метода капиллярного поднятия

Расчетная формула этого метода определения коэффициента поверхностного натяжения имеет вид

$$\sigma \cos \theta = (\rho_1 - \rho_2)ghR / 2,$$

где  $\rho_1$  — плотность исследуемой жидкости;  $\rho_2$  — плотность пара;  $h$  — высота поднятия жидкости;  $R$  — радиус капилляра;  $\theta$  — краевой угол смачивания.

#### 9.4. Определение давления насыщенных паров

Исследование давления насыщенных паров осуществляется несколькими методами, среди которых различают статические методы, динамические, метод переноса потока пара, метод испарения с открытой поверхности и эффузионный метод.

**Метод точек кипения** (рис. 9.3) относится к динамическим методам.

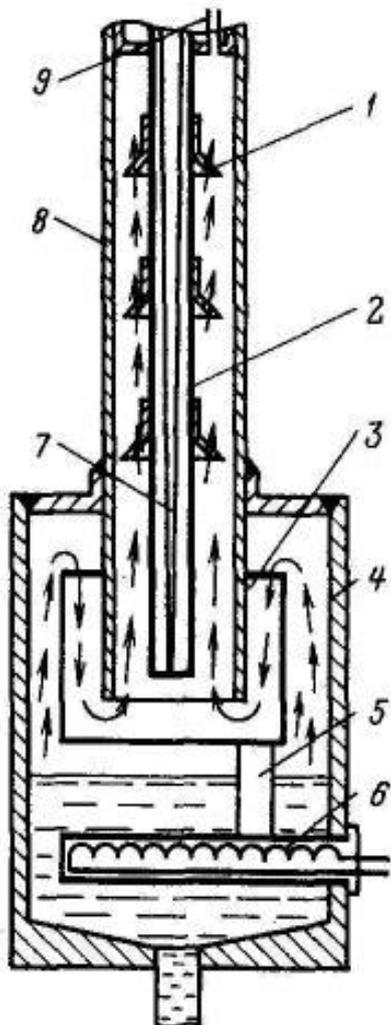


Рис. 9.3. Схема метода точек кипения:  
1 — козырек; 2 — гильза измерителя температуры; 3 — пар вещества;  
4 — сосуд; 5 — патрубок; 6 — нагреватель; 7 — термоэлектрический преобразователь; 8 — конденсатор;  
9 — трубка

Он основан на том, что жидкость закипает, когда давление насыщенных паров становится равным внешнему давлению на жидкость. Однако чтобы избежать влияния перегрева жидкости при кипении, измеряется не температура кипящей жидкости, а температура конденсации паров кипящей жидкости на специально сконструированном устройстве. При этом температура конденсации с большой точностью равна температуре насыщения при давлении, под которым находится кипящая жидкость.

Исследуемое вещество кипит в нижней части сосуда 4. Пары вещества 3 конденсируются на гильзе измерителя температуры 2, на козырьках 1 и стенке конденсатора 8. Конденсат стекает в сосуд 4 по патрубку 5. Температура измеряется термоэлектрическим преобразователем 7 или термометром.

Давление насыщения измеряется по давлению инертного газа, который подается из системы измерения давления в верхнюю часть трубки 9. Нагревается жидкость от электрического нагревателя 6.

**Статический метод исследования давления насыщенных паров.** Принципиальная схема метода изображена на рис. 9.4.

Исследуемое вещество заключено в пьезометр 4, расположенный в многосекционной электрической печи 1. Пьезометр окружен термостатирующим блоком 3. Температура блока и пьезометра в опытах измеряется термоэлектрическим преобразователем 5. Давление пара над жидкостью уравнивается через мембрану давлением инертного газа. В корпусе мембраны 2 имеется специальный электрод, который при перемещении мембраны может ее касаться и замыкать электрическую цепь.

О равенстве давлений инертного газа и насыщенного пара свидетельствует исчезновение или появление контакта при незначительном изменении давления инертного газа с помощью сильфонного пресса.

Давление инертного газа измеряется манометром. Метод обеспечивает точность определения давления не менее 0,2 %.

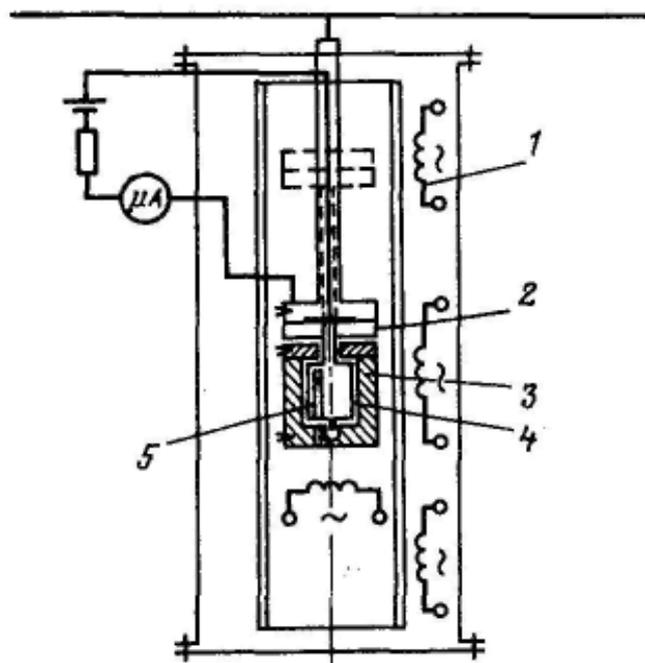


Рис. 9.4. Схема статического метода:  
1 — электрическая печь; 2 — мембрана; 3 — термостатирующий блок;  
4 — пьезометр; 5 — термоэлектрический преобразователь

### 9.5. Определение температуры плавления

Распространенным методом определения температуры плавления при атмосферном давлении является **метод термографирования**, заключающийся в изучении зависимости температуры образца от времени при монотонном нагреве или охлаждении (рис. 9.5).

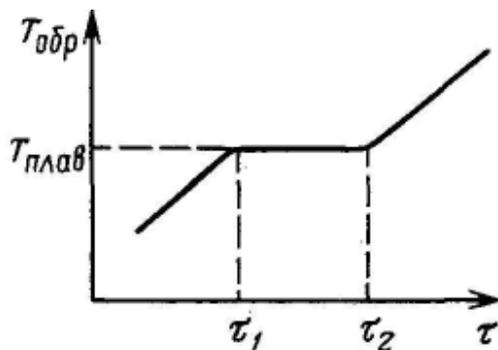


Рис. 9.5. Термограмма

На термограмме фазовый переход характеризуется постоянством температуры образца  $T_{\text{плав}}$  в течение некоторого времени.

## 9.6. Методы измерения теплоемкости веществ

### **Метод адиабатного калориметра непосредственного нагрева.**

Схема адиабатного калориметра непосредственного нагрева представлена на рис. 9.6.

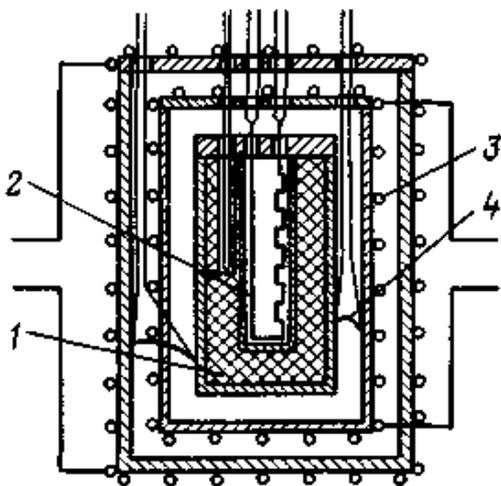


Рис. 9.6. Схема адиабатного калориметра:  
1 — образец; 2 — калориметрический нагреватель; 3 — адиабатная оболочка; 4 — дифференциальная термопара

Определение теплоемкости твердого тела (образца) проводится следующим образом. С помощью калориметрического нагревателя к образцу подводится количество теплоты. В процессе нагрева автоматическая система регулирования поддерживает температуру адиабатной оболочки, равной температуре образца. В этом случае тепловые потери практически отсутствуют, и теплоемкость образца рассчитывается по формуле

$$C_p = \left( \frac{Q}{\Delta T} - A \right) \frac{1}{m},$$

где  $Q$  — подведенное к образцу количество теплоты;  $\Delta T$  — повышение температуры образца в опыте;  $m$  — масса образца;  $A$  — тепловое значение калориметра.

Тепловое значение калориметра  $A = \sum_{i=1}^i m_i C_{pi}$ , где  $m_i$ ,  $C_{pi}$  — масса

и теплоемкость элементов калориметра (провода, изоляция и т. п.). Масса и теплоемкость определяются либо расчетным путем (менее точно), либо в опытах с полностью собранным калориметром, но без исследуемого образца.

**Определение калорических свойств жидкостей и газов.** Для исследования теплоемкости и энтальпии жидкостей (жидких металлов, расплавов солей и др.) используется **метод смешения**. Ампула с исследуемым веществом заданной массы нагревается в печи до температуры опыта  $T$  и сбрасывается в калориметр. Температура калориметра в общем случае повышается от  $T_0$  до  $T_k$ . Определяется

теплота, внесенная в калориметр ампулой, а затем определяется теплоемкость.

Наиболее часто используется **ледяной калориметр** (рис. 9.7).

Нагретая в печи до температуры опыта  $T$  ампула с исследуемым веществом сбрасывается в ледяной калориметр. Количество теплоты  $Q_k$ , введенное с ампулой в калориметр, определяется по массе расплавившегося льда и теплоте плавления льда. Масса расплавившегося льда определяется по уменьшению объема системы лед — вода в калориметрическом сосуде, а это изменение объема в свою очередь определяется по количеству ртути, втянутому внутрь калориметра по капилляру при плавлении льда. Количество ртути определяется весовым методом по убыли массы ртути в сосуде. Температура калориметра во время опыта остается постоянной и равной  $273,15\text{ K}$ .

Разновидностью калориметра постоянной температуры является **кипящий калориметр** (рис. 9.8). Количество теплоты в этом калориметре определяется по количеству испарившейся воды, находящейся в состоянии насыщения из-за теплоты  $Q_k$ , введенной в калориметр с образцом. Образующийся пар конденсируется в специальном конденсаторе; конденсат взвешивается.

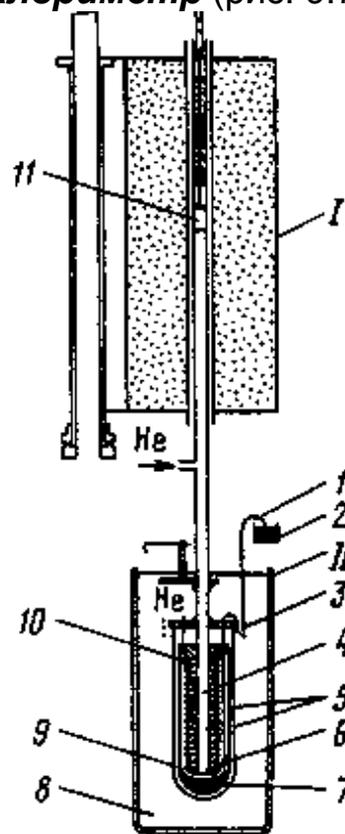


Рис. 9.7. Схема установки с ледяным калориметром:

- I — электропечь; II — ледяной калориметр; 1 — капилляр для подачи ртути; 2 — сосуд с ртутью; 3 — термостатирующая спираль; 4 — приемный канал калориметра; 5 — корпус калориметра; 6 — замороженный лед; 7 — ртуть; 8 — ледяной термостат; 9 — вода; 10 — ребра; 11 — образец

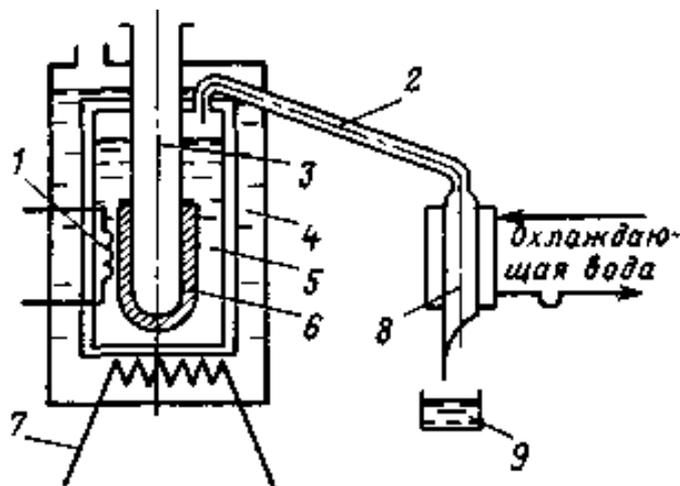


Рис. 9.8. Кипящий калориметр

### 9.7. Методы измерения теплопроводности веществ

Методы определения теплопроводности веществ независимо от их агрегатного состояния и диапазона реализуемых температур разделяют на две группы: **стационарные** и **нестационарные**.

**Стационарный метод плоского слоя** может быть использован для определения теплопроводности твердых тел, жидкостей и газов.

При одномерном тепловом потоке через плоский слой исследуемого вещества его теплопроводность

$$\lambda = \frac{Q\delta_0}{F(T_1 - T_2)},$$

где  $Q$  — тепловой поток;  $\delta_0$  — толщина плоского образца;  $F$  — площадь поверхности;  $T_1$  и  $T_2$  — температуры поверхностей образца.

Для определения теплопроводности этим методом необходимо создать и измерить одномерный тепловой поток через исследуемый образец, найти разность температур, возникающую между границами слоя, определить геометрические размеры образца.

Конструкция ячейки, используемой для измерения теплопроводности жидкостей, приведена на рис. 9.9.

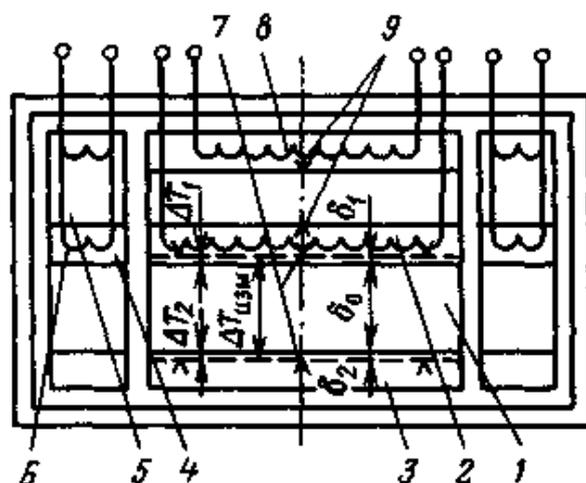


Рис. 9.9. Схема измерительной ячейки:

- 1 — образец; 2 — нагреватель; 3 — холодильник;  
 4, 5 — изоляционные кольца; 6, 8 — охранные нагреватели;  
 7, 9 — термоэлектрические преобразователи

Образец 1 в виде диска диаметром  $D$  и толщиной  $\delta_0$  расположен между нагревателем 2 и холодильником 3. Снаружи расположены изоляционные кольца 4, 5, обычно содержащие охранные нагреватели 6, обеспечивающие одномерность теплового потока. С этой же целью отношение  $\delta_0/D$  выбирается по возможности малым. Для измерения разности температур используют термоэлектрические преобразователи 7, которые могут быть включены и дифференциально. Необходимыми элементами установки являются также верхний охранный нагреватель 8 и дифференциальные термоэлектрические преобразователи 9 для контроля отсутствия утечек теплоты от основного нагревателя.

Основным в реализации метода **для жидкостей** является необходимость контроля за появлением конвекции в исследуемом слое. Для исключения этого эффекта рекомендуется располагать рабочие поверхности строго горизонтально и осуществлять подвод теплоты к исследуемому слою только сверху.

**Метод коаксиальных цилиндров.** В данном методе исследуемое вещество (жидкость или газ) заполняет цилиндрический зазор (рис. 9.10), образованный двумя коаксиально расположенными цилиндрами. Внутренний цилиндр 1, как правило, используется в качестве нагревателя. В нем размещается основной нагреватель 2 с мощностью  $Q$ . Слой исследуемого вещества 3 ограничен внутренним цилиндром 1 с диаметром  $d_1$  и длиной  $L$  и наружным цилиндром 4 с внутренним диаметром  $d_2$ . Рабочая разность температур ( $T_1 - T_2$ ) измеряется термоэлектрическими преобразователями 5. Для исключения торцевых потерь теплоты с цилиндра 1 предусмотрены охранные цилиндры 6 с дополнительными нагревателями 7. Вся измерительная ячейка размещается в корпусе 8, рассчитанном на полное давление опыта.

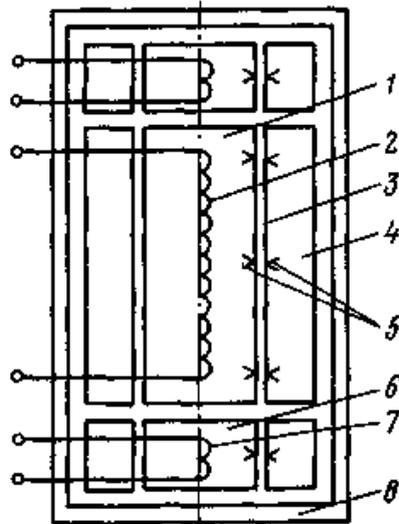


Рис. 9.10. Схема метода коаксиальных цилиндров:  
 1 — внутренний цилиндр; 2 — основной нагреватель;  
 3 — исследуемое вещество; 4 — наружный цилиндр; 5 — термопары;  
 6 — охранный цилиндр; 7 — нагреватель; 8 — корпус

Теплопроводность исследуемого вещества рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{\ln(d_2 / d_1)}{2\pi L} \frac{Q}{(T_1 - T_2)},$$

где  $L$  — длина образующей внутреннего цилиндра 1 ;  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно температуры внешней поверхности внутреннего цилиндра и внутренней поверхности наружного цилиндра 4.

**Метод нагретой проволоки.** В этом методе внутренний цилиндр заменяется нагретой проволокой (нитью), являющейся одновременно источником теплоты  $Q$  и термопреобразователем сопротивления для измерения температуры  $T_1$ . Данный метод занимает ведущее место в исследованиях теплопроводности жидкостей и газов.

Измерительная проволока 1 (рис. 9.11) диаметром  $d_1$  и длиной  $L$  расположена в трубке (капилляре) 2 коаксиально. Исследуемое вещество 3 находится в зазоре между ними. Через проволоку с помощью токоподводов 4 пропускают электрический ток  $I$ . Тепловую мощность  $Q$  определяют по силе тока  $I$  и падению напряжения  $U_{AB}$  на длине проволоки  $L_{AB}$ , измеряемому с помощью потенциальных отводов 5. Температуру внутренней поверхности трубки  $T_2$  определяют с помощью наружного термометра 6 с учетом поправки на перепад температур в стенке трубки.

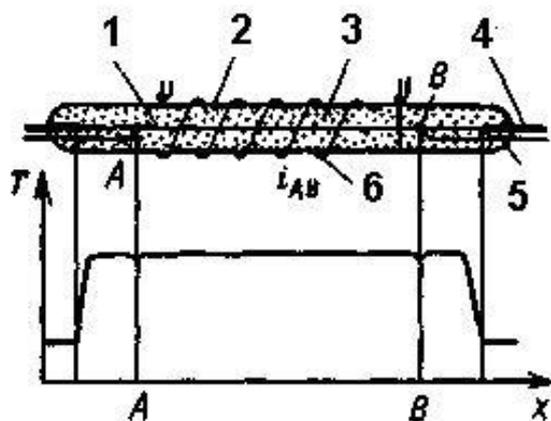


Рис. 9.11. Схема метода нагретой проволоки:

1 — проволока; 2 — трубка; 3 — исследуемое вещество; 4 — токоподвод

Теплопроводность исследуемого вещества определяется формулой

$$\lambda = \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi L_{AB}} \frac{IU_{AB}}{(T_1 - T_2)},$$

где  $d_1$  — диаметр проволоки;  $d_2$  — внутренний диаметр трубки;  $L_{AB}$  — длина проволоки на участке AB;  $I$  — сила тока;  $U_{AB}$  — падение напряжения на участке AB;  $T_1$  — температура проволоки;  $T_2$  — температура внутренней поверхности трубки.

### 9.8. Методы измерения вязкости жидкостей и газов

Вязкость — физическое свойство жидкостей и газов, характеризующее сопротивление их течению под действием внешних сил.

**Метод капилляра** широко применяется для измерения вязкости жидкостей и газов до 2000 К. Вносятся поправки на сжимаемость среды, на эффект «скольжения» на стенке капилляра при исследовании вязкости газов при малых давлениях, на перестройку профиля скорости потока вещества на входе в капилляр и выходе из него. Расчетная формула такая:

$$\eta = \frac{2\pi d^4}{LQ_1} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} \left(1 + \frac{a}{p_1}\right) - \frac{\rho Q_1}{8\pi L} (m + \ln(p_1/p_2)),$$

где  $p_1$ ,  $p_2$  — давление на входе в капилляр и выходе из него;  $d$ ,  $L$  — диаметр и длина капилляра;  $\rho$  — плотность вещества при давлении  $p_1$ ;  $Q_1$  — объемный расход вещества при давлении  $p_1$ ;  $(1 + a/p)$  — множитель, учитывающий эффект «скольжения»;  $m$  — коэффициент, учитывающий перестройку профиля скорости потока на входе в капилляр и выходе из него, обычно  $m = 1,10 \dots 1,16$ .

**Метод кольцевых весов** является разновидностью метода капилляра. По этому методу выполнялись, в частности, исследования вязкости воды и водяного пара в интервале температур 300 ... 875 К при давлениях до 35 МПа. На основе спирального капилляра разработан **реактивный метод** измерения вязкости паров металлов при высоких температурах (рис. 9.12).

Измерительная ячейка, состоящая из испарителя 1, двух спиральных капилляров 2, подвешена на упругой нити 3. По углу поворота ячейки на нити под действием реактивных сил струй пара, вытекающих из капилляров, определяется расход пара. Зная его и измеряя перепад давлений между испарителем и средой, в которую происходит истечение пара, можно определить вязкость.

**Метод крутильных колебаний** широко используется для определения вязкости жидкостей и газов до 2000 К, а **метод падающего груза** — в вискозиметрах, выпускаемых промышленностью для измерения вязкости нефти и нефтепродуктов.

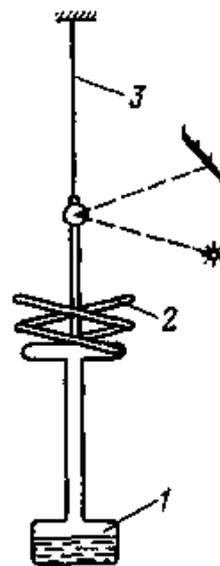


Рис. 9.12. Схема реактивного метода:  
1 — испаритель; 2 — спиральные капилляры; 3 — нить

## Глава 10

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### 10.1. Назначение и состав системы автоматизации эксперимента

Использование систем автоматизации экспериментальных исследований позволяет сократить сроки получения информации и результатов полной обработки материалов эксперимента, интенсифицировать использование оборудования, повысить качество полученных результатов, увеличить производительность труда и снизить относительные затраты на выполнение экспериментального исследования.

Процесс экспериментального исследования может быть подразделен на ряд этапов.

1. Сначала формулируется постановка задачи, которая осуществляется на основе поиска, анализа и систематизации имеющейся информации об интересующем явлении, процессе или

объекте.

2. На следующем этапе формируются исходные гипотезы и модельные представления об изучаемом явлении, позволяющие конкретизировать программу исследования, выбрать соответствующие методы измерения, технические средства и оборудование. Далее осуществляется калибровка используемых средств измерения, отладка оборудования, анализ достоверности получаемых экспериментальных результатов.
3. На следующем этапе производится планирование эксперимента, а в процессе выполнения программы экспериментального исследования осуществляется извлечение эмпирической информации, ее преобразование, сбор, выбраковка, обработка, обобщение и отображение.
4. На следующем этапе проверяется соответствие полученных результатов исходным гипотезам и представлениям. Эти гипотезы и представления могут быть уточнены или пересмотрены заново. При этом может потребоваться проведение дополнительных серий экспериментов.
5. На заключительном этапе устанавливаются новые закономерности, определяющие исследуемое явление или процесс, разрабатываются теории и методы расчета.

Как видно, ряд этапов исследования имеет творческий характер. Поэтому возможность автоматизации этих этапов крайне ограничена. Другие этапы, связанные с калибровкой оборудования, извлечением эмпирической информации, ее преобразованием, выбраковкой, обработкой, доступны для автоматизации на основе современных технических средств и ЭВМ. В этой связи к основным функциям систем автоматизации экспер ментальных исследований относят:

- сбор, обработку и накопление информации;
- отображение результатов исследования и их интерпретацию;
- управление экспериментом и контроль за его ходом.

Сбор измерительной информации предполагает выполнение измерения исследуемой величины, преобразование выходного сигнала средства измерения в электрический сигнал, предварительную обработку электрического сигнала в целях устранения всевозможных помех и наводок, преобразование непрерывного (аналогового) электрического сигнала в цифровую форму, устранение избыточной информации и дальнейшее преобразование сигналов для передачи по каналам связи.

Обработку информации можно подразделить на первичную обработку, где производится расчет величин с использованием калибровочных зависимостей для измерительных трактов, основную обработку, определяемую целями и задачами исследования, и дополнительную обработку, где производится выбраковка результатов, их статистический анализ.

Накопление информации осуществляется в целях ее обработки или для длительного последующего хранения. Отображение результатов исследования в форме графиков, таблиц, формул может быть как оперативным, т.е. по мере поступления информации, так и осуществляться по завершении исследования или его этапа.

Интерпретация результатов исследования предполагает проведение их сопоставления с расчетами по соответствующей математической модели и установление степени адекватности полученных результатов исходным гипотезам и представлениям, а также проведение их сопоставления с имеющимися данными и выявление новых закономерностей изучаемого явления, позволяющих исследователю построить его теорию или сформулировать новые гипотезы, требующие дальнейшей проверки.

Управление ходом эксперимента возможно по заранее составленной жесткой программе, либо по гибкой программе, корректируемой в процессе проведения эксперимента с учетом результатов очередного опыта.

Совокупность технических и программных средств, обеспечивающих выполнение указанных функций систем автоматизации экспериментальных исследований, носит обобщающее название «информационная измерительная система».

В общем случае система автоматизации экспериментальных исследований включает в себя:

- ЭВМ с программным и информационным обеспечением, предназначенную для накопления и обработки поступающей информации, а также управления ходом эксперимента;
- средства отображения получаемой с экспериментальной установки и ЭВМ информации, к которым относятся графопостроители, печатающие устройства, дисплеи, индикаторы и т.п.;
- устройства сопряжения, предназначенные для обеспечения совместной работы установки, ЭВМ и средств отображения.

Схема потоков измерительной информации и сигналов управления между экспериментальной установкой и элементами информационной измерительной системы приведена на рис. 10.1.

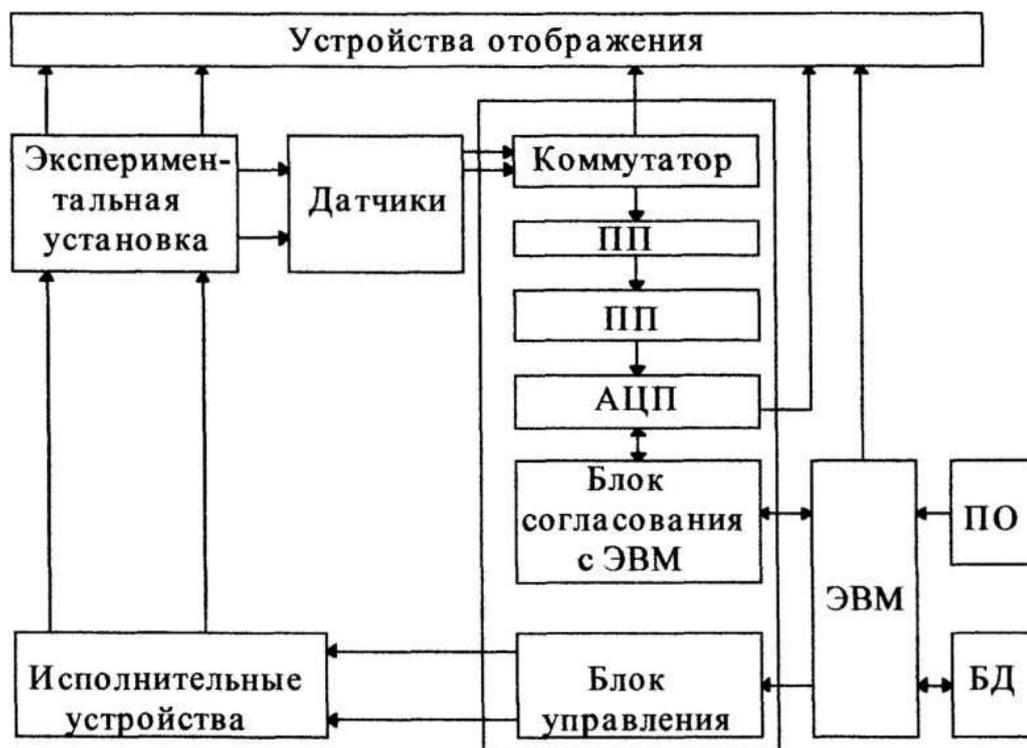


Рис. 10.1. Схема потоков измерительной информации и сигналов управления в системе автоматизации экспериментальных исследований

В процессе эксперимента, как правило, измеряется большое количество физических величин различной природы: температура, скорость, давление, тепловой поток, ток, напряжение, расход и т.д. С помощью первичных измерительных преобразователей — датчиков осуществляется выработка электрического сигнала измерительной информации, зависящего от значения измеряемых в опыте величин. Датчики обычно выдают сигнал в аналоговой форме, т.е. непрерывный во времени. При этом получаемые с датчиков электрические сигналы в виде постоянного тока, напряжения, изменения сопротивления, индуктивности, емкости и других значений, имеют разную природу и существенно отличающийся уровень. Поэтому в большинстве случаев такие сигналы еще не могут быть непосредственно использованы для передачи, измерения или цифрового кодирования. Таким образом, сигналы с датчиков должны быть преобразованы в унифицированные сигналы в виде постоянного тока или напряжения с определенным диапазоном изменения.

Такое преобразование осуществляется с помощью промежуточных преобразователей (ПП), которые также называют унифицирующими или нормирующими преобразователями.

Между датчиками и промежуточными преобразователями в схему обычно вводится коммутатор, который упорядочивает потоки

измерительной информации, обеспечивая поочередное подключение датчиков к преобразователям и ЭВМ.

Дальнейшая обработка унифицированного электрического сигнала сводится к его преобразованию в цифровой код с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Цифровое представление сигналов открывает возможность их непосредственной обработки на ЭВМ, также позволяет зафиксировать их с помощью печатающих устройств, представить показаниями цифровых индикаторов, сравнительно легко без искажений передать по каналам связи на большие расстояния.

ЭВМ производит обработку поступающей информации по программам, входящим в состав программного обеспечения. Необходимая для обработки справочная информация размещается на ЭВМ в форме базы данных.

В блоке управления осуществляется аналого-цифровое преобразование сигналов управления, подаваемых ЭВМ, их усиление и распределение по соответствующим исполнительным устройствам. Одновременно через блок управления и исполнительные устройства ЭВМ управляет работой экспериментальной установки и ходом эксперимента.

Совокупность технических устройств (преобразователей, коммутаторов, усилителей и другого) и правил обмена информацией между составными частями системы, обеспечивающих их совместную работу, называют *интерфейсом*. Принято различать:

- системные интерфейсы, охватывающие всю систему в целом и решающие задачу сопряжения ее составных частей;
- машинные интерфейсы, обеспечивающие совместную работу ЭВМ и периферийных устройств;
- приборные интерфейсы, обеспечивающие объединение и совместную работу приборов.

Любой интерфейс призван обеспечивать информационное, энергетическое и конструкционное сопряжение элементов системы. Центральным элементом системы автоматизации экспериментальных исследований являются ЭВМ. В зависимости от возложенных на ЭВМ функций выделяют три уровня автоматизации экспериментальных исследований.

В системе автоматизации экспериментальных исследований первого уровня автоматизированы сбор, накопление и хранение измерительной информации, а ЭВМ используется лишь для обработки опытных данных в автономном режиме.

В системе автоматизации экспериментальных исследований второго уровня измерительная информация с установки через устройство сопряжения непосредственно вводится и обрабатывается в ЭВМ. При этом ЭВМ управляет интерфейсом, но не работой экспериментальной установки и ходом эксперимента в целом.

В системе автоматизации экспериментальных исследований третьего

уровня ЭВМ осуществляет управление ходом эксперимента и производит обработку измерительной информации.

## **10.2. Измерительно-вычислительные комплексы**

Измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) называют автоматизированное средство измерения, обеспечивающее выполнение аналого-цифровых измерительных преобразований, проведение вычислений в процессе обработки данных, отображение полученных результатов, формирование сигналов управления. ИВК составляет основу информационной измерительной системы. Для создания конкретной информационной измерительной системы необходимо дополнить ИВК датчиками, исполнительными устройствами для воздействия на экспериментальную установку или объект исследования, программами прикладного математического обеспечения.

В свое время отечественной промышленностью были разработаны и выпущены более 50 типов ИВК.

Например, ИВК-20, предназначенный для автоматизации научных исследований, проводимых общезысическими методами, построен на основе ЭВМ СМ-1300 и средств КАМАК. В состав комплекса входит также графопостроитель Н-306.

## **10.3. Методологическое, математическое и программное обеспечение систем автоматизации экспериментальных исследований**

Методологическое обеспечение системы автоматизации экспериментальных исследований включает в себя:

- выбор пути решения поставленной задачи исследования;
- разработку соответствующих методов исследования, позволяющих извлекать необходимую информацию, проверять ее достоверность и отображать в удобной для использования форме;
- формулировку исходных гипотез и модельных представлений в целях интерпретации получаемых результатов.

Методологическое обеспечение системы автоматизации экспериментальных исследований должно быть ориентировано на углубленное изучение явлений и процессов, повышение достоверности, качества, научной значимости и информативности получаемых результатов. Это может быть достигнуто лишь при учете в процессе разработки методологического обеспечения системы автоматизации экспериментальных исследований всех особенностей и возможностей автоматизированного исследования.

Использование в системах автоматизации экспериментальных исследований традиционной методологии, разработанной применительно

к неавтоматизированным исследованиям, зачастую не позволяет выполнить указанные требования и значительно снижает эффективность от применения систем автоматизации экспериментальных исследований.

Методологическое обеспечение, реализованное в виде методик и алгоритмов обработки измерительной информации, ее интерпретации, обобщения и отображения, а также алгоритмов управления ходом эксперимента, составляет **математическое обеспечение** системы автоматизации экспериментальных исследований. Выполнение требований, предъявляемых к методологическому обеспечению системы автоматизации экспериментальных исследований, во многом определяется качеством математического обеспечения. Эти требования удовлетворяются широким использованием аппарата вычислительной математики и математической статистики, привлечением усложненных математических моделей для идентификации и интерпретации экспериментальных данных, использованием тонких методов расчета процессов на основе таких моделей.

Состав математического обеспечения системы автоматизации экспериментальных исследований зависит от задач и может включать в себя:

- тарировочные зависимости для датчиков;
- алгоритмы переработки первичной информации в целях определения искомых величин;
- методики периодического тестирования и калибровки измерительных трактов в целях повышения точности обработки результатов эксперимента;
- алгоритмы проверки достоверности полученных результатов и отбраковки ошибочных данных;
- алгоритмы аппроксимации опытных данных уравнениями регрессии с последующим статистическим обоснованием полученной зависимости;
- банк математических моделей для идентификации изучаемого явления и алгоритмы для проверки адекватности моделей;
- алгоритмы управления ходом эксперимента в соответствии с тем или иным планом его проведения и т.п.

Ряд этапов математической обработки (например, отбраковка ошибочных результатов, аппроксимация и т.п.) выполняются по единым алгоритмам независимо от темы исследования.

Другие этапы требуют разработки специальных алгоритмов, пригодных только для данного конкретного исследования. Например, переработка исходной информации для получения искомых величин.

При обработке результатов измерений возникает необходимость в использовании табличных данных, результатов исследования, полученных ранее, а также другой справочной информации. Полученные результаты исследования представляют научную ценность. Поэтому они

обычно регистрируются и накапливаются в целях последующего использования. В этой связи возникает необходимость в создании специального информационного обеспечения системы автоматизации экспериментальных исследований.

Под программным обеспечением системы автоматизации экспериментальных исследований понимают совокупность программ, обеспечивающих эффективное выполнение возложенных на систему функций. В программном обеспечении системы автоматизации экспериментальных исследований можно выделить две части:

- операционная система (ОС);
- программа прикладного математического обеспечения.

Операционная система управляет выполнением машинных программ, вводом-выводом данных, обеспечивает трансляцию программ, т.е. обеспечивает перевод программ, написанных на алгоритмических языках, на машинный язык соответствующей ЭВМ и их отладку, распределяет память и другие ресурсы и т.п. В зависимости от типа и класса используемой ЭВМ операционная система обеспечивает реализацию различных режимов ее работы, отличающихся формой организации вычислительного процесса, способом обмена информацией между объектом исследования и ЭВМ, принципом организации взаимодействия между ЭВМ и исследователем.

По способу обмена информацией выделяют:

- режим машинного времени, при котором сбор измерительной информации и ее ввод в ЭВМ в целях обработки разнесены во времени;
- режим реального времени, когда ввод измерительной информации в ЭВМ и ее обработка осуществляются одновременно с ходом исследуемого явления или процесса; при этом появляется возможность использования результатов вычислений для оперативного воздействия на объект исследования, а также контроля за правильностью функционирования экспериментальной установки.

По принципам организации взаимодействия исследователя и ЭВМ различают директивный и диалоговый режимы. В директивном режиме исследователь после запуска программы не имеет возможности вмешиваться в ход ее выполнения, а диалоговый режим дает возможность такого вмешательства с внесением необходимых изменений в этот ход на основе анализа промежуточных результатов.

Предписанный режим работы ЭВМ обеспечивается программой управления, называемой супервизором и являющейся центральной частью операционной системы. Супервизор осуществляет упорядоченный вызов различных модулей операционной системы, обеспечивающих ввод программ и исходных данных, трансляцию, редактирование, загрузку программ в оперативное запоминающее устройство, вывод результатов и прочее.

Операционная система сама по себе не обеспечивает выполнения возложенной на конкретную систему автоматизации экспериментальных исследований задачи, а является лишь средством повышения эффективности функционирования этой системы.

Для выполнения системой своего назначения она должна быть снабжена набором специальных программ, составляющих вторую часть программного обеспечения. Называется она программой прикладного математического обеспечения (ПМО).

Состав программ ПМО определяется поставленной целью и задачами исследования. В программах ПМО реализуются методики и алгоритмы математического обеспечения системы автоматизации экспериментальных исследований.

К программам ПМО предъявляется ряд требований, основными из которых являются удобство использования, оптимальные эксплуатационные характеристики, касающиеся, прежде всего, высокого быстродействия и минимизации потребного объема памяти, возможность использования для других типов ЭВМ и в других системах автоматизации экспериментальных исследований.

Программы ПМО могут быть выполнены в виде библиотеки модулей, а также в форме пакета прикладных программ. В этих случаях составными частями ПМО являются программные модули, каждый из которых предназначен для решения отдельной функциональной задачи. Общая программа обработки информации автоматически составляется из модулей специальной управляющей программой. Управляющая программа составляет пользователем для каждой конкретной задачи. Отличительной особенностью ПМО в форме пакета прикладных программ является то, что составление управляющей программы здесь максимально упрощено в результате использования специально разработанного проблемно-ориентированного языка, близкого к обычному профессиональному языку специалиста соответствующей области. Эти две формы представления программ ПМО обладают большой гибкостью и широко используются в системах автоматизации экспериментальных исследований.

**Коэффициент доверия (Стьюдента)**

Число измерений	Надежность					
	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
N	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	1	6,3	12,7	31,8	63,7	636,6
3	0,82	2,9	4,3	7,0	9,9	31,6
4	0,77	2,4	3,2	4,5	5,8	12,9
5	0,74	2,1	2,8	3,7	4,6	8,6
6	0,73	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	0,72	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	0,71	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	0,71	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	0,70	1,8	2,3	2,8	3,2	4,8
20	0,69	1,7	2,1	2,5	2,8	3,8
>20	0,67	1,6	2,0	2,5	2,8	3,3

**Формулы погрешностей косвенных измерений**

Функциональная связь	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$u=x+y$	$\Delta u=\Delta x+\Delta y$	$\delta u=(\Delta x+\Delta y)/(x+y)$
$u=x-y$	$\Delta u=\Delta x+\Delta y$	$\delta u=(\Delta x+\Delta y)/(x-y)$
$u=xy$	$\Delta u=y\Delta x+x\Delta y$	$\delta u=\delta x+\delta y$
$u=x/y$	$\Delta u=u\delta u$	$\delta u=\delta x+\delta y$
$u=x^n$	$\Delta u=u\delta u$	$\delta u=n\delta x$
$u=\sqrt[n]{x}$	$\Delta u=u\delta u$	$\delta u=\delta x/n$
$u=e^x$	$\Delta u=u\Delta x$	$\delta u=\Delta x$
$u=\ln(x)$	$\Delta u=\delta x$	$\delta u=\delta x/u$
$u=\sin(x)$	$\Delta u=\cos(x)\Delta x$	$\delta u=\operatorname{ctg}(x)\Delta x$
$u=\cos(x)$	$\Delta u=\sin(x)\Delta x$	$\delta u=\operatorname{tg}(x)\Delta x$
$u=\operatorname{tg}(x)$	$\Delta u=\Delta x/\cos^2(x)$	$\delta u=2\Delta x/\sin(2x)$
$u=\operatorname{ctg}(x)$	$\Delta u=\Delta x/\sin^2(x)$	$\delta u=2\Delta x/\sin(2x)$

## Отбор промахов по критерию Шовене

Z	M	Z	M	Z	M	Z	M	Z	M
1,00	2	1,40	3	1,80	7	2,20	18	2,60	54
1,02	2	1,42	3	1,82	7	2,22	19	2,62	57
1,04	2	1,44	3	1,84	8	2,24	20	2,64	60
1,06	2	1,46	3	1,86	8	2,26	21	2,66	64
1,08	2	1,48	4	1,88	8	2,28	22	2,68	68
1,10	2	1,50	4	1,90	9	2,30	23	2,70	72
1,12	2	1,52	4	1,92	9	2,32	25	2,72	77
1,14	2	1,54	4	1,94	10	2,34	26	2,74	81
1,16	2	1,56	4	1,96	10	2,36	27	2,76	87
1,18	2	1,58	4	1,98	10	2,38	29	2,78	92
1,20	2	1,60	5	2,00	11	2,40	30	2,80	98
1,22	2	1,62	5	2,02	12	2,42	32	2,82	104
1,24	2	1,64	5	2,04	12	2,44	34	2,84	111
1,26	2	1,66	5	2,06	13	2,46	36	2,86	118
1,28	2	1,68	5	2,08	13	2,48	38	2,88	126
1,30	3	1,70	6	2,10	14	2,50	40	2,90	134
1,32	3	1,72	6	2,12	15	2,52	43	2,92	143
1,34	3	1,74	6	2,14	16	2,54	45	2,94	152
1,36	3	1,76	6	2,16	16	2,56	48	2,96	163
1,38	3	1,78	7	2,18	17	2,58	51	2,98	173

## Библиографический список

Герашенко, О.А. Основы теплотехники [Текст] / О.А. Герашенко.— К.: Наук. думка, 1976.— 192 с.

Ковальногов, Н.Н. Теория и техника теплофизического эксперимента [Текст]: консп. лекций / Н.Н. Ковальногов, Н.М. Лукин.— Ульяновск: УлГТУ, 1999.— 196 с.

Котельников, Р.Б. Анализ результатов матмоделей [Текст] / Р.Б. Котельников.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 143 с.

Повх, И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И.Л. Повх.— Л.: Машиностроение, 1974.— 479 с.

Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / В.П. Преображенский.— М.: Энергия, 1978.— 703 с.

Румшицкий, Л.А. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство [Текст] / Л.А. Румшицкий.— М.: Наука, физ.мат.л-ра, 1971.— 192 с.

Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст]: справочник / под общ.ред.чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В.М. Зорина.— М.: Энергоиздат, 1988.— 560 с.

Теория и техника теплофизического эксперимента [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.Ф. Гортышев, Ф.Н. Дресвяников, Н.С. Идиатулин и др.; под ред. В.К. Щукина.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 360 с.

Температурные измерения. [Текст]: справочник / О.А. Герашенко, А.Н. Гордив, В.И. Лах и др.— К.: Наук. думка, 1984.— 494 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	5
1.1. Виды, методы и средства измерений.....	5
1.2. Метрологические характеристики средств измерений.....	8
1.3. Электрические методы измерения физических величин.....	13
1.4. Измерение основных электрических величин.....	16
Глава 2. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	17
2.1. Общие сведения о погрешностях эксперимента.....	17
2.2. Оценка погрешности прямых измерений.....	18
2.3. Объединение результатов серии измерений.....	24
2.4. Обработка косвенных измерений.....	25
2.5. Правила округления приближенных чисел.....	30
Глава 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ВАКУУМА.....	32
3.1. Классификация средств измерения давления и вакуума.....	32
3.2. Жидкостные приборы давления.....	33
3.3. Грузопоршневые манометры.....	34
3.4. Деформационные приборы давления.....	35
3.5. Электрические датчики давления.....	36
3.6. Приборы для измерения вакуума.....	38
3.7. Требования к системам измерения давления и вакуума.....	42
Глава 4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	44
4.1. Температурные шкалы.....	44
4.2. Средства измерения температуры контактным способом.....	46
4.2.1. Жидкостный стеклянный термометр.....	46
4.2.2. Манометрический термометр.....	46
4.2.3. Термоэлектрический термометр.....	47
4.2.4. Электрические термометры сопротивления.....	50
4.2.5. Дилатометрические и биметаллические термометры.....	52
4.3. Оптические методы измерения температуры.....	52
4.3.1. Яркостные пирометры.....	53
4.3.2. Цветовые пирометры.....	56
4.3.3. Радиационные пирометры.....	58
4.3.4. Тепловизоры.....	60

Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ, РАСХОДА ЖИДКОСТИ И ГАЗА.....	63
5.1. Пневмометрический метод измерения скорости потока.....	63
5.2. Термоанемометрический метод измерения скорости потока.....	68
5.3. Измерение расходов жидкостей и газов.....	70
5.4. Измерение малых расходов жидкостей и газов.....	75
Глава 6. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ.....	76
6.1. Физические основы оптических методов наблюдения в газовых потоках.....	76
6.2. Прямой теневой метод.....	77
6.3. Шлирен-метод Теплера.....	78
6.4. Интерферометрические методы.....	80
6.5. Лазерная анемометрия.....	81
Глава 7. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ.....	87
7.1. Методы измерения тепловых потоков.....	87
7.2. Градиентный метод измерения тепловых потоков.....	91
7.3. Раздельное измерение составляющих теплового потока.....	94
Глава 8. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ.....	96
8.1. Измерение влажности материалов.....	96
8.2. Измерение влажности воздуха.....	97
Глава 9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.....	99
9.1. Классификация теплофизических свойств веществ.....	99
9.2. Определение плотности твердых тел, жидкости и газов.....	99
9.3. Определение поверхностного натяжения.....	101
9.4. Определение давления насыщенных паров.....	102
9.5. Определение температуры плавления.....	103
9.6. Методы измерения теплоемкости веществ.....	104
9.7. Методы измерения теплопроводности веществ.....	106
9.8. Методы измерения вязкости жидкостей и газов.....	109
Глава 10. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	110
10.1. Назначение и состав системы автоматизации эксперимента.....	110
10.2. Измерительно-вычислительные комплексы.....	114
10.3. Методологическое, математическое и программное обеспечение систем автоматизации экспериментальных исследований.....	114
Приложение 1.....	118
Приложение 2.....	119
Приложение 3.....	120
Библиографический список.....	121

Навчальне видання

**Михайленко Тарас Петрович  
Лисиця Олексій Юрійович  
Шахов Юрій Васильович**

## **ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ І ПРИЛАДИ**

(Російською мовою)

Редактор Т.В. Савченко

Зв. план, 2012

Підписано до друку 17.04.2012

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 6,9. Обл.-вид. арк. 7,81. Наклад 100 пр.

Замовлення 129. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК №391 від 30.03.2001