

Ж. Аш с соавторами

# ДАТЧИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

2



Издательство <Мир>

# **LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE**

par  
**Georges Asch**  
Ingénieur E. S. E.  
Professeur à l'université Lyon I

avec la collaboration de  
Pierre Desgoutte  
et

P. André, J. Beaufront, G. Charnay, B. Crétinon,  
J. Fouletier, C. Jouvenot, P. Livrozet, A. Mazeran,  
J. Mérigoux, P. Pariot, A. Piquet, J.-C. Prigent,  
J.-P. Schon, M. Sunyach, J. Tacussel, U. Zelbstein

Préface de  
**Marc Desjardins**  
Président du Comité «Capteurs»  
au ministère de la Recherche et de l'Industrie

Quatrième édition  
mise à jour 1991  
**Dunod**

Ж. Аш с соавторами

# ДАТЧИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В 2-х книгах

КНИГА 2

Перевод с французского  
под редакцией  
канд. физ.-мат. наук  
А. С. Обухова

Spliner



Москва «Мир» 1992

ББК 30.10  
А 98  
УДК 681.508

*Авторы:* Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон, П. Дегут, К. Жувено, У. Зельбштейн,  
Б. Кретинон, П. Ливрозе, А. Мазеран, Ж. Меригу, П. Пейро, А. Пике,  
Ж.-К. Прижан, М. Сюньяш, Ж. Такюсель, Ж. Фулетье, Ж. Шарне,  
Ж.-П. Шон

*Переводчики:* Н. В. Васильченко, С. Л. Вишневецкий, А. Н. Вишняков,  
А. Ю. Заверняев, Э. В. Ленский

Аш Ж. с соавторами

А 98      Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 2.  
Пер. с франц. — М.: Мир, 1992. — 424 с., ил.  
ISBN 5-03-001642-2

В книге известного французского специалиста по измерениям и его сотрудников представлены обширные сведения о принципах работы, конструкциях, характеристиках и условиях эксплуатации всех современных типов датчиков, используемых в различных областях науки и техники. В кн. 2 рассматриваются датчики различных типов.

Для научных работников-экспериментаторов и инженеров-испытателей, а также для преподавателей, аспирантов и студентов, специализирующихся в области экспериментальных исследований и измерений.

А 2402020000—051  
041(01)—92 110—92

ББК 30.10

*Редакция литературы по новой технике*

ISBN 5-03-001642-2 (русск.)  
ISBN 5-03-001249-4  
ISBN 2-04-016948-2 (франц.)

© BORDAS, Paris, 1991  
© перевод на русский язык, коллектива переводчиков, 1992

## 10. ДАТЧИКИ СИЛЫ, ВЕСА, МОМЕНТА

Сила определяется фундаментальным законом динамики  $F = M\gamma$ , где  $M$  — масса (кг), на которую действует сила  $F(H)$ , а  $\gamma$  ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ ) — вызываемое ею ускорение.

Это соотношение чаще используется для определения ускорения по измерению силы (гл. 11), чем для определения силы по измерению ускорения.

Измерение неизвестной силы заключается в уравновешивании ее противодействующей силой; таким образом, динамометрическое устройство, к которому они приложены, остается в покое, когда результирующие сила и момент равны нулю.

Датчик силы содержит чувствительный элемент, который подвергается действию неизвестной силы; в нем возникает деформация, порождающая противодействующую силу; в области упругости деформация пропорциональна силе (закон Гука).

Деформация и, следовательно, сила могут быть измерены:  
а) непосредственно, с помощью экстензометров или датчиков перемещения; б) косвенно, если какое-либо из электрических свойств материала чувствительного элемента зависит от деформации (например, пьезоэлектрический или магнитострикционный материал).

Вес тела  $P$  — это сила, возникающая в поле силы тяжести Земли:

$$P = Mg.$$

Здесь  $g$  — ускорение свободного падения, значение которого зависит от места или, более точно, от его широты, долготы и, в очень слабой степени ( $< 10^{-5}$ ), от геологической структуры окружающей местности. Зависимость ускорения свободного падения  $g_0$  на уровне моря от широты  $\phi$  описывается формулой

$$g_0(\phi) = g_e(1 + 5,2884 \cdot 10^{-3} \sin^2 \phi - 5,9 \cdot 10^{-6} \sin^2 2\phi),$$

где  $g_e = 9,78049 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  — значение  $g_0$  на экваторе. На высоте  $h$  величина ускорения свободного падения выводится из формулы

$$g(\phi, h) = g_0(\phi)(1 - \alpha h), \quad \alpha \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}.$$

На практике вес измеряется преимущественно для определения массы объекта; эта операция взвешивания имеет важное экономическое значение. И наоборот, использование известных масс в том месте, где известно  $g$ , позволяет определить точные по величине силы; в этом состоит принцип эталонной калибровки динамометров с помощью машин прямого нагружения. Датчики силы широко применяются в механике, робототехнике, биомеханике; широк и предел измеряемых величин — от долей ньютона до  $10^7$  Н.

## 10.1. Пьезоэлектрические датчики

### 10.1.1. Пьезоэлектричество

**Введение.** Явление пьезоэлектричества состоит в возникновении (или в изменении) электрической поляризации в некоторых анизотропных диэлектриках — природных (кварц, турмалин и т. п.) или искусственных (сульфат лития, синтетический кварц, обработанная керамика и т. п.) — когда они деформируются под действием определенным образом направленной силы. Если расположить пару обкладок на противоположных сторонах пьезоэлектрической пластинки и приложить к ней силу, то под влиянием силы на обкладках появятся заряды противоположных знаков и, следовательно, возникнет разность потенциалов, пропорциональная приложенной силе. Такое конденсаторное устройство позволяет измерять силы и любые физические величины, приводящие к их возникновению, — давление, ускорение, вибрации; оно представляет собой пьезоэлектрический датчик.

Пьезоэлектрический эффект обратим: подвергнутый действию соответствующим образом ориентированного электрического поля, пьезоэлектрический материал деформируется; в частности, можно вызвать его возбуждение на его механическом резонансе (очень остром). Это свойство пьезоэлектриков используется при изготовлении ультразвуковых генераторов, фильтров, а также для управления частотой генерации; отсюда следует возможность реализации пьезоэлектрических датчиков другого типа, в частности кварцевых, резонанс которых возникает на определенной частоте, чувствительной к изменению различных физических величин (температуры, разд. 6.7, давления, разд. 13.5.5). Эти величины могут измеряться соответствующими датчиками.

**Роль кристаллической симметрии.** Во всяком диэлектрике приложение электрического поля вызывает перемещение зарядов из их положения равновесия; обусловленное этим возникновение или изменение дипольных моментов сопровождается изменением геометрических размеров. Если кристаллическая

конфигурация диэлектрика имеет центр симметрии, то характеристика явления будет квадратической, т. е. пропорциональной квадрату поля; при этом чаще всего речь идет о сжатии, обозначаемом термином «электрострикция».

Кристаллической структуре диэлектрика, не имеющей центра симметрии, соответствует геометрический эффект первого порядка: это обратный пьезоэлектрический эффект, амплитуда которого много больше электрострикционной. В случае полярного материала, для которого характерна поляризация на макроскопическом уровне, существует чувствительность не только к эффекту сжатия (прямое пьезоэлектричество), но и к изменению температуры (пироэлектрический эффект). Всякий пироэлектрический материал является, следовательно, пьезоэлектрическим; однако обратное неверно, так как пироэлектричество требует предварительного существования макроскопической поляризации материала.

В некоторых пироэлектриках элементарная поляризация может изменить знак под действием приложенного электрического поля; такие материалы называются ферроэлектрическими. В качестве примера можно указать на титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), элементарная кристаллическая ячейка которого представлена на рис. 10.1. Это октаэдр из ионов кислорода  $\text{O}^{2-}$ , содержащий в центре один ион  $\text{Ti}^{4+}$ . Распределение потенциала внутри ячейки таково, что ион  $\text{Ti}^{4+}$  слегка отклоняется в направлении одного из шести атомов кислорода. Следовательно, здесь имеет место тетрагональная ячейка без центра симметрии. Барицентры (центры тяжести) положительных и отрицательных зарядов различны, и на макроскопическом уровне в кристалле существует спонтанная поляризация. Во всяком случае, вследствие минимизации общей энергии происходит разделение кристалла на домены. Внутри домена поляризация однородна, но от домена к домену ее ориентация изменяется.

Внешнее электрическое поле стремится ориентировать домены по своему направлению; под действием переменного поля поляризация описывает гистерезисный цикл (рис. 10.2).

Ферроэлектричество исчезает при температурах выше температуры Кюри  $T_c$ . Именно так кристалл  $\text{BaTiO}_3$  при

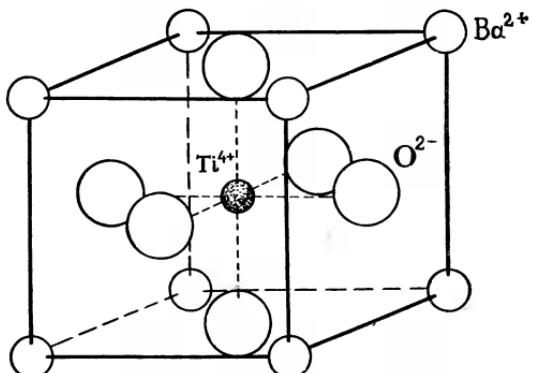


Рис. 10.1. Идеализированная схема кристаллической решетки титаната бария.

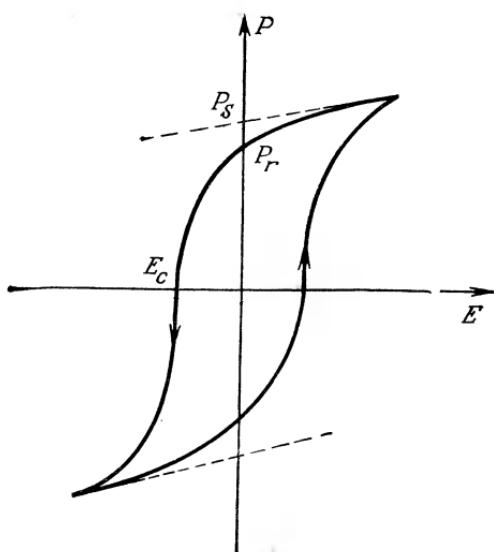


Рис. 10.2. Гистерезисный цикл керамического ферроэлектрика.

$P_r$  — остаточная полюсность;  $P_s$  — спонтанная полюсность;  $E_c$  — коэрцитивное поле.

$T_c = 120^\circ\text{C}$  приобретает центрированную кубическую симметрию и теряет ферро- и пьезоэлектрические свойства. При охлаждении многодоменная конфигурация возникает вновь. Если этот переход происходит в присутствии внешнего электрического поля, то образуется кристалл единого домена.

Таким образом, кристаллы, согласно их элементам симметрии и физическим свойствам, можно классифицировать следующим образом: из существующих 32 типов у 11 имеется центральная симметрия; из остальных 20 являются пьезоэлектриками (в том числе 10

пироэлектриков, из них несколько ферроэлектриков).

**Кварц.** Классическая модель, демонстрирующая механизм пьезоэлектричества явным образом, может быть представлена кристаллом кварца. Кристалл кварца принадлежит к ромбоэдрической системе. Общая форма его монокристаллов и система осей, используемых для выявления анизотропии его физических свойств, показаны на рис. 6.34 (разд. 6.7.1).

Для схематизации общей кристаллической структуры кварца рассмотрим проекцию на плоскость, перпендикулярную оптической оси  $Z$ , трех молекул  $\text{SiO}_2$ , составляющих элементарную кристаллическую ячейку; атомы кислорода группируются по два, образуя тем самым гексагональную форму, характерную для этой кристаллической системы.

В отсутствие сжатия барицентры  $G_+$  и  $G_-$  положительных и отрицательных зарядов трех молекул  $\text{SiO}_2$  совпадают; их результатирующий дипольный момент равен нулю (рис. 10.3,  $a$ ). Если воздействовать силой  $\mathbf{F}$ , например, путем сжатия вдоль оси  $Y$ , то структура деформируется (рис. 10.3,  $b$ ): сжатие вдоль оси  $Y$  сопровождается растяжением вдоль оси  $X$ . При этом барицентры  $G_+$  положительных зарядов  $(\text{Si})_+$  и  $G_-$  отрицательных  $(\text{O})_-$  больше не совпадают, возникают дипольный момент и, соответственно, поверхностные электрические заряды; это и есть пьезоэлектрический эффект.

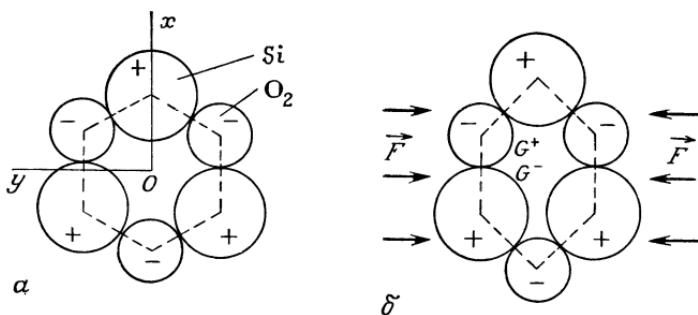


Рис. 10.3. Схематическая проекция элементарной кристаллической ячейки кварца на плоскость, перпендикулярную оптической оси.

*a* — в отсутствие напряжения; *б* — при сжатии по механической оси *Y*.

**Определяющие величины и их обозначения.** Так как пьезоэлектрическая среда анизотропна, величина и знак пьезоэлектрического эффекта зависят: а) от направления наблюдения, т. е. от граней, на которых собираются заряды, и б) от направления сжатия.

Направления осей определяются ортогональным триэдром (*Oxyz*), ориентация которого относительно кристаллической решетки поясняется в разд. 6.7.1.

Оси *x*, *y*, *z* этой системы координат часто обозначаются 1, 2, 3 соответственно.

**Механические величины.** В общем случае под действием механических сил возникает комбинация ортогональных напряжений  $\sigma_{ij}$ , действующих вдоль оси *i* (*i*=*x*, *y*, *z*) на единицу поверхности, перпендикулярной оси *j* (*j*=*x*, *y*, *z*), кубического элемента материала со стороны окружающей его среды (рис. 10.4).

Можно показать, что  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ; это упрощает обозначения:

осевые напряжения	$\left  \begin{array}{l} \sigma_{xx} \rightarrow \sigma_1 \\ \sigma_{yy} \rightarrow \sigma_2, \\ \sigma_{zz} \rightarrow \sigma_3 \end{array} \right.$	сдвиговые напряжения	$\left  \begin{array}{l} \sigma_{yz} \rightarrow \sigma_4 \\ \sigma_{zx} \rightarrow \sigma_5. \\ \sigma_{xy} \rightarrow \sigma_6 \end{array} \right.$
----------------------	---	-------------------------	---

На рис. 10.5 даны два примера простых воздействий на кубический элемент.

**Электрические величины.** В диэлектрике поляризация *P* на единицу объема может возникнуть либо измениться в присутствии макроскопического электрического поля *E* или в результате механических либо термических воздействий. Электрическое состояние диэлектрика описывается уравнением

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P},$$

где *D* — вектор электрической индукции.

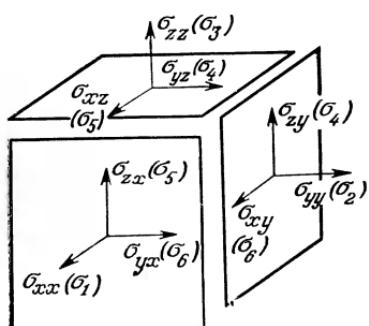


Рис. 10.4. Механические напряжения, действующие на грани кубического кристаллического элемента.

Чтобы проиллюстрировать функционирование электрической схемы (обкладки в замкнутом или разомкнутом контуре), рассмотрим плоский конденсатор из пьезоэлектрического диэлектрика без утечек, подверженный механическому сжатию.

В замкнутом контуре (рис. 10.6, а) поле  $\mathbf{E}$  в диэлектрике равно нулю. Возникшая в результате механических напряжений сжатия поляризация приводит к появлению наведенных зарядов на обкладках;

происходит переход электронов от обкладки  $A_1$  к  $A_2$ . Поле, возникшее от перешедших с обкладок электронов материала, компенсирует поле, порождаемое диполями:  $\mathbf{E}=0$  и  $\mathbf{D}=\mathbf{P}$ . Поверхностная плотность свободных зарядов на каждой обкладке равна  $\pm D$ . Во внешней среде пьезоэлектрический эффект проявляется в возникновении зарядов при нулевом поле. Если обкладки разомкнуты, т. е. изолированы (рис. 10.6, б), то каждая из них несет общий заряд, равный нулю, и поле в диэлектрике обусловлено только диполями:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{P}/\epsilon_0, \quad \mathbf{D} = 0.$$

Степень поляризации зависит от механического напряжения и поля; деформация материала также зависит от этого поля. Таким образом, пьезоэлектрический эффект проявляется в возник-

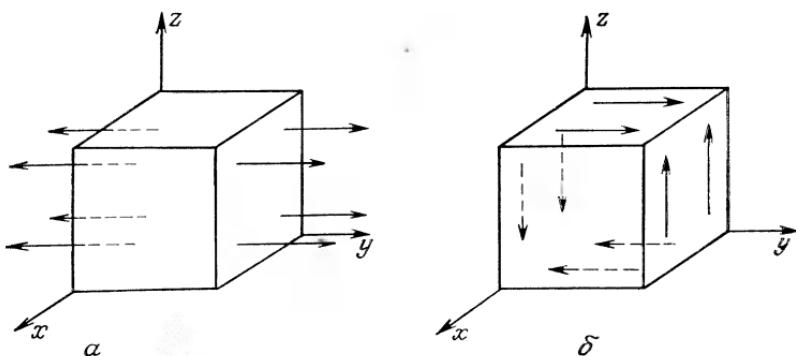


Рис. 10.5. Типичные примеры элементарных напряжений.  
а — нормальное напряжение  $\sigma_x$ ; б — касательное напряжение  $\sigma_4$ .

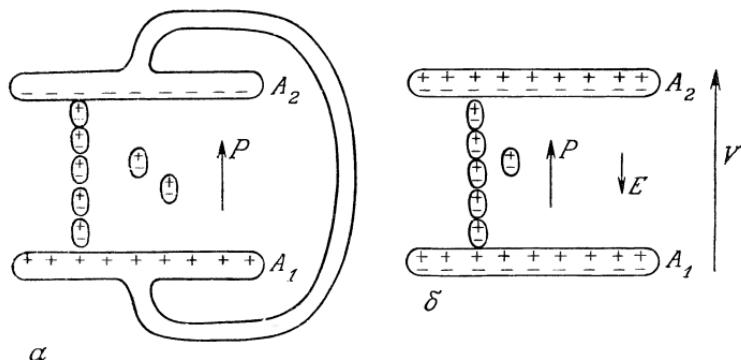


Рис. 10.6. Макроскопическое электрическое поле и поляризация в диэлектрике пьезоэлектрического конденсатора под действием напряжения.

*α* — короткозамкнутый конденсатор; *β* — конденсатор в разомкнутой цепи. Контуром обведены связанные заряды.

новении при нулевой индукции электрического напряжения, определяемого интегралом от поля  $E$  между обкладками.

**Матрица пьезоэлектрических коэффициентов.** В общем случае диэлектрический эффект описывается матрицей коэффициентов, связывающих при нулевом поле механические напряжения ( $\sigma_1 \div \sigma_6$ ) и плотности  $q$  свободных зарядов, возникающих на обкладках, по нормали к осям  $x, y, z$  (или 1, 2, 3). Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} q_1 &= d_{11}\sigma_1 + d_{12}\sigma_2 + d_{13}\sigma_3 + d_{14}\sigma_4 + d_{15}\sigma_5 + d_{16}\sigma_6, \\ q_2 &= d_{21}\sigma_1 + d_{22}\sigma_2 + d_{23}\sigma_3 + d_{24}\sigma_4 + d_{25}\sigma_5 + d_{26}\sigma_6, \\ q_3 &= d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3 + d_{34}\sigma_4 + d_{35}\sigma_5 + d_{36}\sigma_6, \end{aligned}$$

или, в упрощенной записи,

$$q_m = d_{mn}\sigma_n.$$

Каждый пьезоэлектрический коэффициент  $d_{mn}$  характеризует поляризацию в направлении  $m$  ( $1 \div 3$ ), обусловленную механическим напряжением  $\sigma_n$  ( $n = 1 \div 6$ ) при нулевом поле.

Для материалов с высокой степенью кристаллографической симметрии большинство коэффициентов  $d_{mn}$  равны нулю, а другие связаны между собой простыми соотношениями. Для кристаллических структур с центром симметрии они все нулевые, и соответствующие классы структур не являются пьезоэлектрическими.

**Иллюстративный пример: кварц.** Совместим направление 1 с электрической осью, направление 2 — с механической осью, связанной с ней, а направление 3 — с оптической осью.

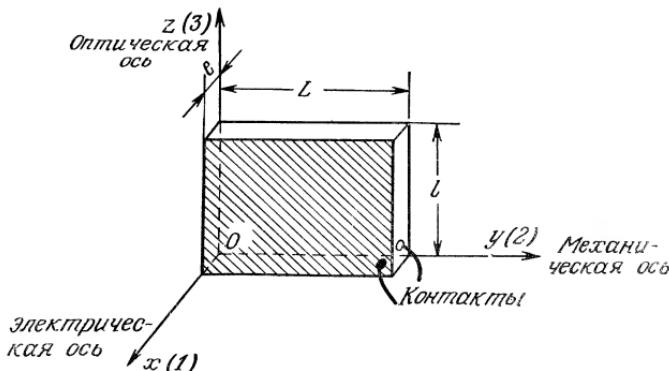


Рис. 10.7. Кварцевая пластинка (сечение Кюри).

В этом случае матрица пьезоэлектрических коэффициентов принимает вид

$$\begin{vmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

где  $d_{11}=2,3 \cdot 10^{-12}$  Кл·Н $^{-1}$ ,  $d_{14}=-0,7 \cdot 10^{-12}$  Кл·Н $^{-1}$ .

Рассмотрим кварцевую пластинку, вырезанную перпендикулярно электрической оси, толщиной  $e$  и длинами  $L$  и  $l$  соответственно вдоль осей  $y$  и  $z$  (срез Кюри, рис. 10.7) с металлизированными гранями, перпендикулярными осям  $x$ .

**Продольный эффект.** Если приложить вдоль оси  $x$  сжимающую силу  $F_1$  (напряжение  $\sigma_1=F_1/(Ll)$ ), то на обкладках возникнет поверхностный заряд плотности

$$q_1=d_{11}\sigma_1.$$

Общий заряд  $Q_1$  пропорционален сжимающей силе:

$$Q_1=Llq_1=d_{11}F_1.$$

**Поперечный эффект.** В случае поперечной силы (вдоль оси  $y$ ) величиной  $F_2$  (напряжение  $\sigma_2=F_2/(le)$ ) плотность поверхностного заряда определяется соотношением

$$q'_1=d_{12}\sigma_2=-d_{11}\sigma_2,$$

а общий заряд равен

$$Q'_1=Llq'_1=-d_{11}LF_2/e.$$

Отношение заряда к приложенной силе пропорционально множителю  $L/e$ . Датчик силы, в котором используется поперечный эффект кварца, может быть очень чувствительным, однако его диапазон измерений ограничен, так как при измерении сил сжатия имеется риск искривления тонкой пластинки; его можно уменьшить, соединив в треугольник три одинаковые пластины (рис. 10.8).

Из матрицы  $|d_{mn}|$  следует, кроме того, что в кварце: а) поляризация в направлении оптической оси не возникает ( $d_{3n}=0$  для любых  $n$ ); б) может возникнуть поляризация вдоль механической оси от поперечной силы, приложенной в плоскости  $xy$ , в которой чувствительность существенна ( $q_2=d_{26}\sigma_6=-2d_{11}\sigma_6$ ); в) не возникает никакого эффекта, если образец погружен в жидкость, которая создает на его гранях одинаковые нормальные механические напряжения (гидростатический эффект); действительно, в каждой строке матрицы  $|d_{mn}|$  сумма первых трех элементов равна нулю.

**Общие соотношения механических и электрических величин.** В общем случае линейного диэлектрика (пьезоэлектрика и пироэлектрика), подверженного воздействию механического напряжения  $\sigma$ , поля  $E$  и изменения температуры  $\Delta\theta$ , уравнение  $D=\epsilon_0 E+P$  можно записать в следующем виде:

$$D_m = d_{m1}^{\sigma, E_{\sigma 1}} + d_{m2}^{\sigma, E_{\sigma 2}} + d_{m3}^{\sigma, E_{\sigma 3}} + d_{m4}^{\sigma, E_{\sigma 4}} + d_{m5}^{\sigma, E_{\sigma 5}} + d_{m6}^{\sigma, E_{\sigma 6}} + \\ + \epsilon_{m1}^{\sigma, E_1} + \epsilon_{m2}^{\sigma, E_2} + \epsilon_{m3}^{\sigma, E_3} + p_m^{\sigma, E_{\Delta\theta}} \quad (m=1, 2, 3).$$

Система трех уравнений описывает электрический отклик диэлектрика на различные механические воздействия. Надстрочные буквенные индексы обозначают величины, остающиеся постоянными при определении коэффициента, к которым относятся:  $d_{mn}^{\sigma, E}$  — пьезоэлектрический изотермический коэффициент в условиях постоянного поля;  $\epsilon_{mi}^{\sigma, E}$  — диэлектрическая изотермическая проницаемость свободно деформирующегося материала;  $p_m^{\sigma, E}$  — пироэлектрическая константа свободно деформирующегося материала в условиях постоянного поля.

Общая запись существенно упрощается выбором осей. Так, можно выбрать ортогональные оси, называемые «главными осями»; в этом случае необходимо определить только три коэффициента.

Таким же образом, если  $\Delta$  — вектор деформации, описывающий линейную механическую реакцию (закон Гука) пьезо-

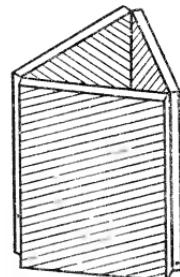


Рис. 10.8. Соединение трех кварцевых пластинок для уменьшения риска перекоса при сжатии.

электрического материала в условиях электрического поля  $E$ , при механическом напряжении  $\sigma$  и изменении температуры  $\Delta\theta$ , то

$$\Delta_i = d_{1i}^{\theta, \sigma E_1} + d_{2i}^{\theta, \sigma E_2} + d_{3i}^{\theta, \sigma E_3} + s_{i1}^{E, \theta \sigma 1} + s_{i2}^{E, \theta \sigma 2} + s_{i3}^{E, \theta \sigma 3} + s_{i4}^{E, \theta \sigma 4} + \\ + s_{i5}^{E, \theta \sigma 5} + s_{i6}^{E, \theta \sigma 6} + \alpha_i^{E, \sigma} \Delta\theta \quad (i = 1 \div 6),$$

где  $s_{ij}^{E, \theta}$  — изотермическая податливость в направлении  $i$  при постоянном поле и действии силы в направлении  $j$ , причем  $s_{ij} = s_{ji}$  (в общем случае целиком несимметричного материала (триклинная система) число различных коэффициентов податливости при постоянных поле и температуре равно 21);  $\alpha_i^{E, \sigma}$  — коэффициент температурного расширения в направлении  $i$  при постоянном поле.

Отметим, что в двух группах приведенных соотношений, в первой из которых связаны электрический заряд и механическое напряжение, а во второй — деформация и электрическое поле, используются одни и те же коэффициенты  $d_{mn}$ , что вытекает из термодинамического рассмотрения (закон сохранения энергии).

Для электрических характеристик часто оказывается излишним рассматривать такие сложные соотношения. Действительно, а) грани, собирающие заряд, обычно соответствуют одной из плоскостей, перпендикулярных осям 1, 2 или 3, так что достаточно один индекс  $m$ ; б) полем  $E$  часто можно пренебречь, когда кристалл используется в квазизамкнутой цепи (использование зарядового усилителя); в) другие усилия, кроме измеряемых, не оказывают заметного влияния, так как адекватное механическое устройство компенсирует их или же соответствующие коэффициенты  $d_{mn}$  равны нулю. Поэтому при использовании зарядового усилителя часто оказывается достаточным уравнение типа  $D = d\sigma$ , а при использовании усилителя напряжения — уравнение  $D = d\sigma + eE$ .

Последнее уравнение чаще используется в форме  $D/e = g\sigma + E$  или  $E = -g\sigma + D/e$ , где  $g = d/e$  — константа напряжения, выражаемая в  $(\text{В/м})/(\text{Н/м}^2)$ , позволяет вычислить электрическое напряжение в пьезоэлектрическом конденсаторе, вызванное механическим напряжением  $\sigma$ .

### 10.1.2. Пьезоэлектрические материалы

За исключением кварца, известного своей стабильностью и твердостью, в датчиках вместо пьезоэлектрических кристаллов обычно используется керамика, более дешевая и удобная в изготовлении.

Керамика представляет собой агрегат произвольно ориентированных пьезоэлектрических микрокристаллов (обычно ферроэлектрических), у которого из-за различия в ориентации доменов поляризации общий пьезоэлектрический эффект отсутствует. Таким образом, для появления преимущественной ориентации и, как следствие, макроскопического пьезоэлектричества, при изготовлении керамики необходимо приложение электрического поля, выравнивающего поляризацию доменов вдоль него. Если принять направление такой поляризации за ось  $z$ , то пьезоэлектрические свойства керамики описываются матрицей с пятью ненулевыми элементами, соответствующей кристаллическому классу  $bmm$ :

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Наиболее часто используются моды сжатия вдоль оси  $z$  на пластинах  $Z$ -сечения (модуль  $d_{33}$ ), и моды сдвига на пластинах  $X$ -среза (модуль  $d_{15}$ ) и  $Y$ -среза (модуль  $d_{24}=d_{15}$ ).

Поскольку знаки  $d_{31}$  и  $d_{33}$  противоположны, гидростатический коэффициент  $d_h=2d_{31}+d_{33}$  обычно невелик и может не учитываться.

Очень употребительно семейство керамик, получаемых на основе оксидов свинца, циркония и титана (принятое обозначение PZT) с химической формулой  $\text{PbTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$ .

Значение  $x$  (обычно около 0,5) определяет некоторые физические и особенно термические свойства. Керамики имеют ряд достоинств, такие, как:

- повышенная пьезоэлектрическая чувствительность;
- большая диэлектрическая проницаемость, следствием чего являются высокая емкость датчиков и минимальное влияние паразитных емкостей;
- возможность получения различных форм механической обработкой или формовкой;
- приданье преимущественного направления осям в зависимости от потребностей;
- механическая прочность;
- регулируемая с помощью состава температура Кюри.

Основные недостатки керамик относятся к их термическим свойствам:

- высокий пироэлектрический коэффициент;
- температурные изменения пьезоэлектрических коэффициентов и диэлектрической проницаемости;
- температурный гистерезис, обусловливающий влияние предшествующих термосостояний на текущее значение характеристики.

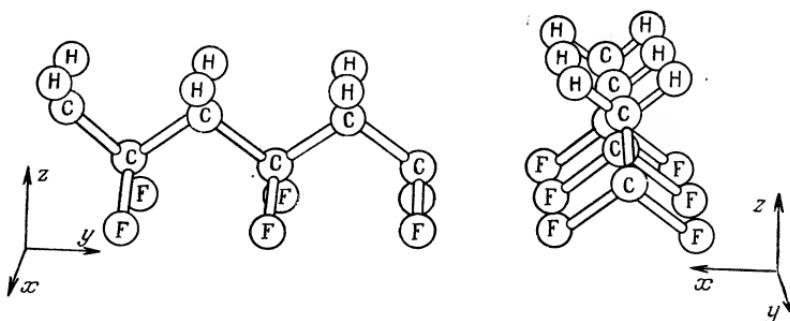


Рис. 10.9. Структуры PVF<sub>2</sub> в полярной фазе (ось поляризации совпадает с осью z) [13]

ристик (температурный гистерезис может быть снижен искусственным старением).

Микрокристаллическую структуру имеют некоторые полимеры; с помощью связей ковалентной природы мономеры объединяются в линейные или геликоидальные цепи (рис. 10.9). Эти цепи взаимодействуют между собой более слабыми поперечными связями, например, вандерваальсовского типа. В результате на микроскопическом уровне возникает элементарная ячейка. Однако в поперечном направлении развитие кристаллической структуры ограничено явлением складкообразования, так что микрокристаллы образуют пластинчатую структуру. Так, например, толщина пластиинки может составлять от 60 до 300 Å, а ее боковые размеры — от 1 до 100 мкм. На макроскопическом уровне эти пластиинки образуют более сложные структуры — сферолиты. Таким образом, даже если мономер имеет существенный дипольный момент, например, как в случае PVF<sub>2</sub> (элементарный дипольный момент = 21,1 дБ, т. е.  $7 \cdot 10^{-30}$  Кл·м), в целом никакой макроскопической поляризации не возникает. Однако обработкой, например, горячей вытяжкой и охлаждением в интенсивном поле (0,1÷1,0 МВ/см), можно обеспечить преимущественную ориентацию элементарных диполей, так что в полимерной пленке возникает постоянная поляризация, наделяющая ее пиро- и пьезоэлектрическими свойствами. Для PVF<sub>2</sub> матрица пьезоэлектрических коэффициентов идентична матрице кристаллической структуры класса *mm2* (орторомбической):

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Величины коэффициентов сильно зависят от технологии изготовления (табл. 10.1).

Таблица 10.1. Порядок величин физических характеристик некоторых пьезоэлектрических материалов (при 25°C)

Материал	Пьезоэлектрические коэффициенты, $10^{-12} \text{ кН}^{-1}$	Проницаемость (при нулеевом сжатии)	Удельное сопротивление, Ом·м	Модуль Юнга, $10^9 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$	Максимальное напряжение, $10^7 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$	Максимальная температура применения, °C	Состав, особенности
Кварц (ромбоэдрический)	$d_{11}=2,3$ $d_{44}=-0,7$	$\varepsilon_{11}=4,5$	$10^{12}$	$Y_{11}=80$	10	550	$\text{SiO}_2$ Высокая стабильность
Сегнетова (или шеллева) соль	ро- $d_{14}=550$ $d_{25}=54$ $d_{36}=12$	$\varepsilon_{11}=350$	$>10^{10}$	$\begin{matrix} Y_{11}=19,3 \\ Y_{22}=30 \\ Y_{33}=30 \end{matrix}$	1,4	45	$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Высокая чувствительность, плохая сопротивляемость влажности и температуре
L. H. (моноклинная)	$d_{21}=15$ $d_{22}=1,8$ $d_{23}=-38$ $d_h=13$	$\begin{matrix} \varepsilon_{11}=5,6 \\ \varepsilon_{22}=10,3 \\ \varepsilon_{33}=6,5 \end{matrix}$	$>10^{10}$	46	1,5	75	$\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Хорошая гидростатическая чувствительность
Kepamkni	G2000 (Gulton Industries) PXE5 (RTC) PX4 (Mullard) PZT5A (Vernitron Corp.)	$d_{33}=80$ $d_{33}=390$ $d_{33}=265$ $d_{33}=375$	$\varepsilon_{33}=250$ $\varepsilon_{33}=1800$ $\varepsilon_{33}=1500$ $\varepsilon_{33}=1700$	$10^9$ $10^{12}$ $10^{11}$ $10^{11}$	$Y_{33}=47$ $Y_{33}=53$ $Y_{33}=79$ $Y_{33}=53$	между 7 и 8	400 285 265 365 Метаниобат свинца, титанат-цирконат свинца Хорошее сочетание чувствительности и сопротивляемости температурным воздействиям
Hormepa	Полифторид винилидена PVF <sub>4</sub>	$d_{15}=10$ $d_{24}=2$ $d_{31}=20$ $d_{32}=2$ $d_{33}=-30$	0,1 10 до 12	$10^{13}$	от 2 до 3	от 90 до 100	$(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$ Применение: акустические передатчики, пиро-электрические детекторы

Интерес к использованию полимеров объясняется их податливостью (очень слабый резонанс), химической инертностью и низкой себестоимостью изготовления.

### 10.1.3. Устройство датчиков

**Основные и побочные деформации.** Схемы деформаций, определяющих принцип действия датчика, представлены на рис. 10.10.

Две пластинки можно соединить с учетом их полярности и знаков деформаций (совпадающих или противоположных): а) параллельно (рис. 10.11, а), так что накопленный заряд и емкость удваиваются; б) последовательно (рис. 10.11, б), так что напряжение (в разомкнутой цепи) и сопротивление удваиваются, а емкость уменьшается вдвое.

Эти случаи можно обобщить (рис. 10.11, в).

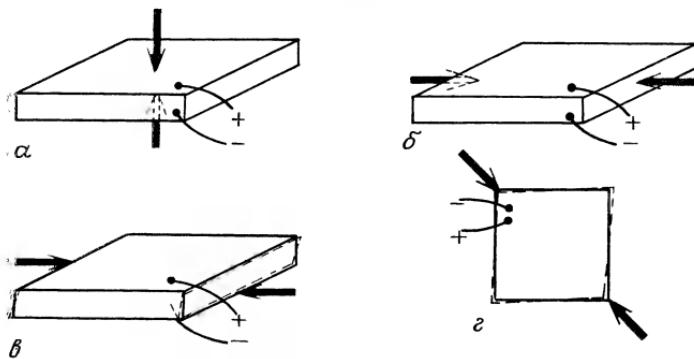


Рис. 10.10. Типичные деформации пьезоэлектрической пластиинки.

а — продольное удлинение; б — поперечное удлинение; в — сдвиг по толщине; г — сдвиг грани.

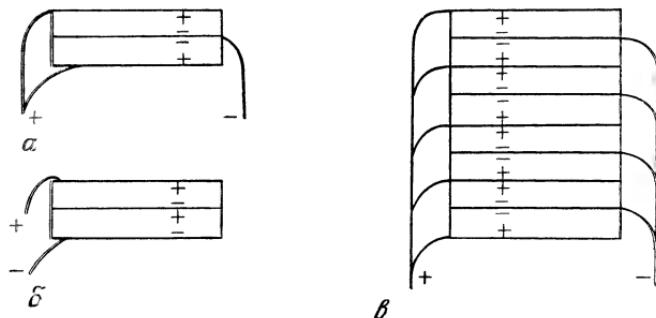


Рис. 10.11. Соединения пьезоэлектрических элементов.

а — параллельное соединение; б — последовательное соединение; в — многослойный монтаж в параллель.

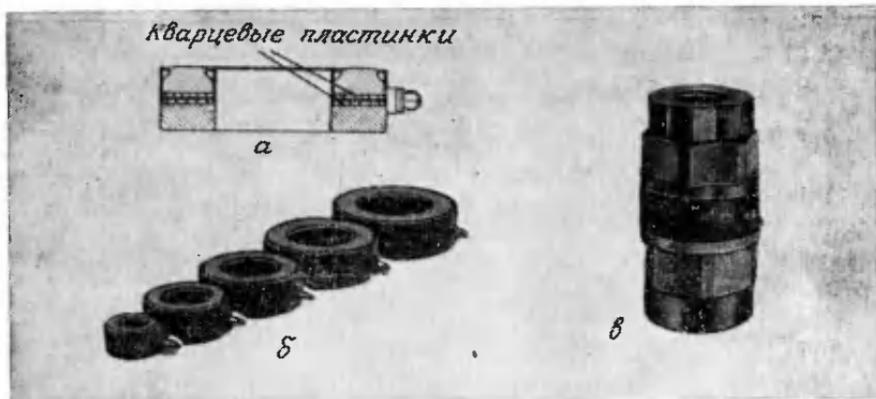


Рис. 10.12. Кварцевые нагрузочные кольца (фирма-изготовитель Kistler).  
а — схема конструкции; б — готовые изделия; в — предварительно напряженная сборка для измерения сил растяжения и сжатия.

**Кварцевые нагрузочные кольца.** Пьезоэлектрические датчики силы, чувствительные только к осевым силам сжатия, выполняются в форме кварцевых колец, называемых нагрузочными (рис. 10.12). Площадь поверхности датчика, подверженная сжатию, определяет верхнюю границу измерений — от нескольких килоньютонов (при диаметре порядка сантиметра) до  $10^3$  кН (при диаметре порядка 10 см).

Значительное предварительное сжатие, которое обеспечивается двумя гайками, сжимающими кольцо (рис. 10.12, в), позволяет расширить диапазон измерений сил сжатия и растяжения (всякая сила растяжения измеряется как уменьшение силы предварительного сжатия). Чувствительность датчика снижается на 5÷10% из-за механического шунта, представляющего собой ось сборки предварительного сжатия.

Диапазон измерений кварцевых нагрузочных датчиков силы составляет от  $\pm 2,5$  до  $\pm 120$  кН в зависимости от размера кольца.

**Кварцевые датчики нескольких составляющих силы.** Кварцевое кольцо можно вырезать так, что в специфических условиях их применения оно будет чувствительно только к силам одного совершенно определенного направления. Известно (разд. 10.1.1), что у кварца имеется только пять пьезоэлектрических коэффициентов:  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{14}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{26}$ . Чувствительность круглого кольца  $X$ -среза к сжатию (или растяжению — сжатию при предварительном сжатии) проявляется через коэффициент  $d_{11}$  (если нет паразитных боковых сил, приводящих к возникновению овальности и механических напряжений, эффект которых связан с коэффициентами  $d_{12}$  и  $d_{14}$ ). Аналогично, кольцо  $Y$ -среза чувст-

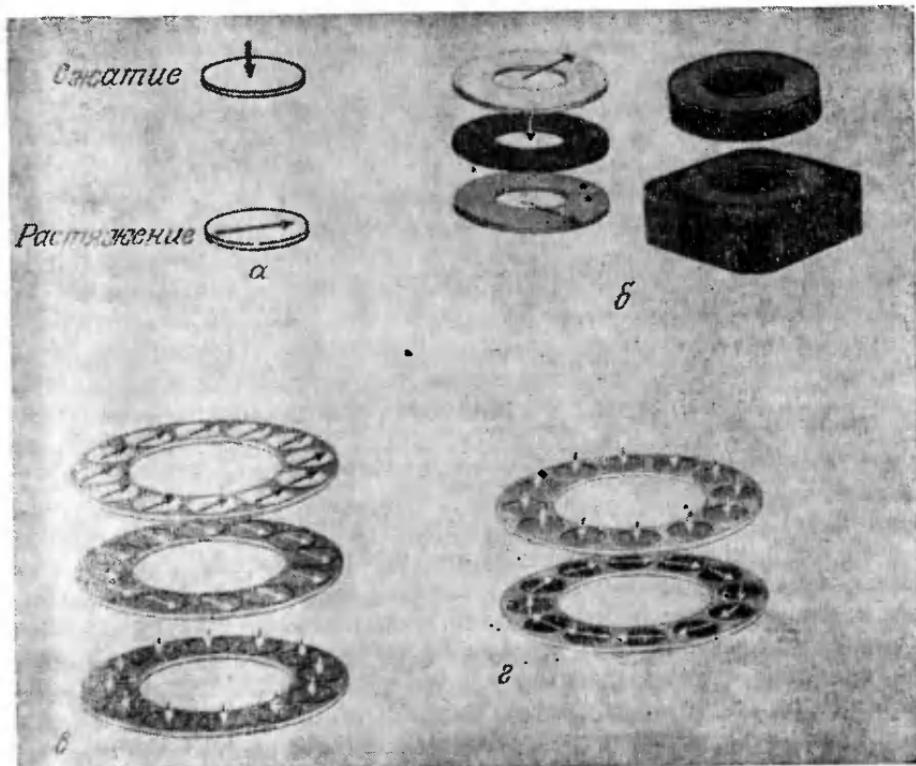


Рис. 10.13. Кварцевые многокомпонентные датчики силы (фирма-изготовитель Kistler).

**а** — схематизация чувствительных пластинок; **б**, **в** — датчики трех нормальных компонент  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ; **г** — двухкомпонентный датчик  $F$  и  $M$ .

вительно только к сдвигу по толщине через коэффициент  $d_{25}$ , если только вследствие механической сборки не возникает усилия, относящегося к  $d_{25}$  (торцевому сдвигу).

В частности, эти два среза, представленные символически на рис. 10.13, а, используются для создания кварцевых датчиков нескольких составляющих, таких, как:

1) датчик трех составляющих, в котором используются три пары колец (рис. 10.13, б), из которых одна, чувствительная к сжатию, измеряет  $F_x$ , тогда как две другие, чувствительные к сдвигу и развернутые одна относительно другой на  $90^\circ$ , измеряют  $F_y$  и  $F_z$ ;

2) датчик трех составляющих, построенный по тому же принципу, но каждое его кольцо несет на себе несколько одинаковых колец, электрически соединенных параллельно (рис. 10.13, в);

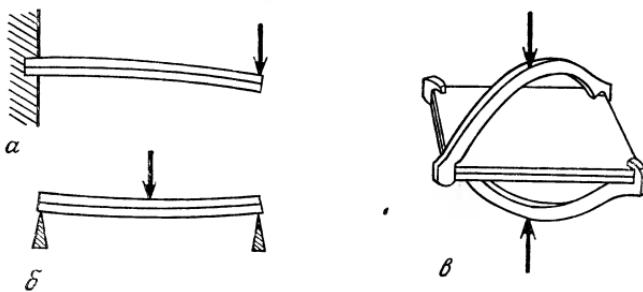


Рис. 10.14. Силовые схемы высокочувствительных пьезоэлектрических датчиков.

*а* — консоль, работающая на изгиб; *б* — балка, работающая на изгиб; *в* — пластинка, работающая на скручивание.

3) датчик двух составляющих: силы сжатия  $F$  и момента  $M$  (рис. 10.13, *г*). Для измерения момента кольца, чувствительные к сдвигу, смонтированы так, что их оси чувствительности направлены по касательной к окружности.

В датчиках этого типа необходимо значительное предварительное сжатие набора колец, так как сдвиговые силы передаются через трение.

**Высокочувствительные датчики.** Гораздо реже используются гибкие пьезоэлектрические датчики, предназначенные для измерения очень малых сил, в виде:

1) консолей (рис. 10.14, *а*) и балок (рис. 10.14, *б*) — под действием силы одна из кварцевых пластинок удлиняется, другая сжимается;

2) пластинок (рис. 10.14, *в*), в которых под действием силы происходит двухосный сдвиг (в этих случаях используют двухкомпонентный датчик);

в) кварцевой пластинки с использованием поперечного эффекта (разд. 10.1.1).

#### 10.1.4. Метрологические характеристики

**Чувствительность, влияние датчика на измеряемую величину.** Собственная чувствительность датчика зависит от величины пьезоэлектрических коэффициентов материала, от типа деформации, которой он подвергается, и от расположения элементов крепления. Кроме того, она зависит от схемы включения, которая определяет соотношение между измеряемой силой и силой, передаваемой на чувствительный элемент. Схема включения влияет и на величину деформации под нагрузкой, которая часто используется для характеристики вносимых датчиком искажений: они тем меньше, чем меньше деформация под нагрузкой и,

следовательно, меньшее чувствительность: влияние датчика на измеряемую величину и чувствительность, вообще говоря, пропорциональны друг другу.

**Линейность, диапазон измерений, разрешение.** Линейность и отсутствие гистерезиса означают, что деформация под нагрузкой остается ниже предела  $\epsilon_{\max}$  упругой области, которым ограничивается верхний предел диапазона измерений Д. И. Для продольной деформации, например, он пропорционален площади чувствительного элемента.

Поскольку ошибка из-за нечувствительности очень мала, разрешающая способность кварцевых датчиков силы превосходна (несколько миллиньютонов для любого Д. И.).

**Полоса пропускания.** Статические измерения являются довольно сложными; ограничения на низких частотах возникают при использовании схем формирования сигналов (разд. 10.1.5), однако постоянная времени в несколько часов, соответствующая граничной частоте ниже  $10^{-3}$  Гц, может быть получена с применением зарядового усилителя (квазистатические измерения).

Ограничения на высокие частоты возникают из-за механического резонанса на частоте  $f_0$  совокупности чувствительной пластиинки и связанных с ней механических составляющих (пружин, гаек, передающих элементов и т. д.). Она зависит от схемы включения, определяющей жесткость датчика.

Так как частотная характеристика такого датчика определяется системой уравнений второго порядка (разд. 2.4.3) с небольшим затуханием, чувствительность вблизи  $f_0$  изменяется согласно закону

$$S(f) \approx S_{BP} / (1 - (f/f_0)^2),$$

где  $S_{BP}$  — чувствительность в используемой полосе пропускания. Это налагает ограничение  $f \ll f_0$  на частоту  $f$  измеряемой величины; обычно  $f_{\max} \approx 0,2f_0$ , если ошибка измерения не должна превышать 5 %. Естественно, что для измерения быстро меняющихся нагрузок желательна большая величина  $f_0$ .

**Влияющие факторы.** Различные внешние факторы влияют на импеданс датчика и значения пьезоэлектрических коэффициентов, а следовательно, чувствительность. В этом отношении кварц предпочтительнее керамики, так как его температурная чувствительность в диапазоне от  $-40$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  составляет лишь около  $-2 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ .

**Изменение температуры.** Многие пьезоэлектрические материалы полярны и потому являются пироэлектрическими; их поляризация зависит от температуры, и температурные изменения поляризации не отличимы от изменений измеряемой величины. Пироэлектрические эффекты, значительные в случае керамики, несущественны для кварца.

**Влажность.** Большой импеданс датчика вызывает риск заметного ухудшения электрической изоляции из-за конденсации паров воды. Схема формирования сигналов с соответствующим входным импедансом (зарядовый усилитель) ослабляет эти последствия.

**Механические усилия.** Они могут порождать паразитные сигналы, когда воздействуют:

а) непосредственно на датчик (составляющие силы в направлениях, отличных от измеряемого; звуковое давление из окружающей среды, когда гидростатический коэффициент пьезоэлектрического материала достаточно высок; паразитные удары, вибрации или ускорение), либо

б) на кабель, соединяющий датчик и измерительное оборудование. Обычно паразитные электрические заряды вследствие трения между диэлектриком и металлическим проводником (трибоэлектрический эффект) появляются в кабеле, подверженном кручению и ударам. В слабошумящих кабелях между проводником и изоляцией вводится смазка графитом или полупроводящая среда.

Примером датчиков рассматриваемого типа может служить кварцевое нагрузочное кольцо с предварительным сжатием типа 9351 (конструкция Kistler). Этот датчик имеет следующие характеристики: Д. И.  $\pm 40$  кН; чувствительность  $\sim 2$  пКл·Н (коэффициент  $d_{11}$  кварца); площадь чувствительного элемента  $\sim 9$  см<sup>2</sup>; жесткость 2000 Н/мкм, т. е. деформация от полной нагрузки  $\pm 20$  мкм. Последняя характеристика относится к датчику в целом и зависит в основном от механических элементов (таких, как гайка предварительного сжатия), связанных с чувствительным элементом (деформация которого составляет лишь около 1 мкм).

#### 10.1.5. Измерительные схемы пьезоэлектрических датчиков

**Эквивалентная схема датчика.** Перемещение заряда  $Q = KF$  вследствие приложения силы  $F$  к пьезоэлектрическому элементу вызывает прохождение тока  $dQ/dt$ . Так как начальный заряд равен нулю, то вместо генератора заряда датчик можно представить источником тока интенсивности  $i = dQ/dt$ , включенным параллельно импедансной схеме из 3 ветвей с определенной собственной частотой (рис. 10.15, а).

Ветвь  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$  моделирует первый электромеханический резонанс на высокой частоте вне полосы пропускания датчика. Сопротивление  $R_g$  — сопротивление изоляции пьезоэлектрического материала; оно становится импедансом датчика на низких частотах. Емкость  $C_g$  присуща генератору зарядов; она представляет импеданс датчика на средних и высоких частотах.

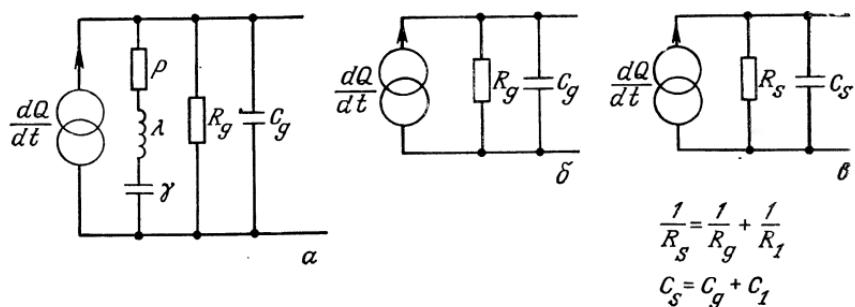


Рис. 10.15. Эквивалентные схемы пьезоэлектрического датчика.

*а* — для широкой полосы; *б* — для используемой полосы пропускания; *в* — датчик, включенный в эквивалентную цепь с параллельными сопротивлением  $R_1$  и емкостью  $C_{\text{г}}$ .

На практике используют эквивалентную схему, приведенную на рис. 10.15, *б*. Когда датчик включен в измерительную линию, ее эквивалентные (в области используемых частот) сопротивление и емкость подключаются параллельно датчику, образуя аналогичную эквивалентную схему (рис. 10.15, *в*). Поэтому при анализе нет необходимости уточнять, имеется линия или нет.

Эквивалентная схема Тевенина приводится на рис. 10.16, как и ее упрощенный вариант, применимый, когда сопротивление изоляции велико ( $R_s \gg 1/C_s \omega$ ). Здесь  $p$  обозначает оператор Лапласа; в синусоидальном режиме  $p=j\omega$ .

**Схема с усилителем напряжения.** Входной импеданс усилителя напряжения эквивалентен конденсатору  $C_e$  в параллельном включении с сопротивлением  $R_e$ , так что в целом снова получается эквивалентная схема того же вида (рис. 10.17).

Напряжение  $v_m$  на входе усилителя выражается формулой

$$v_m = \frac{Q}{C_{\text{экв}}} \frac{R_{\text{экв}} C_{\text{экв}} p}{1 + R_{\text{экв}} C_{\text{экв}} p}.$$

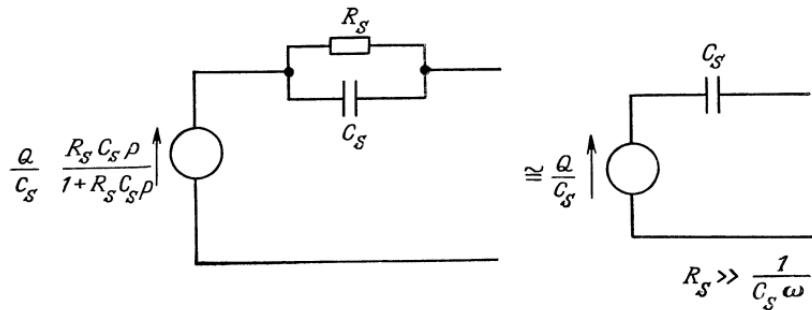


Рис. 10.16. Эквивалентная схема Тевенина пьезоэлектрического датчика.

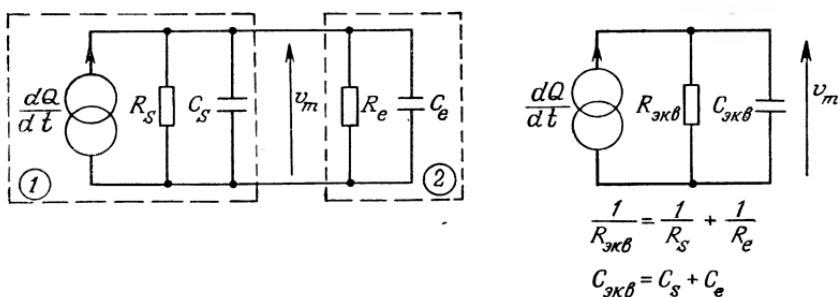


Рис. 10.17. Эквивалентная схема пьезоэлектрического датчика, связанного с усилителем напряжения.

1 — датчик и его линия подключения; 2 — входной импеданс усилителя напряжения.

Передаточная функция  $\tau p / (1 + \tau p)$ , где  $\tau = R_{\text{экв}} C_{\text{экв}}$ , является функцией высокочастотного фильтра первого порядка; важное ограничение схемы этого типа на низких частотах состоит в том, что может возникать существенная ошибка, когда постоянная времени  $\tau$  уменьшается вследствие случайного нарушения изоляции.

Для частот, значительно больших, чем  $f_c = 1 / (2\pi R_{\text{экв}} C_{\text{экв}})$ , имеем

$$\frac{v_m}{Q} = \frac{1}{C_{\text{экв}}} = \frac{1}{C_g + C_l + C_e}.$$

Это соотношение выявляет второе ограничение: коэффициент пропорциональности между зарядом и измеряемым напряжением зависит от емкостей генератора, измерительной линии и входа усилителя. Например, чувствительность керамического датчика емкостью  $C_g = 1000 \text{ пФ}$  снижается на 11% при подключении усилителя с входной емкостью  $C_e = 10 \text{ пФ}$  коаксиальным кабелем длиной 1 м ( $C_l = 100 \text{ пФ/м}$ ). Кроме того, сопротивление изоляции пьезоэлектрических материалов экспоненциально уменьшается с ростом температуры: каждые  $33^\circ\text{C}$  соответствуют падению сопротивления на 1 порядок; например, для акселерометра типа АМ109 (конструкция фирмы Metravib)  $R_g = 10^5 \text{ МОм}$  при  $20^\circ\text{C}$  и  $R_g \approx 10 \text{ МОм}$  при  $175^\circ\text{C}$ .

Предполагая, что измерительная линия хорошо изолирована ( $R_s$  очень велико), а сопротивление входа усилителя  $R_e = 500 \text{ МОм}$ , приходим к выводу, что при  $20^\circ\text{C}$  постоянную времени ограничивает  $R_e$  ( $\tau = 0,55 \text{ с}$  и  $f_c \approx 0,3 \text{ Гц}$ ). Эта граничная частота является вместе с тем достаточно низкой для многих динамических измерений, в частности, при желании снизить пироэлектрический шум.

Однако если нужно ее еще уменьшить увеличением входного сопротивления усилителя, например, до  $10^{10}$  Ом, то следует осторегаться возможных утечек в линии, особенно в контактах, контролируя их чистоту и соблюдая меры предосторожности в окружающей среде повышенной относительной влажности. При  $175^{\circ}\text{C}$  и стабильной величине  $C_g$  частота среза становится равной  $f_c=14$  Гц. Это значение часто оказывается слишком высоким, особенно при фазовых измерениях.

Эти примеры показывают, что при частых изменениях длины линии неудобно использовать усилители напряжения; на очень низких частотах это приводит к случайным ошибкам и даже заведомо неверным измерениям.

Напротив, в установках неизменной конфигурации, особенно в случае датчиков на интегральной электронике, эти усилители применимы.

**Схема с зарядовым усилителем.** Схема формирования сигнала с электрическим зарядом на входе и пропорциональным ему напряжением на выходе называется зарядовым усилителем; этот термин неточен, так как на самом деле речь идет о преобразователе заряд — напряжение.

В зарядовом усилителе (рис. 10.18) имеются:

а) входная ступень, представляющая собой собственно зарядовый преобразователь. Этот преобразователь обычно встроен в схему формирования сигнала (за исключением частных случаев, когда он вынесен на некоторое расстояние от схемного блока и помещен в непосредственной близости от датчика, когда измерения проводятся на значительном расстоянии или в сильно возмущенной среде);

б) ступень формирования нормированной чувствительности датчика, позволяющая получать стандартные значения чувствительности. Иногда эта ступень играет также роль усилителя развязки входа и выхода;

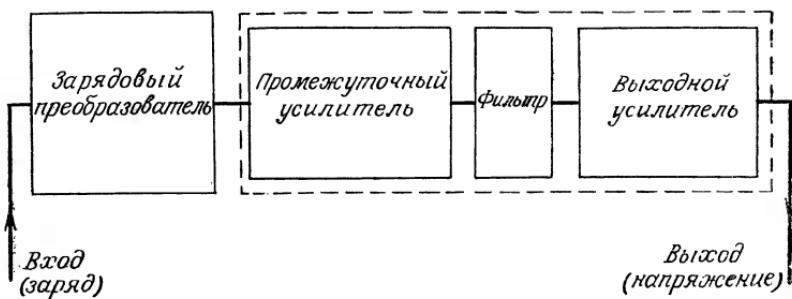


Рис. 10.18. Типовая схема зарядового усилителя.

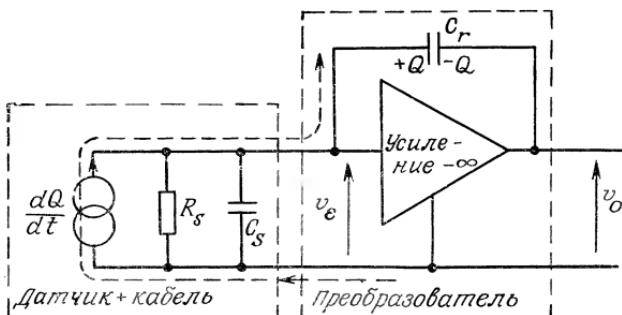


Рис. 10.19. Пьезоэлектрический датчик, связанный с преобразователем заряд/напряжение.

- в) ступень промежуточной фильтрации;
- г) одна или несколько ступеней усиления напряжения, формирующих выходной сигнал.

*Принципиальная схема зарядового преобразователя* (рис. 10.19). Она как бы замыкает генератор заряда, заставляя его тем самым разряжаться полностью, независимо от параллельного импеданса, состоящего из  $R_s$  и  $C_s$ . Заряды переносятся в конденсатор постоянной емкости  $C_r$ , где они накапливаются, так что на его обкладках возникает напряжение, пропорциональное перемещенному заряду. Это позволяет направить ток через любой импеданс, подав его на инвертирующий вход усилителя с большим увеличением и отрицательной обратной связью.

Для бесконечно большого усиления напряжение на входе  $v_e$  стремится к нулю. Поэтому входной импеданс идеального зарядового преобразователя равен нулю, и легко определить коэффициент преобразования:

$$V_0/Q = -1/C_r.$$

*Работа на очень низких частотах.* Практически конденсатор  $C_r$  представляет собой сопротивление изоляции  $R_r$ , очень большой величины, через которое может протекать слабый входной ток, необходимый для создания входного напряжения усилителя (вход на полевых транзисторах). Тогда функция преобразования приобретает вид (рис. 10.20):

$$\frac{V_0}{Q} = -\frac{1}{C_r} \frac{R_r C_r p}{1 + R_r C_r p}.$$

Она имеет ту же форму, что и функция, найденная для усилителя напряжения, с той лишь разницей, что коэффициенты здесь не зависят от параметров источника питания.

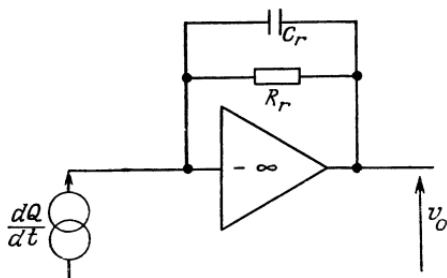


Рис. 10.20. Схема низкочастотного зарядового преобразователя.

рядового преобразователя (через реле или транзистор, подключенный в параллель с  $C_r$ ); с другой стороны, большая постоянная времени не позволяет пользователю преодолеть шумы очень низких частот, обусловленные пироэлектрическими эффектами в датчиках, трибоэлектрическими шумами в линии и электронными шумами на входе усилителя.

В качестве примера приведем характеристики регулируемого зарядового преобразователя для вибрационных измерений (усилитель АС04 конструкции фирмы Metravib):  $C_r=200$  пФ; коэффициент преобразования 5 мВ/пКл; рекомендуемая постоянная времени 0,44 с; рекомендуемое сопротивление утечки  $2,2 \cdot 10^9$  Ом.

**Ослабление и высокочастотная фильтрация на входе регулируемого зарядового преобразователя.** При исследовании ударных нагрузок и ускорений заряд, переносимый пьезоэлектрическим датчиком, может превышать максимально допустимый заряд на входе зарядового преобразователя.

Ослабление входного сигнала осуществляется путем введения в схему конденсатора известной емкости  $C_a$  с малой утечкой, включенного последовательно с датчиком и защищенного от окружающего электрического поля экраном из проводящего металла (рис. 10.21).

При этом сопротивление изоляции  $R_l'$  и емкость  $C_l'$  выходной линии  $C_a$  не учитываются, так как они закорочены входом зарядового преобразователя.

Передаточная функция заряд/напряжение имеет вид

$$\frac{V_o}{Q} = -\frac{1}{C_r} \frac{C_a}{C_a + C_s} \frac{R_s(C_a + C_s)p}{1 + R_s(C_a + C_s)p}.$$

Здесь  $-1/C_r$  — передаточная функция при  $C_a \rightarrow \infty$ ,  $C_a/(C_a + C_s)$  — искомый коэффициент ослабления, для определения которого необходимо знать величину  $C_s$ , являющуюся сум-

На практике возможно сделать стабильной и большой постоянной времени  $R_s C_r$ , что позволяет проводить квазистатические измерения. Однако надо заметить, что слишком большая постоянная времени, с одной стороны, приводит к недопустимой продолжительности разряда после зарядки, что требует ручного выставления на нуль зарядового преобразователя.

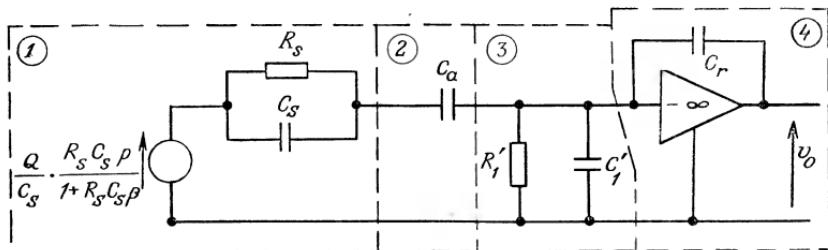


Рис. 10.21. Ослабление входного сигнала емкостной связью.

1 — датчик и линия на входе  $C_a$  (эквивалентная схема Тевенина); 2 — конденсатор ослабления сигнала; 3 — линия на выходе  $C_a$ ; 4 — идеальный зарядовый преобразователь.

мой емкостей датчика и участка линии, соединяющего его с  $C_a$ ,  $[R_s(C_a+C_s)p]/[1+R_s(C_a+C_s)p]$  — высокочастотная часть функции, обусловленная присутствием  $C_a$  и существенно не изменяющаяся, если источник тока хорошо изолирован ( $R_s$  велико).

В случае неидеального зарядового преобразователя конденсатор  $C_r$  будет обладать сопротивлением утечки  $R_r$ , учет которого, как показано выше, приводит к высокочастотной поправочной функции, зависящей от параметров зарядового преобразователя.

Для частот, значительно превышающих две указанные выше граничные частоты, передаточная функция упрощается:

$$\frac{V_o}{Q} = -\frac{1}{C_r} \frac{C_a}{C_a + C_s}.$$

*Пример:* датчик ускорения с емкостью  $C_g=1800$  пФ и зарядовым преобразователем, насыщающимся при измеряемой величине ускорения  $5000$  м/с<sup>2</sup>.

Для емкости  $C_a=1000$  пФ, соединенной десятью метрами кабеля с погонной емкостью  $92$  пФ/м, коэффициент ослабления равен

$$C_a / (C_a + C_s) = 1000 / 3720 = 0,269,$$

и насыщение наступает только для ускорений, превышающих  $18\,600$  м/с<sup>2</sup>.

С другой стороны, для того, чтобы введенная высокочастотная коррекция неискажала характеристику зарядового преобразователя с постоянной времени  $0,44$  с, должно выполняться условие

$$R_a (C_a + C_s) \gg 0,44, \text{ т. е. } R_s \gg 118 \text{ МОм.}$$

Следует отметить, что при малой емкости линии  $C_s$  представляется собой, в основном, емкость генератора заряда; поскольку она меняется с температурой, это может привести к температурному отклонению коэффициента ослабления при измерениях.

**Высокочастотная фильтрация на входе регулируемого зарядового преобразователя.** При вибрационном обследовании сложных конструкций часто оказывается, что низкочастотный измерительный сигнал силы или ускорения почти неразличим на фоне шумовых сигналов более высокой частоты, возникающей от случайных ударов и гармонических составляющих колебаний отдельных частей конструкции.

В таком случае необходимо вводить фильтр на промежуточных уровнях усиления. Если подходящий фильтр отсутствует или сам вход уже насыщен, то необходимо либо применять тщательно спроектированные механические фильтры, либо фильтровать заряд. Характеристика с ослаблением 6 дБ/окт реализуется простым последовательным подключением сопротивления к датчику, помещенному в кожух, образующий электростатический экран (рис. 10.22).

Передаточная функция заряд/напряжение (низкочастотного типа первого порядка) в этом случае имеет вид:

$$\frac{V_0}{Q} = -\frac{1}{C_r} \frac{R_S}{R_S + R_f} \frac{1}{1 + \{R_f R_S / (R_f + R_S)\} C_{SP}}.$$

На практике  $R_S/R_f \gg 1$ , следовательно,

$$\frac{V_0}{Q} \approx -\frac{1}{C_r} \frac{1}{1 + R_f C_{SP}}.$$

Когда измерения осуществляются в синусоидальном режиме, передаточная функция имеет характеристики

$$A = \frac{1}{1 + jf/f_c}, \quad f_c = 1/2\pi R_f C_s,$$

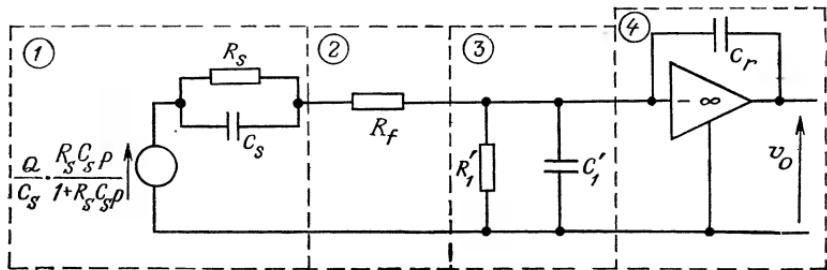


Рис. 10.22. Низкочастотная фильтрация заряда с помощью последовательного сопротивления.

1 — датчик и линия на входе  $R_f$ ; 2 — сопротивление фильтра; 3 — линия на выходе  $R_f$ ; 4 — идеальный зарядовый преобразователь.

а ее модуль и фаза в полосе пропускания определяются выражениями

$$|A| = 1/\sqrt{1 + (f/f_c)^2} \approx 1 - f^2/2f_c^2, \quad f/f_c \ll 1.$$

$$\operatorname{Arg} A = -\operatorname{arctg}(f/f_c) \approx -f/f_c, \quad f/f_c \ll 1.$$

Зная максимальную частоту  $f_{\max}$  измеряемой величины, можно определить такую минимальную граничную частоту, чтобы сохранилась требуемая точность измерения модуля, фазы либо того и другого. Например, при  $f_{\max} = 80$  Гц ошибка измерения модуля  $<5\%$ , откуда  $f_c > 253$  Гц; ошибка измерения фазы  $<5^\circ$ , откуда  $f_c > 920$  Гц.

Соблюдение обоих условий приводит к выбору частоты среза  $\sim 1$  кГц, откуда для тех же датчика и кабеля, что и в предыдущем примере, получаем  $R_f = 58,5$  кОм.

**Частотная характеристика зарядового преобразователя в области высоких частот.** Основной причиной ограниченности по частоте зарядового преобразователя является уменьшение коэффициента усиления  $\mu(f)$  усилителя в разомкнутом контуре в зависимости от частоты.

Предполагается, что рассматриваемый усилитель скорректирован по частоте со спадом в 6 дБ/окт и имеет характеристику  $\mu(f) = \mu_0(1 + jf/f_0')$ , где  $f_0' = 100$  Гц. Так как используемая цепь обратной связи не меняет фазы, стабильность является безусловной. Сопротивление обратной связи  $R_r$  действует только на низкой частоте и поэтому в рабочем диапазоне частот не учитывается.

Передаточная функция зарядового преобразователя (рис. 10.23) записывается в виде

$$\frac{V_o}{Q} = -\frac{1}{C_r} \left( 1 + \frac{1}{\mu(f)\beta} \right)^{-1},$$

где  $\beta = C_r/(C_r + C_s)$  — коэффициент обратной связи.

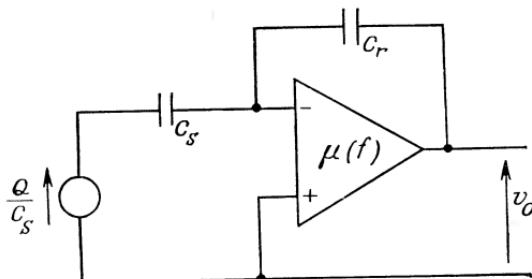


Рис. 10.23. Упрощенная схема высокочастотного зарядового преобразователя.

При  $f \gg f_0'$  усиление  $\mu(f)$  становится чисто мнимым:

$$\mu(f) \approx \frac{\mu_0}{jf/f'_0} = \frac{|\mu(f)|}{j}.$$

Искажение, равное  $[1 + 1/(\mu(f)\beta)]^{-1}$ , составляет  $[(1+j/(\mu(f)\beta))^2]^{-1}$ , а приблизительная величина его модуля равна

$$\left[1 + \frac{1}{|\mu(f)|^2 \beta^2}\right]^{-1/2} \approx 1 - \frac{1}{2|\mu(f)|^2 \beta^2},$$

откуда определяем модуль динамической ошибки

$$\varepsilon_m = -\frac{j}{2|\mu(f)|^2 \beta^2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + C_S/C_r}{|\mu(f)|} \right)^2$$

и ее фазу

$$\varepsilon_\varphi = \arg \left( 1 + \frac{\dot{f}}{|\mu(f)| \beta} \right)^{-1} = -\arctg \frac{1 + C_S/C_r}{|\mu(f)|} \approx -\frac{1 + C_S/C_r}{|\mu(f)|}.$$

Таким образом, динамическая ошибка увеличивается с ростом емкости источника и частоты.

Рассмотрим зарядовый преобразователь с коэффициентом преобразования 5 мВ/пКл,  $C_r=200$  пФ,  $C_g=1000$  пФ и  $C_t=9000$  пФ. Находим  $C_s=10\,000$  пФ,  $|\mu(1000 \text{ Гц})|=60$  дБ,  $|\mu(10\,000 \text{ Гц})|=40$  дБ. Динамические ошибки при 1000 Гц составляют  $\varepsilon_m=-0,13\%$ ,  $\varepsilon_\varphi=-2,9^\circ$ , а при 10 000 Гц  $\varepsilon_m=-13\%$ ,  $\varepsilon_\varphi=-29^\circ$ .

**Шум зарядового преобразователя.** Независимо от температурного шума сопротивления источника, образование шума на входе дифференциального усилителя схематично сводится к действию частично коррелированных двух генераторов тока и одного генератора напряжения.

Если входная ступень зарядового преобразователя выполнена на полевом транзисторе, то, с учетом входного импеданса, генератор шумового напряжения  $e_b$  создает доминирующий эффект (рис. 10.24).

Конечный импеданс источника уменьшает коэффициент обратной связи и приводит к усилению напряжения собственного шума усилителя. В результате имеем:

$$\frac{V_{ob}}{e_b} = 1 + \frac{R_r}{R_s} \frac{1 + R_s C_s p}{1 + R_r C_r p} = \frac{1 + R_r/R_s + R_r p (C_s + C_r)}{1 + R_r C_r p}.$$

**Широкополосный шум.** В полосе пропускания, т. е. для частот, значительно превышающих частоты среза числителя и знаменателя, имеем:

$$V_{ob}/e_b = 1 + C_s/C_r.$$

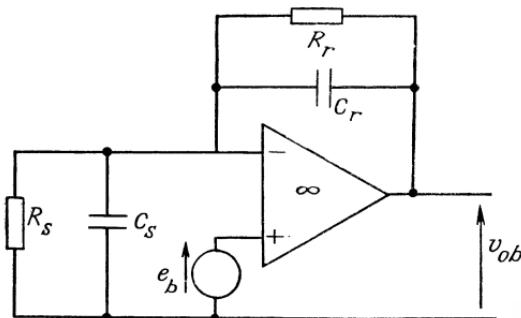


Рис. 10.24. Схема для анализа электронного шума зарядового преобразователя.

Следовательно, спектральное распределение шума остается неизменным и его эффективное значение возрастает с увеличением емкости источника.

Эквивалентный перемещенный заряд, который создавал бы на выходе тот же шум, что и напряжение  $e_b$ , равен  $Q_b = V_{0b}/G_C$ , где  $G_C$  — модуль коэффициента усиления преобразователя:

$$G_C = 1/C_r.$$

Для эффективного значения получаем выражение

$$Q_{b \text{ эфф}} = e_{b \text{ эфф}} (C_r + C_s).$$

Обозначив через  $Q_{b \text{ эфф}}$  эффективное значение измеряемого полезного заряда, находим отношение сигнал/шум:

$$\frac{S}{B} = \frac{G_C Q_{b \text{ эфф}}}{e_{b \text{ эфф}} (1 + C_s/C_r)},$$

или  $\frac{S}{B} = \frac{G_C Q_{b \text{ эфф}}}{e_{b \text{ эфф}} (1 + G_C C_S)}.$

Например, в полосе 2 Гц  $\div$  200 кГц имеем  $e_{b \text{ эфф}} \approx 10$  мкВ. Для  $C_r = 200$  пФ,  $C_s = 5$  пФ находим  $Q_{b \text{ эфф}} = 0,052$  пКл.

**Низкочастотный шум.** На низких частотах, например, причиной усиления шума является шум сопротивления источника  $R_s$ , если оно существенно ниже сопротивления обратной связи  $R_r$ :

$$V_{0b}/e_b \approx 1 + R_r/R_s.$$

В действительности, поскольку спектральная плотность напряжения  $e_b$  собственного шума для частот, меньших примерно 100 Гц, обычно повышена, то это явление выражено еще сильнее.

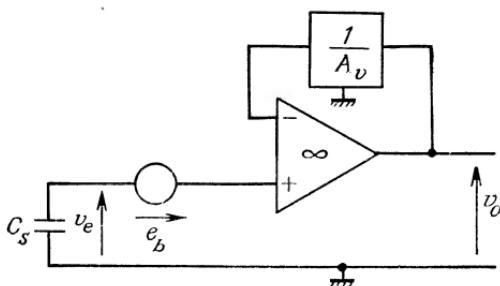


Рис. 10.25. Схема для анализа электронного шума системы с усилителем напряжения.

**Сравнение отношений сигнал/шум на выходе зарядового преобразователя и усилителя напряжения.** Не будем рассматривать здесь влияние генератора шумового тока или температурного шума пассивных составляющих, которые относятся только к низкочастотному диапазону полосы пропускания.

Отношение сигнал/шум зарядового преобразователя получено выше:

$$\left(\frac{S}{B}\right)_Q = \frac{G_C Q_{\text{эфф}}}{e_b \text{эфф} (1 + G_C C_S)}.$$

Операционный усилитель, имеющий то же напряжение шума  $e_b \text{эфф}$ , используется для сравнения в схеме неинвертирующего усилителя напряжения с коэффициентом усиления  $A_v = V_0/v_e$  (рис. 10.25).

Наличие цепи обратной связи не предполагает возбуждения никакого широкополосного шума на инвертирующем входе усилителя.

Коэффициент преобразования заряд/напряжение определяется соотношением

$$G_C = V_0/Q = (V_0/v_e) (v_e/Q) = A_v/C_S.$$

Напряжение на выходе, вызванное генератором напряжения шума, равно

$$A_v e_b \text{эфф} = G_C C_S e_b \text{эфф}.$$

Если  $Q_{\text{эфф}}$  — измеряемое эффективное значение заряда, то

$$\left(\frac{S}{B}\right)_v = \frac{G_C Q_{\text{эфф}}}{e_b \text{эфф} G_C C_S}.$$

**Сравнение двух процедур.** Таким образом, отношение  $S/B$  меньше в случае зарядового преобразователя; однако сравнение нельзя провести без следующих практических замечаний.

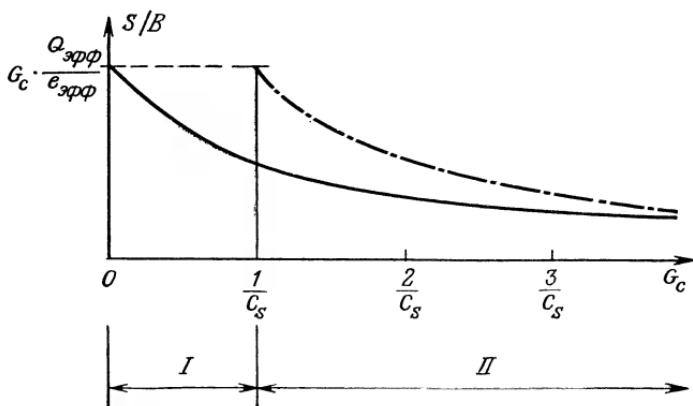


Рис. 10.26. Сравнение преобразователей заряда и напряжения по отношению сигнал/шум.

— зарядовый преобразователь; .—. преобразователь напряжения; I — зарядовый преобразователь необходим; II — с ростом коэффициента усиления превосходство усилителя напряжения уменьшается.

С одной стороны,  $(S/B)_v$  не может возрастать бесконечно, так как произведение  $G_c C_s$  ограничено снизу:

$$G_c C_s = A_v,$$

причем обязательно  $A_v \geq 1$  (этот усилитель не может ослаблять). Следовательно,

$$\max (S/B)_v = G_c Q_{\text{эфф}} / e_b \text{ эффектив.}$$

Напротив, для зарядового преобразователя произведение  $|G_c| C_s = C_s / C_r$  может стать как угодно малым. Следовательно,

$$\max (S/B)_Q = G_c Q_{\text{эфф}} / e_b \text{ эффектив.}$$

Таким образом, оба отношения достигают одного и того же максимального уровня, причем величина этого отношения для усилителя напряжения всегда больше соответствующей величины для преобразователя, но для зарядового преобразователя такие же значения отношения достигаются при меньших коэффициентах усиления. Диаграмма на рис. 10.26 позволяет провести сравнение преобразователя заряда и усилителя напряжения в зависимости от  $G_c$  и  $C_s$ .

## 10.2. Магнитострикционные датчики

Ферромагнитные материалы под действием магнитного поля испытывают определенные изменения — геометрические (изменение размеров с изменением объема или без этого, кручение,

**изгиб)** или механические (изменение модуля Юнга). Эти прямые магнитострикционные эффекты используются в ультразвуковых излучателях, в которых ферромагнитный элемент обычно работает в условиях механического резонанса.

И наоборот, любое механическое напряжение, вызванное, например, воздействием измеряемой силы, изменяет кривую намагниченности, так что становится возможным использование изменения магнитной проницаемости или остаточной индукции для определения силы.

### 10.2.1. Элементарный механизм намагничивания

На микроскопическом уровне ферромагнитный материал характеризуется существованием постоянного магнитного момента у каждого атома, вызванного его электронной оболочкой (в частности, спином электрона). Его внутренняя магнитная энергия является результатом различных взаимодействий:

- между самими магнитными моментами (энергия обмена между ближайшими соседними атомами, которая изменяется при их смещениях);

- между магнитными моментами и кристаллической решеткой (энергия магнитокристаллической анизотропии).

В результате минимизации полной энергии происходят:

- выстраивание магнитных моментов в одном общем направлении, что вызывает спонтанную намагниченность некоторого элемента вещества;

- ориентация этого направления по отношению к кристаллической решетке согласно определенным преимущественным осям, называемым осями предпочтительного намагничивания;

- разделение на домены (размерами от  $10^{-1}$  до  $10^3$  мкм), внутри которых моменты параллельны одному из направлений предпочтительного намагничивания, причем эти направления могут различаться в соседних доменах. Ориентация меняется в промежуточных областях (перегородках), толщина которых имеет порядок сотни атомных радиусов.

**Цикл первичного намагничивания.** Намагничивание ферромагнитного образца под действием возрастающего магнитного поля **H** данного направления происходит в результате последовательного действия трех процессов (рис. 10.27, *a*):

- 1) при слабом поле происходит перемещение перегородок, вызывающее рост доменов, спонтанная намагниченность которых в направлении приложенного поля имеет большую составляющую, чем у соседних доменов;

- 2) при среднем поле происходит инверсия намагниченостей доменов, так что их направления приближаются к направлению поля;

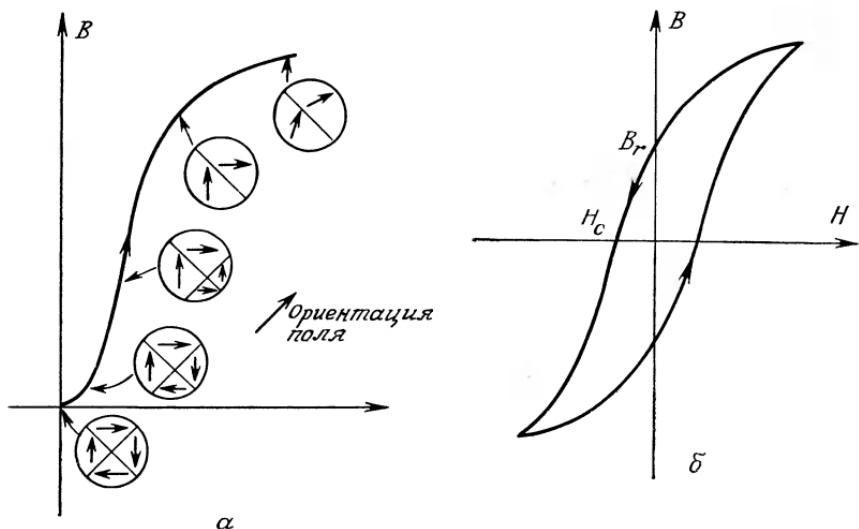


Рис. 10.27. Кривая ферромагнитного намагничивания.

*а* — иллюстрация механизма первичного намагничивания; *б* — гистерезисный цикл.

3) при больших полях происходит разворот направлений легкой намагниченности к направлению поля (насыщение намагниченности).

**Гистерезис.** Если после первого насыщения намагниченности ( $H = H_m$ ) произвести полный цикл изменений поля ( $H_m, 0, -H_m, 0$ ), не меняя его направления, то кривая намагниченности образует гистерезис, в результате чего возникнут остаточная индукция  $B_r$  и наведенное поле  $H_c$  (рис. 10.27, б).

В случае очень чистых материалов гистерезис мал. Его наличие при прохождении цикла требует затраты энергии, проявляющейся в разогреве материала.

**Магнитострикция.** Поскольку некоторые составляющие энергии зависят от взаимодействия между элементарными магнитными моментами и кристаллической решеткой, последняя деформируется, как только поле изменяет направление намагниченности (прямая магнитострикция).

И наоборот, когда внешнее усилие деформирует кристаллическую решетку, изменяются направления предпочтительного намагничивания и, следовательно, ориентации доменов и положения перегородок. Таким образом, возникает магнитострикционная составляющая деформации, которая накладывается на чисто механическую деформацию, подчиняющуюся закону Гука. Поэтому упругие свойства ферромагнитного материала меняются с изменением усилия, и кривая усилие — деформация размагниченного ферромагнитного образца описывает гистерезис за-

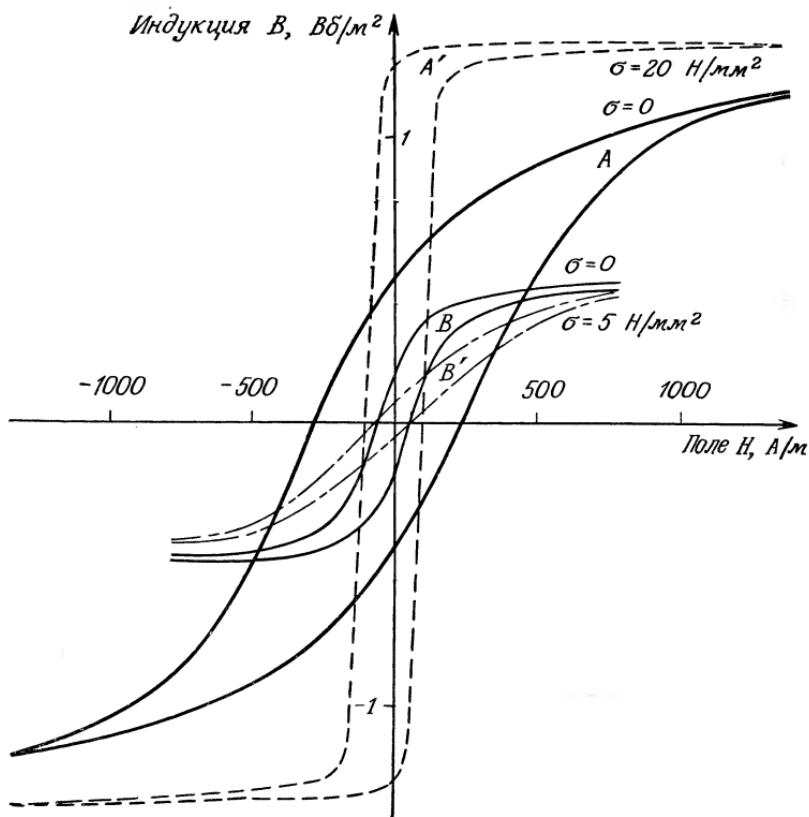


Рис. 10.28. Изменение кривой намагниченности чистого никеля и пермаллоя-68 в зависимости от напряжения растяжения ( $\sigma>0$ ):  $AA'$  — пермаллой-68 (68% Ni, 32% Fe);  $BB'$  — чистый никель.

метно ниже предела упругости. Кроме того, при этом происходит изменение магнитных свойств, которое можно наблюдать по изменению кривой намагниченности (обратный магнитострикционный эффект).

Остаточная индукция  $B_r$  и начальная магнитная проницаемость  $\mu = (dB/dH)_{H=0}$  зависят от материала, а также от величины и знака механического напряжения  $\sigma$  (рис. 10.28).

#### 10.2.2. Датчики, использующие изменение магнитной проницаемости

Изменение магнитной проницаемости  $\mu$  под действием механического напряжения проявляется в изменении индуктивности катушки или связи между двумя обмотками.

**Датчик, использующий изменение индуктивности.** Он состоит из катушки, сердечник которой деформируется под действием измеряемой силы (рис. 10.29). Среднее изменение  $\Delta\mu$  магнитной проницаемости сердечника и, следовательно, магнитного сопротивления  $R$  определяют изменение  $\Delta L$  индуктивности  $L$  катушки; относительные изменения  $L$ ,  $R$  или  $\mu$  пропорциональны механическому напряжению  $\sigma$  и, следовательно, измеряемой силе  $F$ :

$$\Delta\mu/\mu = -\Delta R/R = \Delta L/L = k\sigma.$$

Магнитный контур выполняется из листового материала (чтобы ограничить потери с токами Фуко) и не должен содержать элементов, которые вводили бы в выражение магнитного сопротивления  $R$  члены значительной величины, даже слабое изменение которых могло бы замаскировать изменение магнитной проницаемости самого сердечника.

Изменение индукции измеряется одним из методов, описанных в разд. 3.3.2.

**Чувствительность.** Очевидно, она зависит от материала сердечника и может быть точно определена путем градуировки. Величина коэффициента  $k$  имеет порядок  $2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{Н}^{-1}$  (железо-никелевый сплав). Кроме того, чувствительность изменяется под влиянием ряда параметров, воздействующих на проницаемость, таких, как:

а) температура — тепловой нагрев способствует разориентации магнитных моментов и уменьшает магнитную проницаемость на величину порядка  $0,1\%/\text{°C}$ ;

б) частота тока намагничивания — проницаемость уменьшается с ростом частоты;

в) амплитуда тока намагничивания — наиболее благоприятная его величина та, которая дает наибольшую среднюю проницаемость; при этом вариация амплитуды оказывает малое влияние.

**Пределы измерения.** Порядок величин наибольших допускаемых механических напряжений для чистого никеля составляет  $20 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ , для пермаллоя —  $(60 \div 80) \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ .

**Точность.** Суммарная погрешность (от совокупности всех причин) —  $2 \div 5\%$  от предела измерений. Эффект различных влияющих величин сводится к минимуму, если сравнивать индуктивности двух катушек, из которых та, на которую измеряемая величина не действует, служит в качестве опорной.

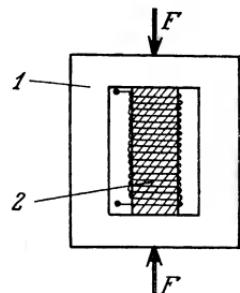


Рис. 10.29. Магнитострикционный датчик, основанный на изменении индуктивности.

1 — замкнутая магнитная цепь; 2 — ферромагнитный сердечник.

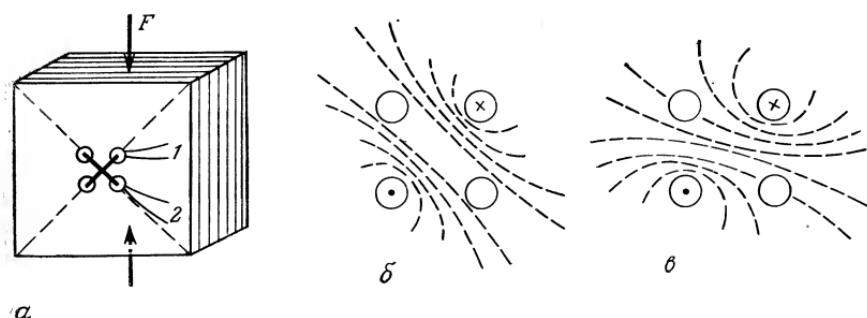


Рис. 10.30. Магнитострикционный датчик, основанный на изменении взаимной индукции.

*а* — схема работы; *б*, *в* — ход силовых линий индукции в датчике без нагрузки (*б*) и под нагрузкой (*в*). 1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка.

**Датчик, использующий изменение взаимной индукции.** Датчик изготавливается из листового ферромагнитного блока с четырьмя отверстиями, расположенными по квадрату; сквозь них пропускаются две обмотки, образующие первичную и вторичную обмотки трансформатора (рис. 10.30, *а*); их расположение под прямым углом исключает индуктивную связь между ними, пока магнитная проницаемость среды изотропна (рис. 10.30, *б*). Эти обмотки расположены под углом 45° к первичной оси датчика (ось, вдоль которой прилагается измеряемая сила).

Приложение силы в случае пермаллоя приводит к уменьшению магнитной проницаемости в направлении сжимающей силы и увеличению — в поперечном направлении. Симметрия линий индукции нарушается (рис. 10.30, *в*), и первичная обмотка находит во вторичный сигнал, пропорциональный измеряемой силе; соотношение фаз в первичной и вторичной обмотках позволяет определить знак приложенной силы.

### 10.2.3. Датчик, использующий изменение остаточной индукции

Хотя существуют такие участки на кривой намагниченности, для которых изменение индукции  $\mathbf{B}$  от механического напряжения заметно сильнее, чем при нулевом поле, однако по причине простоты и стабильности предпочитают измерять вариацию остаточной индукции. Рассмотрим катушку, в сердечнике которой (например, из чистого никеля) наведена остаточная индукция  $B_r$ ; под действием измеряемого механического напряжения (например, сжатия,  $d\sigma < 0$ )  $B_r$  растет. Тогда имеем:

$$dB_r/d\sigma \approx 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ (Вб} \cdot \text{м}^{-2}) / (\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}).$$

Изменение потока индукции наводит в катушке э. д. с., пропорциональную  $dB_r/dt$ ; измеряемое напряжение в разомкнутой цепи определяется выражением

$$v_m = K \frac{dB_r}{dt} = K \frac{dB_r}{d\sigma} \frac{d\sigma}{dt},$$

где  $K$  — коэффициент, пропорциональный числу витков катушки и ее сечению.

Речь идет об активном датчике, применение которого ограничено динамическими измерениями, поскольку измеряется только скорость изменения механического напряжения  $d\sigma/dt$ . Чувствительность датчика при измерении  $\sigma$  зависит к тому же от постоянной времени используемого интегратора.

#### 10.2.4. Метрологические характеристики

Для магнитострикционных датчиков силы характерны:

- малое воздействие на измеряемую величину вследствие повышенной жесткости;
- высокая стойкость и надежность вследствие механической прочности;
- малый электрический импеданс;
- посредственная линейность;
- значительная чувствительность к влияющим величинам (температуре, паразитным магнитным полям) и недостаточная стабильность во времени;
- ограниченность полосы пропускания (обычно частотами ниже частоты механического резонанса, ввиду потерь из-за токов Фуко).

Точность магнитострикционных датчиков — несколько процентов от верхнего предела измерения — ниже точности других датчиков силы.

### 10.3. Экстензометрические датчики

Первичная измеряемая величина (сила) действует на образец, вызывая растяжение (сжатие), изгиб или сдвиг. Возникающая деформация (вторичная измеряемая величина) электрически преобразуется с помощью датчиков, наклеенных на образец и включенных в мост Уитстона.

#### 10.3.1. Механические характеристики

Метрологические характеристики датчика сильно зависят от характеристик трех элементов: промежуточного преобразователя, тензодатчика и клея. Они ограничиваются гистерезисом и ползучестью.

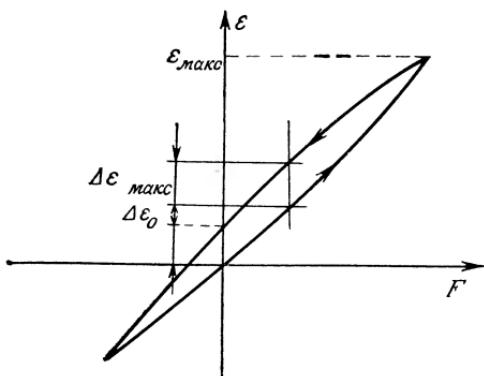


Рис. 10.31. Гистерезис деформации твердого тела под действием силы  $F$ .

этот даже при очень малой деформации материала промежуточного преобразователя датчика.

Гистерезис динамометрического датчика, очевидно, представляет собой суперпозицию гистерезисов каждого из его элементов. Хотя трудно их разделить, можно показать, что знак гистерезиса электрического сопротивления датчика противоположен знаку гистерезиса деформации промежуточного преобразователя и стремится его компенсировать.

На рис. 10.32, а, б для различных материалов и различных датчиков в зависимости от максимальной деформации  $\varepsilon_{\max}$  показаны характеристики невозврата в нуль  $\Delta\varepsilon_0$ , вычисленные по изменению электрического сопротивления датчика с коэффициентом преобразования  $K$ , предполагаемым постоянным.

**Ползучесть.** При нагружении твердого тела постоянной силой его деформация с течением времени увеличивается. Это явление — ползучесть — связано с вязкостью материала. Многочис-

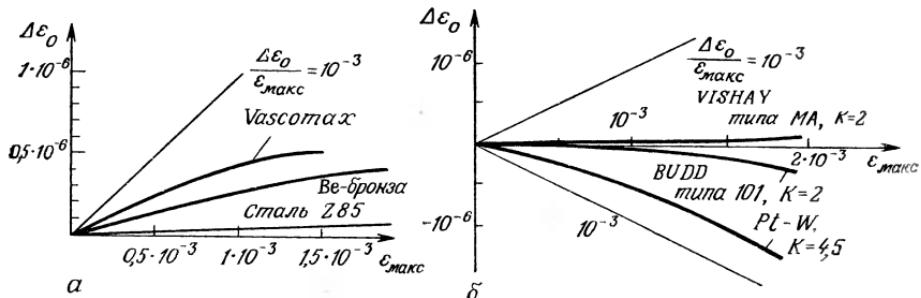


Рис. 10.32. Невозврата в нуль (остаточные деформации) промежуточного преобразователя в зависимости от максимальной деформации.  
а — для различных металлов (датчик MM типа MA, клей ВАР); б — для различных датчиков.

**Гистерезис и невозврата в нуль.** Под действием увеличивающейся силы  $F$  в упругом теле появляется и возрастает деформация  $\varepsilon$ ; при постепенном уменьшении нагрузки деформация также уменьшается, но с запаздыванием  $\Delta\varepsilon$ , так что при снятии силы сохраняется остаточная деформация  $\Delta\varepsilon_0$  (невозврата в нуль) (рис. 10.31).

Этот эффект возникает

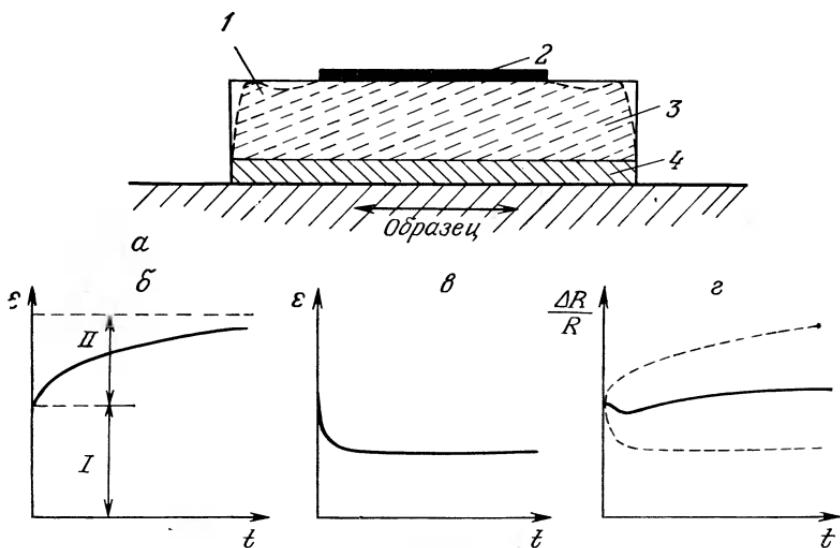


Рис. 10.33. Ползучесть датчика силы, построенного на тензодатчиках.

*а* — релаксация тензодатчика на растигнутом образце (*1* — релаксация подложки и клея; *2* — нить тензодатчика; *3* — подложка тензодатчика; *4* — клей); *б* — деформация образца (промежуточного преобразователя) под действием постоянной силы; *в* — деформация нити тензодатчика из-за релаксации клея и подложки при постоянной деформации образца; *г* — относительное изменение результирующего сопротивления датчика.

ленные измерения с использованием датчиков силы показывают, что знак и величина ошибки, обусловленной ползучестью, непредсказуемы. Действительно, изменение во времени выходного сигнала датчика силы при воздействии постоянной измеряемой величины является результатом суперпозиции двух противоположных эффектов (рис. 10.33): а) вязкопластическое поведение металлов под постоянной нагрузкой всегда проявляется в увеличении деформации (рис. 10.33, б); б) одновременно клей и подложка датчика испытывают релаксацию — явление снижения механического напряжения при постоянной деформации, которая соответствует на уровне датчика отрицательной ползучести (рис. 10.33, в).

Суперпозиция ползучести и релаксации дает результирующую ползучесть — положительную, отрицательную или нулевую в зависимости от соответствующих величин и, возможно, непрерывный знакопеременный участок, если постоянные времена ползучести и релаксации не равны (рис. 10.33, г). Кроме того, общий вид характеристики зависит от температуры и типа датчика (рис. 10.34).

Эти явления обычно вынуждают ограничивать диапазон измерений так, чтобы промежуточный преобразователь датчика не деформировался больше чем на 0,2 %. Такая деформация со-

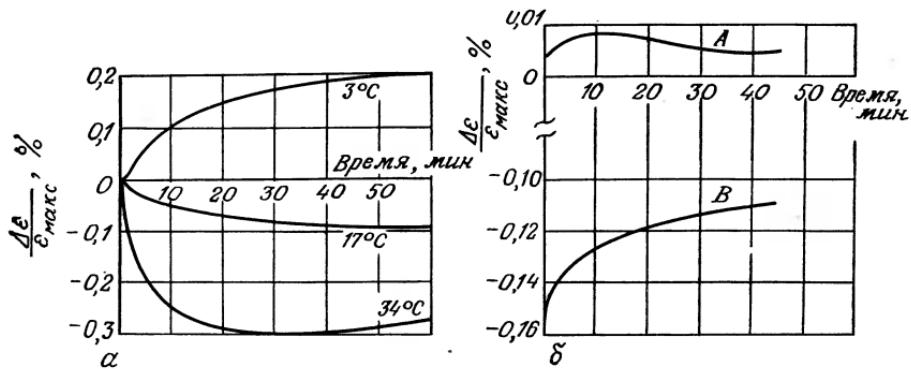


Рис. 10.34. Эффект ползучести в датчике силы, построенном на тензодатчиках.

$\alpha$  — влияние температуры;  $\delta$  — влияние типа тензодатчика на ползучесть после снятия нагрузки ( $A$  — датчик ММ типа  $MA$ ,  $K=2$ , фирма Vishay;  $B$  — датчик из Pt—W,  $K=4,5$ ). Образец: сталь Z85, деформация перед разгрузкой  $\varepsilon_{\max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ .

отвечает только четверти предела упругости промежуточного преобразователя, который условно определяется нагрузкой, при снятии которой остаточная деформация равна 0,2 %.

В табл. 10.2 указаны, по порядку величины, основные механические характеристики сплавов, используемых для изготовления промежуточных преобразователей датчиков.

Таблица 10.2 Механические характеристики сплавов для промежуточных преобразователей датчиков силы (данные Vishay Micromesures)

Характеристики	Сплав	Алюминиевые сплавы		
	Рессорная сталь (с Cr, Si, Mo) марка 45SCD6	Медь с 2% бериллия CuBe <sub>2</sub>	7049A стандарт AZ8GU (Zircal)	2618A стандарт AU2GN
Модуль Юнга $Y, 10^9 \text{ Н} \times \text{м}^{-2}$	2,20	130	72	72
Температурный коэффициент $Y, 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	-0,26	-0,38	-0,58	-0,50
Коэффициент Пуассона	0,285	0,34	0,34	0,34
Коэффициент температурного расширения, $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	13	17	23,5	22
Предел пропорциональности $\varepsilon_{0,2}, 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$	1,45	0,8	0,45	0,40
Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	7,8	8,25	2,8	2,75

### 10.3.2. Конструкция датчиков

Способ приложения силы к чувствительной части динамометра является чрезвычайно важным фактором, определяющим точность датчика.

Геометрия датчика и, в частности, геометрия его промежуточного преобразователя оптимизируются согласно следующим общим рекомендациям:

1) располагать датчики следует в области, не подверженной воздействию краевых эффектов;

2) следует сводить к минимуму риск нежелательной деформации, такой, как выпучивание, особенно для датчиков, работающих на сжатие;

3) наиболее подходят для расположения датчиков зоны, деформации которых равны и противоположны по знаку, что позволяет улучшить линейность сигнала путем дифференциального включения датчиков;

4) форму промежуточного преобразователя следует выбирать таким образом, чтобы избежать непредсказуемых деформаций.

Для определения поля деформаций используются обычные формулы сопротивления материалов. Они позволяют оценить влияние различных геометрических и механических факторов на такие метрологические характеристики датчиков, как воздействие на измеряемую величину, диапазон измерений, чувствительность.

**Датчики в режиме растяжения — сжатия.** В таких датчиках промежуточный преобразователь обычно имеет вид стержня сплошного или трубчатого сечения квадратной, прямоугольной или круговой формы. Его главная ось инерции соответствует первичной оси датчика — направлению приложения измеряемой силы (рис. 10.35).

Соотношение между размерами стержня (высотой  $l$  и поперечным размером — диаметром  $d$  или, в более общем виде, квадратным корнем из площади  $s$  поперечного сечения) выбирается из следующих компромиссных условий: а) оно должно быть достаточно большим (например,  $l/d \geq 3$ ), чтобы неоднородность поля напряжений в плоскости поперечного сечения, которая неизбежна на его краях, не достигала бы зоны крепления тензодатчиков (принцип Сен-Венана); б) должна обеспечиваться достаточная жесткость датчика (обычно принимается  $l < 20\sqrt{s}$ ).

На рис. 10.36 представлен в разрезе датчик силы сжатия; восемь наклеенных на него тензодатчиков (рис. 10.37, а) одинаковы и подвержены продольной деформации  $\varepsilon_{||}$  (датчики  $J_1, J_1'$ ,

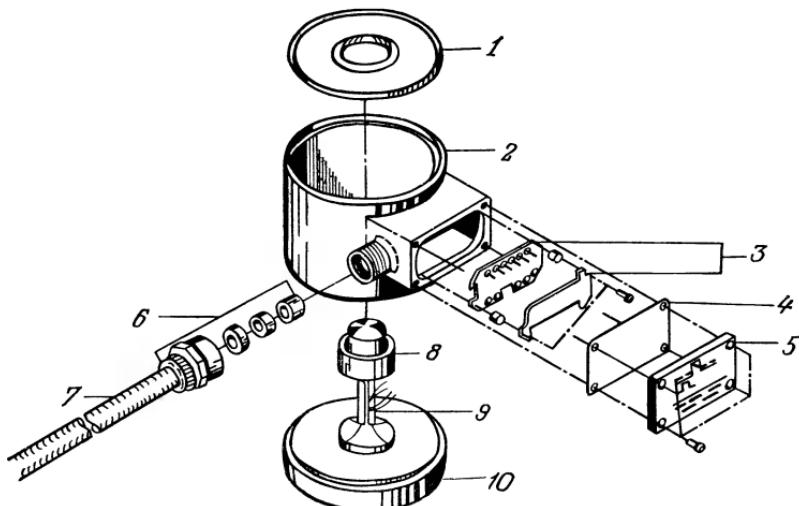


Рис. 10.35. Пример устройства датчика силы сжатия.

1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — платы регулировочных сопротивлений; 4 — защитная крышка; 5 — фальшпанель; 6 — разъем; 7 — кабель; 8 — стержень; 9 — тензодатчик; 10 — основа.

$J_4, J'_4$ ) либо поперечной деформации  $\varepsilon_{\perp} = -v\varepsilon_{\parallel}$  (датчики  $J_2, J'_2, J_3, J'_3$ ).

Если  $F$  — приложенная сила, положительная при растяжении, то

$$\varepsilon_{\parallel} = \Delta l/l = (1/Y)(F/s),$$

где  $\varepsilon_{\parallel}$  — деформация, положительная при удлинении.

В направлении, образующем угол  $\theta$  с главной осью инерции, выражение для деформации имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{\theta} = (\varepsilon_{\parallel}/2) \{(1-v) + (1+v) \cos 2\theta\}.$$

Из этой формулы можно определить ошибку, возникающую при неверном выставлении тензодатчиков.

*Нелинейность.* Напряжение на выходе моста (рис. 10.37, б) описывается формулой

$$v_m = -\frac{K\varepsilon_{\parallel}(1+v)}{2+K\varepsilon_{\parallel}(1-v)} E_s,$$

так что при  $v=0,3$  и коэффициенте преобразования тензодатчика  $K=2$  получаем:

$$v_m/E_s \approx -1,3\varepsilon_{\parallel}(1-0,7\varepsilon_{\parallel}).$$

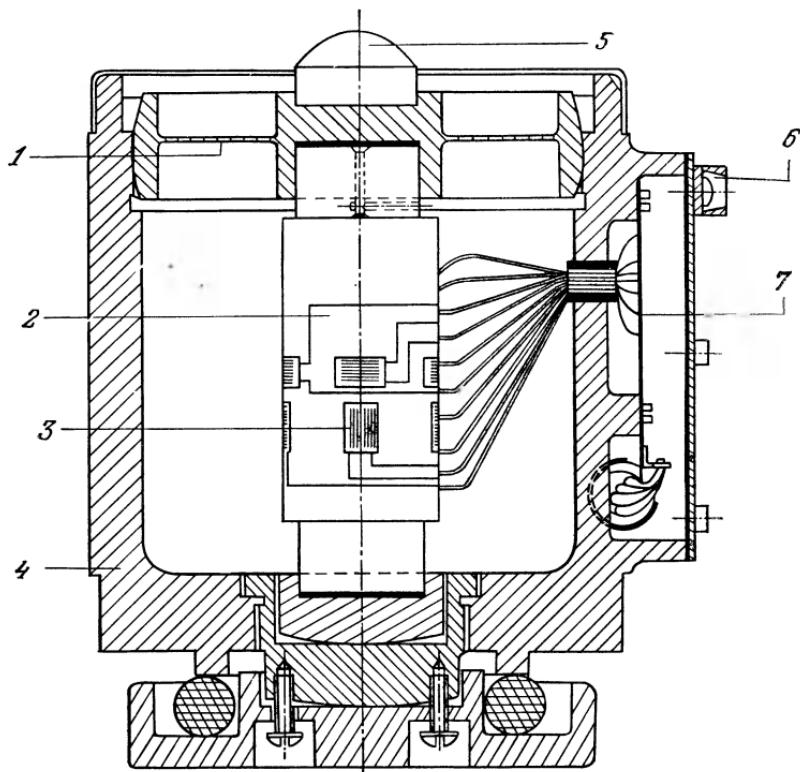


Рис. 10.36. Датчик силы сжатия (в разрезе).

1 — мембрана; 2 — промежуточный преобразователь; 3 — тензодатчики; 4 — корпус; 5 — полусферический выступ; 6 — пломба; 7 — печатная плата.

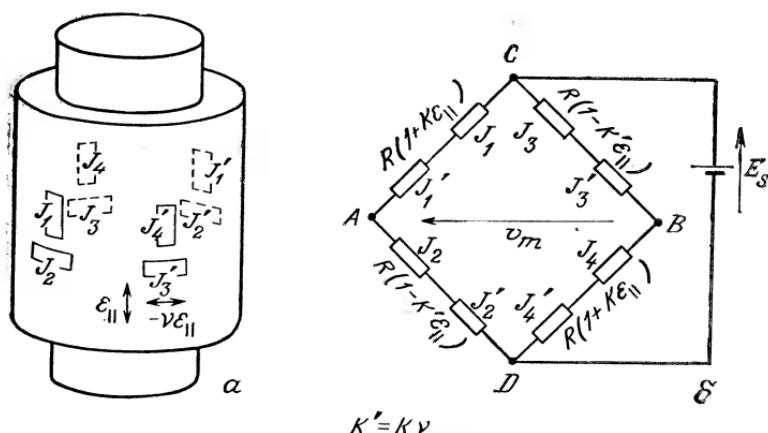


Рис. 10.37. Датчик силы на 8 тензодатчиках.

Расположение тензодатчиков: а — на образце; б — в мосте Уитстона.

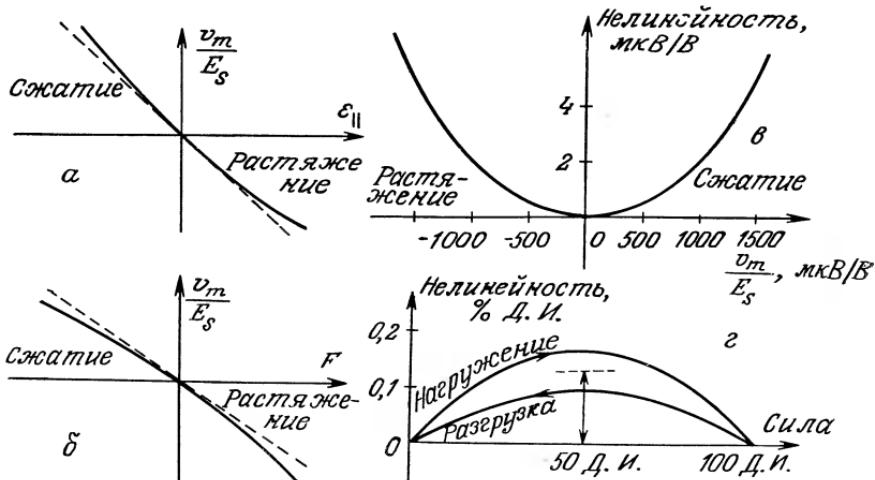


Рис. 10.38. Нелинейность датчиков силы растяжения — сжатия.

Выходной сигнал моста: **а** — деформации тензодатчиков; **б** — сила, приложенная к датчику; **в** — общая нелинейность; **г** — определение максимальной нелинейности (в % диапазона измерений).

Следовательно, электрическая схема вводит нелинейность, которая должна была бы проявиться небольшой потерей чувствительности при растяжении и ее увеличением при сжатии (рис. 10.38, а). На практике выходное напряжение датчика определяется силой, а не деформацией, так что нелинейность имеет знак, противоположный знаку, обусловленному нелинейностью схемы формирования сигналов (рис. 10.38, б), и значительно большую амплитуду (рис. 10.38, в).

10.38, г).

Таким образом, нелинейность моста суммируется с нелинейностью соотношения напряжение — деформация, и выражение для измерительного сигнала можно записать в виде

$$v_m/E_s \approx k_1 F (1 + k_2 F), \quad k_2 > 0.$$

Максимальное отклонение от линейности обычно соответствует отклонению, наблюдаемому при половине максимальной нагрузки. Для него принимается величина среднего значения максимального отклонения при возрастающей силе, а

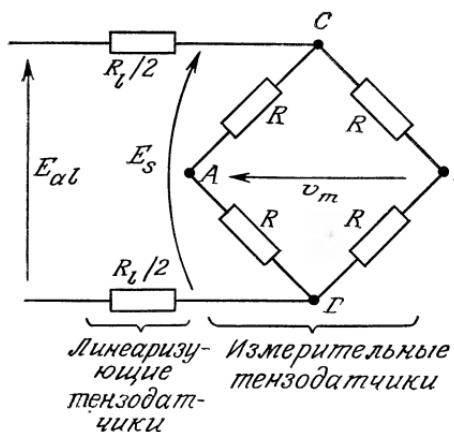


Рис. 10.39. Коррекция нелинейности датчика силы воздействием на питание моста тензодатчиков.

затем — при убывающей (рис. 10.38, г). Для цилиндрического измерительного стержня отклонение составляет  $\sim 0,1\%$  от предела измерений.

*Коррекция нелинейности датчиков на металлических преобразователях.* Эта коррекция обычно получается с помощью полупроводниковых тензодатчиков, наклеенных на измерительный стержень и соединенных последовательно с питанием моста (рис. 10.39).

Мост между точками  $C$  и  $D$  представляет собой эквивалентное сопротивление  $R_e$ , зависящее от деформации:

$$R_e = R + (K - K') R \varepsilon / 2 = R (1 + \alpha \varepsilon),$$

где  $\alpha = (K - K')/2$ ,  $K' = Kv$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_{\parallel}$ .

Каждый из линеаризующих датчиков с коэффициентом  $K_l$  имеет сопротивление  $R_l/2$ , связанное с продольной деформацией  $\varepsilon$  измерительного стержня соотношением

$$R_l = R_{l0} (1 + K_l \varepsilon).$$

Напряжение  $E_s$  при этом зависит от  $\varepsilon$  и, следовательно, от измеряемой величины  $F$ :

$$E_s/E_{a1} = R_e / (R_e + R_l).$$

Так как коэффициент преобразования полупроводникового тензодатчика  $K$  много больше  $\alpha$ , в знаменателе можно пренебречь изменением  $R_e$  по сравнению с изменением  $R_l$ :

$$\frac{E_s}{E_{a1}} \approx \frac{R (1 + \alpha \varepsilon)}{R + R_{l0} (1 + K_l \varepsilon)} \approx \frac{R}{R + R_{l0}} \left( 1 + \alpha \varepsilon - \frac{R_{l0}}{R + R_{l0}} K_l \varepsilon \right),$$

или, полагая

$$\beta = \left( \frac{R_{l0}}{R + R_{l0}} K_l - \alpha \right) \frac{1}{Y_s},$$

где  $Y$  — модуль Юнга, а  $s$  — площадь поперечного сечения, получим с точностью до второго порядка:

$$\frac{E_s}{E_{a1}} \simeq \frac{R}{R + R_{l0}} (1 - \beta F).$$

Измерительный сигнал в зависимости от  $E_{a1}$  записывается в виде

$$\frac{v_m}{E_{a1}} = \frac{v_m}{E_s} \frac{E_s}{E_{a1}} = k_1 F (1 + k_2 F) \frac{R}{R + R_{l0}} (1 - \beta F),$$

и линеаризация с точностью до второго порядка получается при  $\beta = k_2$ , т. е.:

$$R_{t0} = R \frac{k_2 + (K - K') / (2Ys)}{K_t / (Ys) - k_2 - (K - K') / (2Ys)}.$$

Так, для датчика с  $k_2 = 2 \cdot 10^{-7}$  Н<sup>-1</sup>,  $1/Ys = 0,4 \cdot 10^{-7}$  Н<sup>-1</sup>,  $R = 350$  Ом,  $K = 2$ ,  $K' = 0,6$  и полупроводника с коэффициентом  $K_{t0} = 100$  имеем  $R_{t0} = 16$  Ом.

Поскольку полупроводниковые тензодатчики имеют стандартные сопротивления 15, 30, 120 Ом, правильная величина линеаризующих сопротивлений достигается их шунтированием фиксированными сопротивлениями.

*Эффекты от изгибающих напряжений (поперечная чувствительность).* Когда измеряемая сила слегка нецентральная или, будучи центральной, приложена наклонно, на осевое сжатие или растяжение измерительного стержня накладывается паразитный изгиб. Такие паразитные изгибы вызывают в парах тензодатчиков (рис. 10.37, а) ( $J_1, J_1'$ ), ( $J_2, J_2'$ ), ( $J_3, J_3'$ ), ( $J_4, J_4'$ ) противоположные реакции. Таким образом, вследствие симметрии не должен появиться никакой измерительный сигнал. Однако практически все тензодатчики, даже наиболее совершенные, чувствительны к поперечным нагрузкам. Эта чувствительность является следствием того, что все датчики имеют различные коэффициенты и что неизбежны ошибки в их расположении и ориентации на поверхности промежуточного преобразователя. Такая чувствительность компенсируется при усреднении, когда число активных тензодатчиков велико (например, 8 или 16). Она равным образом сильно уменьшается благодаря применению одной или двух рессорных полос, в форме диафрагмы, очень гибких в осевом направлении и очень жестких в поперечной плоскости (рис. 10.35 и 10.36).

**Датчики, работающие на изгиб.** Этот тип деформации соответствует промежуточным преобразователям в форме колец, балок, пластин, мембран, хомутов, кронштейнов, примеры которых представлены на рис. 10.40.

По конструкции жесткость этих промежуточных преобразователей обычно меньше, чем стержневых, поэтому они предназначаются для более чувствительных узкодиапазонных датчиков.

*Механические соотношения.* Выражения для деформации  $\epsilon$  металла в месте прикрепления тензодатчиков и прогиб  $f$  в месте приложения силы приведены в табл. 10.3; они соответствуют обозначениям рис. 10.40. В этих выражениях предполагается, что можно пренебречь жесткостью, возникающей из-за деталей крепления (крюки), и податливостью опор хомутов и кронштейнов.

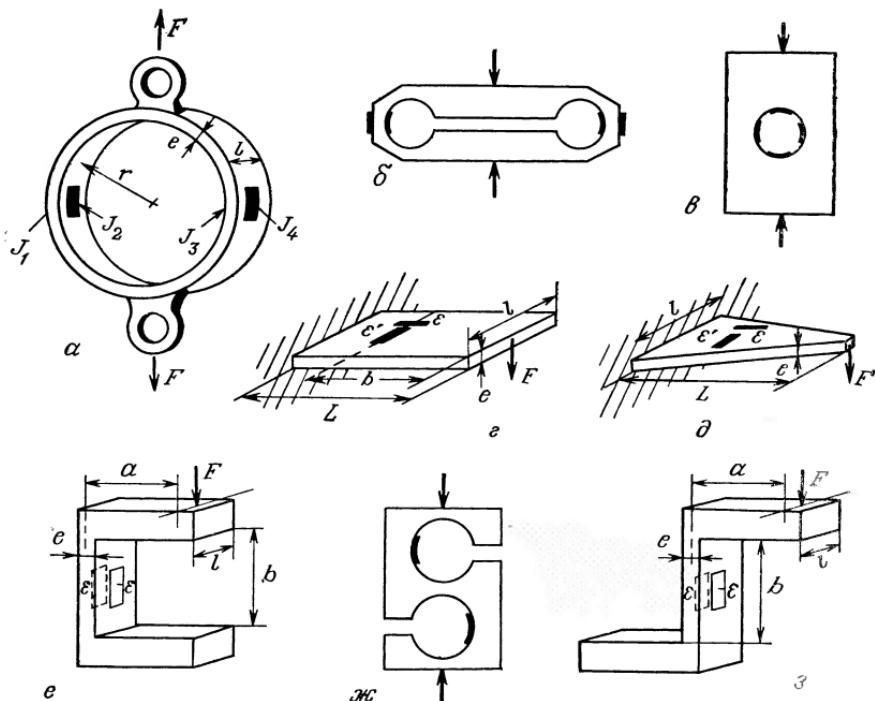


Рис. 10.40. Примеры конструкций промежуточных преобразователей, работающих на изгиб.

Динамометрические кольца: *а* — круглое, *б* — плоское, *в* — в форме поперечно просверленной колонны; пластины: *г* — прямоугольная (изгиб), *д* — треугольная (чистый изгиб); хомуты: *е* — простой, *ж* — двойной, *з* — кронштейн.

В случае пластинчатых промежуточных преобразователей (рис. 10.40, *г*, *д*) деформации  $-\varepsilon$  и  $-\varepsilon'$  соответствуют противоположным сторонам пластины. Помещая одинаковые тензодатчики на противоположных сторонах (например,  $J_1$  — сверху,  $J_2$  — снизу), можно, при мостовом включении, измерять только изгибающую силу  $F_2$ , когда  $J_1$  и  $J_2$  образуют два смежных плеча, или только силу растяжения  $F_1$ , когда они включены в противоположные плечи (рис. 10.41).

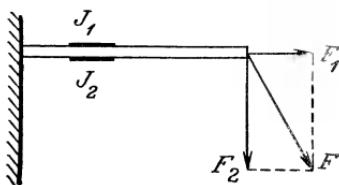


Рис. 10.41. Пластина под действием наклонной силы.

Таблица 10.3. Механические соотношения для промежуточных преобразователей, работающих на изгиб

Конструкция	Рис. 10.40	Деформация	Прогиб
Круговое кольцо ( $e \ll r$ )	$a$	$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 = -\varepsilon_4 =$ $= 1,09 Fr/(Yle^2)$	$f = 1,79 \frac{Fr^3}{Yle^3}$
Прямоугольная пластина	$g$	$\varepsilon = \frac{6Fb}{Yle^2}, \quad \varepsilon' = -ve$	$f = \frac{4FL^3}{Yle^3}$
Треугольная пластина	$\partial$	$\varepsilon = \frac{6FL}{Yle^2}$ (одинакова во всех точках пластиинки — чистый изгиб) $\varepsilon' = -ve$	$f = \frac{6FL^3}{Yle^3}$
Хомут и кронштейн	$e$	$\varepsilon = \frac{F}{Y} \frac{1}{le} \left( \frac{6a}{e} + 1 \right)$	$f = 12 \frac{F}{Y} \frac{a^2 b}{le^3}$

Поскольку таким образом удается измерить обе компоненты, сила  $F$ , действующая в плоскости рисунка, становится известной по модулю и направлению.

*Влияние точки приложения силы.* В предыдущих схемах простой консоли всякое изменение точки приложения силы отражается на измерительном сигнале. Например, имеем:

$$\Delta v_m/v_m = \Delta b/b \quad (\text{прямоугольная пластина}),$$

$$\Delta v_m/v_m = \Delta L/L \quad (\text{треугольная пластина}),$$

где  $b$  и  $L$  обозначают расстояние от точки приложения силы до измеряющего тензодатчика и заделки соответственно. При  $L = 50$  мм и  $\Delta L = 0,05$  мм изменение измерительного сигнала равно 0,1% — отклонение, часто недопустимое для практики.

Чтобы избежать этого неудобства, многие конструкторы принимают специальную конструкцию промежуточного преобразователя, называемую двойной консольной балкой (рис. 10.42).

*Линейность.* В противоположность датчикам растяжения или сжатия датчики, работающие на изгиб, обычно обладают очень хорошей линейностью; действительно, в этом случае на конструкции промежуточного преобразователя есть зоны деформаций, равных по величине и противоположных по знаку. Тензодатчики, помещенные в зоне растяжения, измеряют деформацию

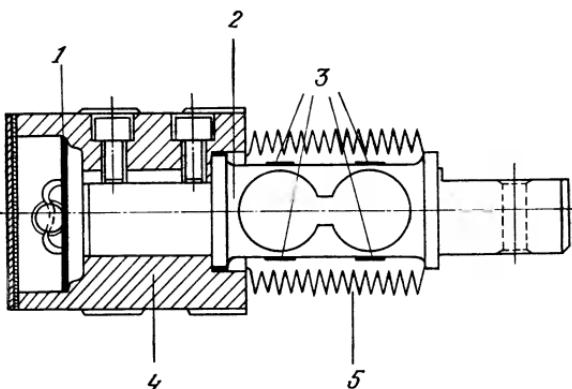


Рис. 10.42. Разрез высокоточного датчика силы со встроенной двойной балкой.

1 — печатная плата; 2 — промежуточный преобразователь; 3 — тензодатчики; 4 — корпус; 5 — сильфонный кожух.

$\varepsilon_t = \alpha F (1 + \beta F)$ , тогда как сжимаемые датчики испытывают деформацию  $\varepsilon_c = -\alpha F (1 - \beta F)$ .

Измеряя разность двух деформаций

$$\varepsilon_t - \varepsilon_c = \alpha F (1 + \beta F + 1 - \beta F) = 2\alpha F,$$

мост Уитстона осуществляет самокомпенсацию квадратичных членов и, следовательно, обеспечивает совершенно линейную характеристику.

**Ползучесть.** Как показывает эксперимент, ползучесть рассматриваемых датчиков более значительна, чем датчиков большей жесткости. Обычно считается, что вклад тензодатчиков в жесткость конструкции становится тем значительнее, чем меньше толщина конструкции промежуточного преобразователя. Адекватный выбор клея и тензодатчиков позволяет, однако, преодолеть это неудобство (разд. 10.3.1).

**Датчики, работающие на сдвиг.** Концепция таких измерений заключается в измерении главных деформаций, которые возникают в материале промежуточного преобразователя, работающем на изгиб, посредством касательных напряжений из-за передающей силы. Чувствительный элемент датчика состоит из одной или нескольких массивных лап прямоугольной или цилиндрической формы, с выемкой в измерительной части (рис. 10.43).

Тензодатчики наклеены на перегородки, вырезанные в теле промежуточного преобразователя; их ось чувствительности образует угол  $45^\circ$  с осью тела.

Тензодатчики на такой конструкции находятся в почти равномерном поле касательных напряжений (рис. 10.43, б, кривая

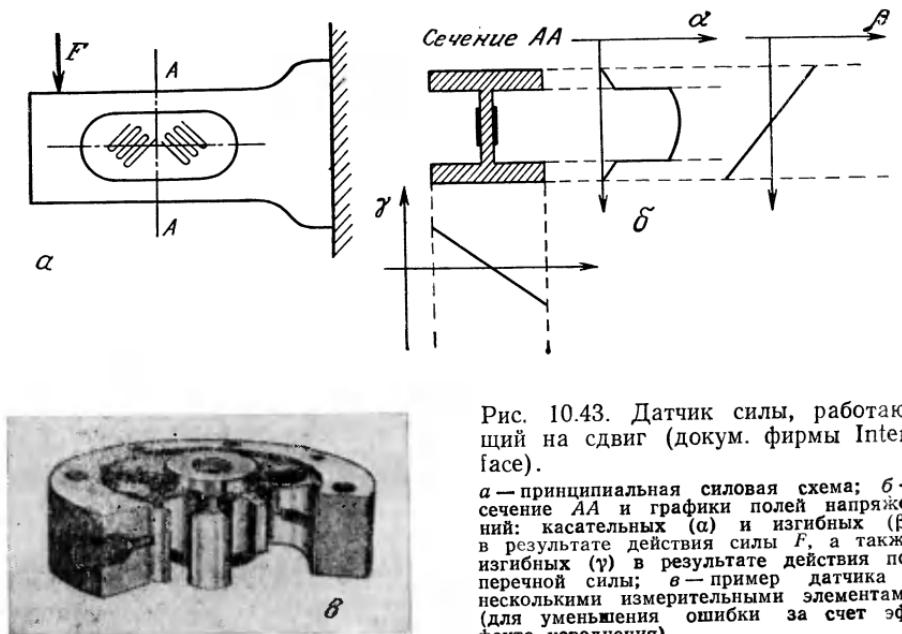


Рис. 10.43. Датчик силы, работающий на сдвиг (докум. фирмы Interface).

*α* — принципиальная силовая схема; *β* — сечение *AA* и графики полей напряжений: касательных (*α*) и изгибных (*β*) в результате действия силы *F*, а также поизгибных (*γ*) в результате действия пооперечной силы; *γ* — пример датчика с несколькими измерительными элементами (для уменьшения ошибки за счет эффекта усреднения).

*α*), поскольку влияние изгибных напряжений пренебрежимо мало. Так как касательное напряжение не зависит от точки приложения силы, такой датчик проявляет очень слабую чувствительность к изменению этой точки. Для расположенных таким образом тензодатчиков, соединенных в мост Уитстона, характеристики:

— малая чувствительность к любому температурному или механическому эффекту (удлинению, растяжению...) при условии, что он не преобразуется в касательные напряжения в контрольных сечениях;

— прекрасная линейность на всем диапазоне измерений ввиду естественной симметрии главных положительных и отрицательных деформаций.

### 10.3.3. Метрологические характеристики

**Проверка и сертификация.** Проверка датчика силы заключается в констатации его характеристик адекватными методами. Эта операция может быть завершена заполнением паспорта датчика в метрологическом учреждении, где проведены испытания датчика.

Сертификация датчика — это процедура, во время которой проверяется, удовлетворяют ли зафиксированные качества су-

ществующим требованиям и спецификациям. Датчики при этом должны удовлетворять предписаниям Международной организации законодательной метрологии и Национальной службы измерительных приборов.

Применительно к Франции эти предписания содержатся главным образом в декрете № 65487 от 18 июня 1965 г. и в постановлении правительства от 24 марта 1972 г.

Измерительные приборы одной и той же категории классифицируются по уровню точности. Классы точности обозначаются одним из двух способов:

— латинскими цифрами (существуют, например, четыре регламентированных класса для датчиков силы тяжести, обозначаемых I, II, III, IV);

— числами в форме  $a \cdot 10^n$  (например, характеризуют инструмент классом  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , если его совокупная погрешность гарантированно не превышает  $1,5 \cdot 10^{-4}$  от предела измерений).

**Условия функционирования.** Показания датчика или совокупности датчиков силы становятся ошибочными, когда изменяются: продолжительность воздействия нагрузки, температура, способ приложения нагрузок, условия установки датчиков, напряжение и частота тока питания, другие второстепенные влияющие факторы.

**Влияние продолжительности нагрузки.** Для контроля погрешностей, связанных с продолжительностью нагрузки, необходимо привлечение понятия ползучести (разд. 10.3.1). Показания датчика после выдержки под нагрузкой известной величины (обычно номинальной) в течение 8 ч сравниваются с полученными перед ней. Для датчика силы веса разность двух показаний не должна превышать допустимой для этой нагрузки погрешности измерений. Другое регламентное испытание состоит в измерении ухода нуля после воздействия номинальной нагрузки в течение 30 мин.

**Влияние температуры.** Изменение температуры является важным источником ошибок: оно влияет и на уход нуля, и на чувствительность датчика. Номинальная область температур обычно простирается от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , но могут быть заданы и другие пределы.

Измерения обычно проводятся при стабильной температуре или при скорости изменения температуры окружающего воздуха, не превышающей  $5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  (максимальный разброс температур во время испытания должен быть не больше  $3^{\circ}\text{C}$ ).

Для датчиков силы веса уход нуля должен находиться в пределах одного деления измеряющего устройства при изменениях окружающей температуры на  $5^{\circ}\text{C}$ . Показание под нагрузкой должно оставаться внутри интервала допустимых ошибок.

Температурный дрейф нуля экстензометрических датчиков

сили обычно вызывается несовершенством компенсации тензодатчиков (даже для сгмокомпенсированных датчиков) или просто тем, что провода измерительной линии моста Уитстона имеют разную длину.

Изменения показаний датчика под нагрузкой связаны с изменением модуля Юнга и нелинейностью характеристики датчика.

Независимо от типа тензодатчика при использовании моста Уитстона влияние температуры можно уменьшить методами, указанными в разд. 3.3.1, когда датчик имеет компенсирующие элементы (табл. 10.4).

*Влияние способа приложения нагрузки.* Датчики силы редко оказываются установленными идеально; так, датчик может быть установлен не вполне горизонтально, и тогда приложенное усилие не совпадает с расчетной осью нагружения датчика. Изменчивость условий установки приводит к неустранимой погрешности. Обычно конструктор с учетом таких отклонений указывает пределы, в которых работа датчика гарантирована в данном классе точности (например, изменение горизонтальности под нагрузкой меньше 2%). Кроме того, когда нагрузка перемещается по конструкции, объединяющей несколько датчиков, выходные сигналы которых складываются, разброс в полученных результатах зависит и от разности чувствительностей каждого из датчиков. Поэтому желательно, чтобы датчики имели одну и ту же чувствительность (например, с отклонением не более  $0,5 \cdot 10^{-3}$ ), что, кроме того, обеспечивает их взаимозаменяемость.

*Чувствительность под нагрузкой.* Чувствительность весоизмерительной установки под нагрузкой оценивается из наблюдений того, какой довесок при данной нагрузке надо добавить.

Таблица 10.4. Чувствительность и влияние температуры в компенсированной области  $+10^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$  (датчик фирмы JPB; диапазон измерений (Д. И.)  $0 \div 500 \text{ Н}$ ).

Датчик	Тензодатчики	Выходной сигнал при 500 Н	Чувствительность	Temperaturnaya pogreshnost'	
				нуля	чувствительности
№ 206-500	Проволочные	2 мВ/В	4 мкВ/В/Н	0,5 % от Д. И.	$2 \cdot 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$
№ 207-500	Полупроводниковые	20 мВ/В	40 мкВ/В/Н	1 % от Д. И.	$5 \cdot 10^{-4} / ^{\circ}\text{C}$

чтобы изменить на единицу индикацию измеряющего прибора. Можно, например, указать ошибку чувствительности на  $1/3$  деления шкалы прибора для номинальной нагрузки.

*Питание датчиков.* Обычно принимают, что изменения номинального напряжения в пределах от  $-10\%$  до  $+15\%$  и номинальной частоты на  $\pm 2\%$  должны компенсироваться измерительными устройствами, связанными с датчиком (например, при работе в режиме измерения отношений, разд. 8.9.1).

*Второстепенные влияющие факторы.* Вообще говоря, датчики силы должны оставаться нечувствительными к таким факторам, как магнитные и электрические поля, вибрации, атмосферные условия (давление, влажность). Необходимо, чтобы датчики, а также вспомогательные устройства и кабели были герметизированы, если они предназначены для работы в условиях влажности или даже в воде; сопротивление изоляции между различными проводниками и массой датчика должно при всех условиях превышать  $2 \cdot 10^9$  Ом.

При измерениях веса измеряемой величиной является сила веса  $Mg$ , действующая на массу  $M$ . Таким образом, ускорение свободного падения  $g$  в принципе может рассматриваться как влияющая величина; она не вносит ошибки, если градуировка измерительной установки произведена в той же местности, где проводятся измерения.

#### 10.3.4. Частотная характеристика

В противоположность пьезоэлектрическим датчикам тензометрические датчики силы работают на постоянном токе  $S_0$  и поэтому подходят для измерений статических усилий.

На высоких частотах их отклик, так же как и для пьезоэлектрических датчиков, представляет собой отклик низкочастотной слабо демпфированной системы второго порядка:

$$S(f) = S_0 / (1 - (f/f_0)^2).$$

Частота механического резонанса  $f_0$  таких датчиков может быть различной — от нескольких сотен герц (датчики малой жесткости и высокой чувствительности) до нескольких десятков килогерц. Она вычисляется с учетом не только массы  $M_c$  подвижной части датчика, но и массы  $M_a$  всей совокупности с ней связанных внешних частей, так что  $f_0$  может оказаться существенно ниже собственной частоты  $f_r$  изолированного датчика:

$$f_r = (1/2\pi) \sqrt{K/M_c},$$

где  $K$  — эквивалентная жесткость датчика, и

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{K/(M_c + M_a)} = f_r \sqrt{M_c/(M_c + M_a)}.$$

Таблица 10.5. Метрологические характеристики тензометрических датчиков силы

Типичные величины номинальных нагрузок (Н.Н.), даН	$\pm 5 \div \pm 5000$ (изгиб) $\pm 500 \div \pm 50\,000$ (сдвиг) $\pm 500 \div 200\,000$ (растяжение/сжатие)
Уровень выходного сигнала при Н.Н.	$1 \div 4$ мВ/В (проводочные тензодатчики) $10 \div 30$ мВ/В (полупроводниковые тензодатчики, см. табл. 10.4)
Погрешность	$0,01 \div 0,2\%$ от Н.Н. (проводочные тензодатчики) $0,5 \div 2\%$ от Н.Н. (полупроводниковые тензодатчики)
Ползучесть	$0,05 \div 0,1\%$ после 8 ч. под Н.Н.
Деформация при Н.Н.	$3 \div 10$ мкм (растяжение/сжатие, сдвиг) $20 \div 200$ мкм (изгиб)
Предельная неразрушающая нагрузка	1,5 $\div$ 2 Н.Н., до 10 Н.Н. для датчиков с механическими ограничителями

В качестве примера можно указать датчик FL 50 U (фирма-изготовитель Straininsert) со следующими характеристиками: предел измерений 220 кН;  $K = 3,8 \cdot 10^9$  Н·м $^{-1}$ ;  $M_c = 0,735$  кг;  $f_r = 11,4$  кГц. При массе  $M_a = 20$  кг находим  $f_0 = 2,14$  кГц.

Когда существует риск возбуждения датчика на частоте собственного резонанса (например, из-за паразитных вибраций), для уменьшения погрешностей измерения можно применить дополнительную амортизацию (жидкостное демпфирование). Метрологические характеристики тензометрических датчиков силы сведены в табл. 10.5.

#### 10.4. Датчики силы по измерениям перемещения

Сила вызывает в промежуточном преобразователе изменение размера  $\Delta l$ , которое может быть измерено с помощью датчика перемещений; если  $v_m$  — выходной сигнал, то коэффициент преобразования записывается в виде

$$v_m/F = (v_m/\Delta l) (\Delta l/F),$$

где  $v_m/\Delta l$  — коэффициент преобразования датчика перемещений,  $\Delta l/F$  — обратная величина жесткости (податливость) промежуточного преобразователя.

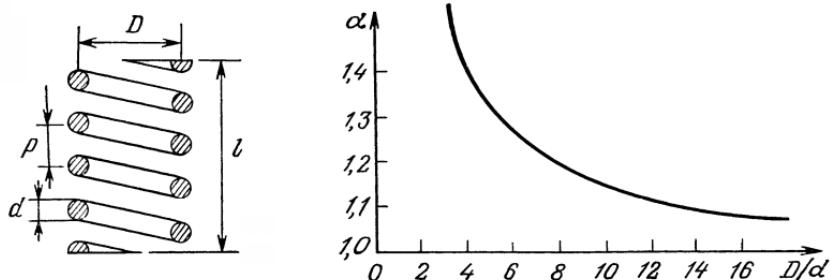


Рис. 10.44. Витая пружина.

Слева — продольный разрез; справа — зависимость коэффициента жесткости пружины  $\alpha$  от отношения  $D/d$ .

Большая податливость улучшает чувствительность, но увеличивает воздействие на измеряемую величину.

*Промежуточный преобразователь.* Так как рассматриваемые датчики обычно предназначаются для измерения относительно небольших сил, их промежуточные преобразователи должны иметь значительную и контролируемую податливость. Наиболее употребительными являются преобразователи в виде динамометрического кольца, консоли (разд. 10.3.2, рис. 10.40) и витой пружины. Пружина может быть выполнена из проволоки кругового сечения (диаметр  $d$ ) или квадратного (сторона  $c$ ) (рис. 10.44,  $a$ ), образующей  $n$  витков среднего диаметра  $D$ .

Пусть  $l$  — длина пружины, тогда  $l = np$ , где  $p$  обозначает ее шаг. При  $p < D/3$  можно допустить, что проволока работает только на кручение; для этого случая теоретическое выражение податливости пружины в зависимости от формы поперечного сечения имеет вид

$$\frac{\Delta l}{F} = \frac{8nD^3}{Gd^4}, \text{ или } \frac{\Delta l}{F} = \frac{5,6nD^3}{Gc^4},$$

где  $G$  — модуль упругости или сдвига материала,

$$G = Y/[2(v+1)],$$

составляющий  $G \approx 8 \cdot 10^{10}$  Н·м $^{-2}$  для стали и  $G \approx 2,7 \cdot 10^{10}$  Н·м $^{-2}$  для алюминия.

Максимальная величина касательного напряжения  $\sigma_s$  в пружине из проволоки кругового сечения определяется выражением

$$\sigma_{s \text{ макс}} = \alpha \frac{8DF}{\pi d^3}.$$

Коэффициент  $\alpha$  зависит от отношения  $D/d$  (рис. 10.44, б).

Для номинального напряжения величина  $\sigma_{s \text{ макс}}$  должна оставаться ниже предельно допустимого для материала касательно-

го напряжения  $\sigma_{st}$ :  $\sigma_{st} \approx 2,5 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  (сталь),  $\sigma_{st} \approx 1,45 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  (алюминий).

*Датчик перемещений.* В зависимости от условий применения и желаемой точности находят применение такие датчики:

- резисторный потенциометр (возможно, с предварительным механическим умножением перемещения с помощью рычага, разд. 7.1);

- индуктивные датчики, использующие изменение магнитного сопротивления, взаимной индукции или построенные на принципе дифференциального трансформатора (разд. 7.2.2 и 7.2.3);

- емкостные датчики (разд. 7.3).

В качестве примера можно указать датчик FTA-G-1K (фирма-изготовитель Schaeivitz, рис. 10.45) со следующими характеристиками: диапазон измерений (Д. И.)  $\pm 1 \text{ даН}$ ; выходной сигнал для всей шкалы  $0,4 \div 1,1 V_{\text{эфф}}$  (при возбуждении в  $5V_{\text{эфф}}$ ,  $2,5 \text{ кГц}$ ); погрешность  $\pm 0,25\%$  (от всей шкалы); перемещение при номинальной нагрузке  $\pm 0,5 \text{ мм}$ . В конструкции датчика используются витая пружина и дифференциальный трансформатор.

## 10.5. Датчики момента

Момент возникает при приложении сил к рычагу, и его измерение основано на тех же принципах. При измерении момента на вращающихся деталях возникает проблема передачи информации с движущегося датчика. Всякий раз, когда это допустимо, измеряется не движущий момент, приложенный к подвижной детали, а момент ее реакции, действующий на неподвижную часть механизма.

### 10.5.1. Электрическая связь с движущимся датчиком

При необходимости измерения моментов, действующих на вращающиеся части механизмов, возникает проблема электрической связи между движущимся датчиком и стационарной измерительной цепью. Эта связь может осуществляться контактным или бесконтактным путем.

**Контактная связь.** Обычно применяются либо скользящие контакты на стержнях и щетках (рис. 10.46, а), либо погруженные в ртуть вращающиеся контакты (рис. 10.46, б).

Преимущество таких контактов состоит в способности проводить постоянный ток, но возникающее при этом контактное сопротивление возмущается случайными отклонениями  $\delta R$ , порождаемыми в основном флуктуациями в давлении контакта (в основном вследствие неровностей и вибраций скользящих контактов).

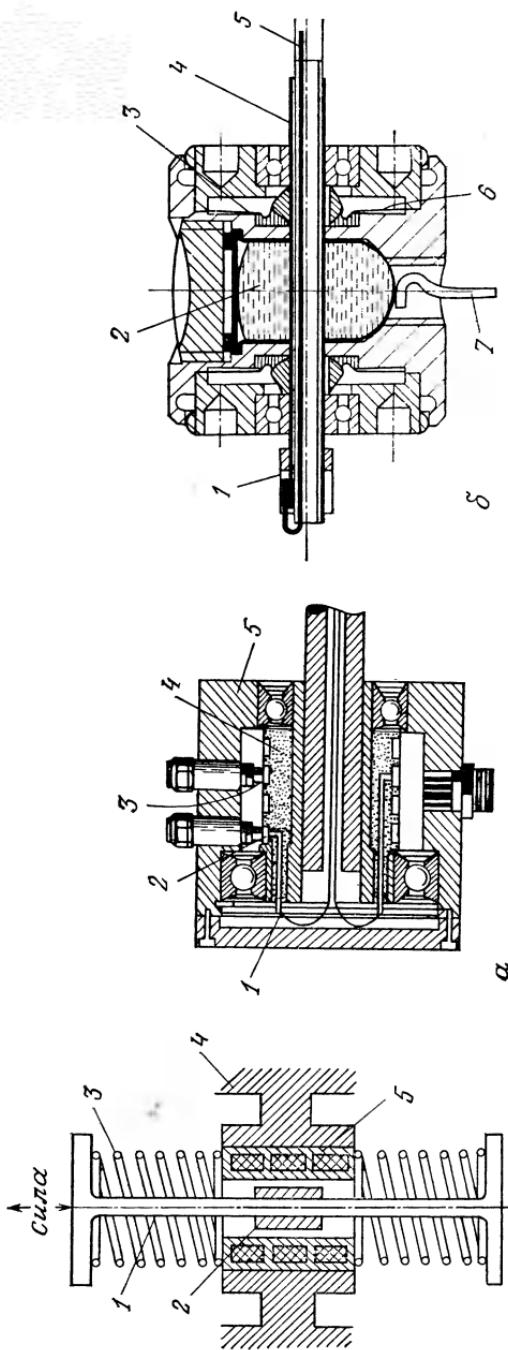


Рис. 10.45. Датчик силы на витой пружине с дифференциальным трансформатором (фирма-изготовитель Schaeffitz).

1 — жесткая трубка; 2 — пружина; 3 — жесткая трубка; 4 — сердечник; 5 — обмотка.

Рис. 10.46. Конструктивные схемы электрической связи с вращающимися деталями.

а — скользящие контакты на стержнях и щетках, конструкция фирмы Lebow (1 — се-ребряный стержень, 2 — щетка, 3 — щеткодержатель, 4 — щетка с погружением в ртуть, конструкция фирмы Viatometer S. A. (1 — пайка, 2 — пайка, 3 — ртуть, 4 — диафрагма, 5 — контактная труба из платино-иридевого сплава, 6 — медная проволока, 7 — соединительная проволока из платино-иридевого сплава).

Размах колебаний  $\delta R$  для скользящих контактов составляет 5–50 мОм; для погруженных в ртуть вращающихся контактов он намного меньше ( $\sim 0,25$  мОм).

Кроме того, если стационарная и вращающиеся части выполнены из разных металлов, их контакт вызывает появление в цепи термо-э. д. с. (в практических условиях для контакта ртуть — платина/иридий она ниже 2 мкВ).

Разогрев и механическое износование из-за трения вызывают уменьшение рабочего ресурса таких контактов, вследствие чего приходится ограничивать скорость вращения (максимальная линейная скорость на уровне скользящих контактов ограничивается величиной  $\sim 25$  м/с), а при больших скоростях устраивать принудительное охлаждение.

Рабочий ресурс контактов, вращающихся в ртути, выше, чем контактов типа стержни — щетки; когда измерения производятся не постоянно, последние становятся достаточно привлекательными, а их обслуживание облегчается, если они разборные.

**Бесконтактная связь.** В этом случае для передачи электрического сигнала используется емкостная (вращающийся конденсатор) или индуктивная (вращающийся трансформатор, рис. 10.47) связь; эти способы пригодны только для сигналов переменного тока.

В этом случае отсутствует трение, ограничивающее рабочий ресурс и скорость вращения. Всякое паразитное взаимодействие между возбуждающей цепью датчика (когда он пассивный) и цепью, принимающей измерительный сигнал, должно быть исключено. Однако, если возбуждение и измерительный сигнал могут быть впоследствии разделены (например, фильтрацией, если они имеют сильно различающиеся частоты), возможно применение общего устройства для их передачи. Несовершенство концентричности между неподвижной и вращающейся частями

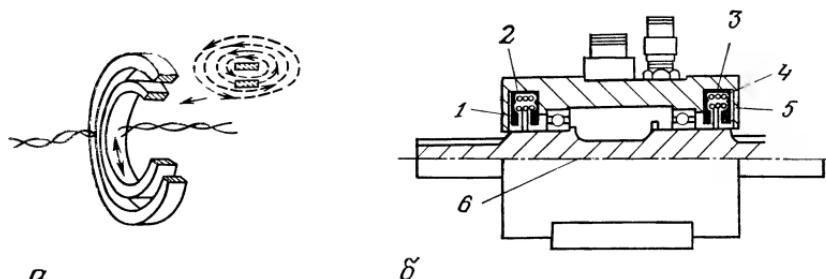


Рис. 10.47. Вращающийся трансформатор (докум. фирмы Lebow).

*a* — схема, иллюстрирующая принцип действия; *б* — использование для возбуждающей и измерительной индуктивной связи с моментометром на тензодатчиках. 1 — магнит; 2 — трансформатор измерительного сигнала; 3 — возбуждающий трансформатор; 4 — первичная обмотка (неподвижная); 5 — вторичная обмотка (вращающаяся); 6 — основание.

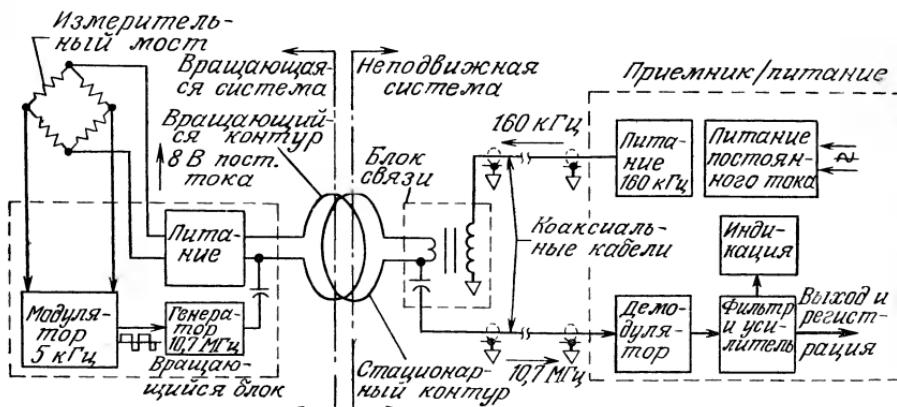


Рис. 10.48. Датчик для бесконтактного измерения момента на вращающемся валу (докум. фирмы Асигех).

измерительного устройства вызывает модуляцию амплитуды передаваемого сигнала. Чтобы это не вызывало погрешностей, можно внести непосредственно во вращающуюся часть стабилизатор сигнала возбуждения датчика и преобразователь измерительного сигнала на частоте модуляции. Если эта частота высока, можно осуществлять частотное преобразование.

На рис. 10.48 приводится блок-схема устройства, основанного на этом принципе.

Датчик представляет собой измеритель моментов, построенный на экстензометрических датчиках (разд. 10.5.3), с питанием постоянным током через трансформатор и стабилизатор напряжения от переменного напряжения (160 кГц), наведенного во вторичном вращающемся контуре первичным неподвижным. Измерительный сигнал модулируется прямоугольным напряжением частотой 5 кГц, которое, в свою очередь, модулирует по частоте генератор 10,7 МГц; модулятор и генератор расположены на вращающейся части и питаются постоянным напряжением, подаваемым от стабилизатора. Вторичный контур служит излучающей антенной сигнала на 10,7 МГц; после приема на первичном контуре он отделяется от напряжения питания частотой 160 кГц и направляется в демодулятор.

### 10.5.2. Измерение момента с помощью электромеханического эффекта

**Пьезоэлектрический измеритель моментов.** В разд. 10.1.3 (рис. 10.13, г) описан измеритель моментов в виде двухкомпонентного датчика силы. Метрологические характеристики двух-

Таблица 10.6. Характеристики датчика 9271А (фирма-изготовитель Kistler)

Характеристики	Сила	Момент
Диапазон измерений	+2000—500 дан	±100 Нм
Общая жесткость (два датчика, установленные с предварительным напряжением)	4 кН/мкм	0,5 Нм/мкрад
Разрешение	0,02 Н	$2 \cdot 10^{-4}$ Нм
Чувствительность	1,8 пКл/Н	150 пКл/Нм
Погрешность		~2%

компонентного датчика 9271А (фирма-изготовитель Kistler) приводятся в табл. 10.6.

**Магнитострикционный измеритель моментов.** Всякое усилие, приложенное к ферромагнитному материалу, вызывает изменение его магнитной проницаемости  $\mu$  (разд. 10.2.1), например,  $\mu$  растет в областях растяжения материала и убывает в областях сжатия. Если на ферромагнитный цилиндрический стержень действует момент, ось которого совпадает с осью стержня, то возникающие напряжения определяют на его поверхности два взаимно перпендикулярных направления под углом  $\pm 45^\circ$  к оси цилиндра, вдоль которых изменение магнитных проницаемостей  $\mu_1$  и  $\mu_2$  максимально и противоположно по знаку. Для выявле-

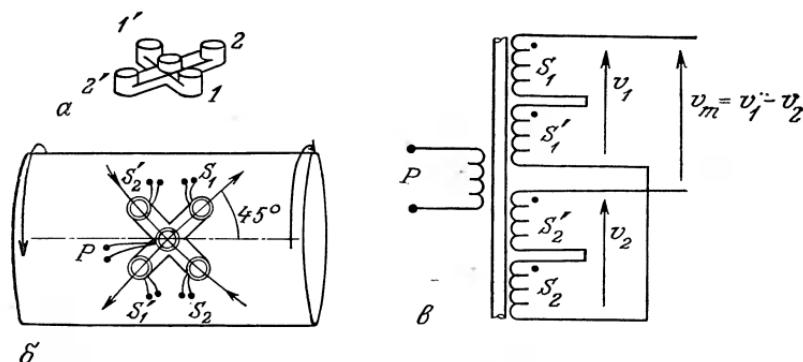


Рис. 10.49. Магнитострикционный моментометр.  
а — форма сердечника обмоток; б — силовая схема; в — электрическая схема.

ния этих изменений можно использовать сердечник крестообразной формы (рис. 10.49, а), несущий первичную обмотку  $P$  и две пары соединенных последовательно вторичных обмоток  $S_1$  и  $S'_1$ ,  $S_2$  и  $S'_2$  (рис. 10.49, б); сами пары обмоток включены дифференциально (рис. 10.49, в). Этот блок помещается напротив вращающейся оси, что обеспечивает взаимодействие между первичной и вторичными обмотками.

Если момент отсутствует, то  $\mu_1 = \mu_2$ ,  $v_1 = v_2$ ,  $v_m = 0$ .

Для момента, приложенного в направлении, указанном на рис. 10.49,  $\mu_1 > \mu_2$ ,  $v_1 > v_2$ ,  $v_m > 0$ .

Хотя это измерительное устройство имеет весьма ограниченную точность (несколько процентов), его преимущество заключается в простоте реализации.

### 10.5.3. Измерение момента с помощью деформации промежуточного преобразователя

**Промежуточный преобразователь.** Деталь, находящуюся под воздействием момента, скрепляют с промежуточным преобразователем в виде сплошного или трубчатого цилиндра (последний при той же крутильной жесткости лучше сопротивляется изгибу) либо бруска прямоугольного сечения (для облегчения возможной наклейки тензодатчиков).

В табл. 10.7 для этих трех типов промежуточных преобразователей (рис. 10.50) указаны угол кручения  $\theta$  и максимальное касательное напряжение  $\sigma_s$  макс в материале, возникающее под действием крутящего момента  $\tau$ , направленного по главной оси симметрии. Соответствующие геометрические характеристики

Таблица 10.7 Механические соотношения для промежуточных преобразователей датчиков момента

	Сплошной цилиндр (рис. 10.50, а)	Трубчатый цилиндр (рис. 10.50, б)	Сплошной стержень квадратного сечения (рис. 10.50, в)
$\theta$	$\frac{2L\tau}{\pi R^4 G}$	$\frac{2L\tau}{\pi(R^4 - r^4)G}$	$\frac{9,43\tau L}{G a^4}$
$\sigma_s$ макс	$\frac{2\tau}{\pi R^3}$	$\frac{2\tau R}{\pi(R^4 - r^4)}$	$4,81 \frac{\tau}{a^3}$



Рис. 10.50. Конфигурации промежуточных преобразователей.  
I — сплошной цилиндр; II — трубка; III — прямоугольный брус.

также приводятся в таблице. Порядок величин модуля упругости  $G$  и предельного допустимого касательного напряжения  $\sigma_{sl}$  указан в разд. 10.4. Размеры промежуточного преобразователя определяются из условия

$$\sigma_{s \text{ макс}} \leq (2/3) \sigma_{sl}.$$

*Учет паразитных изгибных напряжений.* Когда кроме измеряемого крутящего момента  $\tau$  на образец действует изгибающий момент  $M$ , перпендикулярный  $\tau$ , вычисление напряжений в материале должно учитывать  $\tau$  и  $M$ . Для цилиндрического стержня максимальные касательное напряжение  $\sigma_{s \text{ макс}}$  и напряжение растяжение — сжатие  $\sigma_{n \text{ макс}}$  определяются выражениями

$$\sigma_{s \text{ макс}} = 2\tau_e/\pi R^3, \quad \sigma_{n \text{ макс}} = 4M_e/\pi R^3,$$

где  $\tau_e$  и  $M_e$  — эквивалентные моменты, обусловленные комбинацией  $\tau$  и  $M$ :

$$\tau_e = |\tau| = \sqrt{M^2 + \tau^2}, \quad M_e = |M| = (1/2)(M + \tau).$$

Радиус  $R$  тела промежуточного преобразователя должен быть достаточно большим, чтобы напряжения  $\sigma_{s \text{ макс}}$  и  $\sigma_{n \text{ макс}}$  были меньше предельно допустимых напряжений материала.

Для измерений моментов малой величины используются промежуточные преобразователи меньшей жесткости (рис. 10.51).

**Моментомер по измерениям угла кручения.** Для таких измерений можно использовать различные методы.

*Измерения индуктивным датчиком.* Кручение приводит к перемещению сердечника внутри катушки и, следовательно, к изменению индукции (рис. 10.52). Один конец промежуточного преобразователя связи рычагом с одним из сердечников, другой — с одной из обмоток. Четыре обмотки образуют мост, питание которого и снятие сигнала осуществляются двумя вращающимися трансформаторами. Напряжение моста  $v_m$  нулевое, когда сердечники находятся в среднем положении; оно пропорционально углу кручения и, следовательно, приложенному моменту.

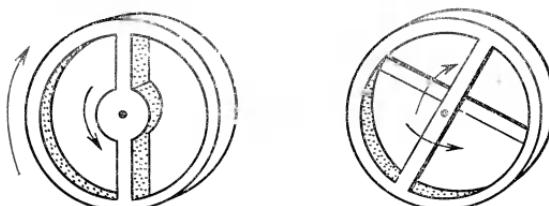


Рис. 10.51. Конструкции торсионных промежуточных преобразователей, используемых для измерения малых моментов.

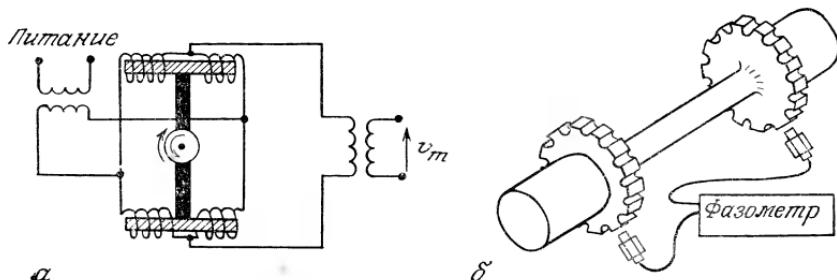


Рис. 10.52. Моментомер на индуктивных датчиках с измерением угла кручения (докум. фирмы Vibrometer S. A.).

*α* — с подвижным сердечником; *β* — с датчиками близости.

Моментомер типа TG-20/В (фирма-изготовитель Vibrometer S. A.) имеет следующие характеристики: питание 10 В, 8 кГц; максимальный угол кручения (при моменте 200 Нм) 0,25°; чувствительность 18 мкВ/В/Нм; скорость вращения от 0 до 18 000 об/мин; погрешность <0,5% от верхнего предела измерений.

*Измерения оптическим датчиком.* Два одинаковых диска, разделенные на чередующиеся прозрачные и непрозрачные секторы, закреплены один напротив другого на двух концах образца; в отсутствие кручения непрозрачные секторы одного частично закрывают прозрачные секторы другого. При кручении образца изменение средней интенсивности светового луча, проходящего через оба диска, пропорционально углу кручения, т. е. крутящему моменту.

*Измерение магнитным датчиком близости* (рис. 10.52, *б*). Каждый конец образца (промежуточного преобразователя) снабжен зубчатым магнитным колесом. Сигналы от двух датчиков близости, помещенных напротив каждого колеса, например, в фазе, когда нет момента, рассогласовываются по фазе пропорционально измеряемому крутящему моменту.

*Моментомер на экстензометрических датчиках.* Тензодатчики помещаются под углом  $\pm 45^\circ$  относительно оси цилиндрического образца (рис. 10.53); для случая сплошного цилиндра с обозначениями табл. 10.7 деформация определяется выражением  $\pm \tau/\pi R^3 G$ .

Использование схемы полного моста обеспечивает хорошую линейность, лучшую чувствительность к измеряемому моменту сил и компенсацию паразитных эффектов (продольное растяжение или сжатие, изгиб).

При использовании скользящих контактов эффект изменения их сопротивления становится пренебрежимым благодаря питанию от тока моста и большому сопротивлению детектора.

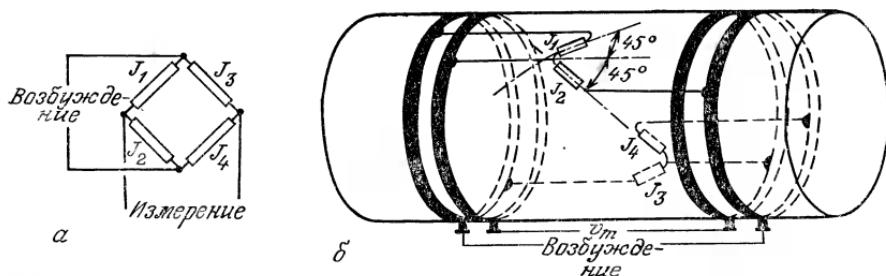


Рис. 10.53. Мост тензодатчиков на цилиндрическом промежуточном элементе моментомера и связь с использованием скользящих контактов.

*a* — принципиальная схема; *б* — реальная конфигурация с противоположной ориентацией пар тензодатчиков  $J_1J_2$  и  $J_3J_4$ .

На метрологические характеристики моментомеров влияют те же факторы, что и в случае датчиков силы (разд. 10.3.1); точность рассматриваемого моментомера намного выше точности моментомеров других типов.

Моментомер 1105-10К (фирма-изготовитель Lebow) имеет следующие характеристики: диапазон измерений (Д. И.)  $0 \div -1130$  Н·м; предельный неразрушающий момент 1700 Н·м; максимальная скорость вращения 8500 об/мин; жесткость 0,085 Н·м/мрад (угол кручения  $0,75^\circ$  при максимальном моменте); выходной сигнал  $2 \div 2,5$  мВ/В в Д. И.; погрешность  $\sim 0,2 \div 0,3\%$  от Д. И.

## 10.6. Тактильные датчики (искусственная кожа)

Здесь рассматриваются датчики, используемые в робототехнике и выполняющие функции тактильных клеток живой кожи, такие, как команда захватывающих усилий и распознавание формы.

**Конструкция.** На изоляционной основе установлена проводящая сеть (рис. 10.54, *a*), несущая потенциал  $V$  и состоящая из двух групп взаимно перпендикулярных линейных проводников ( $X_1, X_2, \dots$ ) и ( $Y_1, Y_2, \dots$ ). В каждой таким образом сформированной прямоугольной ячейке располагается измерительный электрод, который изолирован от окружающих его проводников и связан с массой через токоизмерительную электрическую цепь.

Эта сборка покрыта листом гибкого материала (резина, полибутиадиен), наполненного проводящими частицами и пропускающего ток от проводников с потенциалом  $V$  к измерительным ячейкам.

Когда к участку такой искусственной кожи прикладывается давление, оно вызывает сближение проводящих частиц, что приводит к уменьшению сопротивления в затронутой зоне; это вы-

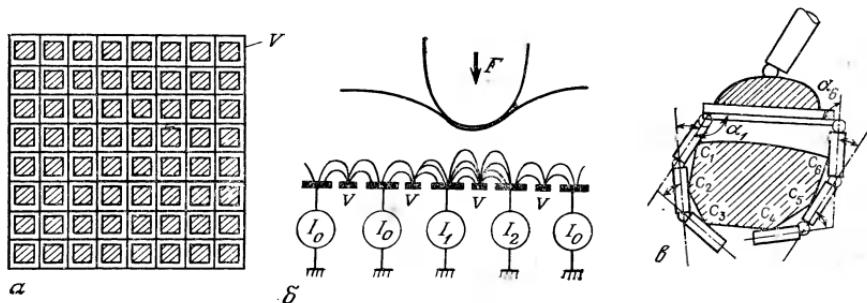


Рис. 10.54. Тактильный датчик [8].

**α** — общий вид; **β** — принцип определения контакта; **γ** — принцип определения формы.

зывает увеличение тока в измерительных ячейках, контактирующих с объектом (рис. 10.54, б). Координаты этих ячеек определяют зону контакта, а интенсивность тока характеризует величину приложенного давления.

Рис. 10.54, в иллюстрирует использование искусственной кожи для распознавания формы (по положениям точек контакта  $C_1, C_2, \dots$  каждой «фаланги» и по углам  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ , которые образуют между собой последовательные фаланги).

## Библиография

### Монографии

1. Brown W. F., Principes de ferromagnétisme, Paris, Dunod, 1970.
2. Burfoot J., Taylor G., Polar dielectrics and their applications, Londres, The Macmillan press Ltd, 1979.
3. Craik D. J., Tebble R. S., Ferromagnetism and Ferromagnetic Domains, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1965.
4. Eyrraud L., Diélectriques solides et anisotropes et ferroélectricité, Paris, Gauthier-Villars, 1967.
5. Lines M. E., Glass A. M., Principles and applications of ferroelectrics and related materials, Oxford, Oxford University Press, 1977.
6. Roark R. J., Young W. C., Formulas for stress and strain, N. Y., McGraw, 5th ed., 1975.

### Периодические и другие издания

7. Edition de l'Association régionale de paléontologie — préhistoire et des amis du muséum de Lyon, Quartz, 1979.
8. Clot J., Falipou J., Peau artificielle et laser: nos mains et nos yeux de demain, *Microsystèmes*, 67 (sept. — oct. 1982).
9. Dahle O., Le Pressducteur, capteur robuste de forces élevées, *ISA Journal*, 32 (Août 1959).
10. Debnam R. C., Jenkins R. F., An investigation of the performance of force measuring devices of very high precision, *VDI Berichte*, Nr 176, 31 (1972).
11. Kovacs S., Effects of excentrical and non axial loads upon the sensibility of strain gauges load cells, *VDI Berichte*, Nr 176, 73 (1972).

12. Levi R., Analysis of cross sensitivity on strain gauge dynamometers, *VDI Berichte*, Nr 137, 61 (1970).
13. McFee J. H., Bergman J. G., Crane G. R., Pyroelectric and non linear optical properties of poled polyvinylidene fluoride films, *Ferroelectrics*, 3, 305 (1972).
14. Micheron F., Vers une nouvelle génération de capteurs grâce aux polymères piézoélectriques, *Mesures, Régulation, Automatisme*, 73 (nov. 81).
15. Moghisi and Squire, An absolute impulsive method for the calibration of force transducers, *J. Phys. Sci. Instr.*, 13, 1090 (oct. 1980).

## **11. ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЯ, ВИБРАЦИИ И УДАРА**

### **11.1. Основные понятия**

Согласно фундаментальным законам механики, ускорение входит в соотношение между силой и массой. Поэтому в датчиках ускорения используются физические явления, позволяющие получить на основе этого соотношения электрический сигнал или визуальную информацию для оператора.

Датчики ускорения можно классифицировать в зависимости от используемого физического явления, которое позволяет либо непосредственно измерить силу (пьезоэлектрические датчики, датчики с уравновешиванием момента или силы), либо измерить ее косвенным путем по перемещению или деформации чувствительного элемента.

Можно также классифицировать эти датчики по явлениям, для анализа которых они предназначены. Рабочая полоса частот этих явлений определяет в таком случае тип соответствующего датчика с учетом требуемой точности.

#### **11.1.1. Различные диапазоны ускорения**

Условия экспериментов различают по уровню ускорений и диапазону частот.

1. Измерения ускорения движущихся объектов — самолетов, ракет, наземных или морских транспортных средств, движение центра масс которых происходит с относительно малыми частотами (от 0 до нескольких десятков герц) и малыми ускорениями.

В соответствующих акселерометрах используются физические явления, позволяющие точно измерить величину ускорения при «нулевой» частоте: это — следящие акселерометры, датчики перемещения (индуктивные, емкостные, потенциометрические, оптические), акселерометры с тензометрическими датчиками, измеряющими напряжения. Точность этих датчиков зависит от технологии их изготовления и изменяется от нескольких единиц  $10^{-4}$  до  $(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$ .

К этому первому классу датчиков, предназначенных для измерения движения центра масс движущихся тел, относятся

также контактные или пороговые акселерометры с умеренной точностью.

2. Измерения вибрационного ускорения жестких конструкций или больших масс в диапазоне частот, достигающем нескольких сотен герц, а также постоянного или псевдопостоянного ускорения со значительным демпфированием.

Для таких задач используются акселерометры с переменной индуктивностью, с металлическими тензометрическими или, чаще, пьезорезистивными датчиками. Точность этих датчиков — несколько единиц  $10^{-2}$ , но область их применения очень широка, ибо они позволяют одновременно измерять статическую и динамическую составляющие ускорения.

3. Измерения вибрационного ускорения средней величины, обычно в диапазоне высоких частот (несколько десятков килогерц). Такие вибрации часто действуют на легкие конструкции, требующие применения высокочувствительных датчиков. В подобных случаях используются главным образом пьезорезистивные или пьезоэлектрические датчики. Принцип действия пьезоэлектрических акселерометров исключает возможность измерения постоянного ускорения, но они могут применяться для измерений вибраций или шума очень высоких частот, недоступных датчикам ускорения любого другого типа. Класс их точности — несколько единиц  $10^{-9}$  — достаточен для таких измерений.

4. Измерения ударов, представляющих собой импульсные ускорения высоких уровней, требующие применения датчиков с широкой полосой пропускания, от низких до высоких частот (до сотен килогерц).

### 11.1.2. Вибрационные движения.

#### Выбор измеряемой величины

Измерение вибраций конструкции имеет большое значение в промышленности и технике а) из-за ограничений, налагаемых на предельную амплитуду вибрации с целью избежать порождаемого ею вредного акустического воздействия; б) из-за того что уровень вибрации может привести к повреждению машины или установки (балансировка механизмов и машин с вращением) либо снизить эффективность ее работы (оптимизация режима работы механических инструментов); в) наконец, ввиду необходимости оценки характеристик вибрации, дающей информацию о степени износа или усталости механических элементов установки, что позволяет принять предупредительные меры.

Вибрацию можно охарактеризовать (в дополнение к частоте) перемещением, скоростью или ускорением в определенных точках колеблющейся конструкции. Акселерометр часто является наиболее подходящим датчиком для измерения вибраций и ударов по ряду причин.

Измерение ускорения всегда позволяет определить скорость и перемещение путем одно- или двукратного интегрирования, тогда как обратная операция нежелательна из-за уменьшения отношения сигнал/шум, присущего операции дифференцирования. Кроме того, датчики ускорения являются измерительными приборами, которые осуществляют абсолютные измерения и не требуют какой-либо точки отсчета. Напротив, датчики перемещения измеряют перемещение какого-либо подвижного элемента объекта относительно этого объекта, который может двигаться или быть неподвижным.

### 11.1.3. Принцип действия сейсмических датчиков (рис. 11.1)

Акселерометр может служить примером, иллюстрирующим частотную реакцию систем второго порядка (разд. 2.4.3). В наиболее общем виде такой датчик, в зависимости от диапазона частот, может быть датчиком перемещения, скорости или ускорения, которым подвергается корпус прибора.

Конструктивная схема на рис. 11.1, как и все последующее изложение, хотя и относится к датчикам прямолинейного движения, может быть модифицирована применительно к области вращательных движений.

В любом случае сейсмический датчик состоит, во-первых, из механической части, включающей массу  $M$  и элемент, связанный с корпусом (кристалл пьезоэлектрика, пружина, гибкая пластинка и т. д.), и, во-вторых, из устройства преобразования в электрический сигнал параметров движения этого элемента, являющихся вторичной измеряемой величиной  $m_2$ . В такой постановке можно считать, что рассматривается механическая система с одной степенью свободы.

Пусть  $h_0$  — ордината точки  $a$  на корпусе, а  $h$  — ордината точки  $b$  на сейсмической массе. В отсутствие ускорения, приложенного к корпусу, ордината точки  $b$  совпадает с ординатой точки  $a$ . Обозначим через  $z = h - h_0$  перемещение сейсмической массы  $M$  относительно корпуса.

В уравнение равновесия

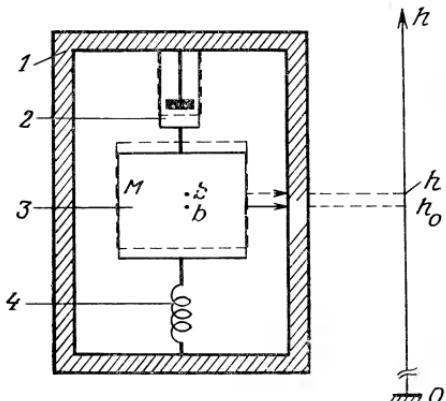


Рис. 11.1. Принципиальная схема датчика движения с сейсмической массой.

1 — корпус; 2 — демпфер; 3 — чувствительная масса; 4 — возвратная пружина.

входят: сила  $Cz$ , возвращающая пружину в положение равновесия; сила вязкого трения  $Fdz/dt$ ; сила  $Md^2h/dt^2$ , вызванная ускорением массы  $M$ .

Уравнение равновесия записывается в виде

$$M \frac{d^2h}{dt^2} = -F \frac{dz}{dt} - Cz,$$

или

$$-M \frac{d^2h_0}{dt^2} = M \frac{d^2z}{dt^2} + F \frac{dz}{dt} + Cz.$$

Поэтому в самом общем виде тип и конструкция датчика, предназначаемого для измерения первичной измеряемой величины  $m_1$  (перемещения  $h_0$ , скорости  $dh_0/dt$ , ускорения  $d^2h_0/dt^2$ ), зависят от: а) параметра, выбранного в качестве вторичной измеряемой величины  $m_2$ , ( $z, dz/dt, d^2z/dt^2$ ); б) диапазона частот, определяющего, какой из трех членов ( $Cz, Fdz/dt$  или  $Md^2h/dt^2$ ) является доминирующим, в связи с чем его следует взять в качестве второго члена уравнения.

Чувствительность датчика  $S$  можно описать соотношением

$$S_1 S_2 = S = \frac{\text{Выходная электрическая величина } s}{\text{/Первичная измеряемая величина } m_1},$$

где  $S_1 = m_2/m_1$  — «механическая» чувствительность датчика первичной измеряемой величины;  $S_2 = s/m_2$  — чувствительность вторичного датчика (преобразователя).

На практике в качестве вторичного датчика пользуются датчиками относительного положения сейсмической массы (или некоторой величины, от него зависящей: восстанавливающей силы — пьезоэлектрический элемент, деформации — пьезорезистивный датчик) либо датчиками относительной скорости.

Типы сейсмических датчиков движения и их параметры приведены в табл. 11.1.

Принцип действия и характеристики этих датчиков станут яснее, если переписать общее уравнение в символическом виде, пользуясь преобразованием Лапласа с оператором  $p$ :

$$-Mp^2h_0 = Mp^2z + Fpz + Cz,$$

или

$$\frac{z}{h_0} = \frac{-p^2/\omega_0^2}{p^2/\omega_0^2 + 2\xi(p/\omega_0) + 1},$$

где  $\omega_0 = \sqrt{C/M} = 2\pi f_0$  — собственная круговая частота колебаний массы  $M$  на пружине жесткостью  $C$ ;  $\xi = F/2\sqrt{CM}$  — коэффициент демпфирования. В режиме синусоидальных колебаний  $p = j\omega$ .

Таблица 11.1. Принципы действия и параметры сейсмических датчиков движения

Тип датчика	Первичная измеряемая величина $m_1$	Вторичная измеряемая величина $m_2$	Преобразователь
Сейсмометр	Абсолютное перемещение $h_0$	Относительное перемещение $z$	Потенциометр, дифференциальный трансформатор
Датчик вибрационной скорости	Абсолютная скорость $dh_0/dt$	Относительная скорость $dz/dt$	Переменная индуктивность
Акселерометр	Ускорение $d^2h_0/dt^2$	Относительное перемещение $z$ , деформация, восстанавливающая сила	Потенциометр, дифференциальный трансформатор, пьезоэлектрический или пьезорезистивный элемент

**Сейсмический датчик перемещения.** Чувствительность  $S_1 = m_2/m_1$ , где  $m_2 = z$ , а  $m_1 = h_0$ , с использованием преобразования Лапласа запишется в виде

$$S_1 = \frac{-p^2/\omega_0^2}{p^2/\omega_0^2 + 2\zeta(p/\omega_0) + 1}.$$

Речь идет о функции пропускания фильтра верхних частот второго порядка с частотой среза  $\omega_0$  (рис. 11.2). Поэтому использование такого датчика ограничено измерением вибрационных перемещений, частота которых много больше  $f_0$ . Для распространения рабочей полосы пропускания в область низких частот требуются: а) с одной стороны, уменьшение  $\omega_0 = \sqrt{C/M}$  путем уменьшения  $C$  либо путем увеличения  $M$  (в последнем

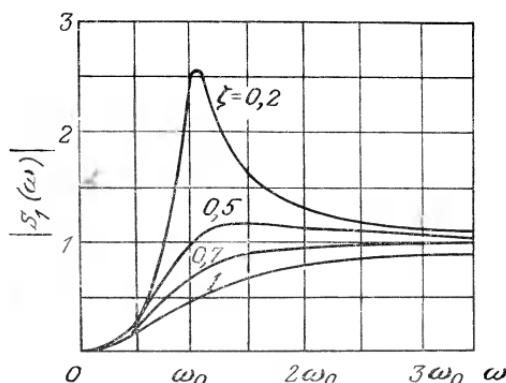


Рис. 11.2. Частотные характеристики фильтра верхних частот второго порядка для различных коэффициентов демпфирования.

случае масса датчика увеличивается, его обратное воздействие на измеряемую величину возрастает, и область применения ограничивается случаями, в которых обратное воздействие не имеет особого значения (сейсмометр); б) с другой стороны, эффективное ограничение  $\omega_0$  некоторым нижним пределом, что налагает условие на коэффициент демпфирования  $\zeta$ , который должен составлять  $\sim 0,6 \div 0,7$ .

Со стороны высоких частот ограничения налагаются: а) уменьшением измеряемой амплитуды перемещений; б) недостаточным быстродействием используемого датчика перемещения в динамическом режиме, связанным с его электрической схемой.

**Сейсмический датчик скорости.** При измерении скорости вибрационных колебаний исследуемой конструкции или корпуса датчика  $dh_0/dt$  ( $ph_0$  в символических обозначениях) можно воспользоваться в качестве вторичной измеряемой величины относительным перемещением  $z$ . Первичная чувствительность  $S_1$  запишется в этом случае в виде выражения для частотного фильтра, настроенного на  $\omega_0$ :

$$S_1 = \frac{m_2}{m_1} = \frac{z}{ph_0} = \frac{-p/\omega_0^2}{p^2/\omega_0^2 + 2\zeta(p/\omega_0) + 1}.$$

Рабочий диапазон частот определяется членом  $2\zeta p/\omega_0$  в знаменателе. Для его увеличения нужно увеличивать демпфирование, что вредно оказывается на самой величине чувствительности. Поэтому предпочтительно пользоваться в качестве вторичной измеряемой величины  $m_2$  относительной скоростью  $dz/dt$ ; тогда чувствительность  $S_1$ , как и в случае описанного выше сейсмического датчика перемещения, принимает вид функции фильтра верхних частот:

$$S_1 = \frac{pz}{ph_0} = \frac{-p^2/\omega_0^2}{p^2/\omega_0^2 + 2\zeta(p/\omega_0) + 1}.$$

Выводы о пределах применимости, по существу, такие же: а) частота исследуемого явления должна быть достаточно высокой; б) расширение полосы пропускания в сторону низких частот усиливает обратное воздействие датчика на измеряемую величину.

Преобразование скорости перемещения относительно корпуса в электрический сигнал обычно обеспечивается катушкой, связанной с сейсмической массой и перемещающейся относительно магнитного сердечника, скрепленного с корпусом датчика (рис. 11.3), или наоборот.

Нельзя пренебрегать реакцией вторичного датчика на движение сейсмической массы; она вносится силой реакции  $f = Bli$ ,

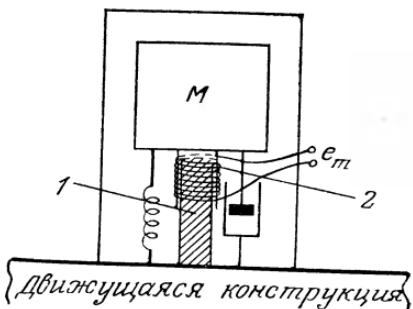


Рис. 11.3. Принципиальная схема сейсмического датчика скорости.  
1 — магнитный сердечник; 2 — катушка.

действующей на катушку, обмотка которой имеет длину  $l$ , перемещается в поле магнитной индукции  $B$  и пропускает ток

$$i \simeq e_m/R = (Bl/R)(dz/dt).$$

Предполагается, что реактивностью катушки  $L\omega$  можно пренебречь по сравнению с полным сопротивлением измерительной цепи  $R$ , включающим сопротивление самой катушки. Сила реакции  $f$  пропорциональна скорости:

$$f = (Bl)^2(1/R)(dz/dt).$$

Она противоположна направлению движения и вносит вклад в величину коэффициента  $F$ , определяющего общее демпфирование измерительной цепи, которое является удобным средством воздействия на частотную характеристику датчика (рис. 11.2).

Электродинамические сейсмические датчики скорости могут обладать очень большой чувствительностью, если не имеет существенного значения влияние датчика на измеряемую величину.

Верхняя граница полосы пропускания определяется следующими факторами: а) с одной стороны, присутствием члена  $jL\omega$ , которым здесь пренебрегают по сравнению с  $R$ , но который приводит к уменьшению выходного электрического сигнала; б) с другой стороны, механическим поведением подвижной части прибора: катушки (или магнита) и ее подвески, а также требованием низкой частоты среза, что приводит к низким механическим резонансным частотам элементов подвески, оказывающим негативное влияние на частотную характеристику измерителя абсолютной скорости.

**Сейсмический датчик ускорения.** Входная величина  $d^2h_0/dt^2$  выражается либо в  $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ , либо в единицах ускорения силы тяготения  $g$  ( $1 g \sim 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ). Перемещение  $z$  сейсмической массы, являющееся второй измеряемой величиной, измеряется одним из трех способов:

а) непосредственно акселерометрами, снабженными потенциометрами, дифференциальными трансформаторами, переменными емкостями;

б) посредством деформации упругого чувствительного элемента, поддерживающего сейсмическую массу, т. е. тензометрическими акселерометрами;

в) наконец, посредством восстанавливающей силы  $Cz$ , пропорциональной перемещению, т. е. пьезоэлектрическими акселерометрами, в которых упругим элементом является кристалл пьезоэлектрика.

Первичная чувствительность  $S_1$  в символических обозначениях

$$S_1 = \frac{z}{p^2 h_0} = \frac{-1/\omega_0^2}{p^2/\omega_0^2 + 2\zeta(p/\omega_0) + 1}$$

является функцией пропускания фильтра нижних частот второго порядка (амплитудная и фазовая характеристики которой при различных коэффициентах демпфирования приведены на рис. 2.6 в разд. 2.4.3):

$$\left| \frac{S_1(\omega)}{S_1(\omega=0)} \right| = \frac{1}{\sqrt{[1 - \omega^2/\omega_0^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_0)]^2}},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-2\zeta(\omega/\omega_0)}{1 - \omega^2/\omega_0^2}.$$

Чувствительность  $S_2$  датчика перемещения  $z$  отражает особенности получения его электрического сигнала: это случай пьезоэлектрических акселерометров, не реагирующих на постоянную составляющую.

Исследование функции  $S_1$  позволяет выделить несколько существенных особенностей, общих для рассматриваемых акселерометров различных типов и относящихся к трем определяющим метрологическим характеристикам: быстродействию, обратному воздействию датчика на измеряемую величину, чувствительности.

Увеличение полосы пропускания происходит вместе с уменьшением влияния датчика на измеряемую величину. Действительно, величина  $\omega_0 = \sqrt{C/M}$  увеличивается с уменьшением сейсмической массы  $M$  и с повышением жесткости  $C$  упругого элемента, поддерживающего массу  $M$ , что способствует миниатюризации датчика.

Чувствительность, равная  $1/\omega_0^2$  в полосе пропускания, уменьшается с увеличением собственной частоты. При измерении высокочастотных вибраций (характеризующихся, соответственно, большими ускорениями) выбор датчика обычно должен определяться скорее собственной частотой, чем чувствительностью.

Увеличение демпфирования, уменьшающее или устраняющее резонанс, позволяет расширить рабочую полосу пропускания.

Но демпфирование часто можно увеличить только за счет возрастания массы датчика, т. е. увеличения его влияния на измеряемую величину, что приводит к сдвигу фаз, который может затруднить, например, анализ мод колебаний.

## 11.2. Общие характеристики пьезоэлектрических и пьезорезистивных датчиков

### 11.2.1. Быстродействие

В общем виде понятие «быстродействие» охватывает, с одной стороны, ряд нормативных определений, а с другой — обычные термины и вторичные параметры, вытекающие из узаконенной терминологии.

**Собственная, резонансная и переходная частоты.** Некоторые экспериментаторы неправильно используют термин «собственная частота» вместо «резонансная частота». Собственная частота является теоретическим понятием, тогда как резонансную частоту можно зафиксировать с помощью осциллографа.

*Собственная частота.* Собственная частота, или естественная частота свободных колебаний, является главной характеристикой динамического поведения датчиков, уподобляемых маятниковой системе. Собственная частота определяется прохождением фазы через значение, равное  $-\pi/2$  ( $\phi = -\pi/2$ ). Практически рассматривают два случая:

1. Случай изолированного акселерометра (например, подвешенного в воздухе). Его можно моделировать сейсмической массой  $M$ , связанной при помощи пружины жесткостью  $C$  с системой основание + корпус массой  $m_b$ . Собственная частота такого акселерометра определяется выражениями

$$f_0' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{m_b} \right)}.$$

2. Случай акселерометра, закрепленного на исследуемой конструкции массы  $M_s$  (рис. 11.4). Если крепление акселерометра на конструкции можно считать абсолютно жестким, массы  $m_b$  и  $M_s$  просто складываются, и собственная частота закрепленного акселерометра записывается в виде

$$f_{0m} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{m_b + M_s} \right)}.$$

Собственную частоту сейсмической массы с пружиной,  $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{C/M}$ , можно приближенно измерить с хорошей точностью (2÷4%), укрепляя датчик на сравнительно легкой конструкции, ускорение которой отслеживается обратной связью, причем ее эффективная (динамическая) масса  $M_s$ , определяемая

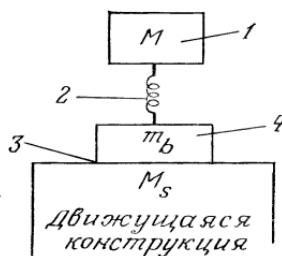


Рис. 11.4. Схема установки акселерометра.

1 — чувствительная масса;  
2 — пружина жесткостью  $C$ ;  
3 — жесткая связь; 4 — основание+корпус.

Частоту  $f_{rm}$  часто называют «верхней частотой резонанса».

Частоты  $f_r$  и  $f_0'$  очень близки друг к другу, если демпфирование невелико (случай пьезоэлектрических акселерометров). Имеем:

$$f_r \approx f'_0 (1 - \zeta^2) \approx f'_0.$$

Частота отклика маятниковой системы в периодическом режиме (возбуждение при импульсном возмущении) является переходной частотой  $f_t$  (разд. 2.5.3):

$$f_t = f'_0 \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

Например, пьезоэлектрический акселерометр типа 4370 фирмы Brüel et Kjaer имеет следующие метрологические характеристики:  $f_0' = 28$  кГц,  $f_0 = (1/2\pi)\sqrt{C/M} = 19$  кГц,  $m_b = 25$  г,  $M = 29$  г. Для опорной конструкции массой  $M_s = 300$  г  $f_{rm} = 19,8$  кГц.

**Демпфирование, добротность. Коэффициент демпфирования.** Коэффициент демпфирования  $\zeta$  (множитель, характеризующий демпфирование) определяет переходную реакцию маятниковой системы (разд. 2.5.3):  $\zeta \approx 1$  — критический режим,  $\zeta > 1$  — апериодический режим,  $\zeta < 1$  — периодический режим.

**Коэффициент добротности.** Вместо коэффициента демпфирования часто вводят понятие коэффициента добротности  $Q$ ; действительно, коэффициент добротности можно непосредственно зафиксировать, например, с помощью осциллографа. Коэффициент добротности (прежде называвшийся коэффициентом усиления) в случае, когда частотная характеристика имеет максимум, определяется как отношение амплитуды сигнала на резонансной частоте  $f_r$  к средней амплитуде сигнала в плоской части характеристики:

$$Q = 1 / [2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}],$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - 1/Q^2})}.$$

отношением силы к ускорению, много больше массы  $M$ .

**Резонансная частота.** Резонансная частота  $f_r$  (или естественная частота с учетом демпфирования) представляет собой частоту, при которой амплитуда колебаний максимальна. Она связана с собственными частотами  $f_0'$  и  $f_{0m}$  соотв-

ольше массы  $M$ .

$$f_r = f'_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2}, \quad f_{rm} = f_{0m} \sqrt{1 - 2\zeta^2}.$$

**Коэффициент выбегания.** Если в реакции на единичный ступенчатый импульс обозначить через  $A_1$  амплитуду первого максимума, а через  $A_2$  — амплитуду в конечном установившемся состоянии, то коэффициент выбегания определяется соотношением  $(A_1 - A_2)/A_2$ . Он связан с коэффициентом демпфирования выражением

$$(A_1 - A_2)/A_2 = \exp(-2\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}).$$

**Реакция на переходные ускорения. Измерение ударов.** Спектр частот удара, представляющего собой импульс ускорения, теоретически непрерывен и распространяется от нуля до бесконечности; для его идеального воспроизведения требуется датчик с бесконечной полосой пропускания. На практике, в зависимости от вида удара, оказывается, что главная часть его энергии содержится в ограниченном диапазоне частот и надлежащим образом зафиксировать его характеристики можно с помощью пьезоэлектрических или пьезорезистивных акселерометров. Важными параметрами датчика при таких измерениях являются, во-первых, нижняя и верхняя границы полосы пропускания и, во-вторых, демпфирование.

Кроме того, качество измерения зависит от параметров удара: формы и амплитуды гребня импульса, длительности. На рис. 11.5 для нескольких ударных импульсов простой формы указаны порядки величины импульса и приведены теоретические формы реакции акселерометров в зависимости от коэффициента демпфирования  $\xi$ , нижней граничной частоты  $\omega_1$  и верхней резонансной частоты  $\omega_2$ .

В случае удара большой длительности  $T$  реакция акселерометра не будет статической ( $\omega_1 \neq 0$ ). При  $\omega_2 \gg 2\pi/T$  можно, как и при слабом демпфировании, пренебречь наличием затухающих волн, сопровождающих реакцию акселерометра. Напротив, нижняя граничная частота  $\omega_1$  должна быть достаточно малой (см. табл. 11.2).

В случае удара малой длительности влиянием нижней граничной частоты  $\omega_1$  можно пренебречь, и вид частотной характеристики отклика сильно зависит от демпфирования и резонансной частоты  $\omega_2$ . Например, в случае акселерометра с малым демпфированием для обеспечения погрешности измерения пикового значения менее 10% требуется выполнение условий:

- для полусинусоидального или треугольного ударного импульса:  $\omega_2 > 10\pi/T$ ;

- для квазипрямоугольного импульса со временем нарастания  $t_m$ :  $\omega_2 > 6\pi/t_m$ .

Эти границы величины  $\omega_2$  можно уменьшить приблизительно на 30%, если увеличить коэффициент демпфирования до

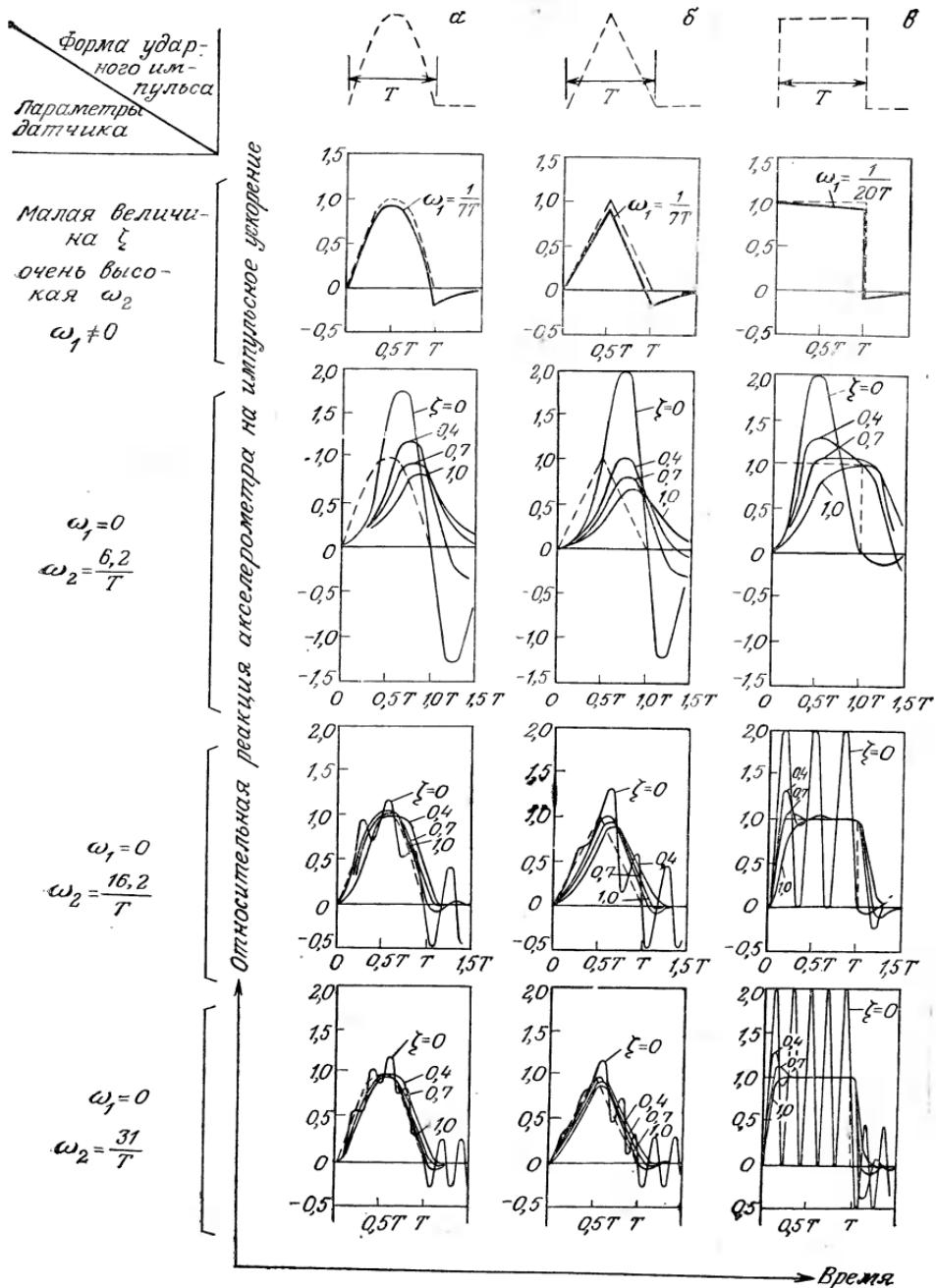


Рис. 11.5. Реакция различных акселерометров на ударный импульс длительностью  $T$  при различных формах импульса (данные фирмы Brüel & Kjaer).  
*а* — полусинусоидальный; *б* — треугольный; *в* — прямоугольный.

Таблица 11.2. Примеры условий, налагаемых на нижнюю граничную частоту реакции акселерометра, измеряющего ударный импульс большой длительности  $T$

Предельная ошибка измерения пикового значения	Форма ударного импульса	Полусинусоидальный или треугольный	Прямоугольный
		$\omega_1 < 1/7T$ $\omega_1 < 1/16T$	$\omega_1 < 1/20T$ $\omega_1 < 1/50T$
$\pm 5\%$			
$\pm 2\%$			

$\xi \approx 0,7$ , — условие, при котором вводимое запаздывание еще не оказывает заметного влияния на измерение.

Из этого рассмотрения следует, что если не принимать во внимание зависимость от других факторов (диапазон измерений, чувствительность, стойкость к перегрузкам), то с точки зрения частотных характеристик наиболее подходящими акселерометрами являются:

— для ударов большой длительности — акселерометры, обладающие ненулевой чувствительностью в статическом режиме ( $\omega_1 = 0$ ), т. е. пьезорезистивные;

— для очень кратких ударов — акселерометры, имеющие широкую полосу пропускания, т. е. пьезоэлектрические акселерометры с очень высокой резонансной частотой, а также пьезорезистивные акселерометры с демпфированием, обеспечивающим отсутствие отрицательного воздействия фазового сдвига.

### 11.2.2. Влияние механической связи акселерометра с конструкцией

Так как область применения акселерометров охватывает полосу частот, которая может достигать 100 кГц, необходимо особое внимание уделить креплению акселерометра к конструкции. Действительно, опыт показывает, что в 90% случаев возникающие осложнения вызваны недостаточной жесткостью соединения. Крепление можно моделировать упругой связью между конструкцией и опорной поверхностью датчика (рис. 11.6).

На жесткость крепления влияют следующие параметры: способ крепления; состояние поверхности конструкции; момент затяжки; твердость поверхности; кривизна опорной поверхности.

Вносимые ошибки действуют, главным образом, на частотную характеристику акселерометра (снижение резонансной частоты, появление паразитных резонансов) и искажают измерение, изменяя ускорение основания, измеряемое датчиком, ко-

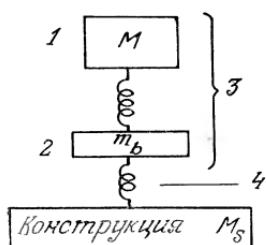


Рис. 11.6. Механическая модель акселерометра и его связи с конструкцией.

1 — чувствительная масса; 2 — основание+корпус; 3 — акселерометр; 4 — связь.

Примерами зависимости полосы пропускания (со спадом до 5 %), получаемой в пьезорезистивных акселерометрах с собственной частотой 12 кГц, от способа крепления могут служить:

- датчик на стальных шпильках, запрессованных в массу основания — 8 кГц;
- датчик на завинченных шпильках — 6 кГц;
- датчик, приклеенный эпоксидной смолой — 4,5 кГц;
- датчик, приклеенный двусторонней липкой лентой — 2 кГц.

*Состояние поверхности.* Общее правило, относящееся к любому способу крепления, состоит в том, что состояние поверхностей (датчика и конструкции) должно быть, по возможности, наиболее близким к идеальному. Это утверждение требует некоторых пояснений.

Частотные характеристики системы аналогичны сигналу самого акселерометра. Снижается только резонансная частота.

Слой смазки существенно улучшает соединение акселерометра с контролируемой конструкцией (см. таблицу).

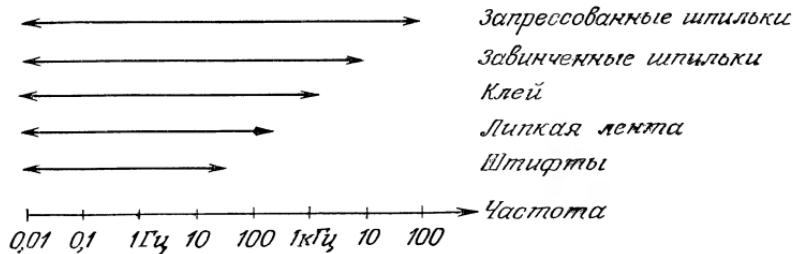


Рис. 11.7. Способы крепления, употребляемые в зависимости от рабочего диапазона частот.

торое становится нетождественным ускорению самой конструкции, т. е. истинного объекта измерения.

Эти ошибки, пренебрежимые при частотах до  $\sim 200$  Гц, затем становятся существенными, однако их, к сожалению, нельзя рассчитать с достаточной строгостью.

*Способ крепления.* Рассматривая только порядки величин и учитывая накопленный опыт, можно при выборе способа крепления, наиболее подходящего для того или иного диапазона частот измеряемой величины, руководствоваться графиком, представленным на рис. 11.7.

Состояние поверхности образца	Жесткость связи, $10^8 \text{ Н/м}$	
	Несмазанная поверхность	Смазанная поверхность
Шлифованная	6	15
Шероховатости до 5 мкм	5	11
Фрезерованная	3,5	10

Следует избегать посторонних элементов даже в ничтожном количестве: например, остатки железных опилок на шлифованной поверхности могут уменьшить полосу пропускания на 30%.

*Момент затяжки.* Момент затяжки является важным параметром. Обычно его можно узнать из указаний изготовителя.

Пример влияния момента затяжки на жесткость соединения для шлифованной поверхности:

Момент затяжки, Н·м	1	5	6
Жесткость, $10^8 \text{ Н/м}$	3,5	10	11

Через базовую опорную поверхность датчику могут передаваться механические напряжения: а) вызванные очень большим моментом затяжки; б) вызванные деформацией конструкции (эти напряжения более опасны, поскольку они в принципе могут иметь те же частоты, что и измеряемые ускорения).

Другие акселерометры, в отличие от пьезоэлектрических, вообще говоря, менее чувствительны к сжатию.

*Кривизна поверхности или неортогональность.* Если поверхность искривлена или ось крепления датчика неперпендикулярна контролируемой поверхности конструкции, выходной сигнал датчика представляет собой лишь часть истинной величины ускорения, и возникают эффекты, аналогичные влиянию плохого состояния поверхности.

### 11.2.3. Влияние датчика на измеряемую величину

Присутствие акселерометра массой  $M_c$  на конструкции массой  $M_s$  изменяет движение последней, т. е. измеряемую величину; возмущающая сила  $F$ , действующая на конструкцию, остается той же, как в присутствии, так и в отсутствие датчика, а ускорения  $\gamma$  и  $\gamma'$ , которые она сообщает конструкции в этих случаях, определяются из выражений

$$F = M_s \gamma = (M_s + M_c) \gamma',$$

откуда

$$\gamma' = \gamma M_s / (M_c + M_s).$$

Присутствие датчика уменьшает ускорение контролируемой конструкции.

Далее, поскольку конструкцию без датчика можно моделировать системой из массы  $M_s$  и пружины жесткостью  $C$  с одной степенью свободы, она имеет собственную частоту  $f_{0s} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/M_s}$ , а при наличии датчика собственная частота снижается до величины

$$f'_{0s} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/(M_s + M_c)} = f_{0s} \sqrt{M_s / (M_s + M_c)}.$$

На практике эти выражения являются лишь приближенными, так как конструкцию, испытывающую вибрационные колебания, редко можно представить системой с одной степенью свободы: необходимо учитывать не только статические массы  $M_c$  и  $M_s$ , но и динамические (эффективные) массы  $M_c$  и  $M_s$ , т. е. соотношение между силой, приложенной к акселерометру (с индексом  $c$ ) или к конструкции (с индексом  $s$ ), и вызываемым этой силой ускорением. Если для акселерометра в его рабочем диапазоне частот можно приблизенно приравнять  $M_c$  и  $M_s$ , то для объекта, на котором он установлен, это сделать нельзя; действительно, если имеется небольшое внутреннее демпфирование конструкции, оно приводит к появлению ряда узкополосных резонансов (при малых  $M_s$ ) и антирезонансов (при больших  $M_s$ ) (рис. 11.8). Чтобы оценить ошибку измерения при возникновении различных резонансов, масса датчика  $M_c$  должна быть сравнима по величине с  $M_s$ . Для измерения

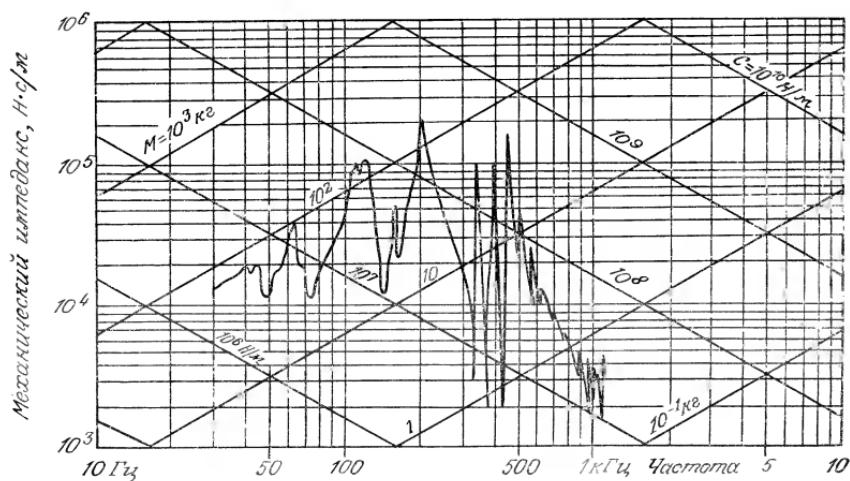


Рис. 11.8. Пример резонансов и антирезонансов сложной вибрирующей конструкции (данные фирмы Metravib).

$M_s$  необходимы датчик силы и датчик ускорения, тогда величина  $M_s$  определяется по отношению сигналов этих датчиков. Комбинированный датчик силы и ускорения называют импедансной головкой (рис. 11.9), ибо механический импеданс конструкции связан с величиной  $M_s$ . Импедансной головкой пользуются, когда необходимы точные измерения на легких конструкциях.

Кроме того, крепление акселерометра на небольшой и легкой детали может привести к локальному увеличению жесткости, что изменяет амплитуды и частоты резонанса. Кроме малой массы, датчик должен обладать малой опорной поверхностью по сравнению с поверхностью, на которой он крепится. На малых конструкциях следует устанавливать миниатюрные акселерометры с kleевым, а не резьбовым креплением.

Эти соображения приводят к определению параметра влияния акселерометра на измеряемую величину, как его массы, отнесенной к единице опорной поверхности, т. е. отношения в  $\text{г}/\text{см}^2$  массы  $M_c$  к площади опорной поверхности  $s$ . Однако этого понятия недостаточно для полной характеристики влияния датчика на результаты измерения, поскольку из рассмотрения исчезают полная масса датчика и размеры зоны крепления — факторы, оказывающие, очевидно, влияние на движение, которое необходимо измерить. Таким образом, предпочтительно выражать отношение  $M_c/s$  без приведения к единице поверхности.

В качестве примера укажем на пьезорезистивный акселерометр J312 фирмы JPB с демпфером, для которого влияние на измеряемую величину характеризуется величиной  $15 \text{ г}/2 \text{ см}^2$ .

#### 11.2.4. Поперечная чувствительность

Датчик обладает максимальной чувствительностью вдоль измерительной оси, но всегда существует и некоторая остаточная поперечная чувствительность, главной причиной которой является неидеальность совпадения монтажной оси с осью максимальной чувствительности (рис. 11.10, a). Располагая оси координат так, чтобы ось максимальной чувствительности лежала в плоскости  $y0z$ , для каждого направления можно определить коэффициент поперечной чувствительности

$$C_t = S_t/S_z = \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_2.$$

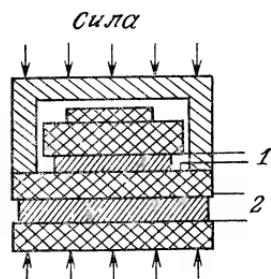


Рис. 11.9. Схема конструкции импедансной головки (конструкция фирмы Brüel & Kjaer).

1 — выходной сигнал ускорения; 2 — выходной сигнал силы.

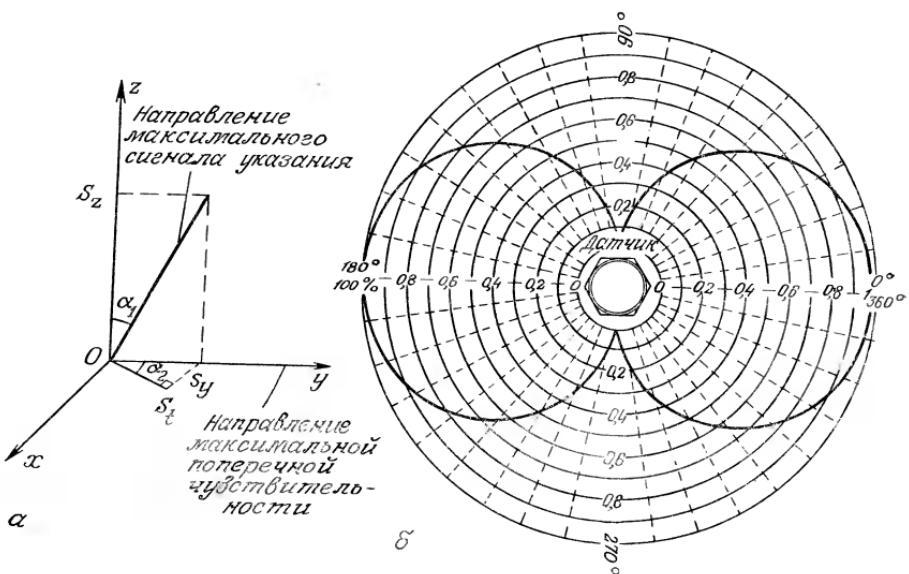


Рис. 11.10. Поперечная чувствительность (данные фирмы Brüel & Kjaer).  
 а — определение основных направлений; б — диаграмма направленности в зависимости от направления в плоскости основания  $xOy$ .

Он выражается в относительных величинах  $g/g$ . Например, поперечная чувствительность, равная  $0,1g/g$ , означает, что при поперечном ускорении  $1g$  вдоль оси  $y$  измерительный сигнал имеет такую же величину, как при ускорении  $0,1g$  вдоль главной оси ( $z$ ).

Особенностями поперечной чувствительности являются:

а) малая величина (меньше нескольких процентов продольной чувствительности), зависящая от технологии изготовления датчика;

б) зависимость от частоты, аналогичная по характеру зависимости чувствительности вдоль главной оси, но с резонансной частотой, примерно в три раза меньшей;

в) диаграмма направленности в опорной плоскости, состоящая (теоретически) из двух одинаковых окружностей (рис. 11.10, б) и позволяющая, по известным направлению и величине максимальной поперечной чувствительности, оценить чувствительность для любого другого поперечного направления.

Поперечная чувствительность акселерометра часто является источником существенных ошибок; с ней же, главным образом, связаны повреждение и даже разрушение датчика при воздействии нерасчетных перегрузок.

### 11.2.5. Меры предосторожности

Часто причиной повреждения акселерометров являются случайные удары.

При испытаниях на удар порядки величин частоты и амплитуды известны с достаточной точностью, что позволяет выбрать датчик с надлежащим диапазоном измерения. Напротив, во время транспортировки, при монтаже и обслуживании акселерометр может подвергнуться непредвиденным ударным воздействиям, уровень перегрузок для которых известен плохо и обычно недооценивается.

Пример, приведенный в табл. 11.3, показывает результаты серии опытов с пьезорезистивными акселерометрами, сбрасываемыми с различной высоты на площадку из различных материалов: а) лист многослойной фанеры толщиной 1 см, положенный на верстак; б) школьную тетрадь в 50 листов, положенную на плоскую поверхность верстака; в) стальную пластину толщиной 5 см, имитирующую измерительную плоскость вибрирующего объекта.

### 11.2.6. Градуировка

Методы градуировки акселерометров разделяются на три группы, в соответствии с применением их к датчикам постоянного, синусоидального или переходного ускорения.

**Постоянное ускорение.** Методы градуировки путем приложения постоянного ускорения, строго говоря, пригодны только в применении к датчикам и схемам преобразования, реагирующим на постоянную составляющую.

*Градуировка в поле тяготения.* Метод состоит в измерении сигнала, получаемого в случае, когда истинная ось чувствительности датчика ориентирована под углом  $\alpha$  относительно местной вертикали. При этом нужно очень хорошо знать местную величину ускорения силы тяжести. Точность градуировки существенно зависит от ошибок измерения выходного напряже-

Таблица 11.3. Амплитуда перегрузки, возникающей при ударе акселерометра о поверхность для случаев а, б, в

Высота сбрасывания, см	Амплитуда перегрузки, g/g		
	а	б	в
3	30	5	800
5	60	10	1500
8	140	30	2500
10	250	50	4000
20	450	90	8000

ния и величины угла  $\alpha$ , связанного с наличием поперечной чувствительности (разд. 11.2.4).

Если позволяет конструкция, осуществляют полуоборот, чтобы определить уровень выходного сигнала при начальных ускорениях  $\pm 1g$ ; этот метод практически очень удобен для быстрой поверки чувствительности системы перед началом измерения.

*Градуировка с применением центрифуги.* Этот метод позволяет проводить динамическую градуировку в широком диапазоне измерений (от 0 до 50 000 g). Центрифуга состоит из стола или штанги, вращающихся вокруг вертикальной оси и несущих акселерометр, ось чувствительности которого ориентирована по радиусу. Измерительный сигнал передается с помощью скользящего контакта или соответствующей телеметрической системы (разд. 10.5.1). Уровень ускорения, т. е. величину  $\gamma = \omega^2 r$ , можно регулировать, изменения угловую скорость  $\omega$  или расстояние  $r$  от оси вращения до центра тяжести  $G$  сейсмической массы. Точность определения величины  $\omega$  должна быть очень высокой. Напротив, точность определения величины  $r$  связана со знанием положения  $G$ , которое указывается изготовителем или может быть найдено с помощью двух последовательных измерений при одинаковой угловой скорости  $\omega$  и двух значениях  $r_1$  и  $r_2 = r_1 + \Delta r$  расстояния  $r$ . Обозначая выходные сигналы  $s_1$  и  $s_2$  и предполагая, что характеристика датчика линейна, получим

$$r_1 = s_1 \Delta r / (s_2 - s_1).$$

**Синусоидальное ускорение.** Осуществление градуировки датчика вибраций при синусоидальном ускорении производится с использованием электродинамического, пьезоэлектрического или механического возбуждения, амплитуду и частоту которого можно изменять (разд. 2.2, градуировка абсолютным методом или путем сравнения с эталонным датчиком). Движение должно очень точно следовать заданному закону (с минимальным искажением) и происходить в постоянном направлении; рабочий диапазон частот простирается от 10 Гц до более 10 кГц, но точность быстро уменьшается с ростом частоты. Амплитуду ускорения, меньшую 50g при классическом возбуждении, можно увеличить путем использования упругого элемента, работающего в резонансном режиме (например, при использовании гибкой штанги амплитуда ускорения достигает 4000 g). Амплитуда ускорения вычисляется по амплитуде движения, измеренной соответствующими средствами (датчиком перемещения, визирной трубой, лазерным интерферометром).

Упомянем также, для полноты изложения, метод взаимной градуировки, который сохранился практически только в спе-

Таблица 11.4. Области использования акселерометров и точность различных методов их градуировки

Области использования	Постоянное ускорение	Синусоидальные колебания						Переходное движение
		Абсолютные методы						
По частоте	По амплитуде, g	Угловое отклонение от местной вертикали	Центрирующая труба	Визирная труба	Датчик перемещения	Лазерный интерферометр	Взаимная градуировка	Сравнение с эталоном
						Счетчик полос	Исчезновение полос	
Постоянное ускорение	$0,01 \div 1$ $0,1 \div 50\ 000$	$< 1\%$	$< 1\%$	—	—	—	—	—
$5 \div 30\ \text{Гц}$	$0,1$ $0,01 \div 5$ $5 \div 40$	—	—	$2 \div 10\%$ $1 \div 5\%$	$2 \div 10\%$ $1 \div 5\%$	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$	—	$2 \div 10\%$ $2 \div 10\%$
$10 \div 1000\ \text{Гц}$	$0,01 \div 0,5$ $0,5 \div 5$ $5 \div 40$ $40 \div 100$	—	—	$2 \div 10\%$ $1 \div 5\%$	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$	$< 1\%$	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$
$1000 \div 5000\ \text{Гц}$	$0,5 \div 50$ $5 \div 40$ $40 \div 100$	—	—	—	—	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$	—	$1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$ $1 \div 5\%$
$5000 \div 10\ 000\ \text{Гц}$	$0,5 \div 100$	—	—	—	—	$1 \div 5\%$	—	$1 \div 5\%$
$0,5 \div 10\ \text{мс}$	$100 \div 20\ 000$	—	—	—	—	—	—	$2 \div 10\%$

циализированных лабораториях; в нем используются два датчика. Этот метод позволяет получить очень высокую точность, но он неприменим к датчикам, не обладающим механоэлектрической обратимостью, например, к потенциометрическим.

**Переходное движение.** Используются следующие классические средства градуировки:

а) простой маятник, несущий на конце стержня датчик, измерительная ось которого ориентирована в радиальном направлении; маятник освобождается, и при измерении определяется пиковый уровень, получаемый при первом колебании;

б) баллистический маятник, например, шарик, направляемый нитью и ударяющий по наковальне, к которой прикреплен акселерометр; измеряется (с помощью двух фотоэлементов или лазерным измерителем скорости) скорость, приобретенная наковальней, и ее отношение к интегралу выходного сигнала датчика, полученному вычислением или графическим интегрированием. Можно также производить такую градуировку путем сравнения с эталонным датчиком;

в) ударная машина со свободным падением или принудительным бросанием; методы измерения такие же, как для баллистического маятника.

**Достоверность градуировки.** Чтобы быть достоверной, градуировка должна осуществляться при использовании штатной измерительной схемы с креплением датчика на градуировочной установке, которое должно полностью имитировать реальные условия применения датчика (состояние поверхностей, моменты затяжки и т. д.). В табл. 11.4, составленной по образцу нормативного документа AFNOR E90-150, указаны характеристики, которые можно получать при различных способах градуировки, описанных выше<sup>1)</sup>.

### 11.3. Пьезоэлектрические акселерометры

#### 11.3.1. Принцип действия

В пьезоэлектрических акселерометрах сейсмическая масса закреплена на пьезоэлементе, создающем электрический заряд, пропорциональный восстанавливающей силе и, следовательно, перемещению сейсмической массы. Этот узел сделан заодно с жестким основанием, а весь блок заключен в герметичный корпус.

Обычно приходится измерять ускорения в обоих направлениях вдоль измерительной оси. Поскольку механические на-

<sup>1)</sup> В отечественных нормативных документах ГОСТ 8.138-84 и ГОСТ 8.476-82 приведены поверочные схемы для средств измерения перемещения, скорости и ускорения. — *Прим. перев.*

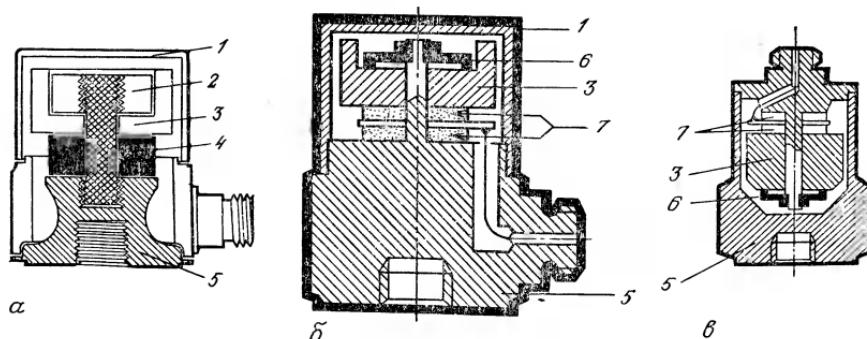


Рис. 11.11. Пьезоэлектрические акселерометры, работающие на сжатие в осевом направлении.

*a* — зажимка гайкой (фирма Endevco); *b*, *c* — поджатие с помощью пружины (фирма Brüel & Kjaer). 1 — кожух; 2 — гайка; 3 — масса; 4 — пьезоэлектрический элемент; 5 — основание; 6 — пружина; 7 — пьезоэлектрические элементы.

пряжения пьезоэлектрического материала и необходимых средств крепления (клей и т. п.) различны в зависимости от характера приложенных нагрузок (сжатие, растяжение, срез), часто бывает необходимым обеспечение защиты чувствительного элемента от механических нагрузок, чтобы получить требуемый диапазон измерений ускорения в двух направлениях.

Это реализуется различными способами, в зависимости от характера работы материала датчика (растяжение — сжатие, изгиб, тангенциальные нагрузки).

Электрические схемы формирования сигналов пьезоэлектрических датчиков рассмотрены в разд. 10.1.5.

**Пьезоэлектрические акселерометры, работающие на сжатие** (рис. 11.11). Особенности этих датчиков таковы: а) достаточна высокая резонансная частота, поскольку при работе на сжатие она соответствует очень большой жесткости пьезоэлектрического элемента (модулю сжатия); б) большая прочность; в) чувствительность к напряжениям, возникающим в основании (ее следует уменьшать, применяя массивное основание, механически отделенное от пьезокристалла: придаением основанию соответствующей формы — рис. 11.11, *a*, применением схемы с обратным расположением кристалла — рис. 11.11, *c*); г) чувствительность к пироэлектрическим эффектам, что требует применения средств компенсации или изоляции в неблагоприятных условиях эксплуатации датчика (измерения на очень низких частотах, при переменных температурах).

**Пьезоэлектрические акселерометры, работающие на срез** (рис. 11.12). Существуют следующие конструктивные схемы этих акселерометров:

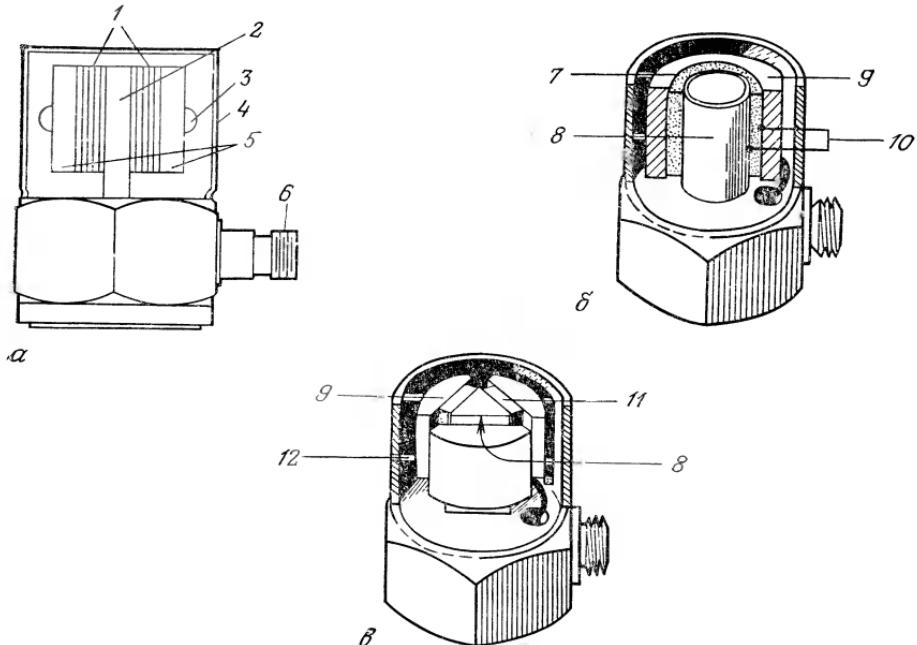


Рис. 11.12. Устройство пьезоэлектрических акселерометров, работающих на срез.

*a* — с набором пластинок (фирма Endevco); *б* — с трубчатым элементом; *в* — работа на срез  $\Delta$ -образного элемента (фирма Brüel & Kjaer). 1 — набор пластинок; 2 — опорная пластина; 3 — соединительные стержни и винты; 4 — герметично запаянный корпус; 5 — чувствительная масса; 6 — разъем; 7 — пьезоэлектрическая керамика; 8 — центральный стержень; 9 — масса; 10 — проводящие слои, нанесенные адгезией; 11 — пьезоэлектрический элемент; 12 — предварительно напряженное кольцо.

а) набор пьезоэлектрических пластинок, стянутых болтами между двумя металлическими деталями, служащими сейсмической массой (рис. 11.12, а);

б) пьезоэлектрический элемент кольцевой формы (рис. 11.12, б) или набор нескольких плоских элементов (рис. 11.12, в), тугу вставленный в зазор между периферийной сейсмической массой и центральным столбиком.

В силу особенностей конструкции акселерометрам, работающим на срез, свойственны:

а) малая чувствительность к напряжениям, возникающим в основании (основание и пьезоэлектрические элементы механически не связаны), и к термическим воздействиям (отсутствие первичных пироэлектрических эффектов, так как ось поляризации не перпендикулярна поверхностям, несущим заряды, а лежит в их плоскости;

б) некоторая хрупкость, связанная с характером работы материала пьезоэлектрика.

Кроме того, если схема с набором пластинок (рис. 11.12, а) может обеспечить очень высокую чувствительность, то схемы с круговой симметрией (рис. 11.12, б и в) лучше подходят для использования в точных механических приборах, поскольку они обеспечивают малую поперечную чувствительность и миниатюризацию, позволяющую минимизировать помехи измерениям (масса самых маленьких пьезоэлектрических акселерометров не превышает нескольких десятых грамма).

**Пьезоэлектрические акселерометры консольной схемы.** Принцип их действия состоит в использовании изгиба пары тонких, склеенных между собой пьезоэлектрических пластинок (рис. 11.13), на конце которых укреплен груз. Чувствительность акселерометров такой конфигурации может быть очень большой, особенно на резонансной частоте; область их применения ограничена вибрационными ускорениями небольшой величины и низкой частоты, где другие, не пьезоэлектрические акселерометры (правда, больших габаритов) имеют лучшие характеристики.

### 11.3.2. Метрологические характеристики

**Чувствительность и частотная характеристика.** Если обозначить  $\gamma$  — ускорение, которое испытывает датчик,  $z$  — относительное перемещение сейсмической массы и  $Q$  — возникающий при этом электрический заряд, то для чувствительности  $S$  получим выражение

$$S = Q/\gamma = S_1 S_2,$$

где  $S_1$  — механическая чувствительность системы с сейсмической массой,

$$|S_1| = |z/\gamma| = 1/\omega_0^2 \sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_0)^2},$$

$S_2$  — электрическая чувствительность пьезоэлектрического датчика,

$$|S_2| = \left| \frac{Q}{z} \right| = dC \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c/\omega)^2}},$$

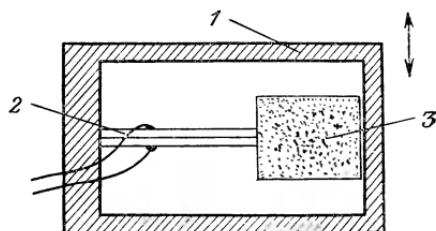


Рис. 11.13. Принцип действия пьезоэлектрического акселерометра консольной схемы.

1 — корпус; 2 — пьезоэлектрические пластины; 3 — чувствительная масса.

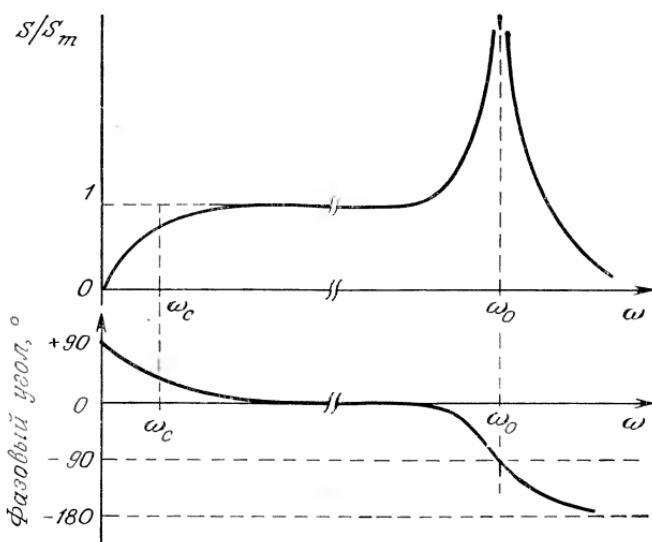


Рис. 11.14. Амплитудная и фазовая характеристики пьезоэлектрического акселерометра.

$d$  — пьезоэлектрическая постоянная,  $C$  — жесткость чувствительного элемента,  $\omega_c = 1/\tau$  — нижняя граничная частота системы датчик+электрическая схема (разд. 10.1.5). С учетом этих обозначений и выражений относительная чувствительность  $S/S_m$ , определяемая как отношение чувствительности к ее величине в середине частотного диапазона  $S_m = dC/\omega_0^2$  (рис. 11.14), описывается формулой

$$\left| \frac{S}{S_m} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c/\omega)^2}} \frac{1/\omega_0^2}{\sqrt{1 - (\omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}}.$$

Порядки величин (для датчиков, работающих на сжатие и на срез):  $S_m = 10 \div 100 \text{ пКл/g}$ ;  $f_0^m = \omega_0/2\pi = 10 \div 50 \text{ кГц}$ . Острому резонансу соответствует очень малая величина коэффициента демпфирования ( $\xi = 0,01 \div 0,02$ ), обусловленная малыми потерями энергии при механическом гистерезисе пьезоэлектрических материалов.

Нижняя граничная круговая частота с погрешностью  $< 5\%$  равна  $\omega_1 \approx 5\omega_c$ , а верхняя граничная круговая частота составляет  $\omega_2 \approx 0,2\omega_0$ .

Помехи, возникающие из-за возбуждения акселерометра при приближении к резонансу, исключаются с помощью фильтра — механического (специальная подвеска) либо электрического (в цепи усиления, разд. 10.1.5).

**Диапазон измерений, линейность.** Диапазон измерений ограничен:

снизу — электрическими шумами соединительного кабеля и усилителя, а также возможными пироэлектрическими эффектами; для акселерометров чувствительностью  $\sim 10 \text{ пКл/g}$  нижний предел составляет  $\sim 0,001 g$ ;

сверху — механической прочностью датчика (в зависимости от чувствительности обычно от 5000 до 10 000  $g$  и даже до 100 000  $g$  — акселерометры для мощных ударных импульсов).

В случае предварительно напряженных пьезоэлектрических акселерометров, работающих на сжатие, диапазон измерений определяется параметрами предварительного напряжения.

Причинами нелинейности характеристики пьезоэлектрического акселерометра являются:

а) собственная нелинейность пьезоэлектрического материала (изменение пьезоэлектрического коэффициента в зависимости от приложенного напряжения); она очень мала для кварца, а для пьезокерамических элементов может быть уменьшена использованием предварительного напряжения;

б) механическая нелинейность, связанная с пружиной предварительного напряжения (или эквивалентная нелинейность в случае прижима гайкой); она отсутствует в случае акселерометров, работающих на срез.

Нелинейность керамических пьезоэлектрических акселерометров проявляется в линейном ухудшении чувствительности от 0,5% (при работе на срез) до 5% (при сжатии гайкой) на 1000  $g$ .

### 11.3.3. Влияющие факторы

Здесь указаны факторы общего характера, влияющие на показания пьезоэлектрических датчиков.

**Температура.** Температура двояким образом воздействует на все пьезоэлектрические элементы: оказывают влияние как уровень температуры, так и ее изменение.

Величина температуры — важный параметр, влияющий на электрическую чувствительность датчика  $S_2$ , так как от нее зависит пьезоэлектрический коэффициент и, возможно, происходит также изменение механических параметров, определяющих коэффициент преобразования механических величин в электрические (например, изменение механического напряжения, вследствие температурной деформации деталей). При постоянной температуре это влияние на чувствительность можно не учитывать.

Изменение температуры пьезоэлектрического элемента влечет за собой возникновение электрических сигналов даже в

отсутствие вибрационных возмущений. Эти сигналы возникают вследствие механических напряжений, которым подвергается пьезоэлектрический элемент, например, из-за различного расширения деталей и вследствие пироэлектрического эффекта, обычно сопровождающего пьезоэлектрические явления.

Материалы, наименее подверженные влиянию температуры, обычно имеют и наименьшую чувствительность при использовании в акселерометрах: например, кварц по сравнению с материалами типа титаната — цирконата свинца имеет примерно в 50 раз меньшую чувствительность, но и в 20–50 раз меньший температурный коэффициент влияния. Осуществляется также компенсация путем применения материалов с разными температурными коэффициентами расширения.

Пироэлектрические сигналы очень низкой частоты (дрейф) ослабляются естественным образом фильтром схемы формирования сигнала, который пропускает только повышенные частоты. Это ограничивает возможности расширения полосы пропускания в сторону низких частот.

Для измерений на высокотемпературных конструкциях (до 2000 °C) используют акселерометры, опорное основание которых охлаждается принудительной циркуляцией жидкости.

Для очень точных измерений необходимо знать зависимость чувствительности прибора от температуры.

**Деградация характеристик.** Деградация — это необратимое изменение некоторых характеристик датчика под влиянием тех или иных факторов: времени, температуры, механических воздействий. Наиболее критичным в этом отношении параметром является собственно чувствительность акселерометра (частичная потеря поляризации материала).

Менее других материалов подвержен деградации кварц, который часто используется в датчиках, предназначенных для градуировки методом сравнения с эталоном.

Однако некоторые современные материалы также являются практически стабильными, и у датчиков, эксплуатируемых в нормальных условиях, обычно не происходит ухудшения характеристик в течение нескольких лет. Тем не менее, старение может иметь вредные последствия и приводить к существенной потере чувствительности, если датчик испытывает длительное тепловое воздействие (непрерывная эксплуатация при температуре, близкой к предельной температуре применения датчика). В других случаях периодическая поверка позволяет частично устранять эффекты временных дрейфов или случайных перегрузок.

**Шумы, вызванные соединительным кабелем.** Соединительный кабель может быть источником шума под влиянием различных механических и тепловых факторов. Действительно,

деформации изоляции или движения изоляции относительно проводников порождают движения заряда, главным образом, под влиянием трибоэлектрических эффектов и даже пьезоэлектрических и пироэлектрических явлений, а также из-за изменения пространственного распределения емкостей.

Шумы можно уменьшить, если кабель на участке возмущений жестко скрепить с вибрирующей конструкцией. Когда жесткое скрепление осуществить невозможно (например, в случае сильно нагретых поверхностей), предпочтительно пользоваться акселерометром с верхним подсоединением кабеля.

Проблемы помех от соединительного кабеля не возникают, когда миниатюризованная схема формирования сигнала объединена с датчиком в один конструктивный блок. Однако акселерометры такого типа, называемые акселерометрами со встроенной электроникой, вносят дополнительные искажения в контролируемый процесс, а их стойкость к воздействию температуры и ударов лимитируется электронной частью.

**Шумы, вызываемые акустическим давлением.** Влияние акустических шумов может быть существенным при измерениях малых ускорений в акустическом поле большой интенсивности. Кроме прямого действия на пьезоэлектрический элемент, следует предотвращать действие на акселерометр акустических возмущений через недостаточно жесткие опорное основание и корпус. Датчики, в которых пьезоэлектрические элементы и система корпус — основание хорошо изолированы друг от друга, существенно менее чувствительны к акустическим шумам (к ним относятся акселерометры, работающие на срез). Уровень рассматриваемых помех можно проиллюстрировать тем фактом, что при уровне звукового давления 100 дБ паразитный сигнал пьезоэлектрического акселерометра составляет около 0,1 g.

**Уход нуля.** Это явление свойственно керамическим акселерометрам. Когда такой датчик испытывает удар, после исчезновения измеряемой величины остается малый электрический сигнал (уход нуля), уменьшение которого происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени, характеризующей систему датчик+электросхема. Ненулевой сигнал остается как бы вследствие продолжения действия измеряемой величины. Это явление объясняется некоторой деполяризацией керамики из-за перегрузки; последняя может возникать при возбуждении акселерометра на резонансной частоте, где усиление заметно выше, например, вследствие резкого ступенчатого импульса (даже если его величина остается в пределах диапазона измерений).

Уход нуля не оказывает существенного влияния на чувствительность. Иногда она уменьшается, но лишь временно, когда

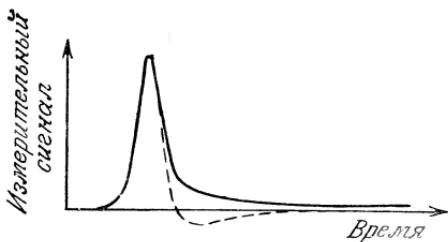


Рис. 11.15. Характеристики ухода нуля и электрического дрейфа для акселерометра с керамическим пьезоэлектрическим элементом.

— уход нуля; — — — электрический дрейф.

граничения полосы пропускания со стороны низких частот; в противоположность уходу нуля, электрическое смещение проявляется после прекращения ударного импульса в виде напряжения обратной полярности по отношению к полярности, соответствующей измерительному сигналу (рис. 11.15).

## 11.4. Пьезорезистивные акселерометры

### 11.4.1. Принцип действия

Сейсмическая масса акселерометра  $M$  выполняется заодно с пластинчатой пружиной, оснащенной двумя или четырьмя пьезорезистивными тензодатчиками, смонтированными по схеме моста Уитстона. Изгиб пластины вызывает деформацию тензодатчиков либо непосредственно (акселерометры низких частот), либо косвенно — в сочетании с механическим усилением (акселерометры средних частот и для измерения ударных импульсов).

### 11.4.2. Метрологические характеристики

**Чувствительность. Частотная характеристика.** Как показано в разд. 11.1.3, чувствительность можно записать как

$$S = S_2 S_1 = (V_m / \varepsilon) (\varepsilon / \gamma),$$

где  $S_2 = V_m / \varepsilon$  — электрическая чувствительность моста Уитстона, образованного четырьмя тензодатчиками. Когда деформации одинаковы, выходное напряжение моста имеет вид

$$V_m = e_s (\Delta R / R) = e_s K \varepsilon,$$

откуда

$$S_2 = K e_s,$$

где  $e_s$  — напряжение питания моста (на практике  $e_s \approx 10 \div 15$  В);  $K$  — коэффициент преобразования тензодатчиков (в зависимос-

акселерометр подвергается повторным ударам. Для акселерометров, измеряющих ударные импульсы, уход нуля не превышает  $1 \div 2\%$  пиковой амплитуды даже у нижней границы диапазона измерений.

Это явление не следует смешивать с электрическим смещением, возникающим вследствие ог-

стороны низких частот; в

противоположность уходу нуля, электрическое смещение про-

является после прекращения ударного импульса в виде напря-

жения обратной полярности по отношению к полярности, соот-

ветствующей измерительному сигналу (рис. 11.15).

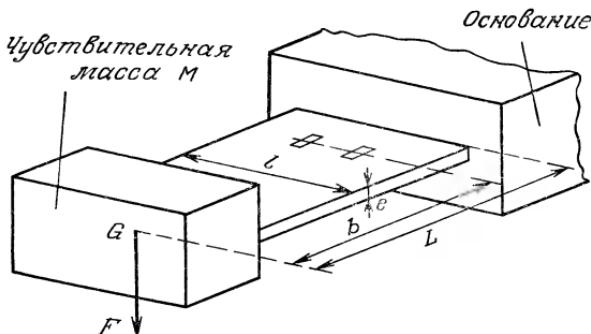


Рис. 11.16. Принцип действия пьезорезистивного акселерометра.

ти от типа датчика  $K \approx 50 \div 150$ );  $R$  — сопротивление тензодатчика ( $R \approx 350 \div 500$  Ом).

Величина  $S_1 = \varepsilon/\gamma$  характеризует реакцию механической части акселерометра; она определяется выражением

$$S_1 = \frac{A}{\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_0)^2}}.$$

Величины  $A$  и  $\omega_0$  вычисляют по результатам измерений датчиками силы, работающими на изгиб (разд. 10.3.2, табл. 10.3).

В качестве примера укажем характеристики датчика, представленного схематически на рис. 11.16: поверхностная деформация плоской пружины на уровне тензодатчиков  $\varepsilon = -6Fb/Yle^2$ ; провес (перемещение центра тяжести  $G$ )  $f = -4FL^3/Yle^3$ ; статическая жесткость  $C = \text{Сила}/\text{Провес} = Yle^3/4L^3$ ; собственная круговая частота  $\omega_0 = \sqrt{C/M} = \sqrt{Yle^3/4L^3M}$ , где  $Y$  — модуль Юнга плоской пружины, а  $l$ ,  $b$ ,  $e$ ,  $L$  — геометрические размеры, указанные на рис. 11.16.

Для статического ускорения  $\gamma = F/M$  (при  $\omega = 0$ ) получаем

$$S_1|_{\omega=0} = \frac{A}{\omega_0^2} = \frac{6bM}{Yle^2}$$

и

$$A = 1,5 \frac{be}{L^3}.$$

**Полоса пропускания.** Практически рабочая полоса пропускания пьезорезистивного акселерометра простирается от 0 до  $1/4$  резонансной частоты для акселерометров с критическим коэффициентом демпфирования ( $\xi = 1$ ) или от 0 до  $1/10$  резонансной частоты для слабодемпфированных акселерометров ( $\xi = 0,05$ ). Желательно, чтобы: а) акселерометры для измерения постоянного и низкочастотного ускорения имели критический коэффициент демпфирования; б) акселерометры для из-

мерения постоянного и среднечастотного ускорения имели в периодическом режиме коэффициент демпфирования, близкий к критическому; в) акселерометры для измерения высокочастотного ускорения и ударного импульса не были демпфированы (периодический режим).

**Практические замечания.** 1. Добротность пьезорезистивных акселерометров, как и пьезоэлектрических, определяется выражением

$$\beta = Sf_0^2 = \text{const},$$

где  $S$  — чувствительность, а  $f_0$  — собственная частота.

Отсюда следует, что акселерометр определенной конструкции и технологии не может обладать одновременно высокой чувствительностью и широкой полосой пропускания (разд. 11.1.3). Если требуется измерить высокочастотные ускорения и получить достаточный уровень выходного сигнала, необходимо использовать маятниковые системы с механическим усилителем.

2. Чем больше демпфирование акселерометра, тем больше возникающий при этом сдвиг фаз.

**Влияние температуры.** Оно проявляется трояко.

**Влияние на уход нуля.** В пьезорезистивных акселерометрах, измеряющих и постоянную составляющую, необходимо учитывать тепловое смещение нуля. Оно составляет, по порядку величины, 1% от диапазона измерений (Д.И.) при изменении температуры на 50 °C.

**Влияние на чувствительность.** Из-за изменения модуля Юнга и коэффициента преобразования тензодатчика под воздействием тепла чувствительность уменьшается с повышением температуры. Коэффициент влияния составляет  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  номинальной чувствительности на 1 °C. Соответствующая погрешность может достигать нескольких процентов чувствительности при 20 °C, но эта ошибка воспроизводима, так что ее можно частично скорректировать соответствующим пересчетом.

**Изменение коэффициента демпфирования.** Пьезорезистивные акселерометры демпфируются силиконовым маслом. Кинематическая вязкость масла с повышением температуры уменьшается и поэтому снижается коэффициент демпфирования. Например, в рабочем диапазоне температур (от -25 °C до +100 °C) коэффициент демпфирования пьезорезистивного акселерометра изменяется вдвое при изменении температуры от -5 °C до 50 °C.

**Мощность выходного сигнала.** Чувствительность пьезорезистивного акселерометра выражается в мВ/В/g, но обычно указывают выходной сигнал в мВ/В для максимального значения измеряемого ускорения (верхняя граница диапазона измере-

ний). Порядок величины выходного сигнала составляет  $20 \text{ мВ/В}$  для максимального ускорения. Выходная мощность имеет порядок  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$ .

Эта мощность, а также малое выходное сопротивление моста ( $\sim 350 \text{ Ом}$ ) — важные достоинства таких датчиков.

### 11.4.3. Устройство

Технология изготовления и устройство акселерометров зависят от условий применения, для которых предназначены акселерометры.

**Акселерометры для измерения постоянных и низкочастотных ускорений.** Эти акселерометры демпфируются вязкой рабочей жидкостью (силиконовым маслом). Полоса их пропускания с неравномерностью до  $\pm 10\%$  простирается от 0 до  $\sim 1000 \text{ Гц}$ , а диапазон измерений заключен между  $1g$  и  $500g$ . Выходной сигнал составляет  $50 \div 100 \text{ мВ}$  при номинальном напряжении источника питания, так что добротность имеет порядок  $5 \cdot 10^2 \text{ В} \cdot \text{г}^{-1} \text{ Гц}^2$ .

Пример устройства такого акселерометра приведен на рис. 11.17. Назначение разъединительных вырезов состоит в переносе инерционной массы к периферии пластины, чтобы уменьшить влияние паразитных поперечных ускорений. Пластины изготавливаются из нержавеющей стали или сплава меди с бериллием (бериллиевая бронза).

Сейсмическая масса выполнена из стали или отожженного вольфрамового сплава. Для демпфирования пластина размещается в камере, заполненной силиконовым маслом. Площадь поверхности пластины существенно влияет на эффективность демпфирования.

Низкочастотный акселерометр J505 100g фирмы JPB имеет

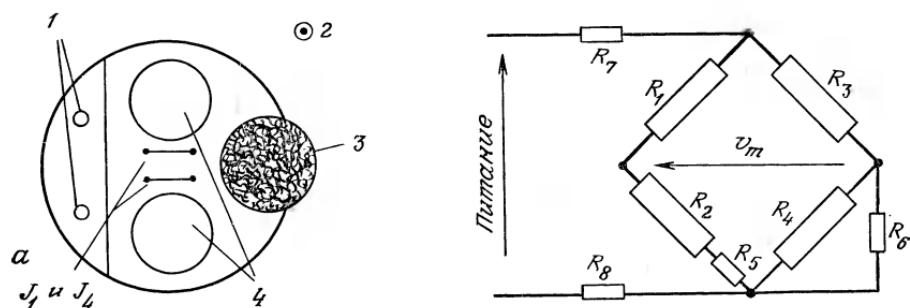


Рис. 11.17. Пьезорезистивный акселерометр для измерений на низких частотах (материалы фирмы JPB).

1 — отверстия для жесткого закрепления; 2 — ось чувствительности; 3 — чувствительная масса; 4 — разъединительные вырезы;  $J_1, J_4$  — тензодатчики прямого действия;  $J_2, J_3$  — тензодатчики обратного действия;  $R_5, R_6$  — компенсация теплового ухода нуля;  $R_7, R_8$  — компенсация теплового изменения чувствительности.

следующие метрологические характеристики: диапазон измерения  $100\text{ g}$ ; отклонение от линейности  $\pm 0,2\%$  от Д.И.; гистерезис  $0,3\%$  от Д.И.; порог разрешения  $1 \cdot 10^{-5}$  от Д.И.; параметры влияния датчика на измеряемую величину — поверхностная плотность  $16\text{ г}/\text{см}^2$ , масса  $55\text{ г}$ ; область неразрушающих перегрузок — 10-кратный запас по отношению к верхнему пределу диапазона измерений; поперечная чувствительность  $0,05\text{g/g}$ ; собственная частота  $1200\text{ Гц}$ ; полоса пропускания (с неравномерностью  $10\%$ )  $0 \div 200\text{ Гц}$ ; номинальный коэффициент демпфирования  $0,7$ ; выходной сигнал на верхней границе диапазона измерений  $50\text{ мВ}$  (при номинальном питающем напряжении  $15\text{ В}$ ); коэффициент добротности  $\sim 7 \cdot 10^2\text{ В}\cdot\text{г}^{-1}\text{ Гц}^2$  при номинальном питающем напряжении. Области применения: измерение коэффициентов нагрузки, инклинометрия; измерение постоянных ускорений; измерение вибраций с частотой до  $1\text{ кГц}$ ; управление вибростендами; исследование подвески и условий транспортировки; пороговое детектирование уровня низкочастотных ускорений; измерение поперечных ускорений рельсовых транспортных средств.

**Пьезорезистивные акселерометры общего применения и для измерения ускорений на средних частотах.** Эти акселерометры предназначены для работы в диапазоне частот  $0 \div 10\text{ кГц}$ ; они позволяют измерять: а) постоянные ускорения; б) постоянные ускорения в сочетании с режимами вибрационных колебаний амплитудой от нескольких  $\text{g}$  до  $1000\text{g}$  и с полосой пропускания (с неравномерностью  $\pm 10\%$ ) от постоянного ускорения до  $10\,000\text{ Гц}$ .

**Принцип действия.** В этих акселерометрах используется механический усилитель (или преобразователь), входящий в общий блок прибора (рис. 11.18); назначение усилителя состоит в умножении деформации тензодатчиков (т. е. и чувствительности) без увеличения отклонений сейсмической массы или уменьшения жесткости упругой плоской пластины и, следовательно, собственной частоты.

Два тензодатчика жестко закрепляются своими концами по обе стороны боковых вырезов в теле пластины, ширина которых  $\lambda$  изменяется на  $\pm\Delta\lambda$  под воздействием силы инерции, приложенной к центру тяжести  $G$ . Для одного и того же отклонения  $\Delta\theta$  центра тяжести  $G$ , т. е. для одного и того же  $\Delta\lambda$ , относительная деформация тензодатчиков тем больше, чем меньше  $\lambda$ .

Пьезорезистивные тензодатчики, в зависимости от типа, имеют номинальную длину от  $0,8\text{ мм}$  (тип  $E$ ) до  $6,5\text{ мм}$  (тип  $L$ ). Для таких датчиков при изменении  $\Delta\lambda \approx 1\text{ мм}$  имеем  $\Delta\lambda/\lambda \approx \approx 0,15 \cdot 10^{-3}$  (тензодатчик типа  $L$ ) и  $\Delta\lambda/\lambda \approx 1,25 \cdot 10^{-3}$  (тензодатчик типа  $E$ ).

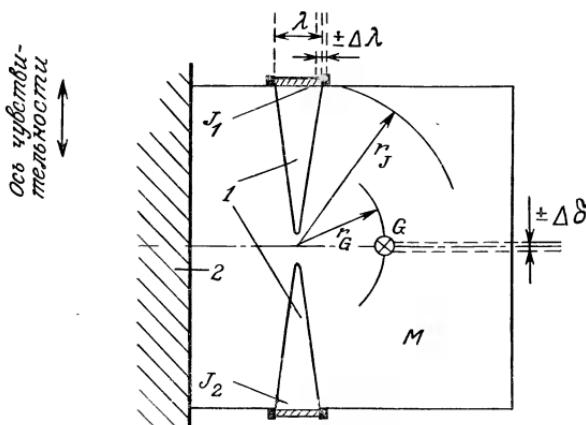


Рис. 11.18. Принцип действия пьезорезистивного акселерометра с механическим усилением для измерений на средних частотах.

1 — вырезы; 2 — жесткое крепление.

Далее, отношение отклонения  $\Delta\delta$  центра тяжести к удлинению  $\Delta\lambda$  тензодатчиков может достигать  $5 \div 10$ :

$$\Delta\lambda/\Delta\delta = r_J/r_G,$$

где  $r_J$  и  $r_G$  — радиусы вращения соответственно точки анкерного крепления тензодатчиков и центра тяжести сейсмической массы.

В результате при заданной собственной частоте общее повышение чувствительности может достигать  $10^2$ .

В качестве примера приведем характеристики среднечастотного акселерометра J212-100 g фирмы JPB: диапазон измерения 100 g; отклонение от линейности  $\pm 0,2\%$  от Д.И.; гистерезис 0,2% от Д.И.; порог разрешения  $1 \cdot 10^{-5}$  от Д.И.; параметры обратного влияния датчика — поверхностная плотность  $7,5 \text{ г/см}^2$ , масса 15 г; перегрузка — четырехкратный запас по верхнему пределу Д.И.; поперечная чувствительность  $0,01g/g$ ; собственная частота 7000 Гц; номинальный коэффициент демпфирования  $\sim 0,7$ ; выходной сигнал на верхней границе диапазона измерений 50 мВ (при номинальном питающем напряжении 15 В); коэффициент добротности  $5 \cdot 10^4 \text{ Bg}^{-1} \text{ Гц}^2$  при номинальном питающем напряжении (этот коэффициент добротности приблизительно в 100 раз больше, чем у низкочастотного акселерометра, описанного на стр. 103).

**Пьезорезистивные акселерометры для измерения ударных импульсов.** Анализ характеристики отклика акселерометров, измеряющих ударные импульсы, сделан в разд. 11.2.1.

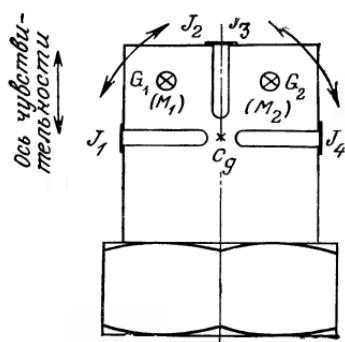


Рис. 11.19. Схема пьезорезистивного акселерометра для измерения ударных импульсов.

$C_g$  — центр вращения  $M_1$  и  $M_2$ .

По принципу действия пьезорезистивные акселерометры для измерения ударных импульсов не отличаются от среднечастотных. Необходима большая тщательность при их монтаже (идеальное состояние установочной поверхности, большая жесткость крепления), чтобы избежать любого уменьшения полосы пропускания.

Демпфирование слабое (коэффициент добротности  $\sim 50$ ). Симметрия конфигурации такого акселерометра (рис. 11.19) позволяет улучшить стойкость к резким ударам. Ускорение, направленное вдоль оси чувствительности, вызывает силу реакции, действующую на сейсмические массы  $M_1$  и  $M_2$ . Перемещение центров их

тяжести  $G_1$  и  $G_2$  в направлении стрелок влечет за собой деформацию ё тензодатчиков  $J_1$  и  $J_4$ , а датчики  $J_2$  и  $J_3$  испытывают противоположную по знаку деформацию — ё. Схема включения тензодатчиков такая же, как на рис. 11.17. Получаемое в результате механическое усиление имеет такой же порядок величины, как у акселерометров, предназначенных для измерений на средних частотах.

Ниже в качестве примера приводятся метрологические характеристики акселерометра типа J313-25 000 g фирмы JPB, предназначенного для измерения ударных импульсов: диапазон измерений 25 000 g; допустимая перегрузка 75 000 g; отклонение от линейности  $\pm 0,4\%$  от Д. И.; гистерезис  $\pm 0,3\%$  от Д. И.; порог разрешения  $1 \cdot 10^{-5}$  от Д. И.; параметры обратного влияния датчика — поверхностная плотность 20 г/см<sup>2</sup>, масса 40 г; поперечная чувствительность 0,03 g/g; собственная частота 170 000 Гц; демпфирование — коэффициент добротности свыше 50; выходной сигнал на верхней границе диапазона измерений 50 мВ (при номинальном питающем напряжении 15 В); добротность  $6 \cdot 10^4$  В g<sup>-1</sup> Гц<sup>2</sup> (при номинальном питающем напряжении 15 В).

Важными достоинствами акселерометров для измерения ударных импульсов являются способность измерять ударные импульсы с постоянной составляющей (например, импульсы трапециевидного типа) и отсутствие нижней частоты среза (следовательно, надежное возвращение всей энергии, использованной за время удара).

Такие акселерометры применяются при испытаниях вооружения (артиллерийских орудий), пневматических и гидравли-

ческих машин ударного действия, для измерения механических ударных волн и, путем двукратного интегрирования, для определения перемещения деталей в процессе удара.

#### 11.4.4. Вспомогательное оборудование

Назначение схемы формирования сигнала пьезорезистивного акселерометра состоит в питании акселерометра и обеспечении соответствующей мощности в цепи обработки сигнала (рис. 11.20).

В такую схему входят: источник питания постоянного напряжения или постоянного тока для моста Уитстона (разд. 8.9.1); цепи начальной балансировки моста, составленного из датчиков (разд. 8.9.1); устройство градуировки измерительного канала; усилитель с дифференциальными входами, предназначенный для приведения уровня электрических сигналов, формируемых в измерительной диагонали, к требуемому уровню (разд. 4.3); соединительный кабель.

**Начальная балансировка моста.** Она имеет целью аннулировать перед началом испытаний постоянное напряжение, появляющееся на клеммах измерительной диагонали. Это напряжение обусловлено главным образом тем, что даже в отсутствие всякого механического напряжения электрические сопротивления всех тензодатчиков не в точности равны друг другу.

Пусть, например, мост Уитстона образован четырьмя тензодатчиками пьезорезистивного акселерометра, сопротивление одного из которых (без нагрузки) равно  $R+r$ , т. е. отличается от сопротивления  $R$  трех других тензодатчиков (рис. 11.21, а). Очевидно, предполагается, что  $r \ll R$ .

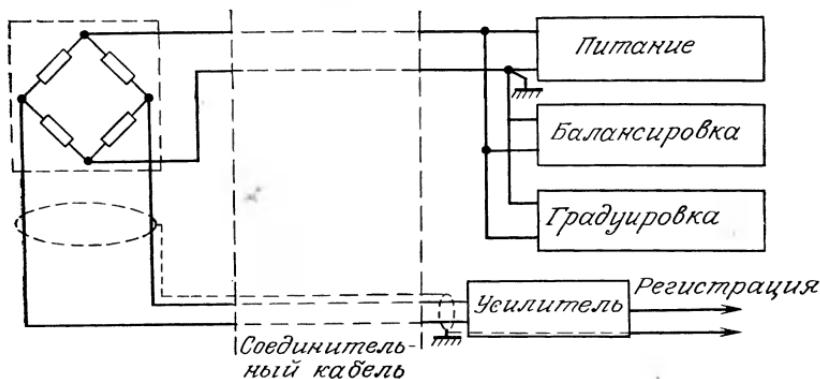


Рис. 11.20. Блок-схема электрической измерительной системы пьезорезистивного акселерометра.

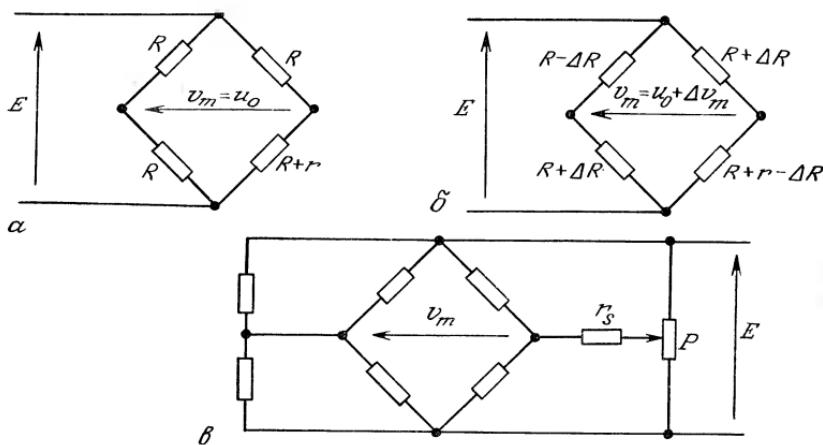


Рис. 11.21. Мост Уитстона с начальным разбалансом.

*а* — датчик не включен, только начальный разбаланс; *б* — начальный разбаланс наложен на измерительный сигнал; *в* — схема компенсации.

В отсутствие ускорения, действующего на датчик, на клеммах измерительной диагонали существует напряжение

$$V_m = u_0 \approx -(E/4)(r/R).$$

Если при действии ускорения сопротивление каждого из тензодатчиков изменяется на  $\pm\Delta R$  (рис. 11.21, *б*), то напряжение  $V_m$  изменяется на величину  $\Delta V_m$ :

$$\Delta V_m = E (\Delta R / 2R + \Delta R / (2R + r)).$$

Чувствительность моста определяется выражением

$$S'_p = \frac{\Delta V_m}{\Delta R / R} = \frac{E}{2} \left( 1 + \frac{1}{1 + r/2R} \right).$$

В отсутствие начального разбаланса ( $r=0$ ) чувствительность равна

$$S_p = E.$$

Отсюда можно вывести выражение для относительной ошибки измерения:

$$\delta = \frac{S'_p - S_p}{S_p} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{1 + r/2R} \right) - 1 \approx -\frac{r}{4R} = \frac{u_0}{E}.$$

Процесс измерения осуществляется так, как если бы ускорение измерялось датчиком, имеющим погрешность  $\delta$  (например, при  $E=10$  В и  $u_0=2,5$  мВ имеем  $\delta=0,25\%$ ). Поэтому ба-

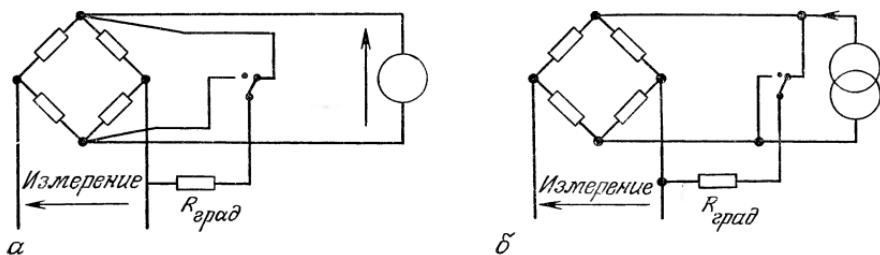


Рис. 11.22. Градуировка измерительного канала с помощью включенного параллельно сопротивления.

*а* — питание моста постоянным напряжением; *б* — питание моста постоянным током.

балансировка моста состоит в приведении  $u_0$  к нулю с помощью схемы, показанной на рис. 11.21, *в*.

Точность балансировки определяется разрешающей способностью потенциометра  $P$  и диапазоном компенсации, зависящим от величины омического сопротивления  $r_s$ .

**Градуировка измерительного канала.** Ускорение, действующее на датчик, может моделироваться двумя возможными методами.

1. *Пассивная градуировка.* Она достигается параллельным включением большого сопротивления  $R_{\text{град}}$ , известного с высокой точностью. Оно включается параллельно одному из плеч моста с помощью двух дополнительных измерительных проводов, когда мост питается от источника напряжения (рис. 11.22, *а*) или непосредственно от источника тока (рис. 11.22, *б*).

Если  $S$  — чувствительность датчика в  $\text{В} \cdot \text{В}^{-1} \text{g}^{-1}$ ,  $\gamma$  — величина ускорения (в  $\text{g}$ ), которую нужно моделировать, а  $R$  — сопротивление одного плеча моста, то можно вычислить необходимую величину  $R_{\text{град}}$ :

$$R_{\text{град}} = \frac{R}{4} \left( \frac{1}{S\gamma} - 2 \right).$$

2. *Активная градуировка.* Такая градуировка осуществляется включением в измерительный канал переменного напряжения  $V$ , создаваемого генератором (рис. 11.23). Выходные клеммы генератора должны быть изолированы от его массы. Моделируемое ускорение выражается формулой

$$\gamma = V/SE.$$

**Соединительный кабель.** При измерении процессов с частотой, превышающей 5000 Гц, следует отказаться от применения акселерометров со штепельным соединением. Предпочтитель-

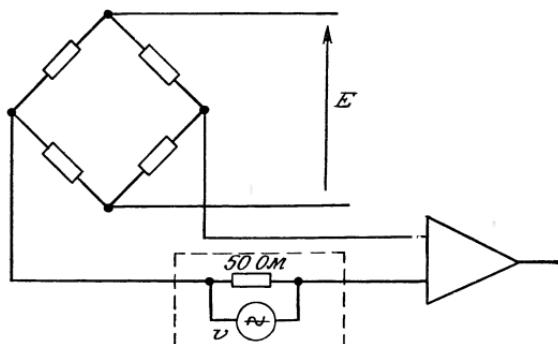


Рис. 11.23. Градуировка измерительного канала с помощью генератора.

но пользоваться датчиком со встроенным кабелем (рис. 11.24, а).

Пьезорезистивный акселерометр всегда используется с соединительным кабелем, состоящим из 4 экранированных и изолированных проводов (рис. 11.24, б). Наличие кабеля приводит к изменению передаваемого сигнала, поступающего на вход, которое зависит от длины кабеля и частоты сигнала.

На постоянном токе и при низких частотах ( $100 \div 200$  Гц) ослабление сигнала определяется соотношением (рис. 11.25, а)

$$V_e/e_{\text{экв}} = R_i / (R_{\text{экв}} + R_i + 2R_l),$$

где  $e_{\text{экв}}$ ,  $R_{\text{экв}}$  — э. д. с. и внутреннее сопротивление генератора, эквивалентного мосту Уитстона (теорема Тевенина),  $R_i$  — входное сопротивление схемы формирования сигнала,  $R_l$  — сопротивление кабеля.

При достаточно высоких частотах можно представить кабель некоторой единичной емкостью  $C$ . Структура схемы в

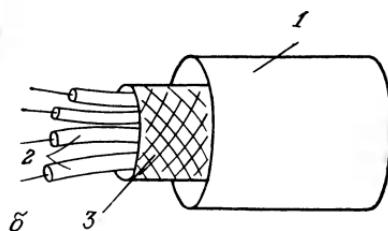


Рис. 11.24. Электрическое соединение пьезорезистивного акселерометра.

*a* — датчик со встроенным соединительным кабелем (фирма JPB); *б* — деталь кабеля. 1 — изоляция; 2 — изолированные провода; 3 — экранировка.

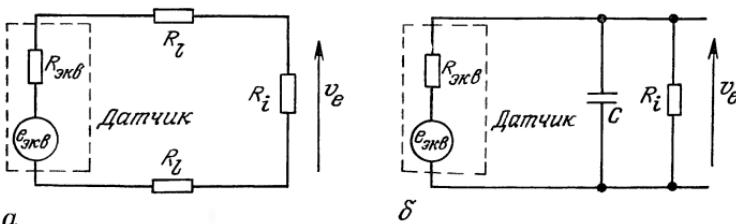


Рис. 11.25. Влияние соединительного кабеля на пьезорезистивный акселерометр.

*а* — схема для измерения постоянных и низкочастотных ускорений; *б* — схема для измерения высоких частот.

этом случае аналогична фильтру нижних частот (рис. 11.25, *б*) с частотой среза

$$f_c = 1 / \{2\pi C [R_{экб} R_i / (R_{экб} + R_i)]\}.$$

При частоте  $f = n f_c$  ослабление сигнала составляет 1 дБ для  $n=0,5$ , 3 дБ для  $n=1$ , 12 дБ для  $n=4$  (разд. 2.4.3, рис. 2.4).

Когда длина кабеля велика, можно питать акселерометр не от источника постоянного напряжения, а от источника постоянного тока, чтобы исключить влияние сопротивления питающей линии.

#### 11.4.5. Сравнение с акселерометрами других типов

Область применения пьезорезистивных акселерометров находится между областями применения следящих акселерометров и пьезоэлектрических акселерометров, далеко проникая в каждую из них.

**Достоинства пьезорезистивных акселерометров.** Используя, по существу, резистивные датчики с малым импедансом, эти акселерометры мало чувствительны к паразитным внешним воздействиям и возмущениям окружающей среды. Для проведения измерений достаточно лишь небольшого усиления ( $10 \div 100$ ).

Электрическое соединение обеспечивается кабелем с четырьмя изолированными и экранированными проводниками, поэтому не возникают трибоэлектрические явления, свойственные некоторым коаксиальным кабелям.

Пропускание постоянной составляющей, кроме пригодности для измерения монотонных ускорений и ускорений с очень низкой частотой, облегчает градуировку и испытания совместно с системами, создающими постоянные ускорения.

Отсутствует опасность больших уходов нуля после резких ударов. Влияние момента затяжки на уход нуля и чувствитель-

ность незначительно. Достоинствами пьезорезистивных акселерометров являются также большая выходная мощность ( $\sim 0,1$  мВт) и возможность миниатюризации.

**Недостатки пьезорезистивных акселерометров.** К недостаткам пьезорезистивных акселерометров относятся: а) меньшая, чем у пьезоэлектрических акселерометров, допустимая нерасчетная перегрузка; б) трудности реализации датчиков с очень узким диапазоном измерений (обычно минимальный диапазон измерений имеет порядок  $\pm 1 g$ ); в) значительно меньшие точность и чувствительность, чем у следящих систем; г) необходимость иметь источник питания.

Способность измерять постоянную составляющую вызывает уходы нуля при механических и тепловых воздействиях, которые не воспринимаются пьезоэлектрическими датчиками.

### 11.5. Акселерометры, основанные на измерении перемещения

Перемещение сейсмической массы относительно корпуса акселерометра измеряется потенциометрическим или индуктивным датчиком либо оптическим методом (движение сейсмической массы приводит к перемещению связанного с ней зеркала).

#### 11.5.1. Демпфирование

**Реализация.** Демпфирование обычно осуществляется протеканием воздуха или масляной пленки между сейсмической массой и корпусом. Оно может быть обеспечено также устройством типа «буферного амортизатора», напоминающего систему поршня в цилиндре; в этом случае демпфирование происходит в результате сочетания сжатия газа и его течения между поршнем и цилиндром.

Важно отметить, что каково бы ни было техническое устройство акселерометра, коэффициент демпфирования может изменяться вследствие изменения вязкости масла с изменением температуры, а также высыхания смазки с течением времени. В некоторых конструкциях этими изменениями можно пренебречь или компенсировать их; в противном случае их влияние необходимо учитывать при выборе акселерометра или при измерениях.

Демпфирующее устройство, в котором используется ламинарное течение газа (например, между сейсмической массой и корпусом), практически невозможно регулировать, ибо регулирование связано с вязкостью газа или с разностью диаметров сейсмической массы и корпуса. Для регулирования в сей-

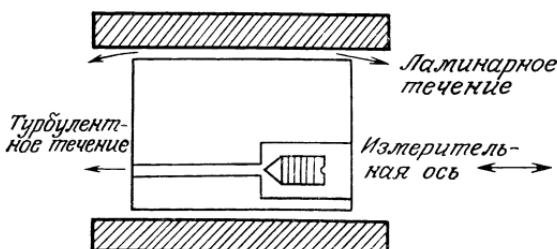


Рис. 11.26. Принцип настройки газового демпфера для акселерометра.

смической массе делают отверстие, частично перекрываемое остроконечным винтом, которое создает дополнительное, неламинарное течение (рис. 11.26). Такое течение изменяет частотную характеристику акселерометра, но оно необходимо по соображениям технологии.

**Выбор величины коэффициента демпфирования  $\zeta$ .** Малые величины  $\zeta$  позволяют получить малый сдвиг фаз вплоть до 90% собственной частоты, но за счет большей неравномерности по амплитуде (рис. 2.6), поэтому они используются в тех случаях, когда при динамическом анализе какого-либо явления требуется знать только реакцию по фазе или когда собственная частота акселерометра намного выше частоты изучаемого явления и даже частоты нежелательных вибраций, которые могут его сопровождать.

В других случаях стараются получить коэффициент демпфирования  $\sim 0,6 \div 0,7$ , что соответствует оптимальной амплитудной характеристике и минимальному искажению по фазе (разд. 2.4.3).

Кривые на рис. 11.27 позволяют, зная максимальную относительную частоту анализируемого явления (в процентах от собственной частоты датчика  $f_0$ ), определить пределы, внутри которых должна находиться величина коэффициента демпфирования, необходимая для получения заданной точности.

### 11.5.2. Возвратная пружина

Пружина, необходимая для возвратного движения сейсмической массы акселерометра, обычно служит одновременно опорой и направляющей. В акселерометрах используются пружины двух типов.

**Круглые пружины с вырезами.** Они характеризуются хорошей однородностью упругих свойств; масса цилиндрической формы подвешивается симметрично между двумя такими пружинами (рис. 11.28). Участок линейного соотношения между

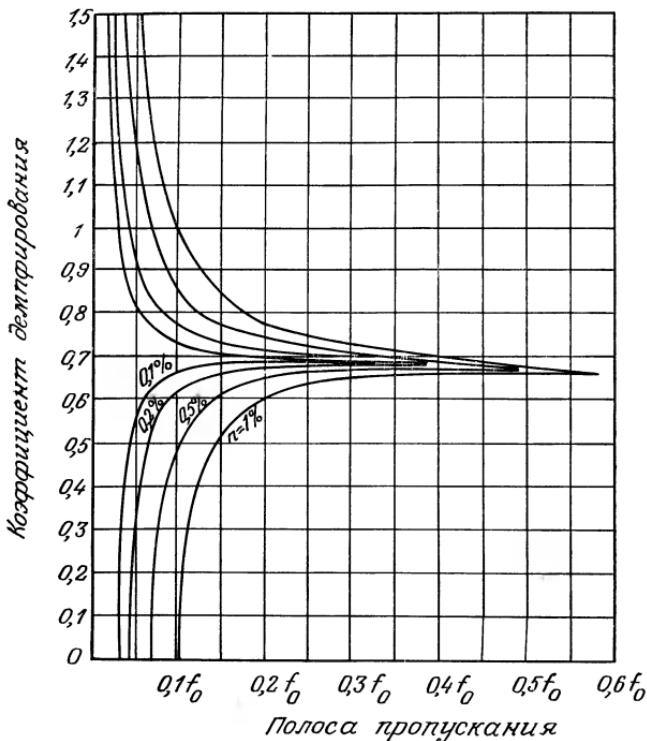


Рис. 11.27. Зависимость демпфирования акселерометра с собственной частотой  $f_0$  от частоты в полосе пропускания и заданной точности  $n\%$ .

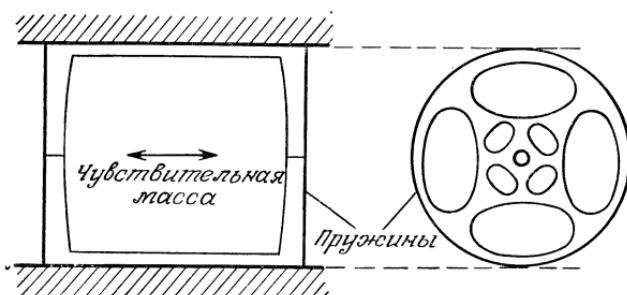


Рис. 11.28. Подвеска чувствительной массы акселерометра с помощью двух тонких круглых пружин и пример устройства вырезов.

восстанавливающей силой и перемещением ставит предел максимальной деформации. Кроме того, поперечная жесткость деформированной пружины должна быть достаточной для того, чтобы под воздействием боковых ускорений сейсмическая

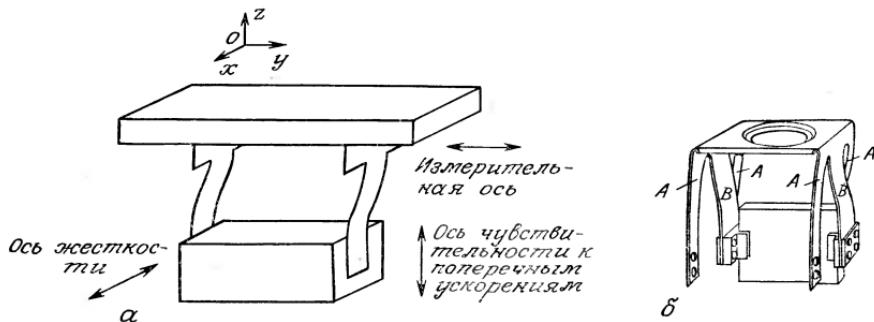


Рис. 11.29. Подвеска чувствительной массы на плоских полосовых пружинах. *а* — принципиальная схема; *б* — пример реализации (фирма Genisco).

масса не коснулась стенок акселерометра и пружина не подвергалась бы необратимой деформации.

**Прямая плоская пружина.** Такие пружины допускают заметное смещение сейсмической массы. В этой схеме две пружины, корпус акселерометра и сейсмическая масса образуют деформируемый параллелепипед (рис. 11.29, *а*), достоинством которого является обеспечение хорошей поперечной жесткости относительно оси *x*. Напротив, чувствительность к ускорениям относительно оси *z* остается заметной, когда под действием большого ускорения вдоль измерительной оси масса находится далеко от своего положения в состоянии покоя.

В примере реализации на рис. 11.29, *б* крепление пружины к корпусу акселерометра обеспечивается внешними пружинными лентами *A*, а измерительная масса жестко скреплена с внутренними пружинными лентами *B*. Ширина одной ленты *B* вдвое больше ширины лент *A*, между которыми она заключена; при этом измерительная масса перемещается прямолинейно, а тепловое расширение пружины не влияет на ее положение.

Демпфирование осуществляется либо погружением в жидкость, либо токами Фуко, когда сделанная из меди масса помещается между полюсами магнита.

### 11.5.3. Потенциометрические акселерометры

Перемещение ползунка должно быть достаточным для того, чтобы разрешающая способность потенциометра не ставила предел точности измерений.

В случае, когда перемещение массы достаточно велико и потенциометр имеет достаточную разрешающую способность и линейную характеристику, ползунок может приводиться в

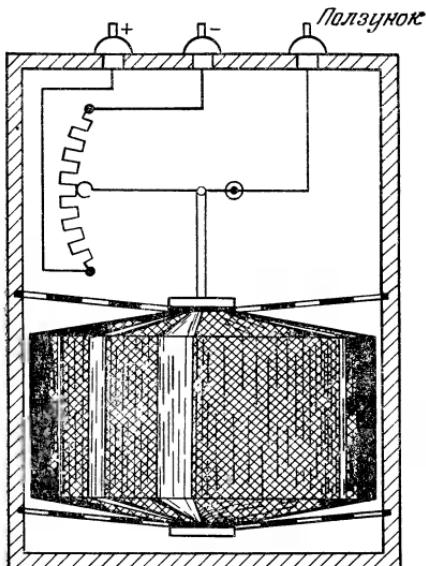


Рис. 11.30. Устройство потенциометрического акселерометра с механическим усилением движения (фирма SFIM).

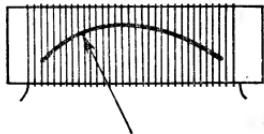


Рис. 11.31. Перемещение ползунка по дуге окружности на плоском потенциометре.

движение непосредственно сейсмической массой. В других случаях необходимо механическое усиление движения (рис. 11.30).

**Порог подвижности.** Трение между ползунком и проводником потенциометра является причиной появления порога подвижности, более или менее значительного, в зависимости от соотношения между движущей силой, связанной с движением массы, и силой трения, которую требуется преодолеть. Последняя заметно уменьшается в потенциометрах с пластмассовой дорожкой.

Механическое усиление перемещения осуществляется вставкой вилки, позволяющей избежать перемещения точки приложения силы, действующей на рычаг усиления. Наличие такого сочленения повышает порог подвижности. Кроме того, влияние сил трения на порог подвижности необходимо определять с учетом коэффициента механического усиления, зависящего от соотношения плеч рычага.

**Линейность.** Перемещение ползунка по дуге окружности в плоском потенциометре (рис. 11.31) приводит к отклонению от линейности, которое можно лишь с большим трудом компенсировать в катушечных потенциометрах. Вопрос о его компенсации в потенциометрах с пластмассовой дорожкой требует

специального рассмотрения, которое оправдывает себя только для достаточно крупных партий датчиков.

Потенциометрические акселерометры имеют следующие метрологические характеристики (по порядку величины): диапазон измерения — от нескольких единиц  $\pm g$  до нескольких десятков  $\pm g$ ; погрешность 2% от Д.И.; собственная частота — несколько десятков Гц; поперечная чувствительность  $10^{-2} \text{ g/g}$ .

#### 11.5.4. Индуктивные акселерометры (рис. 11.32)

Сейсмическая масса акселерометра перемещается между двумя сердечниками U-образной формы, первичные обмотки которых питаются одним и тем же переменным напряжением. При этом образуются две магнитные цепи с зазорами  $e_1$  и  $e_2$ , изменяющимися под действием перемещения массы.

Измеряемое ускорение, пропорциональное этому перемещению, определяется напряжением на выводах вторичных катушек, включенных дифференциально.

### 11.6. Следящие акселерометры

Принцип действия таких акселерометров состоит в том, что сила, необходимая для возвратного движения сейсмической массы, создается электрическим способом: перемещение массы под действием измеряемой величины вызывает противоположное действие, стремящееся ликвидировать это перемещение (отрицательная обратная связь). Когда устанавливается равновесие, электрический сигнал (ток), явившийся причиной компенсирующего действия, служит мерой ускорения.

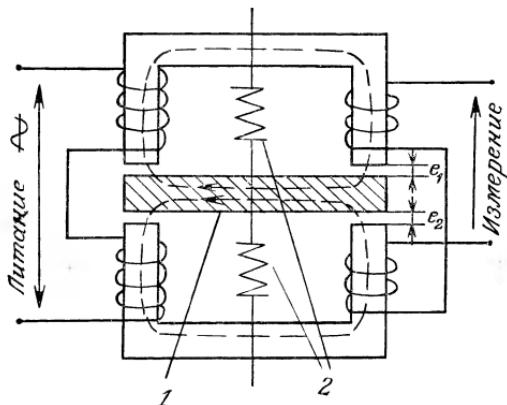


Рис. 11.32. Принцип действия индуктивного акселерометра.  
1 — чувствительная масса; 2 — возвратные пружины.

Метрологические характеристики датчика такого типа следующие: высокая точность (погрешность менее 0,1%); очень хорошее разрешение ( $10^{-6} g$ ); диапазон измерения — от нескольких  $\pm g$  до нескольких десятков  $\pm g$ ; полоса пропускания — от 0 до нескольких Гц или нескольких сотен Гц, в зависимости от области использования; высокий уровень выходного сигнала (несколько мА при максимальном показании). Его недостатками являются высокая стоимость и хрупкость.

### 11.6.1. Следящие акселерометры с уравновешиванием момента

**Принцип действия** (рис. 11.33, а). Легкая рамка, аналогичная подвижной рамке гальванометра, подвешена в поле магнитной индукции на оси вращения, обеспечивающей минимальное трение, и снабжена эксцентричной измерительной массой. Под влиянием силы инерции, создаваемой ускорением, масса стремится переместиться и увлекает рамку, поворачивая ее.

На оси рамки помещены также две хорошо уравновешенные пластиинки, которые перемещаются перед двумя катушками детектора, питающимися переменным напряжением высокой частоты (около 1 МГц). Когда пластиинки перемещаются перед катушками вследствие поворота подвижной части прибора, изменяются индуктивность катушек и напряжение на их выводах (разд. 7.2.2). Напряжение выпрямляется диодом, а затем сравнивается с некоторым опорным напряжением. Разность напряжений усиливается и преобразуется в ток  $I$ , протекаю-

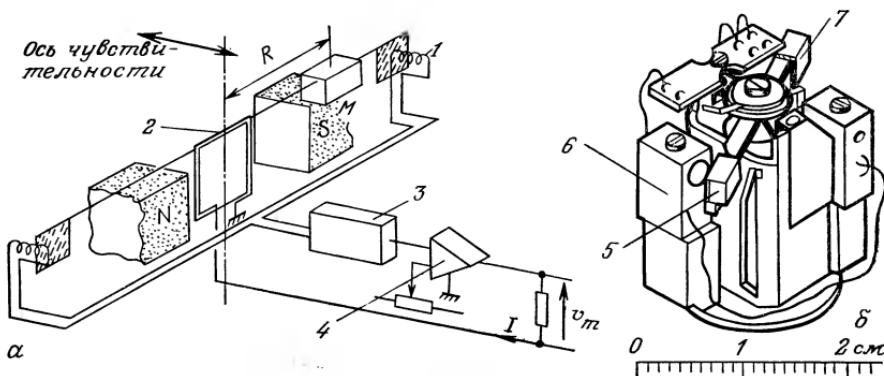


Рис. 11.33. Следящий акселерометр с уравновешиванием момента (фирма SFIM).

**α** — принцип действия; **б** — пример реализации. **1** — пластиинка датчика положения; **2** — рамка; **3** — детектирование; **4** — усиление и преобразование  $V \rightarrow I$ ; **5** — чувствительная масса; **6** — пластиинка; **7** — катушки детектора.

щий через рамку и создающий момент реакции  $C_r$ , пропорциональный протекающему току:

$$C_r = KI,$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от индукции рамки и числа витков.

При равновесии момент  $C_r$  компенсируется моментом  $C_m$ , вызванным силой инерции. Так как угол поворота очень мал, можно записать соотношение

$$C_m = M\gamma R,$$

где  $M$  — сейсмическая масса,  $R$  — радиус вращения массы,  $\gamma$  — измеряемое ускорение.

Окончательно получаем  $KI = M\gamma R$ , откуда  $I = K_1\gamma$ , где  $K_1 = M R / K$ . Следовательно, ток  $I$  пропорционален измеряемому ускорению. Величина его определяется просто введением резистора известного сопротивления в цепь питания рамки и измерением напряжения на выводах этого резистора.

Такой акселерометр может быть выполнен также во вращательном варианте, в котором используются две одинаковые симметрично расположенные массы (рис. 11.34).

Под действием углового ускорения  $\gamma_a$  относительно оси  $x$  вращения рамки возникает движущий момент  $C_m$  величиной  $C_m = I_x \gamma_a$ , где  $I_x$  — момент инерции подвижной части прибора относительно оси вращения. Как и прежде, момент реакции  $C_r = KI$ , приложенный к рамке, вызывается протекающим через нее током  $I$ ; поскольку при равновесии  $C_m = C_r$ , имеем  $I_x \gamma_a = KI$ , откуда  $I = K_2 \gamma_a$ , где  $K_2 = I_x / K$ . Измерительный сигнал пропорционален измеряемому угловому ускорению.

**Влияние поперечных ускорений.** Принцип действия акселерометров с уравновешиванием момента включает поворот подвижной части прибора на угол  $\alpha$ , хотя и очень малый, но не равный нулю. Поэтому всякое ускорение  $\gamma_t$ , перпендикулярное ускорению вдоль измерительной оси  $\gamma_t$ , участвует в создании момента, и при угле поворота  $\alpha$  движущий момент записывается в виде (рис. 11.35)

$$C_m = MR (\gamma_t \cos \alpha + \gamma_t \sin \alpha).$$

При градуировке акселерометра с уравновешиванием момента вращением в поле тяготения необходимо учитывать относительную ошибку измерения  $\varepsilon = \gamma_t \alpha / \gamma_t$ .

**Измерения в условиях вибраций. Фильтрация.** Как и все следящие системы, акселерометр с уравновешиванием момента (порог подвижности которого очень мал) имеет большую

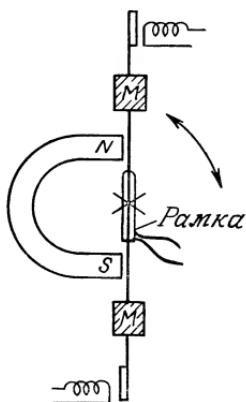


Рис. 11.34. Принцип действия следящего акселерометра с уравновешиванием момента для измерения углового ускорения.

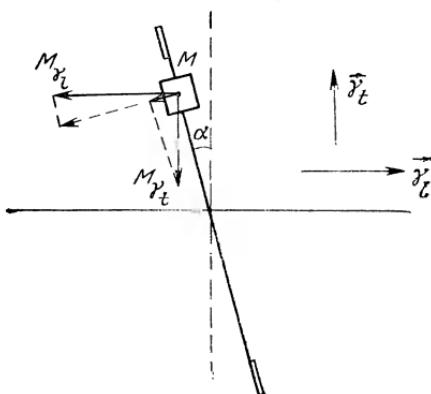


Рис. 11.35. Вклад поперечного ускорения в измерение при повороте подвижной части прибора.

крутизну характеристики вблизи точки статического равновесия и высокую собственную частоту.

В этих условиях акселерометр измеряет не только ускорение центра масс движущейся детали, на которой он установлен, но также и вибрационные ускорения, соответствующие местным условиям, поэтому выходной сигнал сильно засорен шумом. Его можно отфильтровать электрическим способом с помощью многополюсного фильтра низких частот при условии, что диапазон измерения акселерометра достаточен для детектирования всех имеющихся вибрационных ускорений без какого-либо ограничения сверху (наличие ограничения внесет ошибку при прохождении сигнала через фильтр). Так, например, если желательно измерить ускорение  $\pm 10 \text{ м/с}^2$  при низкой частоте в условиях вибрации с ускорением  $\pm 10 \text{ м/с}^2$ , то необходимо иметь акселерометр с диапазоном измерений до  $\pm 100$ , а не  $\pm 10 \text{ м/с}^2$ . Если требуется точность  $10^{-3}$  от  $\pm 10 \text{ м/с}^2$ , то точность применяемого акселерометра должна быть  $10^{-4}$  от  $100 \text{ м/с}^2$ , что вынуждает использовать акселерометр, обладающий очень большой точностью и высокой стоимостью для точного, но обычновенного измерения.

Недостаток фильтрации сигнала для исключения вибрационных шумов заключается во внесении существенного сдвига фаз, что приводит к потере точности при корреляции двух измерений. Проще и лучше использовать акселерометр, собственная частота которого соответствует ширине полосы рабочих частот изучаемого явления. С этой целью понижают собствен-

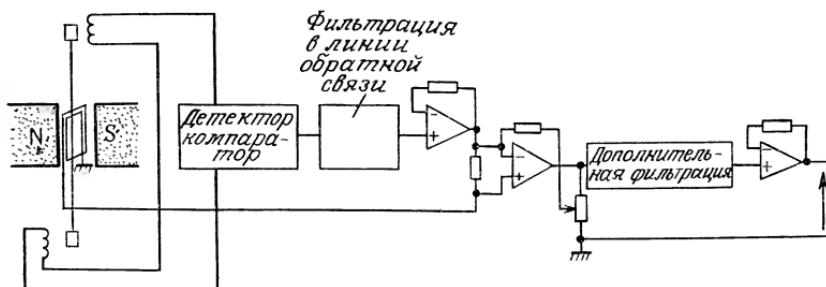


Рис. 11.36. Принципиальная схема следящего акселерометра с уравновешиванием момента и с фильтрами.

ную частоту акселерометров с уравновешиванием момента, вводя в линию обратной связи элемент емкости (при этом точность измерения не изменяется) (рис. 11.36).

Схема формирования выходного сигнала позволяет дополнить эту фильтрацию узкополосным активным фильтром; можно, например, получить собственную частоту порядка 7 Гц с крутизной ослабления сигнала 18 дБ/октава.

Полученная таким способом характеристика — пологая до 80% собственной частоты, а вводимый линейный сдвиг фаз имеет величину порядка  $40^\circ$  в диапазоне рабочих частот. Поэтому акселерометр с уравновешиванием момента, снабженный таким фильтром, позволяет точно измерять ускорение малой частоты в условиях сильной вибрации.

### 11.6.2. Следящие акселерометры с уравновешиванием силы

Акселерометры этого типа широко применяются в навигационных системах, в которых используют однократное или двукратное интегрирование сигнала ускорения для получения информации о скорости и перемещении вдоль измерительной оси, т. е. информации, необходимой для определения траектории движения. Точность определения величины перемещения, т. е. расстояния, пройденного самолетом, кораблем или ракетой, зависит от продолжительности интегрирования и точности применяемого акселерометра. Получение результатов, отвечающих высоким требованиям современной навигации, приводит к необходимости поиска акселерометров класса точности лучшего, чем  $10^{-4}$ , и с высокой собственной частотой.

**Принцип действия.** Акселерометр с уравновешиванием силы представляет собой маятниковую систему, в которой детектирующим элементом является сейсмическая масса. При из-

мерении ускорения вдоль чувствительной оси положение сейсмической массы детектируется датчиком, выходной сигнал которого усиливается и подается в подсистему возвращения массы в ее начальное положение. Обычно оно соответствует нулевому показанию акселерометра, т. е. отсутствию ускорения; следовательно, возмущающие механические напряжения в условиях балансировки отсутствуют. Таким образом, речь идет о следящих системах с перемещением, близким к нулю, т. е. с большой крутизной характеристики и высокой собственной частотой.

Используемый датчик перемещения может быть либо индуктивным, как в акселерометрах с уравновешиванием момента (разд. 11.6.1), либо емкостным. В этом последнем случае измерительная масса или связанный с ней элемент выполнен в виде подвижной обкладки конденсатора, включенного в мостовую схему измерения емкости (рис. 11.37).

В линии обратной связи предусмотрены различные элементы компенсации нелинейности и влияния некоторых внешних факторов, например, температуры. Тем не менее для повышения точности измерений применяется дополнительный детектор температуры. Возвратный электромагнит составляет часть сейсмической массы.

**Влияние попечных ускорений.** Равновесие сил, порождаемых воздействием ускорения на измерительную массу и возвратным электромагнитом, контролируется постоянным удержанием массы в фиксированном положении, соответствующем

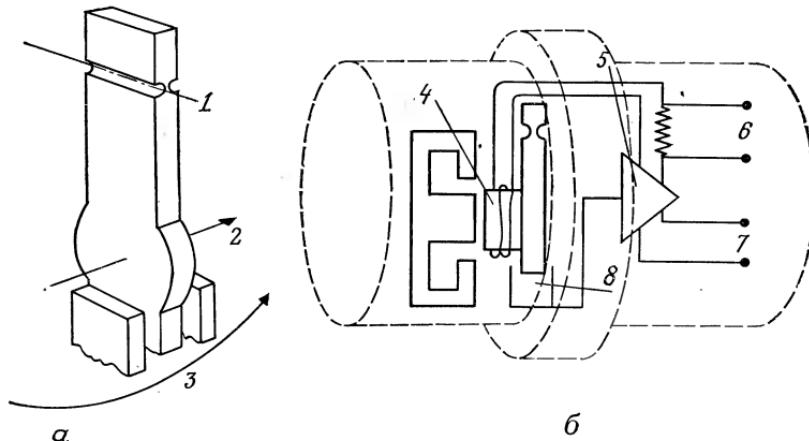


Рис. 11.37. Следящий акселерометр с уравновешиванием силы (фирма Endevco).

а — маятниковая система и емкостный датчик положения; б — общая блок-схема.  
1 — ось вращения; 2 — сила инерции; 3 — маятниковое движение; 4 — электромагнит;  
5 — блок формирования и усиления сигнала; 6 — сигнал; 7 — возбуждение; 8 — емкостный датчик положения.

нулевому отсчету системы. Отклонения массы от положения равновесия при работающей обратной связи не превышает нескольких угловых секунд.

Если, кроме того, поперечная жесткость измерительного прибора относительно оси вращения достаточно велика, то сигнал может возникать только под воздействием ускорения вдоль измерительной оси. Следовательно, акселерометр нечувствителен к ускорениям, перпендикулярным его измерительной оси (кроме ошибок установки), в отличие от акселерометров с уравновешиванием момента, в которых ускорения, перпендикулярные измерительной оси, приводят к ошибке, пропорциональной синусу угла поворота подвижной части прибора.

Типичная величина поперечной чувствительности акселерометра составляет  $\sim 0,002 \text{ g/g}$ . Поэтому акселерометры с уравновешиванием силы особо рекомендуется использовать в случаях, когда необходимо выделить три составляющие ускорения, действующего в каком-либо произвольном направлении.

**Влияние вибраций.** Наличие вибрационных ускорений, наложенных на полезный сигнал, не вызывает затруднений, когда измерение ускорения используется не непосредственно, а после двухкратного интегрирования, что оказывает превосходное фильтрующее действие. Необходимо, однако, чтобы вибрационный шум детектировался и воссоздавался акселерометром без искажения или подрезания. Следовательно, для акселерометра желательны такие свойства:

а) достаточно широкая полоса пропускания, позволяющая охватить весь спектр частот вибрационных колебаний, которые могут возникать в среде, где осуществляется измерение (от 0 до нескольких сотен герц);

б) хорошая линейность фазовой характеристики в рабочем диапазоне измерений;

в) достаточный диапазон измерения, чтобы не подрезалась амплитуда вибрационных сигналов.

**Реализация.** Следящие акселерометры с уравновешиванием силы обычно устанавливают на гиростабилизированной платформе, чтобы их измерительные оси занимали некоторое характерное направление в пространстве. Поэтому размеры и массы этих акселерометров должны быть малыми. Требование высокой собственной частоты также обуславливает необходимость небольших размеров сейсмической массы.

Конструирование и изготовление таких приборов диктуют необходимость применения передовой технологии; при этом со всей остротой встает проблема материалов, способных обеспечить долгосрочную надежность, отсутствие гистерезиса и низкий порог чувствительности.

Сочленения в таких акселерометрах выполняются неме-

таллическими; в местах опоры оси вращения используется, например, тонкая кварцевая пластина. Преимущество такого решения состоит в том, что опора при этом хорошо электрически изолирована и с помощью нанесенного проводящего материала может передавать ток движущемуся элементу.

Подвижная обкладка емкостного датчика положения выполняется путем нанесения металла, обычно — золота.

Электронная часть следящей системы выполняется в виде толстых пленок на керамической подложке и теплоизолируется таким образом, чтобы тепло рассеивалось только вне прибора.

Возвратное движение реализуется с помощью катушки, помещенной на подвижном элементе, и постоянного магнита. Магнит нельзя устанавливать на подвижной части, так как масса его велика, что связано с большой величиной поля, необходимого для осуществления обратной связи.

Главные проблемы, которые нужно решить применительно к следящим акселерометрам, — это тщательный подбор материалов и совершенство конструкции, с тем чтобы не возникали какие-либо паразитные моменты под влиянием внешних воздействий, таких, как постоянная или переменная температура, линейные или угловые ускорения, вибрации и т. д.

Особое внимание нужно уделять выбору материалов, образующих детали, поддерживающие чувствительный элемент, с учетом соответствия их физико-механических характеристик.

## Библиография

### Монографии

1. Bouche R., Calibration of shock and vibration measuring transducers, Washington, Naval Research Laboratory, Shock and Vibration Information Centre, SVIC, 1979.
2. Broch J. T., Mechanical vibration and shock measurements, Brüel et Kjaer, 1980.
3. Harris M., Crede E. Shock and vibration handbook, N. Y., McGraw, 1976.  
[Имеется перевод: Харрис С. М., Крид Ч. И., Справочник по ударным нагрузкам (сокр. перевод). — Л.: Судостроение, 1980.]
4. Pennington D., Piezoelectric accelerometers, ouvrage publié par Endevco, 1965.

### Периодические и другие издания

5. AFNOR, Recueil de normes francaises des chocs et vibrations mécaniques, 1-ère édition, Paris, 1981.
6. Andre P., Fiabilité des mesures en accélérométrie: influence du mode de fixation des capteurs piézoélectriques, Publication Metravib, 1971.
7. Brüel et Kjaer, Technical review, Publication périodique.
8. Brüel et Kjaer, Accéléromètres: Instructions et Applications.

9. Ciame, Essais d'évaluation des capteurs d'accélération linéaire, Documentation Française, oct. 1981.
10. ENDEVCO France, Chocs et vibration, Publication périodique.
11. ENDEVCO France, Technologie de la mesure de chocs et vibrations.
12. Lang G. F., Understanding vibration measurements, Application Note 9, Nicolet Scientific Corp., juin 1979.
13. Van Nierop J. H., A low-cost linear accelerometer, *Journal of Scientific Instruments*, 14, 7, 860 (1981).
14. Szabados B., Sinha N. K., di Cenzo C. D., A new digital instrument for measuring angular velocity and acceleration, *Proc. of IEEE*, 455 (1972).
15. Usher M. J., Buckner I. W., Burch R. F. A miniature wideband horizontal-component feedback seismometer, *Journal of Sc. Instr.*, 1253 (1977).
16. Wall W. E., Piezoresistive strain gauge accelerometers increase spectrum of shock and vibration measurement capability, Publication Endevco.

## 12. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ, РАСХОДА И УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Жидкость в широком смысле — это материальная среда, находящаяся в жидким или газообразном состоянии в определенных условиях по температуре, давлению и объему, связанных уравнениями состояния (которые выражаются термодинамическими диаграммами). Под действием внешних сил, вызванных, например, разностью давлений, жидкость может перемещаться. Изучение этих перемещений и макроскопических свойств среды, рассматриваемой как непрерывная, составляет предмет механики жидкостей.

Механика жидкостей имеет обширные и разнообразные области приложения, например, в авиации, гидротехнике, метеорологии, физиологии, и это разнообразие влечет за собой большое различие приборного оборудования, в частности, датчиков и методов измерения.

### 12.1. Элементарные понятия механики жидкостей

#### 12.1.1. Характеристики течения

Движущаяся жидкость называется течением. На практике физическое описание течения требует измерения скоростей, плотностей, давлений и температур в различных точках. Необходимо знать и другие характеристики жидкости — вязкость, теплопроводность, удельную теплоемкость, но большей частью они принимаются постоянными.

Для изучения течения в целом и для выбора соответствующих датчиков необходимы некоторые предварительные знания о типах и структурах течения. Элементарная классификация течений приведена в табл. 12.1.

Существуют и многофазные течения; любая комбинация парообразной, жидкой и твердой фаз одной или разных сред может образовывать течение или его часть, например, при волнении воды под действием ветра или в случае пламени, содержащего сажу.

В некотором диапазоне условий физические параметры течения в данной точке могут быть постоянными или изменяться

Таблица 12.1. Характеристики течения

Тип течения	Среда	Режим течения	Температура
Однофазное течение	Жидкая или газообразная		
Многофазное течение	Единая поверхность раздела или диспергированые локальные поверхности	Ламинарный или турбулентный	Постоянная или переменная

в зависимости от времени. В первом случае течение называется ламинарным, во втором — турбулентным.

В турбулентном течении измерение таких величин, как средняя скорость, является трудной задачей из-за наличия случайных пульсаций, амплитудой которых нельзя пренебречь.

Для облегчения описания и сравнения различных течений в механике жидкости обычно пользуются безразмерными комплексами (критериями), позволяющими уменьшить число параметров, которыми определяется рассматриваемое течение. Можно показать, что в случае изотермического течения несжимаемой жидкости (плотность  $\rho$  и температура  $T$  постоянны) единственным безразмерным параметром, достаточным для определения этого течения, является число Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = UD/v,$$

где  $U$  — характерная скорость течения (например, если речь идет о трубе, то это средняя по поперечному сечению потока скорость  $U = Q/S$ ,  $Q$  — объемный расход,  $S$  — площадь поперечного сечения);  $D$  — характерная длина (например, в упомянутом выше случае — диаметр трубы);  $v$  — кинематическая вязкость жидкости, т. е. отношение динамической вязкости жидкости  $\mu$  к ее плотности  $\rho$ .

В аналогичных геометрических условиях два изотермических течения несжимаемой жидкости подобны, если их числа Рейнольдса одинаковы.

*Пример.* Рассмотрим два течения в трубах диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  с одинаковой относительной шероховатостью поверхности; средние скорости равны соответственно  $U_1$  и  $U_2$ , а вязкости —  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Если выполняется условие

$$Re_1 = Re_2, \text{ т. е. } U_1 D_1 / v_1 = U_2 D_2 / v_2,$$

то, зная местную скорость  $u_1$  на расстоянии  $x_1$  от стенки в первом течении, можно определить скорость  $u_2$  на расстоянии  $x_2 = x_1 \frac{D_2}{D_1}$  от стенки во втором течении из соотношения

$$u_1/U_1 = u_2/U_2.$$

То же самое можно записать в более общем виде

$$u_1/U_1 = f(Re),$$

т. е. все относительные величины, характеризующие течение и записанные в безразмерной форме, можно выразить в виде функций от числа Рейнольдса, определяющего рассматриваемое течение.

Каков режим однофазного течения — ламинарный или турбулентный — зависит от величины числа Рейнольдса. Например, в трубе кругового сечения течение становится турбулентным, когда число Рейнольдса превышает 2200. Двухфазное течение определяется и другими параметрами.

В более сложном случае переменных плотностей и температур число безразмерных критериев, необходимых для определения некоторой величины  $A$ , записанной в безразмерной форме, увеличивается.

Для течения газа с большой скоростью можно записать

$$A = f(Re, M),$$

где  $M = U_1/c$  — число Маха,  $c$  — скорость звука, выражаемая формулой  $c = \sqrt{\gamma RT}$ ,  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение удельных теплоемкостей при постоянных давлении и объеме (для воздуха  $\gamma = 1,4$ ),  $R$  — газовая постоянная совершенного газа (в единицах СИ  $R = 287$  для воздуха),  $T$  — абсолютная температура.

Для конвективного течения имеем:

$$A = f(Re, Pr, Fr),$$

где  $Pr = \nu/a$  — число Прандтля,  $a$  — температуропроводность жидкости,  $Fr = \rho_0 U_0^2/g(\rho - \rho_0)D$  — число Фруда,  $\rho_0$  — характерная плотность,  $(\rho - \rho_0)$  — характерная разность плотностей (например, разность максимальной и минимальной плотностей),  $g$  — ускорение силы тяжести.

С практической точки зрения датчики, основанные на каком-либо одном принципе, но предназначенные для жидкостей или газов, могут различаться по конструкции. В табл. 12.2 указаны некоторые типичные различия жидкой и газообразной сред.

Поперечный размер течения, являющийся одним из параметров, определяющих выбор типа датчика, может составлять

Таблица 12.2. Сравнение жидкостей и газов по их параметрам

	Плотность $\rho$	Вязкость $\mu$ , Пз	Скорость течения, м/с
Жидкость	Постоянна, $800 \div 13\,000 \text{ кг}/\text{м}^3$	$\approx 1 \div 10^{-4}$	$0 \ll U \ll 200$
Газ	Зависит от $T$ и $p$ , для воздуха $\sim 1 \text{ кг}/\text{м}^3$ при нормальных давлениях и температуре	$\approx 10^{-5}$	$0 \ll U \ll 2000$

на практике от десятых долей миллиметра для масляных пленок при смазке подшипников до десятков метров для течений в системах воздушного охлаждения атомных электростанций. В метеорологии и океанографии масштаб течений может быть еще больше.

Присутствие датчиков в потоке может возмущать течение, и важно тщательно анализировать эту проблему в каждом конкретном случае. В частности, течения с очень малыми скоростями (например, свободная конвекция) весьма чувствительны к любому внешнему возмущению.

### 12.1.2. Уравнения механики жидкостей

**Локальные уравнения однофазного течения.** Эти уравнения выводятся в координатах  $x_i$ . Уравнение неразрывности, или уравнение сохранения массы (в отсутствие источников), записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0,$$

где  $t$  — время,  $\rho$  — плотность,  $U_i$  — компоненты вектора скорости.

Уравнение сохранения количества движения жидкости, находящейся в поле ньютоновской силы тяготения, имеет вид

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g \delta_{i3} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j},$$

где  $p$  — давление,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\mu$  — динамическая вязкость,  $\delta_{i3}=0$  при  $i \neq 3$  и  $\delta_{i3}=1$  при  $i=3$  (ось 3 вертикальна).

Уравнение сохранения энергии, которое записывается для случая, когда выделением теплоты из-за вязкой диссипации

можно пренебречь, записывается в виде

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right),$$

где  $T$  — температура,  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Отметим, что для полного описания движения необходимо принять во внимание уравнение состояния, например, уравнение состояния совершенного газа

$$p/\rho = rT.$$

Хотя вязкость  $\mu$ , теплопроводность  $\lambda$  и удельная теплоемкость  $c_p$  изменяются в зависимости от давления и температуры, при измерениях обычно их принимают постоянными. Искусствами величинами являются компоненты скорости  $U_i$ , плотность  $\rho$ , давление  $p$  и температура  $T$ <sup>1)</sup>.

**Одномерное приближение.** В технических задачах часто достаточноенным является одномерное описание течений, в которое входят более общие параметры (рис. 12.1). При этом для течения, ограниченного твердыми стенками, в котором скорость считается равномерной в каждом поперечном сечении, уравнение неразрывности превращается в уравнение сохранения массового расхода  $Q_m$

$$\rho S U = \text{const} = Q_m = \rho Q,$$

где  $Q$  — объемный расход.

Точно так же из уравнения сохранения количества движения, записанного для одной и той же линии тока, в случае течения несжимаемой ( $\rho = \text{const}$ ) и невязкой ( $\mu = 0$ ) жидкости по-

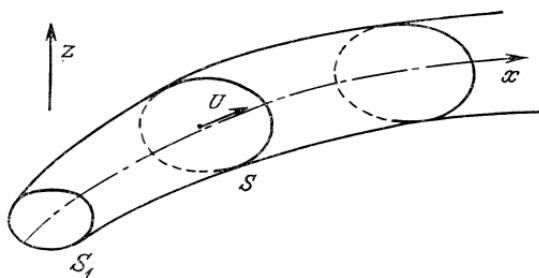


Рис. 12.1. Одномерная модель течения.

<sup>1)</sup> Уравнения сохранения количества движения и энергии записаны здесь с учетом возможной зависимости параметров течения вязкой жидкости от времени, т. е. для нестационарных течений. — Прим. перев.

лучаем

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} + Z = \text{const.}$$

Это — уравнение Бернулли, которое выражает сохранение суммы величин, называемой напором. Этим уравнением можно также воспользоваться «в среднем» для поперечного сечения трубы, вводя перед членом с  $U^2$  множитель  $\alpha$ , учитывающий распределение скорости по сечению

$$\alpha = \frac{\iint_S U^3 dS}{U^3 dS},$$

и принимая за скорость среднюю по сечению скорость  $U_d$ :

$$U_d = \frac{1}{S} \iint_S U dS = \frac{Q}{S}$$

Наконец, влияние вязкости учитывают, вводя поправку  $\Delta H_{1,2}$  для течения между сечениями 1 и 2. Эта эмпирическая поправка выражает потери напора:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_{1,2}^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2^2}{\rho g} + \frac{U_{2,2}^2}{2g} + Z_2 + \Delta H_{1,2}.$$

Если течение нельзя считать несжимаемым (для скоростей  $U > 100$  м/с, для воздуха при нормальных давлениях и температуре), используют несколько более сложные соотношения; например, в отсутствие трения и ударных волн получаем

$$\frac{U_{1,2}^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{U_{2,2}^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_2}{\rho_2}.$$

**Двухфазные, многокомпонентные, реагирующие течения.** Для двухфазных течений можно определить ряд общих параметров: глубину для течений со свободной поверхностью, газосодержание для течений жидкости с пузырьками, концентрацию и распределение по размерам частиц для аэрозоля, поверхностное натяжение. Наконец, для течений, содержащих несколько химических компонентов, реагирующих или не реагирующих, необходимо определить их концентрации.

**Аэро- и гидродинамические силы.** Определение сил, с которыми жидкость действует на твердые тела, составляет, вообще говоря, одну из наиболее важных задач проектирования: это — силы ветра и сопротивления жидкости, действующие на суда, подъемная сила самолетов, лобовое сопротивление автомобилей и т. д.

Когда жидкость обтекает твердое тело или, что тоже са-

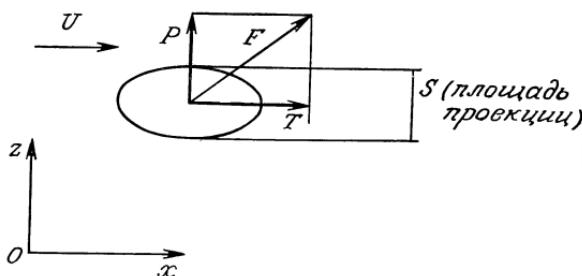


Рис. 12.2. Определение аэро- и гидродинамических сил, действующих на тела.

мое, когда твердое тело перемещается в жидкости, оно подвергается действию системы сил, которую характеризуют результирующими силой и моментом (в общем случае — 6 составляющих).

Если течение симметрично, то результирующую силу обычно разлагают (рис. 12.2) на составляющую  $T$ , параллельную скорости  $U$  (ее называют лобовым сопротивлением), и на составляющую  $P$ , перпендикулярную  $U$  (ее называют подъемной силой). Через  $S$  обозначают площадь миделевого сечения, т. е. площадь проекции твердого тела на плоскость, перпендикулярную скорости  $U$ . В этом случае можно написать

$$T = c_x S \rho \frac{U^2}{2},$$

где  $c_x$  — коэффициент лобового сопротивления.

## 12.2. Датчики и методы измерения скорости жидкости

Скорость обычно измеряют косвенно, определяя воздействие, которое она оказывает: а) на физические характеристики чувствительного элемента; б) на определенные физические явления, объектом которых является чувствительный элемент. Чувствительным элементом может быть как сама жидкость, так и один из элементов датчика.

Если чувствительным элементом является сама жидкость, то ее скорость определяет: а) динамическое давление  $\rho \frac{U^2}{2}$ ; б) доплеровский эффект, которому подвергается лазерное или ультразвуковое излучение; в) время пробега радиоактивного изотопа между двумя заданными сечениями.

Таким образом, определить скорость можно с помощью датчика для измерения какого-либо физического параметра: давления, светового потока, ультразвукового и ядерного излучения. Такие датчики используются не только в механике жид-

кости, но, учитывая важность их использования, соответствующие методы измерения будут здесь вкратце описаны.

Если чувствительный элемент является элементом датчика, помещенного в жидкость, то показателем ее скорости может служить какая-либо определяемая ею физическая характеристика, например: а) температура и, следовательно, сопротивление нагретой нити, питаемой постоянным током; б) скорость вращения помещенной в поток крыльчатки. Датчики этого типа специально предназначены для измерения скорости жидкости; они будут более детально рассмотрены в настоящей главе.

### 12.2.1. Термоанемометры с нагретой металлической нитью или лентой

**Принцип действия, устройство, закон теплообмена.** Если поместить в поток металлическую нить или ленту, температура которой поддерживается с помощью эффекта Джоуля постоянной и превышающей температуру потока, то между ней и потоком возникает конвективный теплообмен. Этот теплообмен зависит от физических свойств жидкости, ее скорости и разности температур нагретого элемента и жидкости.

Равновесная температура нити или ленты, являющейся чувствительным элементом датчика, определяется путем измерения ее электрического сопротивления; оно зависит от выделенной джоулевой теплоты и скорости жидкости, которую необходимо определить.

Металл, используемый для изготовления датчика, должен обладать высоким температурным коэффициентом сопротивления; для измерений в газах обычно используют очень тонкую платиновую или вольфрамовую проволочку ( $0,6 \text{ мкм} < D < 10 \text{ мкм}$ ), а в жидкостях из соображений прочности чувствительный элемент датчика представляет собой тонкую платиновую ленту, наложенную на изолированный конус или цилиндр, заключенный в кварцевую оболочку (рис. 12.3).

Количество джоулевой теплоты  $P_j$ , выделяемой при температуре  $T$  резистором  $R$ , через который течет постоянный ток  $I$ , выражается формулой

$$P_j = R(T) I^2.$$

Полагая, что теплообмен осуществляется только конвекцией в жидкости, имеющей температуру  $T_a$ , количество теплоты, участвующее в теплообмене, можно записать так:

$$P_c = hS_l(T - T_a),$$

где  $h$  — коэффициент теплообмена,  $S_l$  — боковая поверхность чувствительного элемента датчика. Для нити  $S_l = \pi D l$ , где  $D$  —

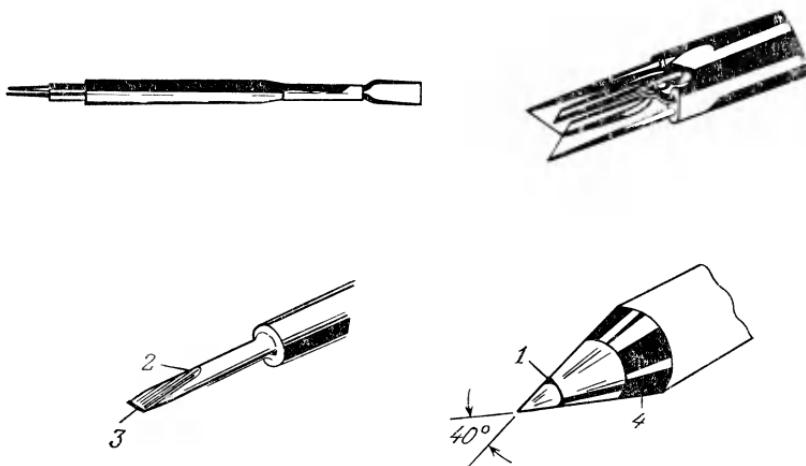


Рис. 12.3. Термоанемометры с нагретой нитью или лентой.

1 — лента с кварцевым покрытием; 2 — кварцевый стержень; 3 — лента с покрытием из оксида алюминия; 4 — кольцо из эпоксидной смолы.

диаметр, а  $l$  — длина нити, для ленты  $S_l = 2Dl$ , где  $D$  — ширина, а  $l$  — длина ленты.

При тепловом равновесии  $P_j = P_a$ , т. е.

$$R(T) I^2 = h S_l (T - T_a).$$

Скорость жидкости  $U$  входит в выражение для  $h$ , для которого предложены различные эмпирические формулы в зависимости от характера течения.

*Формула Кинга.* Эта формула имеет вид

$$h = a + b \sqrt{U},$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для конкретных жидкости и датчика. Тогда получаем

$$R(T) I^2 = (A + B \sqrt{U}) (T - T_a),$$

где

$$A = a S_l, \quad B = b S_l.$$

Принимая во внимание различные параметры, играющие роль в рассматриваемом процессе, с достаточной степенью общности можно положить

$$h = \lambda N_u / D,$$

где  $\lambda$  — теплопроводность жидкости,  $D$  — диаметр нити или ширина ленты,  $N_u$  — число Нуссельта. При таких обозначениях уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$R(T) I^2 = \frac{\lambda N_u}{D} S_l (T - T_a)$$

или, в случае нити,

$$\frac{R(T) I^2}{\pi \lambda l (T - T_a)} = \text{Nu}.$$

Предложены различные эмпирические выражения для Nu. Физические характеристики обычно принимают при температуре  $T_f$  поверхности раздела между жидкостью и элементом датчика:

$$T_f = \frac{T + T_a}{2},$$

и они отмечаются индексом  $f$ .

*Формула Крамера.* Эта формула записывается следующим образом:

$$\text{Nu}_f = 0,42 \text{Pr}_f^{0,2} + 0,57 \text{Pr}_f^{0,33} \text{Re}_f^{0,5},$$

где  $\text{Re}_f = UD/v$  — число Рейнольдса (см. разд. 12.1.1),  $\text{Pr}_f = v/a$  — число Прандтля (см. разд. 12.1.1).

*Формула Коллиса и Уильямса* (пригодна для воздуха)

$$\text{Nu}_f = (A + B \text{Re}_f^n) \left( \frac{T + T_a}{2T_a} \right)^{0,17},$$

где  $n=0,45$ ,  $A=0,24$ ,  $B=0,56$  при  $0,02 < \text{Re} < 44$ ;  $n=0,51$ ,  $A=0$ ,  $B=0,48$  при  $44 < \text{Re} < 150$ .

*Поправка Бейля.* Так как существует влияние свободной конвекции, необходимо сделать поправку, вводя эффективное число Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{эфф}}$ :

$$\text{Re}_{\text{эфф}}^2 = \text{Re}_f^2 + (0,9 \text{Gr}_f^{0,42})^2,$$

где Gr — безразмерное число Грасгофа,

$$\text{Gr}_f = \frac{g \beta (T_f - T_a) D^3}{v^2},$$

$g$  — ускорение силы тяжести,  $\beta$  — коэффициент теплового расширения.

**Измерительные схемы.** В термоанемометрах с нагретой нитью или лентой используются измерительные схемы двух типов: схема с постоянным током  $I$  и схема с постоянной температурой  $T$ .

*Схема с постоянным током.* Ток  $I$ , протекающий через нить, поддерживается постоянным с помощью либо балластного сопротивления, включенного последовательно с нитью, либо питающего источника тока. Так как количество теплоты, участвующей в теплообмене, зависит от скорости жидкости, то при

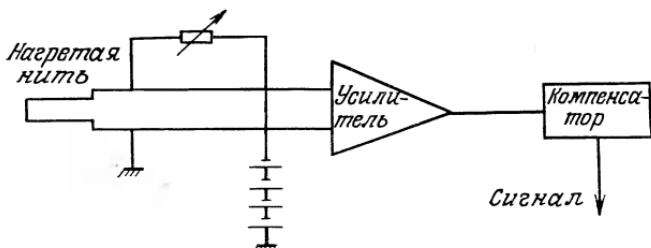


Рис. 12.4. Схема измерений при постоянной силе тока.

изменении скорости изменяется и температура нити. Сопротивление нити зависит от ее температуры, поэтому с изменением скорости происходит изменение напряжения на ее концах.

На рис. 12.4 упрощенно показана измерительная схема такого типа, снабженная цепью компенсации тепловой инерции; эта цепь предназначена для улучшения быстроты реакции. Компенсация тепловой инерции необходима из-за того, что нить обладает некоторой теплоемкостью, определяющей тепловую постоянную времени запаздывания (разд. 6.6.1).

Пульсация  $u$  скорости  $U$  жидкости приводит к отклонению  $e$  измеряемого напряжения, которое изменяется по закону

$$e(t) = e_\infty [1 - \exp(-t/\tau)].$$

Величина  $e_\infty$ , которая несет информацию о величине  $u$ , достигается только в конце некоторого отрезка времени  $t \gg \tau$ , но ее можно считать известной непосредственно из измерений, если можно записать соотношение

$$e_\infty = e(t) + \tau(de/dt).$$

Это выражение можно ввести в электрическую цепь, содержащую интегратор, дифференциальный трансформатор и, если возникает вопрос о знаке, инвертор — преобразователь знака (рис. 12.5). Использование такой измерительной схемы заметно улучшает частотную характеристику в случае малых пульсаций и слабых перегревов  $(T - T_a)/T_a < 0,5$ .

Величину  $\tau$  можно определить непосредственно, так как реакция нити на пульсации силы тока такая же, как на пульсации скорости. Для этого питают нить током с периодическим прямоугольным импульсом или регулируют величину сопротивления  $R$  дифференциального трансформатора таким образом, чтобы изменение измеряемого напряжения происходило по закону, возможно более близкому к закону изменения тока. Но описанный способ имеет два недостатка: а) реакция нити, строго говоря, не является линейной; б) введение цепи диффе-

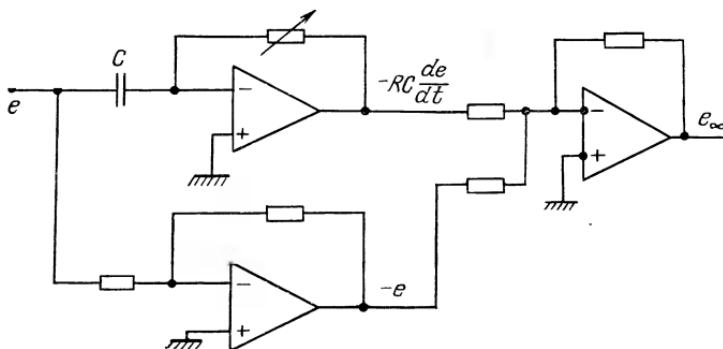


Рис. 12.5. Схема компенсации тепловой инерции.

ренициального трансформатора может создавать проблемы, связанные с повышением уровня вызываемого им фонового шума.

*Схема с постоянной температурой.* В этом случае температура и, следовательно, сопротивление поддерживаются постоянными.

Датчик является одним из плеч моста Уитстона, и ток, необходимый для поддержания равновесия, зависит от скорости жидкости (рис. 12.6). Преимущество этой схемы состоит в том, что тепловая инерция оказывает меньшее влияние на реакцию системы.

*Метрологические характеристики.* Отклик нити вызывают:  
а) скорость  $U$  и угол  $\phi$  между направлением скорости и нормалью к нити; б) температура жидкости  $T_a$ ; в) концентрация компонентов жидкости.

В принципе нить реагирует на нормальную составляющую скорости течения, но некоторое влияние оказывает и тангенциальная составляющая. Таким образом, определяется скорость

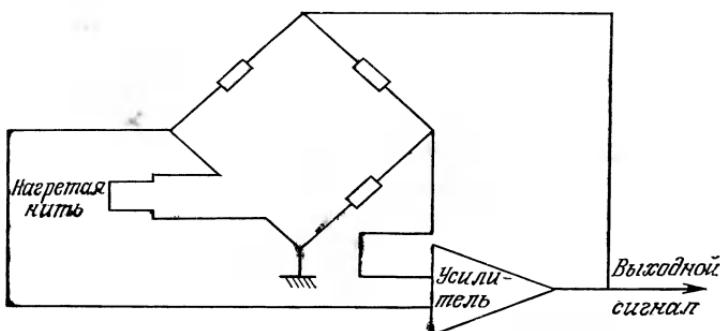


Рис. 12.6. Схема измерений при постоянной температуре.

$U_{\text{эфф}}$ , на которую реагирует нить. Она выражается формулой

$$U_{\text{эфф}} = U \sqrt{\cos^2 \varphi + k \sin^2 \varphi},$$

где  $k$  — коэффициент, характеризующий отклик на тангенциальную составляющую скорости (величина  $k$  близка к 0,2).

Применение термоанемометра с нагретой нитью в газах возможно в двух диапазонах скоростей: а) для дозвуковых течений с  $0 \leq M \leq 0,8$ , т. е. до 280 м/с при температуре 300 К; б) для сверхзвуковых течений с  $1,1 \leq M \leq 2,2$ .

В области трансзвуковых течений при  $0,8 \leq M \leq 1,1$  использование термоанемометра с нагретой нитью затруднительно.

Время запаздывания термоанемометра тем меньше, чем меньше нить и чем больше скорость течения  $U$ . Постоянная запаздывания  $\tau$  зависит также от схемы измерения. Ниже для каждой схемы приводится выражение  $\tau$ , полученное с использованием формулы Кинга (разд. 12.2.1).

I. Схема с постоянным током  $I$ :

$$\tau_I = \frac{K}{A + B \sqrt{U - aI^2}},$$

где  $K$  — теплоемкость нити ( $K = MC$ ,  $M$  — масса, а  $C$  — удельная теплоемкость металла, из которого изготовлена нить),  $a$  — коэффициент, зависящий от закона изменения электрического сопротивления с температурой. Обычно  $\tau_I$  имеет порядок миллисекунд. В результате предельная частота измерений  $f_{ci} = \frac{1}{2\pi\tau_I}$  имеет порядок  $10^2$  Гц.

II. Схема с постоянной температурой:

$$\tau_T = \frac{\tau_I}{1 + bG},$$

где  $b$  — коэффициент, зависящий от сопротивления и средней величины тока, текущего через нить,  $G$  — активная динамическая проводимость усилителя, питающего мост (она представляет собой отношение изменения выходного тока к изменению командного напряжения). Повышенная активная проводимость используемых усилителей позволяет получить  $\tau_T \approx 10^{-2}\tau_I$  и  $f_{ct} \approx 10^2 f_{ci}$ .

При использовании различных схем компенсации удается расширить полосу пропускания и получить в случае газовых течений предельные частоты, достигающие  $10^5$  Гц как в режиме постоянного тока, так и в режиме постоянной температуры.

Покрытие нагретых лент или нагретых нитей уменьшает

быстроту реакции термоанемометра из-за возрастания теплоемкости.

Для тонких измерений турбулентности необходимо учитывать и другие факторы, например, паразитный теплообмен, связанный с конечной длиной нитей. Погрешность таких измерений в дозвуковых изотермических течениях составляет лишь несколько процентов.

В течениях газов с большими скоростями эффекты сжимаемости требуют рассмотрения более сложных явлений, поскольку в таких течениях всегда существуют пульсации температуры и давления.

**Изучение пульсаций скорости. Многонитевые зонды.** Обозначив вектор средней скорости  $U$ , можно записать выражение для вектора мгновенной скорости в виде

$$U = U + u + v + w,$$

где  $u$  — пульсация скорости в направлении  $U$ ;  $v$  — пульсация скорости по нормали к  $U$  в плоскости нити анемометра;  $w$  — пульсация скорости в направлении, перпендикулярном  $u$  и  $v$  (при слабой турбулентности ее влиянием на реакцию нити можно пренебречь).

Точно так же, обозначив  $\bar{T}_a$  среднюю температуру в потоке, можно записать выражение для мгновенной температуры:

$$T_a = \bar{T}_a + \theta_a,$$

где  $\theta_a$  — пульсация температуры.

Пульсации  $u$ ,  $v$ ,  $\theta_a$  вызывают пульсацию измеряемого напряжения  $e$ , которую можно представить в виде линейной комбинации:

$$e = \alpha u + \beta v + \gamma \theta_a.$$

Система нитей позволяет определить пульсации скорости и температуры, а также их взаимные корреляции. Корреляции связаны со сдвиговыми напряжениями и с турбулентным потоком тепла. Пример схемы многонитевого термоанемометра показан на рис. 12.7.

### 12.2.2. Ионный анемометр

**Устройство и принцип действия.** Существует много видов ионных анемометров; они различаются, в основном, конфигурацией, которая обычно определяется назначением этих анемометров. Зонд может представлять собой нить, поддерживаемую под высоким напряжением в заземленном цилиндре;

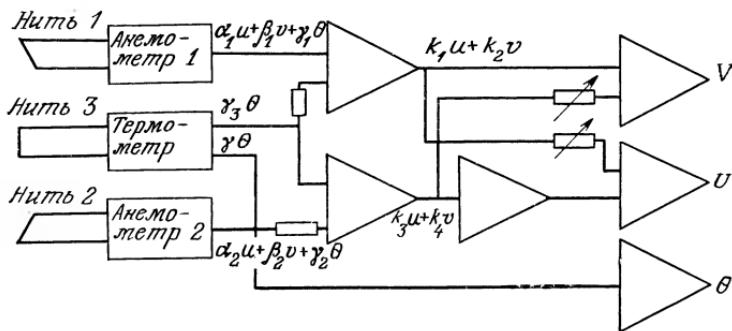


Рис. 12.7. Трехнитевой зонд.

общая ось цилиндра и нити параллельны скорости потока. В другой конфигурации зонда нить размещается перпендикулярно потоку, а вокруг нее устанавливают четыре цилиндрических электрода (рис. 12.8, а).

В воздухе вблизи центральной нити, находящейся под высоким напряжением, образуются ионы, например,  $(H_2O)_n H^+$ , скорость которых пропорциональна напряженности электрического поля. При расположении нити зонда перпендикулярно направлению течения токи, возникающие в электродах, находящихся в покоящемся воздухе, одинаковы. Если же воздух движется со скоростью  $U$ , то система токов становится несимметричной. Разность токов  $I_1 - I_2$  в паре коллекторов  $A_1$  и  $A_2$  связана с проекцией скорости  $U$  на направление  $A_1A_2$ , а сумма  $I_1 + I_2$  остается, по существу, постоянной.

**Метрологические характеристики.** Чувствительность  $S$  анемометра определяется как

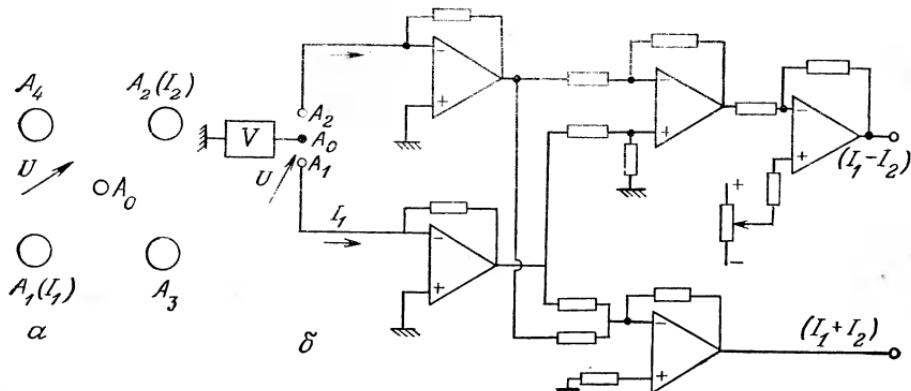


Рис. 12.8. Ионный анемометр.

*а* — схема установки; *б* — схема формирования сигнала.

мометра выражается в зависимости от параметра  $\sigma = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$ :

$$S = \Delta\sigma/\Delta U.$$

Анемометр этого типа наиболее подходит для диапазона малых скоростей (0—10 м/с), где его характеристику можно считать линейной.

Для нити диаметром 100 мкм и длиной около 2 см, расположенной в цилиндрическом коллекторе диаметром 1,2 см, на расстоянии 1 см от нити получена квазилинейная характеристика приложенном напряжении около 6000 В. Токи в каждом коллекторе составляют  $\sim 1,5$  мкА, а чувствительность имеет порядок 0,04 на 1 м/с, для чего необходимо измерять разность токов порядка 100 нА при изменении скорости на 1 м/с.

Что касается чувствительности ионного анометра к направлению скорости, то отличие характеристики от закона косинуса не превышает 4%. Поэтому рассматриваемый тип зонда представляет большой интерес, так как в отличие от термоанемометров с нагретой нитью или лентой, ионный термоанемометр позволяет определить направление течения.

Пространственное разрешение и разрешение по частоте зависят от размеров зонда; полоса пропускания имеет порядок  $10^2$  Гц. Чувствительность зонда мало зависит от влажности (изменяется на несколько процентов при изменении относительной влажности от 10 до 90%), за исключением случая очень влажной атмосферы.

### 12.2.3. Чашечные и крыльчатые аномометры

Анемометры этого типа, называемые также вертушками, снабжены чувствительным элементом в виде системы чашек или крыльчаток, приводимых во вращение движущейся жидкостью. Скорость вращения, измеренная соответствующим тахометрическим устройством, пропорциональна скорости течения жидкости.

**Чашечный аномометр** (рис. 12.9). Система состоит из 3 или 4 (в зависимости от модели) полусферических чашек, каждая из которых расположена на конце стержней, укрепленных на общей оси. Система может быть открытой или закрытой обтекателем; обтекатель уменьшает чувствительность аномометра к пространственным неоднородностям течения.

Находясь в потоке, чашечный аномометр вращается, так как его коэффициент лобового сопротивления (разд. 12.1.2) имеет разную величину в зависимости от того, на какую сторону полусферической чашки набегает поток.

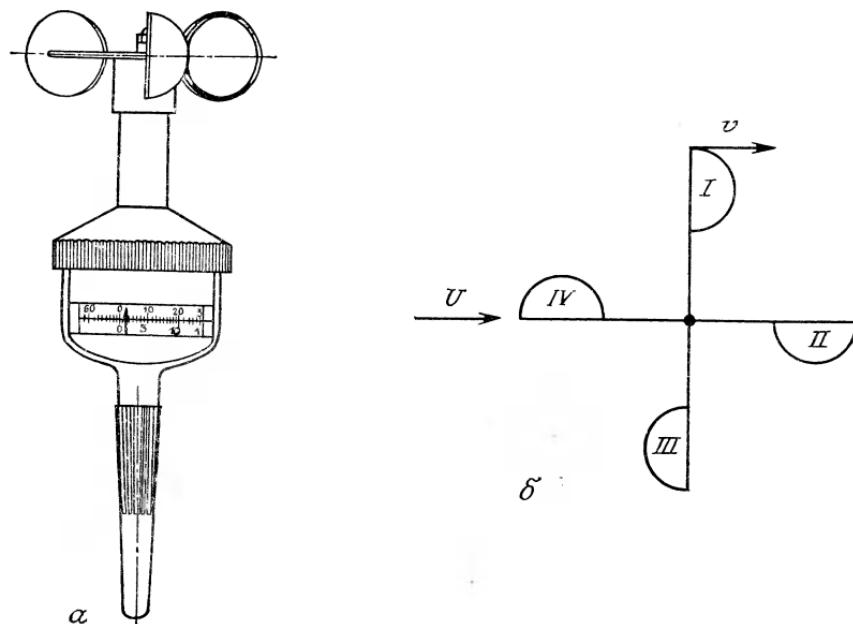


Рис. 12.9. Чашечный анемометр.

*α* — модель с тремя чашками (фирма Richard et Pekly); *β* — схема анемометра с четырьмя чашками, соответствующая расчету, описанному в разд. 12.2.3.

Легко вывести уравнение равновесия анемометра, рассмотрев его в момент времени, когда две чашки (например, I и III) расположены перпендикулярно скорости течения  $U$ . Если не учитывать влияние соседних аэродинамических следов, то можно сказать, что силы, действующие на две другие чашки (II и IV), уравновешены (рис. 12.9, *б*).

Скорости I и III чашек равны  $v$  и  $-v$  и в рассматриваемый момент времени направлены параллельно  $U$ . Поэтому силы лобового сопротивления, действующие на чашки, соответственно равны

$$F_1 = (1/2) \rho c_x S (U - v)^2,$$

$$F_3 = (1/2) \rho c'_x S (U + v)^2,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $S$  — площадь миделевого сечения чашки,  $c_x$  и  $c'_x$  — коэффициенты лобового сопротивления для каждой из сторон полусферической чашки. Получаем

$$c_x (U - v)^2 = c'_x (U + v)^2,$$

откуда

$$U = v \frac{\sqrt{c_x} + \sqrt{c'_x}}{\sqrt{c_x} - \sqrt{c'_x}}.$$

Численные значения коэффициентов лобового сопротивления для полой полусферы составляют  $c_x = 1,42$  и  $c_x' = -0,38$ ; в результате получаем  $U = 3,1 v$ .

Следует отметить, что предыдущий расчет проведен на основе упрощенного подхода, так как коэффициенты  $c_x$  зависят от числа Рейнольдса и угла атаки, а также необходимо учитывать влияние следа. При работе в некотором диапазоне скоростей следует учитывать нелинейность характеристики.

**Крыльчатые анемометры** (рис. 12.10). Ось крыльчатого анемометра располагается вдоль скорости течения. Пренебрегая трением, можно приближенно оценить скорость по частоте вращения крыльчатки в потоке. Получим соотношение:

$$U = hN,$$

где  $U$  — скорость течения,  $N$  — число оборотов в секунду,  $h$  — постоянная.

Для практического применения предложены другие формулы, учитывающие трение и порог страгивания:

$$U = a + bN,$$

$$U = aN + bN^2 + c \quad (\text{Баумгартен}),$$

$$U = a + bN + c/U \quad (\text{Рато}).$$

Величины констант, входящих в эти формулы, зависят, очевидно, от характеристик крыльчатки и свойств жидкости. Некоторые характеристики анемометра могут изменяться с течением времени, например, из-за износа подшипников. При использовании крыльчатых анемометров в жидкостях, особенно в естественных потоках, необходимо обращать внимание на посторонние предметы (растения, галька и т. д.). Поэтому приходится часто производить повторные градуировки этих приборов.

Анемометр Гилла, применяемый в метеорологии, имеет три взаимно перпендикулярные оси, на каждой из которых закреплена система чашек. Он позволяет определить вектор скорости ветра.



Рис. 12.10. Крыльчатый анемометр (фирма Richard et Pekly).

**Характеристики схем формирования сигнала.** Формирование сигнала, генерируемого вертушкой, осуществляется каким-либо из четырех возможных методов. Наиболее старый метод состоит в использовании простой механической трансмиссии, связанной с механическим счетчиком, совместно с хронометром. Второй метод заключается в соединении вертушки с тахометрическим генератором (см. разд. 9.1) на оси вертушки, что сопряжено со снижением чувствительности. Более употребительны такие методы:

- закрепление небольшого магнита на крыльчатке, что позволяет индуцировать импульс при каждом прохождении магнита перед катушкой;
- использование фотоэлектрического датчика, который закрывается при каждом прохождении лопасти.

Соответствующая схема формирования сигнала позволяет измерить либо частоту, которая связана со скоростью, либо напряжение, пропорциональное скорости, которое получается в преобразователе частота — напряжение (см. разд. 9.4).

Градуировка вертушки осуществляется двумя способами:  
а) путем размещения в потоке, скорость которого известна;  
б) путем перемещения вертушки с известной скоростью в неподвижной жидкости.

Первый метод применяют, главным образом, для воздушных вертушек, а второй — для жидкостных. При градуировках вертушек необходимо принимать меры предосторожности; среди прочих факторов надо учитывать ускорение потока и влияние стенок.

Рабочие характеристики вертушек в сильной степени зависят от качества изготовления, состояния и тщательности градуировки. Можно обеспечить точность около 1 %. Однако при большой турбулентности и при значительных градиентах скорости сигнал может искажаться. Разрешение по частоте может достигать в лучшем случае нескольких Гц, а диапазон скоростей, в котором применяются вертушки, составляет от 0,1 до 30 м/с для газов и от 0,05 до 10 м/с для жидкостей. Нижний предел определяется порогом страгивания вертушки.

#### 12.2.4. Методы измерения скорости косвенными датчиками

Ниже мы кратко опишем методы измерений, в которых определение скорости производится косвенно, по воздействию, оказываемому на некоторую зависящую от скорости физическую величину, измеряемую рассматриваемыми датчиками.

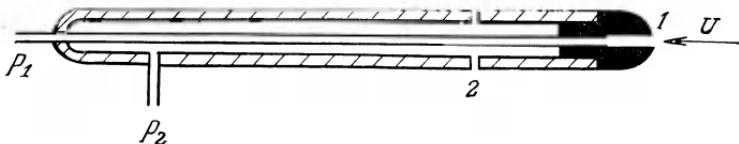


Рис. 12.11. Трубка Пито.

**Измерение трубкой Пито** (рис. 12.11). Уравнение Бернулли (см. разд. 12.1.2) позволяет связать скорость  $U$  с давлениями  $p_1$  и  $p_2$  соответственно в точках 1 и 2. Для такого случая получаем

$$U = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}},$$

где  $\rho$  — плотность жидкости. Разность  $p_1 - p_2$  можно измерить с помощью дифференциального датчика давления (гл. 13).

**Лазерная анемометрия.** *Принцип действия.* Два луча, испускаемые лазером, фокусируются на одном и том же объеме жидкости ( $\sim 0,1$   $\text{мм}^3$ ), где образуются интерференционные полосы (рис. 12.12, а). Выражение для ширины полосы имеет вид

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)},$$

где  $\lambda$  — длина световой волны, а  $\theta$  — угол между двумя лучами лазера.

Когда частицы, увлекаемые потоком, пересекают зону интерференции, они поочередно проходят через светлые и темные области. Поэтому рассеянный ими свет, воспринимаемый оптическим датчиком (фотодиодом или фотоумножителем), модулируется с частотой  $f_D$  (доплеровская частота), зависящей от скорости частиц и ширины интерференционных полос  $d$ :

$$f_D = \frac{U}{d} = \frac{2U}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2},$$

где  $U$  — компонента скорости жидкости по нормали к полосам. Частота  $f_D$  является линейной функцией скорости  $U$ . Таким методом можно измерять скорости  $U$  в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  м/с.

Для формирования сигнала, генерируемого оптическим датчиком, используются две методики: приведение частоты и счет импульсов.

В первом случае (рис. 12.12, б) частота отфильтрованного доплеровского сигнала сравнивается с частотой гетеродина,

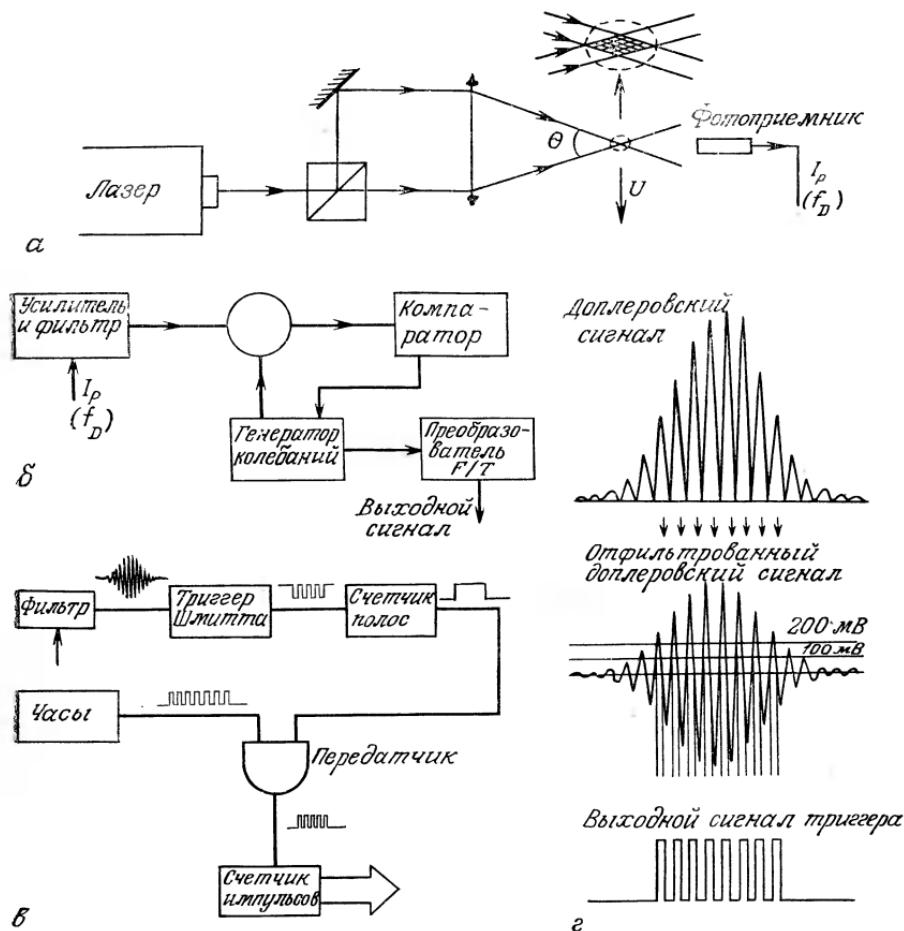


Рис. 12.12. Лазерный анемометр.

*а* — принцип действия; *б* — схема с приведением частоты; *в* — схема счета импульсов; *г* — форма сигналов.

определенной заданным напряжением. Разность частот преобразуется в пропорциональное ей напряжение, которое воздействует на гетеродин таким образом, чтобы привести его частоту к величине  $f_D$ . Преобразователь частоты в напряжение позволяет затем получить аналоговый сигнал, пропорциональный скорости движения частиц в потоке.

Преимущество такой схемы состоит в получении непрерывного сигнала, но для того, чтобы доплеровский сигнал не прерывался, необходимо наличие достаточно большого количества частиц.

Вторая схема (рис. 12.12, в) применяется к течениям с малой плотностью частиц (к газам), которые генерируют доплеровский сигнал в виде «порывов» (импульсов) — рис. 12.12, г. Этот сигнал фильтруется, преобразуется по форме и передается на высокочастотные часы, частота которых  $F_H$ . Подсчитывается число периодов  $N_H$  за время действия фиксированного числа периодов  $N_D$  доплеровского сигнала. В результате определяется частота

$$f_D = (N_D/N_H) F_H.$$

**Ультразвуковой анемометр.** Акустическая волна распространяется в данной среде со скоростью звука  $c$ , зависящей от свойств среды и от температуры. Например, для воздуха  $c = 331,4$  м/с при  $8^\circ\text{C}$  и  $c = 342,9$  м/с при  $20^\circ\text{C}$ . Скорость звука в жидкостях больше, чем в газах. Для воды при  $8^\circ\text{C}$   $c = 1435$  м/с.

Если среда, в которой распространяется волна, движется со скоростью  $U$  относительно наблюдателя, то измеренная им скорость  $c'$  выражается формулой

$$c' = c + U \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между скоростью  $U$  и направлением распространения волны (рис. 12.13).

Система для измерения скорости состоит из излучателя ультразвуковых импульсов и приемника, находящегося на расстоянии  $L$ . Длительность распространения импульсов между излучателем и приемником равна

$$t_p = \frac{1}{c + U \cos \alpha}.$$

Излучатель и приемник представляют собой пьезоэлектрические пластинки. Излучатель возбуждается электрическим напряжением, создающим серию волн высокой частоты (например, 1 МГц). Приемник выдает сигнал в форме изменений акустического давления, действию которого он подвергается. Такая система редко используется для измерения скорости, так как ее пространственное разрешение невелико (скорость интегрируется по расстоянию  $L$ ). Такую измерительную установку чаще применяют при измерении расхода (разд. 12.3).

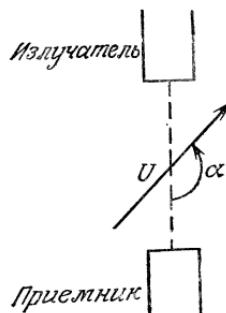


Рис. 12.13. Принцип действия ультразвукового анемометра.

### 12.3. Измерение расхода

Измерение расхода имеет большое значение в трубопроводных транспортных системах (газопроводы, нефтепроводы) и в промышленных установках, где необходимо контролировать количество жидкости, участвующей в процессе: в химических реакторах, энергетических станциях, двигателях внутреннего сгорания и т. д.

#### 12.3.1. Электромагнитные расходомеры

**Принцип действия.** Рассмотрим перемещение за время  $dt$  отрезка проводника  $M_1M_2$  длиной  $l$  в магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ . Пусть угол между проводником и вектором его скорости  $\mathbf{U}$  равен  $\theta$  (рис. 12.14). Тогда можно записать соотношения

— для ометаемой площади

$$ds_c = lU \sin \theta dt,$$

или в векторной форме

$$ds_c = \mathbf{l} \times \mathbf{U} dt, \text{ где } \mathbf{l} = M_1 M_2,$$

— для потока магнитной индукции

$$d\varphi_c = \mathbf{B} ds_c dt,$$

— для индуцированной э. д. с.

$$e = -d\varphi_c/dt = \mathbf{B} \times \mathbf{U} \mathbf{l}.$$

Если скорость  $\mathbf{U}$  перпендикулярна  $\mathbf{l}$ , а индукция  $\mathbf{B}$  перпендикулярна плоскости, образованной векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{U}$ , то получим:

$$e = BlU.$$

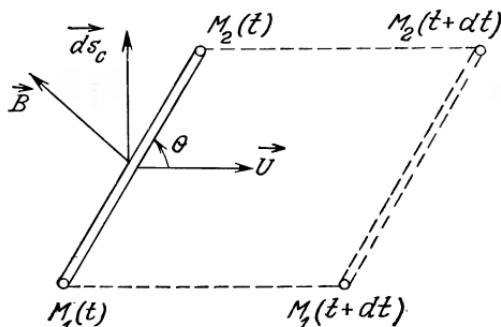


Рис. 12.14. Перемещение отрезка проводника в поле магнитной индукции.

Эта формула распространяется на случай течения жидкости в трубопроводе диаметром  $D$  со скоростью  $U$ , перпендикулярной  $B$ . Индуцированная э. д. с. вдоль диаметра, перпендикулярного  $B$  и  $U$ , выражается формулой

$$e = BDU.$$

В действительности скорость изменяется вдоль радиуса поперечного сечения, но так как распределение скорости симметрично относительно оси трубопровода, то можно показать, что измеренная описанным способом скорость  $U$  является средней скоростью течения. В этих условиях сигнал  $e$  пропорционален расходу.

**Реализация метода.** Магнитная индукция величиной  $10^{-3} \div 10^{-2}$  Тл создается двумя катушками, расположенными диаметрально противоположно по обе стороны трубопровода, расход в котором измеряется. Трубопровод изготавливается из немагнитного материала, а внутренняя поверхность трубы покрывается изоляционным слоем, в случае необходимости стойким к агрессивной транспортируемой среде.

Два электрода, воспринимающие сигнал, располагаются на концах диаметра поперечного сечения, перпендикулярного силовым линиям магнитного поля. Катушки питаются переменным током (например, с частотой 30 Гц), чтобы избежать поляризации электродов. При этом сигнал генерируется в виде

$$e = UDB_0 \cos(\omega t + \varphi),$$

где  $B_0$  — максимальная величина индукции, а  $\omega$  — частота ее пульсаций. Амплитуда сигнала, пропорциональная  $U$ , обычно имеет порядок мВ. Она выделяется из сигнала (рис. 12.15) посредством синхронного детектирования (см. разд. 4.4.4).

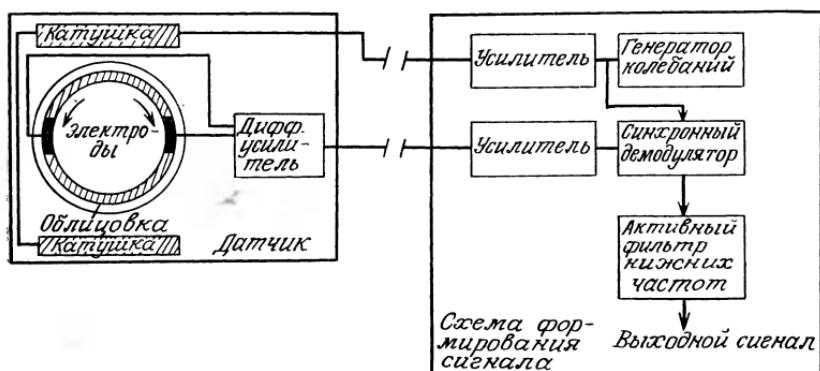


Рис. 12.15. Электромагнитный расходомер и схема формирования сигнала (фирма Sereg — Schlumberger).

**Метрологические характеристики.** Удельная электрическая проводимость жидкостей должна быть минимальной, порядка нескольких мкСм/см, во-первых, чтобы внутреннее сопротивление генератора сигнала оставалось много меньшим входного сопротивления измерительной установки и, во-вторых, чтобы ограничить постоянную времени  $RC$ , где емкость  $C$  определяется, главным образом, соединительными кабелями. Диапазон измеряемых расходов зависит от диаметра трубопровода; скорость течения обычно составляет от 1 до 10 м/с.

**Примеры датчиков.** 1. Диаметр трубопровода 10 мм, минимальный расход жидкости  $0,28 \text{ м}^3/\text{ч}$ , максимальный  $2,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

2. Диаметр трубопровода 1 м, минимальный расход жидкости  $2800 \text{ м}^3/\text{ч}$ , максимальный  $28000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Нелинейность  $<\pm 0,25\%$  от полного диапазона измеряемых расходов; погрешность  $\pm 1\%$  от Д.И.; постоянная времени  $\sim 1$  с.

Достоинства магнитных расходомеров:

а) измерение не зависит от физических свойств жидкости (плотности, вязкости, удельной электрической проводимости — при условии, что она выше некоторой минимальной величины порядка нескольких мкСм/см);

б) измерение практически не зависит от распределения скорости в трубопроводе, что позволяет, в случае необходимости, размещать расходомер вблизи местных сопротивлений (колен, задвижек и т. п.);

в) в зоне измерений не происходит потери напора, так как сечение трубопровода ничем не загромождается;

г) отсутствие у расходомера подвижных изнашивающихся элементов;

д) коррозионная стойкость расходомера (например, в случае кислот), обеспечиваемая выбором соответствующего внутреннего покрытия (тефлон, эмаль, стекло) и материала электродов (титан, платина).

### 12.3.2. Механические расходомеры с электрическими преобразователями

На чувствительный элемент расходомера, помещенный в трубопровод, воздействуют аэро- или гидродинамические силы движущейся жидкости, которые вызывают его вращение (ротор турбины) или перемещение (поплавок ротаметра, лопасть). Соответствующий датчик (в первом случае — тахометр, во втором — датчик положения) генерирует электрический сигнал, пропорциональный расходу жидкости.

**Турбинный расходомер.** Принцип его действия такой же, как у крыльчатых анемометров: поток жидкости приводит во

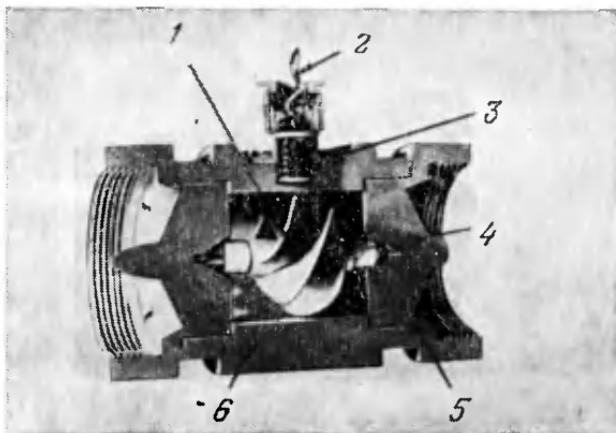


Рис. 12.16. Разрез турбинного расходомера (фирма Richard — Pekly).  
1 — крыльчатка; 2 — кабель; 3 — катушка; 4 — магнит; 5 — дефлектор; 6 — корпус.

вращение турбину, размещенную на оси трубопровода, в котором измеряется расход (рис. 12.16). Частота вращения турбины  $N$  (число оборотов в секунду) пропорциональна расходу  $Q$ :

$$Q = KN.$$

Коэффициент  $K$  является параметром конструкции расходомера, не зависящим, в принципе, от рода жидкости. Получены различные формулы, в которых не учитываются механическое трение и влияние вязкости жидкости:

$$N = 2\pi \bar{r} A \operatorname{ctg} \alpha,$$

где  $\bar{r}$  — средний радиус лопаток турбины,  $A$  — площадь поперечного сечения потока ( $A = A_c - A_r$ ,  $A_c$  — площадь внутренне-го поперечного сечения трубопровода,  $A_r$  — площадь поперечного сечения ротора),  $\alpha$  — угол наклона лопатки относительно оси турбины. Гохрейтер предложил другое выражение для  $K$ :

$$K = \frac{\pi}{4} D^2 L \left[ 1 - \alpha^2 - \frac{2m(D_b - D_p)t}{\pi D^2} \sqrt{1 + \left( \frac{\pi D_b}{L} \right)^2} \right],$$

где  $D$  — внутренний диаметр трубопровода,  $D_b$  и  $D_p$  — соответственно диаметры лопатки у конца и у корня,  $L$  — длина турбины,  $t$  — ширина лопатки,  $\alpha = D_p/D$ ,  $m$  — число лопаток.

Из теоретического анализа размерности следует, что  $Q/ND^3$  зависит также от числа Рейнольдса  $ND^2/v$ , но экспериментами доказано, что обычно существует область больших чисел Рей-

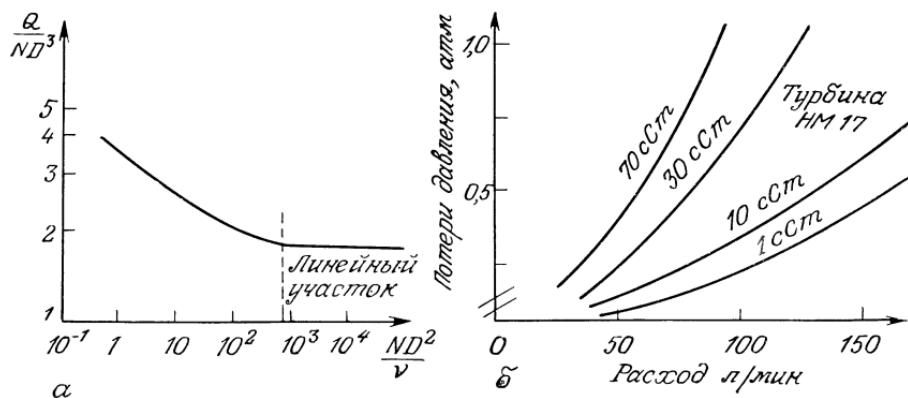


Рис. 12.17. Турбинный расходомер (данные фирмы Endress — Hauser).  
а — влияние числа Рейнольдса; б — зависимость потерь давления от вязкости и расхода жидкости.

нольдса, в которой  $Q/ND^3$  не зависит от числа Рейнольдса и характеристика расходомера является линейной (рис. 12.17, а).

Турбинные расходомеры обычно имеют приспособления, позволяющие ограничить потери напора. Последние, хотя они и невелики, зависят от вязкости жидкости (рис. 12.17, б).

Для преобразования частоты вращения в электрический сигнал используются такие же методы, как для чашечных и крыльчатых анемометров.

*Метрологические характеристики.* Расходы, измеряемые турбинными расходомерами, заключены в следующих диапазонах:

- для газов — от  $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $36\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- для жидкостей — от  $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $14\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Отношение предельных величин диапазона измерений для турбинного расходомера  $Q_{\max}/Q_{\min}$  обычно составляет  $5 \div 20$ . Нижний предельный расход  $Q_{\min}$  определяется трением в подшипниках на оси турбины, которое препятствует вращению при очень малых расходах, поэтому величина  $Q_{\min}$  тем больше, чем меньше плотность жидкости.

Нелинейность датчика составляет  $\pm 0,5 \div 1\%$  при вязкости до  $1 \text{ сПз}$  и  $\pm 1,5\%$  при большей вязкости, воспроизводимость лучше  $\pm 0,5\%$ , погрешность измерений  $\pm 1 \div 2\%$ , время запаздывания — несколько миллисекунд.

К достоинствам турбинных расходомеров относятся указанные выше высокие рабочие характеристики, а также удобство использования генерируемых ими электрических сигналов. Однако для получения достоверных результатов необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности: в жидкости не должно быть газовых пузырей, волокон и диспергированных в

большом количестве частиц; расходомеры необходимо устанавливать посередине прямолинейных участков трубопроводов определенной длины, чтобы исключить возмущения течения.

**Ротаметр.** Ротаметр состоит из небольшого поплавка, помещенного в вертикальной конической трубке (рис. 12.18). Поплавок находится в равновесии под действием, с одной стороны, архимедовой выталкивающей силы и силы лобового сопротивления и, с другой стороны, силы его веса:

$$\rho g V + C_x \frac{\rho S U^2}{2} = \rho_0 g V,$$

где  $V$  — объем поплавка,  $\rho_0$  — его плотность,  $U$  — скорость жидкости,  $\rho$  — ее плотность,  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления,  $S$  — миделевое сечение поплавка (площадь проекции на плоскость, перпендикулярную скорости  $U$ ),  $S = \pi D_0^2/4$ ,  $g$  — ускорение силы тяжести.

Поплавок находится в положении, для которого скорость  $U$  определяется формулой

$$U = \sqrt{\frac{2gV}{C_x S} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}.$$

Диаметр трубы линейно зависит от высоты  $z$ :

$$D = D_0 + az.$$

Расход  $Q$  выражается формулой

$$Q = \frac{\pi}{4} [(D_0 + az)^2 - D_0^2] \sqrt{\frac{2gV}{C_x S} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}.$$

Если трубка слабо расширяющаяся, то на практике пользуются формулой

$$Q = \sqrt{\pi az} \sqrt{\frac{2gV}{C_x} \left( \frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} = Kz.$$

Благодаря канавке, вырезанной в поплавке, обеспечиваются его устойчивое положение и вращение. Отсчет положения производится либо по шкале, нанесенной непосредственно на стеклянную коническую трубку, либо с помощью равномерно расположенных ячеек фотоэлементов, либо, наконец, путем

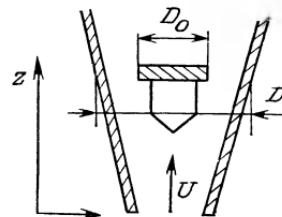


Рис. 12.18. Схема и принцип действия ротаметра.

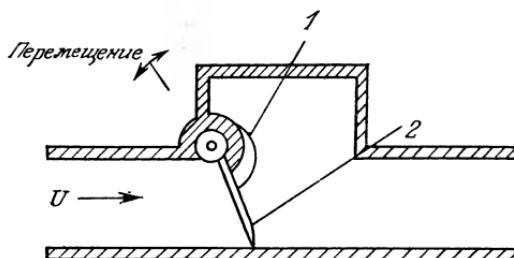


Рис. 12.19. Расходомер с лопастью.

1 — пружина; 2 — лопасть.

соединения поплавка через стержень с сердечником дифференциального трансформатора. Размеры ротаметров и, соответственно, диапазон измеряемых расходов изменяются в очень широких пределах: от  $10^{-4}$  до  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для данного ротаметра предельные величины диапазона измеряемого расхода находятся в отношении 10 : 1.

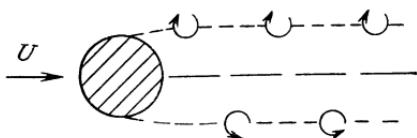
Погрешность измерения составляет 3—10% от диапазона измерений. Ротаметр вносит потери напора, величина которых зависит от расхода и от вязкости жидкости. Градуировку ротаметров необходимо производить в тех же условиях, в которых они будут эксплуатироваться.

**Расходомер с лопастью.** На лопасть действуют аэро- и гидродинамическая сила потока, сила ее веса и, если это необходимо, сила от возвратной пружины (рис. 12.19). Положение равновесия лопасти зависит от расхода, и указание положения можно преобразовать в электрический сигнал с помощью потенциометра, ось которого закреплена на оси вращения лопасти. Характеристика отклика может быть как линейной, так и нелинейной и зависит от формы измерительного участка трубопровода. Преимущества расходомера рассматриваемого типа заключаются в его простоте, прочности и низкой стоимости.

### 12.3.3. Жидкостные расходомеры с электрической передачей сигнала

В данном случае чувствительным элементом является сама жидкость. Препятствие, соответствующим образом помещенное в трубопроводе, создает в потоке периодические возмущения (вихри). Частота этих периодических возмущений жидкости пропорциональна скорости течения и, следовательно, расходу. Он измеряется с помощью датчика, воспринимающего периодические изменения давления или скорости потока.

Рис. 12.20. Вихри в следе за препятствием.



**Расходомер, использующий вихри Кармана.** Если поместить поперек потока цилиндрический стержень, то в следе за ним при некоторой определенной величине числа Рейнольдса образуются чередующиеся вихри (рис. 12.20).

Частота  $f$  этих вихрей, записанная в безразмерном виде, определяет число Струхала  $S$ :

$$S = fD/U = F(\text{Re}),$$

где  $D$  — диаметр трубопровода, а  $U$  — скорость течения. Число Струхала постоянно для чисел Рейнольдса, заключенных в диапазоне от  $3 \cdot 10^2$  до  $2 \cdot 10^5$ :

$$fD/U = 0,185.$$

Поэтому скорость и, следовательно, расход жидкости можно определить, измеряя частоту  $f$  схода вихрей. Такое измерение можно осуществить посредством емкостных датчиков давления, помещенных по обе стороны препятствия, либо с помощью нагретых нитей, помещенных в следе за препятствием. Достоинствами этого прибора являются широкий диапазон измерений (в принципе максимальный предел измерений может быть в 30 раз больше минимального) и хорошая линейность характеристики. Могут возникать неустойчивости, связанные с трехмерностью течения; используются различные средства стабилизации течения: решетки, другие специальные препятствия в потоке.

**Расходомеры, использующие вихри на оси потока и эффект Коанда.** Расходомеры первого типа основаны на генерации колеблющихся вихрей с помощью насадка на входе в прибор (рис. 12.21). Частоту колебаний вихря, связанную со скоростью течения, можно измерить пьезоэлектрическим датчиком. Расходомер этого типа имеет широкий диапазон измерений (отношение максимального предела измерений к минимальному достигает 100) и линейную характеристику.

Расходомер, основанный на эффекте Коанда, использует тот факт, что струя, текущая вблизи стенки, прилипает к ней; создав возмущение, можно вызвать отрыв струи и присоединение ее к другой стенке. Эффект Коанда позволяет реализовать жидкий осциллятор, частота которого линейно зависит от расхода. Измерение осуществляется терморезистором, размещен-

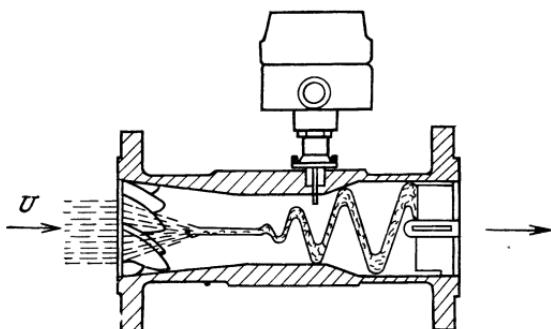


Рис. 12.21. Расходомер с осевым вихрем.

ным вблизи одной из стенок и находящимся при постоянной температуре; соответствующий сигнал определяется частотой колебаний жидкости.

Измеряемые расходы, в зависимости от конструкции таких приборов, составляют от  $10^{-3}$  до  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ , а пределы измерений одним прибором обычно отличаются в 10 раз.

#### 12.3.4. Расходомеры с сужающими устройствами

Сужение трубопровода или изменение его направления вызывает возникновение разности давлений  $\Delta p$  перед сужением (поворотом) и за ним, которая связана с расходом соотношением вида

$$Q = K \sqrt{2\Delta p / \rho},$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, а  $K$  — константа, определяемая в некотором диапазоне чисел Рейнольдса только геометрией устройства. Дифференциальный датчик перепада давления генерирует измеряемый сигнал.

Основными типами сужающих устройств являются (рис. 12.22) диафрагма (мерная шайба), которая применяется наи-

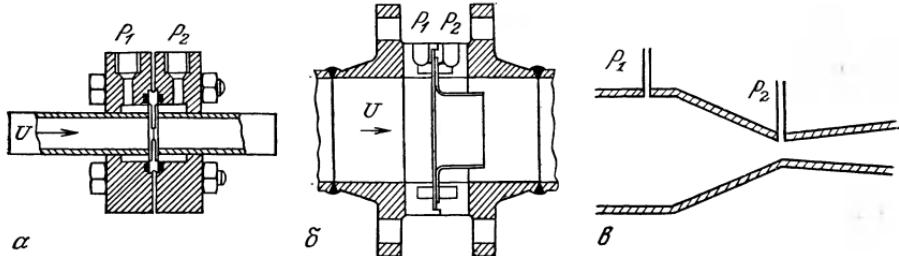


Рис. 12.22. Сужающие устройства (докум. фирмы Seger — Schlumberger).   
  $\alpha$  — диафрагма;  $\delta$  — сопло;  $\beta$  — труба Вентури.

более часто, сопло и труба Вентури. Эти устройства позволяют измерять расход в очень широком диапазоне его изменения: от долей  $\text{м}^3/\text{ч}$  до нескольких сотен тысяч  $\text{м}^3/\text{ч}$ , в зависимости от диаметра трубопровода. Относительный диапазон измерений для данного устройства составляет примерно 3 : 1. Погрешность измерения — 1–2% от диапазона измерений. К сожалению, сужающие устройства создают невосстановимые потери напора, которые составляют значительную часть возникающего перепада давления (70% для диафрагмы, 50% для сопла и 10% для трубы Вентури).

### 12.3.5. Ультразвуковой расходомер

**Методы измерения.** Принцип действия ультразвукового расходомера описан в разд. 12.2.4. Время распространения  $t_p$  последовательности ультразвуковых волн на расстояние  $L$  выражается формулой

$$t_p = L(c + U \cos \alpha).$$

Время  $t_p$  зависит от скорости звука  $c$ , зависящей, в свою очередь, от рода жидкости и от ее температуры.

Можно получить выражение, не зависящее от  $c$ , измеряя эффективную величину  $t_p$ , когда каждый из двух пьезоэлектрических элементов поочередно используется сначала в качестве излучателя, а затем в качестве приемника (рис. 12.23). Итак, в этих случаях получим

— для направления 1→2:

$$t_p = L/(c + U \cos \alpha),$$

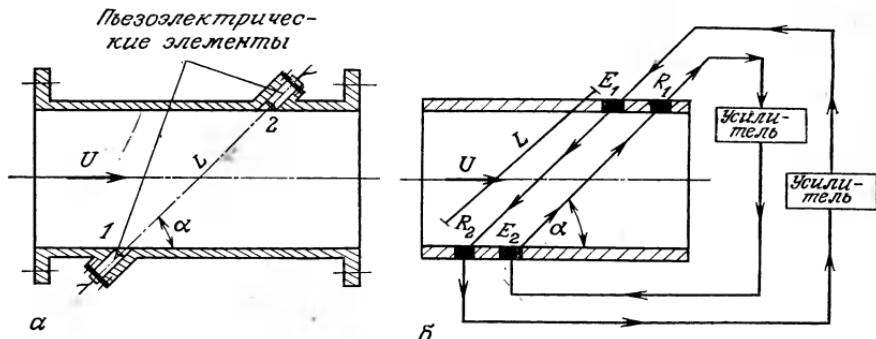


Рис. 12.23. Ультразвуковой расходомер.

**а** — схема с двумя пьезоэлектрическими элементами; **б** — схема с четырьмя пьезоэлектрическими элементами.

— для направления  $2 \rightarrow 1$ :

$$t_p = L / (c - U \cos \alpha),$$

откуда

$$(t_{p_{21}} - t_{p_{12}}) / (t_{p_{12}} t_{p_{21}}) = 2U \cos \alpha / L.$$

Этот результат можно получить и экспериментальным путем, например, с помощью схемы, изображенной на рис. 12.24, б: излучатель  $E_1$  с приемником  $R_2$  измеряют  $t_{p_{12}}$ , а излучатель  $E_2$  с приемником  $R_1$  измеряют  $t_{p_{21}}$ .

Приход сигнала на каждый из приемников включает новое излучение соответствующего излучателя. Поэтому частоты излучаемых последовательностей волн равны

$$f_{12} = 1/t_{p_{12}} \quad \text{и} \quad f_{21} = 1/t_{p_{21}}.$$

Совместная обработка этих сигналов в нелинейной схеме позволяет отфильтровать на выходе частоту биения  $f_b$ :

$$f_b = f_{21} - f_{12} = 2U \cos \alpha / L.$$

В действительности такой способ дает измерение средней по поперечному сечению трубопровода скорости  $U_m$ :

$$U_m = \frac{2}{D} \int_0^{D/2} U dr.$$

Средняя по расходу скорость  $U_d$  при наличии осевой симметрии течения выражается формулой

$$U_d = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4}{\pi D^2} \int_0^{D/2} 2\pi r U dr.$$

Отношение  $U_m/U_d$  зависит от профиля скорости в поперечном сечении и числа Рейнольдса  $Re$ . Это отношение можно определить, пользуясь эмпирическими формулами. Для больших  $Re$  оно близко к 1. На практике описанное устройство необходимо градуировать в условиях, близких к условиям его эксплуатации.

**Метрологические характеристики.** Ультразвуковые расходомеры позволяют измерять расходы от 0,1 до  $10^5$  м<sup>3</sup>/ч в зависимости от диаметра трубопровода, который может составлять от нескольких миллиметров до нескольких метров; отклонение от линейности менее  $10^{-3}$  от диапазона измерений; погрешность  $\pm 1\%$  от диапазона измерений; время запаздывания зависит от используемой методики, но может быть порядка  $10^{-3}$  с. Достоинствами прибора являются отсутствие движущих элементов

(нет износа) и возмущений течения (нет потерь напора) и независимость от физико-химических свойств жидкости (жидкость может быть электропроводной и неэлектропроводной, корrodирующей, заряженной и т. д.). К недостаткам ультразвукового расходомера следует отнести необходимость его градуировки в реальных условиях эксплуатации.

### 12.3.6. Измерение расхода с помощью радиоактивных добавок

Использование радиоактивных добавок позволяет осуществлять измерения, не зависящие от физических свойств жидкости. Однако эта методика не позволяет измерять расход непрерывно; она используется, в частности, для градуировки других расходомеров, установленных на том же трубопроводе.

**Метод подмешивания постоянного расхода.** Добавка радиоактивного вещества с концентрацией  $C_0$  и постоянным расходом  $q$  вводится в трубопровод, расход  $Q$  через который неизвестен. В точке измерения, расположенной достаточно далеко вниз по потоку для того, чтобы добавка полностью смешалась с исследуемой жидкостью, концентрация  $C$  радиоактивного вещества удовлетворяет соотношению

$$qC_0 = (Q + q) C,$$

откуда расход можно определить по формуле

$$Q = q(C_0/C), \text{ поскольку } q \ll Q.$$

Концентрации  $C_0$  и  $C$  радиоактивного вещества определяются образцовыми приборами, измеряющими радиоактивность посредством соответствующего детектора ядерного излучения.

**Метод размаха.** Выше по потоку от двух точек измерения  $A_1$  и  $A_2$ , находящихся на расстоянии  $L$  друг от друга и снабженных детекторами ядерного излучения, в трубопровод кратковременно вводят радиоактивную добавку. После этого определяют последовательные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , когда радиоактивность и, следовательно, концентрация радиоактивного вещества становятся максимальными сначала в  $A_1$ , а затем в  $A_2$ . Затем определяют скорость течения  $U$ , предполагая ее постоянной в поперечном сечении трубопровода, и соответствующий расход  $Q$ , если площадь этого сечения  $S$  известна:

$$U = L/(t_2 - t_1) \quad \text{и} \quad Q = SU.$$

Можно привести примеры радиоактивных добавок и детекторов (см. гл. 16). Для газов — это излучатель частиц  $\beta^-$  — изотоп криптона  $^{85}\text{Kr}$ , которые детектируются счетчиком Гейгера — Мюллера.

лера, а для жидкостей — добавка изотопа натрия  $^{24}\text{Na}$ , который испускает  $\gamma$ -излучение, детектируемое, например, сцинтиллятором.

### 12.3.7. Тепловой измеритель массового расхода

**Принцип действия.** Измерительное устройство состоит из тонкостенной металлической трубы малого диаметра, на внешнюю поверхность которой намотан проволочный нагреватель, а с противоположных двух сторон от него симметрично установлены два датчика температуры, показывающие соответственно температуру  $T_1$  выше по потоку и температуру  $T_2$  ниже по потоку от нагревателя (рис. 12.24, *a*). Когда расход равен нулю, нагрев симметричен и  $T_1 = T_2$ . При наличии расхода  $T_1$  уменьшается, а  $T_2$  увеличивается. Разность  $\Delta T = T_2 - T_1$  пропорциональна массовому расходу  $Q_m$  (рис. 12.24, *б*).

**Реализация.** Датчиками температуры могут быть либо две термопары, либо два термометра сопротивления, составляющие два смежных плеча моста Уитстона. В два других плеча моста

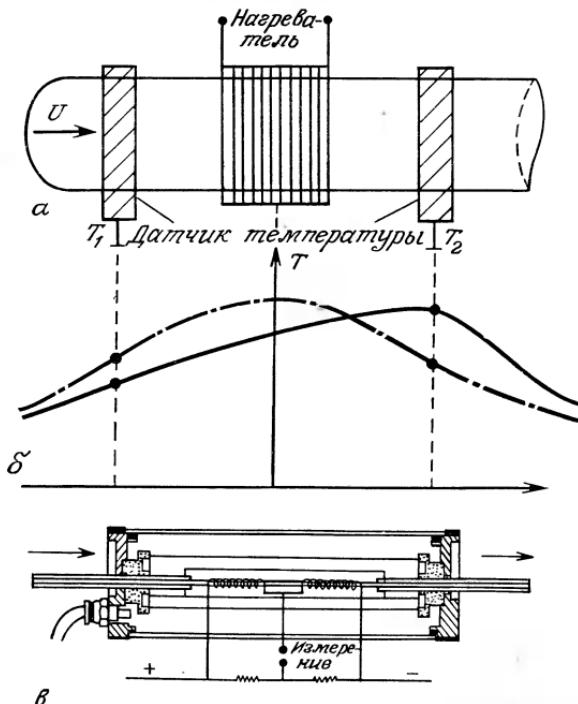


Рис. 12.24. Термовой измеритель массового расхода (докум. фирмы Setaram).  
*а* — принцип действия и устройство; *б* — распределение температур перед нагревательной катушкой и за ней (—, — без расхода, — с расходом); *в* — схема, в которой совмещены нагревательная и измерительная цепи.

включены резисторы постоянного сопротивления, а измеряемым сигналом является разбаланс напряжения. В другой конструктивной схеме функции подогрева и измерения  $\Delta T$  осуществляются одновременно с помощью двух термометров сопротивления, тепловыделение которых достаточно для нагрева жидкости (рис. 12.24, в).

Примером теплового измерителя массового расхода может служить датчик U70 (фирма-изготовитель Setaram) со следующими метрологическими характеристиками: максимальный расход 5 л/ч (для воздуха при нормальных условиях); максимальный расход обратно пропорционален давлению (0,05 л/ч при давлении 10 МПа и 50 л/ч при давлении 10 кПа). Для других газов максимальный расход получается делением максимального расхода для воздуха на отношение объемных удельных теплоемкостей рассматриваемого газа и воздуха. Порог чувствительности прибора 1/10 000 максимального расхода, т. е. 0,5 см<sup>3</sup>/ч; погрешность 0,5÷1,5% (в зависимости от градуировочного газа); постоянная времени от 2,5 до 150 с (в зависимости от схемы прибора); потери напора 2 Па для максимального расхода воздуха при нормальных условиях.

Если расход, который нужно измерить, больше максимального расхода, измеряемого датчиком, последний устанавливают на байпасе, геометрические характеристики которого выбирают так, чтобы расход, измеряемый датчиком, составлял постоянную часть от суммарного расхода.

### 12.3.8. Измеритель массового расхода, использующий силу Кориолиса

Законами механики установлено, что на массу  $m$ , движущуюся со скоростью  $v_r$  относительно системы отсчета, находящейся во вращательном движении с угловой скоростью  $\Omega$ , действует сила  $f_c$ , называемая силой Кориолиса и описываемая формулой

$$f_c = 2m\Omega \times v_r.$$

Жидкость, массовый расход  $Q$  которой необходимо измерить, течет со скоростью  $v_r$  через измерительную трубку U-образной формы (рис. 12.25). Трубку приводят в колебательное движение относительно оси  $OO'$ , перпендикулярной рукавам U-образной трубки; мгновенная угловая скорость трубы равна  $\Omega$ . Пусть  $\rho$  — плотность жидкости,  $A$  — площадь поперечного сечения U-образной трубы,  $L$  — длина одного из ее рукавов,  $d$  — расстояние между рукавами. В этом случае легко получить выражения для массового расхода  $Q = \rho A v_r$ ; массы жидкости, содержащейся в одном из рукавов U-образной трубы,  $m = \rho A L$ ;

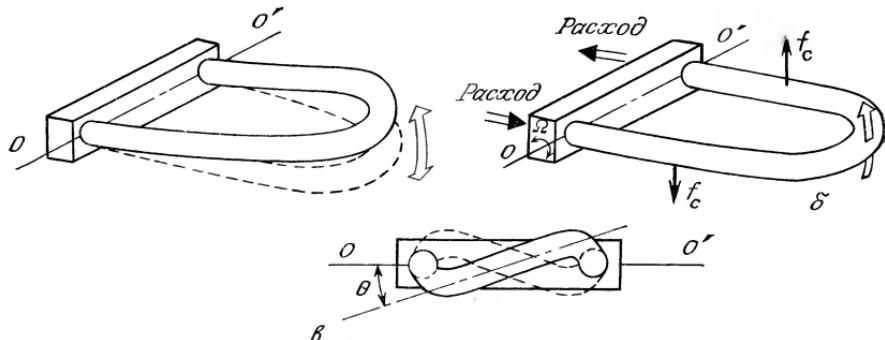


Рис. 12.25. Измеритель массового расхода, использующий силу Кориолиса. *a* — колеблющийся измерительный прибор; *б* — направление сил Кориолиса; *в* — результатирующие крутые колебания.

силы Кориолиса, действующей на один из рукавов U-образной трубы,  $f_c = 2\rho AL\Omega v_r = 2QL\Omega$ ; момента сил Кориолиса, действующих на жидкость в обоих рукавах U-образной трубы (скорости  $v_r - v_r$ ),  $\Gamma_c = 2Q\Omega Ld$ .

Под воздействием кориолисового момента  $\Gamma_c$  U-образная трубка поворачивается на угол  $\theta$  и уравновешивается моментом действующих в противоположном направлении сил упругости  $\Gamma_c = k\theta$ . В положении равновесия получаем

$$\theta = 2Q\Omega Ld/k, \text{ или } Q = k\theta/2\Omega Ld.$$

Угловая скорость  $\Omega$  зависит от времени, как и угол  $\theta$ . Его можно измерить датчиками положения, сигналы которых после преобразования позволяют получить напряжение, пропорциональное массовому расходу  $Q$ .

Получаемое показание прибора не зависит от электрофизических свойств жидкости, и для определения  $Q$  не требуется заранее знать ее плотность, вязкость, давление и температуру. Поэтому описанный датчик является особенно подходящим для неэлектропроводных, заряженных (смеси жидкости с твердыми частицами), двухфазных (эмulsionий), неньютоновских (у которых вязкость зависит от скорости) жидкостей.

Такие датчики позволяют измерять расход от 3 кг/ч до 70 т/ч; погрешность измерений составляет 0,4% от полной шкалы.

#### 12.4. Измерение и указание уровня

При транспортировке и хранении жидкостей в резервуарах требуется определять степень их заполненности, т. е. уровень, которого достигает находящийся в них жидкий продукт. Полу-

чение информации об уровне жидкости может осуществляться двумя способами: в виде непрерывного измерения и в виде указания предельных величин.

При непрерывном измерении датчик и измерительная схема формируют сигнал, амплитуда или частота которого несут информацию о величине уровня жидкости в резервуаре. При этом в каждый момент времени оператор может точно знать объем имеющегося продукта или располагаемый свободный объем резервуара.

При указании уровня указывающий прибор, который состоит по существу лишь из датчика, поставляет информацию только о том, достигнут или не достигнут определенный уровень. Указание верхнего предельного уровня позволяет прекратить наполнение и избежать перелива через край; указание нижнего уровня дает сигнал о необходимости прекратить расходование продукта, что обеспечивает минимальный резервный остаток продукта в емкости и позволяет избежать, например, холостой работы насосов. Сочетание двух сигнализаторов предельного уровня — верхнего и нижнего — позволяет автоматизировать операции заполнения и опорожнения емкостей.

Исходя из различных принципов действия приборов, применяемых для измерения или указания уровня, можно дать следующую классификацию наиболее употребительных методов:

а) гидростатические методы с преобразованием в электрический сигнал;

б) методы, основанные на электрофизических свойствах жидкости;

в) методы, использующие взаимодействие какого-либо излучения с жидкостью.

При выборе соответствующего метода принимаются во внимание физические и химические свойства жидкости (электропроводность, диэлектрическая постоянная, плотность, вязкость, пенообразование, корродирующие свойства) и их возможное изменение; условия хранения (температура, давление, устройства стабилизации или перемешивания); простота установки прибора.

#### 12.4.1. Гидростатические методы

Сигнал, генерируемый измерительным прибором, в этом случае является непрерывной или дискретной функцией высоты уровня жидкости. Он не зависит от электрофизических свойств жидкости, но зависит, кроме рода поплавка, от плотности жидкости.

Поплавок (рис. 12.26, а), который держится на поверхности жидкости, жестко связан с помощью тросов и блоков с аналого-

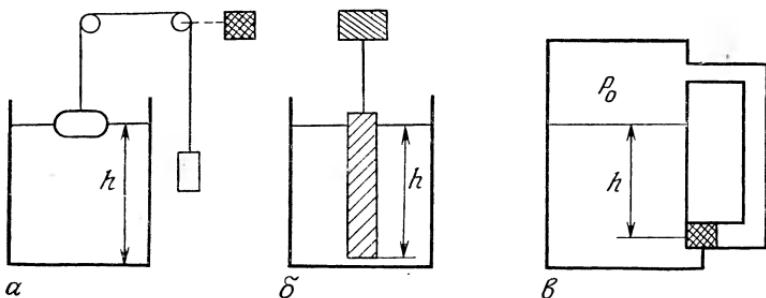


Рис. 12.26. Гидростатические методы измерения уровня.

*а* — поплавочный датчик уровня; *б* — плунжерный датчик выталкивающей силы; *в* — дифференциальный датчик перепада давления.

вым (круговой ленточный потенциометр) или цифровым (градуированный диск) датчиком положения, поставляющим электрический сигнал, соответствующий уровню жидкости.

Плунжер (рис. 12.26, *б*) представляет собой погруженный в жидкость цилиндр, высота которого не меньше максимальной высоты жидкости в резервуаре. Плунжер подвешен к динамометрическому датчику, находящемуся под действием силы  $F$  (кажущийся вес), зависящей от гидростатической высоты  $h$  жидкости:

$$F = P - \rho g S h,$$

где  $P$  — вес плунжера,  $S$  — площадь его поперечного сечения, а  $\rho g S h$  — архимедова выталкивающая сила, действующая на объем погруженной части плунжера ( $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение силы тяжести).

Дифференциальный датчик перепада давления располагается у дна резервуара (рис. 12.26, *в*), где давление  $p$  равно

$$p = p_0 + \rho g h.$$

Здесь  $p_0$  — давление в свободной от жидкости верхней части резервуара, которое может быть равным или не равным атмосферному давлению;  $\rho g h$  — гидростатическое давление на высоте  $h$  в жидкости, плотность которой  $\rho$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести. Чувствительным элементом датчика является мембрана, с одной стороны которой действует давление  $p$ , а с другой — давление  $p_0$ . Деформация мембраны, преобразованная в электрический сигнал, пропорциональна уровню  $h$ . Когда уровень известен, измерение  $p$  позволяет определить плотность  $\rho$ .

Этот малогабаритный прибор создает меньше проблем, связанных с его установкой, чем два предыдущих, и он может применяться при наличии мешалки.

### 12.4.2. Электрофизические методы

Это единственная группа методов, в которых используются специальные датчики, непосредственно преобразующие уровень в электрический сигнал. Их преимущества заключаются в простоте приборного оборудования и в удобстве эксплуатации.

**Датчик, измеряющий электропроводность.** Он применяется только в электропроводных жидкостях (минимальная электрическая проводимость порядка 50 мкСм), не корродирующих и не содержащих эмульсий или супензий (например, масел).

Зонд образован двумя цилиндрическими электродами, одним из них может служить стенка резервуара, если он сделан из металла. Зонд запитывается слабым переменным (чтобы избежать поляризации электродов) электрическим током с напряжением  $\sim 10$  В (рис. 12.27).

При непрерывном измерении зонд размещается вертикально и длина его охватывает весь диапазон изменений уровня. Амплитуда изменения циркулирующего электрического тока пропорциональна длине погруженной части электрода, а величина его зависит от электропроводности жидкости.

Для указания уровня можно, например, поместить зонд горизонтально на высоте предельного уровня. Появление электрического тока постоянной амплитуды покажет, что жидкость достигла зонда.

**Емкостный датчик.** В случае неэлектропроводной жидкости можно использовать конденсатор, образованный либо двумя цилиндрическими электродами, либо одним электродом и стенкой резервуара (если он сделан из металла). Диэлектриками являются жидкость, заполняющая часть резервуара, и воздух над нею.

Электроды для измерения текущего или для указания предельного уровня устанавливаются так же, как для датчика, измеряющего электропроводность.

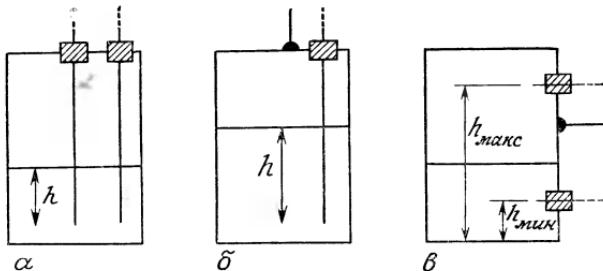


Рис. 12.27. Определение уровня зондами, измеряющими электропроводность.  
а — двумя электродами (емкость из неэлектропроводного материала); б — одним электродом (емкость из электропроводного материала); в — указатель уровня (емкость из электропроводного материала).

Измерение или указание уровня сводится к определению изменения емкости, причем это изменение тем больше, чем больше диэлектрическая постоянная контролируемой жидкости  $\epsilon_r$ , превышает диэлектрическую постоянную воздуха. Обычно условием применимости метода считается  $\epsilon_r > 2$ . В случае электропроводной жидкости используют один электрод, покрытый изолирующим материалом, представляющим собой диэлектрик конденсатора, а остальная арматура сводится к соединению с жидким проводником.

#### 12.4.3. Методы, основанные на использовании излучений

Преимущество этих методов состоит в возможности выполнения измерений без контакта с жидкостью, поэтому они применимы и в жестких условиях высокой температуры, высокого давления, агрессивных веществ.

**Измерение поглощения  $\gamma$ -излучения** (см. также разд. 16.1.2). Источник и приемник излучения размещены диаметрально противоположно вне резервуара. Такое расположение особенно удобно в случае сильно корродирующих жидкостей или при высоких давлениях и температуре. В качестве источника  $\gamma$ -излучения используется изотоп кобальта  $^{60}\text{Co}$  ( $T=5,3$  года) или цезия  $^{137}\text{Cs}$  ( $T=33$  года). Приемником является либо ионизационная камера (см. разд. 16.2.2), либо несколько трубок Гейгера — Мюллера (разд. 16.2.4).

При указании уровня (рис. 16.1) источник и приемник размещены один напротив другого на предельном уровне, достижение которого необходимо указать. Источник, обычно снабженный коллиматором, испускает в направлении приемника узкий пучок  $\gamma$ -лучей. Когда уровень жидкости достигает предельного, происходит изменение ослабления пучка  $\gamma$ -излучения, что преобразуется приемником в соответствующий электрический сигнал.

При непрерывном измерении (рис. 16.1) источник излучения экранируют таким образом, чтобы он испускал пучок с углом раскрытия, охватывающим, с одной стороны, полную высоту резервуара и, с другой стороны, положение приемника. Подъем жидкости в резервуаре постепенно уменьшает интенсивность дозы излучения, получаемой приемником, и выходной ток приемника уменьшается непрерывно по мере повышения уровня жидкости.

**Измерение с помощью акустических волн.** При непрерывном измерении используют преобразователь, работающий поочередно в режиме излучателя и в режиме приемника. Этот преобразователь, размещенный в верхней части резервуара, из-

лучает последовательности акустических волн в пределах конуса с небольшим углом раскрытия. После отражения от поверхности жидкости волны возвращаются к прибору, который преобразует их в электрический сигнал.

Промежуток времени  $\Delta t$  между излучением и приемом последовательности отраженных волн пропорционален расстоянию от зонда до поверхности жидкости и, следовательно, зависит от ее уровня. Величина  $\Delta t$  обратно пропорциональна скорости звука, которая зависит от температуры. Поэтому требуется измерять температуру, чтобы иметь возможность внести необходимую поправку. Генератором ультразвуковых волн (например, с частотой 40 кГц) может служить керамический пьезоэлектрический элемент; для излучения звуковых волн применяют зонд электродинамического типа. Звуковые волны, которые при распространении ослабляются меньше, находят применение при измерении больших расстояний (от 10 до 30 м), а ультразвуковые волны на коротких расстояниях обеспечивают более высокую точность. Зонд для указания предельного уровня состоит из электромеханического осциллятора, действие которого требует приведения мембранны в колебательное движение. Колебания мембранны возможны, пока она соприкасается с воздухом; когда мембрана входит в контакт с жидкостью, колебания прекращаются из-за увеличения демпфирования. Наличие или отсутствие колебаний фиксируется соответствующей электрической схемой.

Отметим, что некоторые из описанных выше методов измерения уровня жидкости применимы и в случае сыпучих тел. К ним относятся, в частности, емкостный метод, пригодный для порошкообразных и непроводящих веществ, а также методы, в которых используется ядерное или акустическое излучение.

## Библиография

### Монографии

1. Adams L. F., Engineering Measurements and Instrumentation, Londres, The English University Press, 1975.
2. Bradshaw B. A., Experimental fluid mechanics, Londres, Pergamon Press, 1970.
3. Buchave P., The accuracy of flow measurements by laser-Doppler methods, Proc. LDA symp., Copenhagen, New York, Hemisphere, 1975.
4. Durst F., Melling A., Whitelaw J. H., Principles and practice of laser-Doppler Anemometry, Londres, Academic Press, 1976.
5. Eckert E. R. G., Goldstein R. J., Measurements in heat transfer, 2e ed., N. Y., Hemisphere, 1976.
6. Goulard R., Combustion measurements, Modern techniques and instrumentation, N. Y., Hemisphere, 1976.
7. Hebrard P., Lioussse F., Calvet P., Méthodes et moyens de mesure de débit de gas, Monographie du BNM, Paris, Editions Chiron, 1979.

8. Jancovici B., Thermodynamique et Physique statistique, Paris, Ediscience, 1973.
9. Kovasznay L. S. G., Favre A., Buchave P., Fulachier L., Dynamic Measurements in Unsteady Flows, Proc. of the Dynamic Flow Conference, DK 2740 Skovlunde, Denmark, 1978.
10. Ladenburg R. W., Lewis B., Pease R. N., Taylor H. S., Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion, Princeton University Press, 1954. [Имеется перевод: Физические измерения в газовой динамике и при горении./Под ред. Р. У. Ладенбурга, Б. Льюиса и др.—М.: ИЛ, 1957.]
11. Ower E., Pankhurst R. C., The measurement of air flow, Londres, Pergamon Press, 1966.
12. Rebuffet P., Aérodynamique expérimentale, Paris, Dunod, 1966.
13. Richards B. E., Measurements of unsteady fluid dynamic phenomena, Von Karman Institute, Lecture Serie № 73, N. Y., Hemisphere, 1977.

#### Периодические издания

14. Boure M., Mesure des débits de gas, CEA, BIB. 227, 1978.
15. Comte-Bellot G., Hot-wire anemometry, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 8, 209 (1976).
16. Caviglio J., Sur les méthodes de l'anémométrie par fil chaud des écoulements turbulents compressibles de gas, *J. Meca. Appl.*, 2, 449 (1978).
17. Priel M., Nouvelles méthodes de mesure des débits de fluide, Centre de Perfectionnement Technique, Rueil, Malmaison, 1975.
18. Actes du Congrès Euromech, Hot film anemometry and conditional measurement, Lyon, 1980.

#### Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке

- Андронов И. В. Измерение расхода жидкостей и газов.—М.: Энергоиздат, 1981.
- Балдин А. А., Бошняк Л. Л., Соловский В. М. Ротаметры.—Л.: Машиностроение, 1983.
- Бобровников Г. Н., Новожилов Б. М., Сарафанов В. Г. Бесконтактные расходомеры.—М.: Машиностроение, 1985.
- Киясбейли А. Ш., Перельштейн М. Е. Вихревые измерительные приборы.—М.: Машиностроение, 1978.
- Киясбейли А. Ш., Измайлов А. М., Гуревич В. М. Частотно-временные ультразвуковые расходомеры и счетчики.—М.: Машиностроение, 1984.
- Кремлевский П. П. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара.—М.: Изд-во стандартов, 1980.

## 13. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Давление, как и температура, скорость или расход, входит в качестве одной из переменных величин в описание явлений, связанных с поведением жидких или газообразных сред. Твердые тела, находящиеся в жидкости, также оказывают или испытывают давление. Поэтому давление является одним из существенных параметров в разнообразных дисциплинах: термодинамике, аэродинамике, акустике, гидромеханике, геофизике, биофизике и т. д.

Эти дисциплины относятся ко всей человеческой деятельности, но если рассматривать только их технические приложения и, главным образом, проблемы измерений, а среди них — измерение давления, то можно констатировать, что только одна лишь энергетика поглощает большую часть выпускаемых промышленностью датчиков давления. Очевидно, что в гидравлических, тепловых, ядерных и других установках, поставляющих механическую, тепловую или электрическую энергию, необходимо пристальное непрерывное наблюдение за давлением, чтобы оно находилось в заданных пределах, ибо превышение давления может повлечь за собой повреждение стенок сосудов и трубопроводов, не говоря уже о риске, связанном с разрывом стенок, и авариях.

Давление является важным параметром систем контроля и управления как автоматизированных производственных процессов, так и управляемых оператором. Измерение давления представляет интерес и для робототехники либо непосредственно в качестве привода, либо косвенно, как заменитель прямого контакта (например, в тактильных датчиках) для распознавания формы или определения сил захватывания.

Все эти устройства требуют создания приборного оборудования, в котором первичным звеном являются датчики давления. Они поставляют данные о давлении сжатого воздуха, газа, пара, масла или других жидкостей, определяющих надлежащее функционирование машин, механизмов или систем, обеспечивающих протекание процесса.

Широкий спектр потребностей (каждый датчик должен наилучшим образом соответствовать поставленной задаче, идет ли

речь о производстве, транспортировке или научных исследованиях) привел к большому разнообразию применяемых датчиков. Это разнообразие связано также и с тем, что понятие «давление» охватывает очень протяженную область значений — от глубокого вакуума до сверхвысоких давлений. Давление можно выражать в абсолютных (по отношению к вакууму) или в относительных (по отношению к атмосферному давлению) величинах; оно может представлять собой также разность двух произвольных величин — двух разных давлений. Наконец, измерение давления может относиться к различным средам и жидкостям, физические (например, температура) или химические (например, опасность коррозии) характеристики которых весьма разнообразны.

### 13.1. Общие понятия

#### 13.1.1. Давление как физическая величина

Жидкое или газообразное тело, заключенное в сосуде, который оно полностью заполняет, действует на все стенки сосуда с силой, называемой силой давления. Последняя зависит от рода жидкости, от объема, занимаемого ею до и после заполнения сосуда, т. е. от условий заполнения, и, наконец, от температуры.

С феноменологической точки зрения давление  $p$ , как макроскопический параметр, определяется силой  $dF$ , действующей по нормали к элементу поверхности  $ds$  стенки сосуда со стороны жидкости, содержащейся в сосуде. Величины  $p$ ,  $dF$  и  $ds$  связаны соотношением

$$p = dF/ds.$$

Это отношение не зависит от ориентации элементарной площадки  $ds$ , а определяется только ее положением в жидкости. На жидкость действует также сила тяжести. Поэтому, например, в случае столба жидкости, находящейся в открытой вертикальной трубе, давление в точке  $M$  на расстоянии  $h$  от свободной поверхности равно сумме атмосферного давления  $p_0$  и веса столба жидкости, действующего на единицу площади:

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, а  $g$  — ускорение силы тяжести на широте измерения. Точно так же, если на жидкость действует какое-либо ускорение, необходимо учитывать влияние силы инерции на давление.

*Таблица 13.1. Сравнение различных единиц давления\**

Единицы давления	Паскаль, Па	бар	кГ/см <sup>2</sup>	атмосфера	см. воды <sup>10)</sup>	мм рт. ст.	мбар	дюйм рт. ст.	фунт/дюйм <sup>2</sup>	бария
1 паскаль <sup>1)</sup>	1	10 <sup>-5</sup>	1,02·10 <sup>-5</sup>	0,9869·10 <sup>-5</sup>	1,02·10 <sup>-2</sup>	0,75·10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	0,2953·10 <sup>-3</sup>	0,1451·10 <sup>-3</sup>	10
1 бар <sup>2)</sup>	10 <sup>5</sup>	1	1,02	0,9869	1020	750	1000	29,53	14,51	10 <sup>6</sup>
1 кГ/см <sup>2</sup> <sup>3)</sup>	98·10 <sup>3</sup>	0,980	1	0,986	1000	735	980	28,96	14,22	0,98·10 <sup>6</sup>
1 атмосфера <sup>4)</sup>	101325	1,013	1,033	1	1033	760	1013	29,92	14,70	101327·10 <sup>6</sup>
1 г/см <sup>2</sup> (или см <sup>5)</sup>	98	98·10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	0,968·10 <sup>-3</sup>	1	0,735	0,98	0,02896	0,01422	0,98·10 <sup>3</sup>
1 мм рт. ст. <sup>5)</sup>	133,3	13,33·10 <sup>-4</sup>	1,36·10 <sup>-3</sup>	1,315·10 <sup>-3</sup>	1,36	1	1,333	0,03937	0,01934	1,333·10 <sup>4</sup>
1 миллибар <sup>6)</sup>	100	1·10 <sup>-3</sup>	1,02·10 <sup>-3</sup>	0,9869·10 <sup>-3</sup>	1,02	0,750	1	0,02953	0,01451	1·10 <sup>3</sup>
1 дюйм рт. ст. <sup>7)</sup>	3386	33,86·10 <sup>-3</sup>	0,03453	0,03345	34,53	25,4	33,86	1	0,4910	3,386·10 <sup>4</sup>
1 фунт/дюйм <sup>2</sup> <sup>8)</sup>	6890	6,89·10 <sup>-2</sup>	0,07031	0,068	70,3	51,75	68,947	2,041	1	6,89·10 <sup>4</sup>
1 бария <sup>9)</sup>	0,1	10 <sup>-6</sup>	1,02·10 <sup>-6</sup>	0,9869·10 <sup>-6</sup>	1,02·10 <sup>-3</sup>	7,501·10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	0,2953·10 <sup>-4</sup>	0,1451·10 <sup>-4</sup>	1

1) Единица СИ (давление, равномерно распределенное по плоской поверхности площадью 1 м<sup>2</sup> от действия перпендикулярной эгроповерхности силы в 1 ньютон).

2) Бар равен 1 гектопасе — долгой единице системы МТС.

3) Старая практическая единица, используемая в Америке, при которой не рекомендуется.

4) Нормальное атмосферное давление (0,76 м. рт. ст. при температуре 0°C и нормальном ускорении силы тяжести g=9,8066 м/с<sup>2</sup>).

5) При плотности ртути 13,59533. При измерении вакуума 1 мм рт. ст. носит специальное наименование торр.

6) Единица барометрического давления.

7) Дюйм ртутного столба, английское обозначение inch Hg.

8) Фунт на квадратный дюйм, английское обозначение psi.

9) Единица системы СГС (дана на квадратный сантиметр).

10) 10 м водяного столба соответствуют давлению 10<sup>3</sup> г/см<sup>2</sup>.

\* Относительная ошибка, вносимая при использовании множителей, указанных в таблице, не превышает 0,1%.

### 13.1.2. Единицы давления

Соотношение  $p = dF/ds$  сразу определяет давление и единицу давления как производную величину. Эта единица — паскаль (Па) в Международной системе единиц (СИ) — представляет собой давление, равномерно действующее с силой 1 ньютона (Н) на площадь 1 м<sup>2</sup>.

Так как давление в 1 Па является относительно малой величиной, то в технике при измерении давлений предпочитают пользоваться кратной величиной, называемой баром и равной 10<sup>5</sup> Па.

Нормальное атмосферное давление соответствует давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0°C и нормальном ускорении силы тяжести  $g = 9,8066 \text{ м/с}^2$ . Оно равно 101 325 Па и часто выражается в миллибараах; 1 мбар равен 100 Па.

В таблице соотношений между различными употребляемыми единицами давления (табл. 13.1) для каждой единицы указана также определенная выше величина нормального атмосферного давления. Она всегда измеряется относительно вакуума. Для других жидкостей в каждом случае необходимо уточнить, какое давление указывает прибор — абсолютное (относительно вакуума), относительное (чаще всего относительно атмосферного давления) или, наконец, речь идет о сравнении двух давлений, т. е. о перепаде давления. В соответствии с типом измерения и используемого прибора нулевое показание отвечает вакууму, атмосферному давлению или другому известному давлению, принятому за давление отсчета, или, наконец, равенству двух давлений. В случае атмосферного давления отсчета показания могут принимать как положительные (избыточное относительное давление), так и отрицательные (относительное разрежение) значения.

## 13.2. Принципы измерения

### 13.2.1. Неподвижная жидкость

Измерение давления в неподвижной жидкости сводится к измерению силы  $F$ , действующей на поверхность  $s$  стенки, ограничивающей среду — объект измерения. Можно рассмотреть три случая:

а) измерение с помощью приемника давления на стенке, состоящего обычно из отверстия, просверленного в стенке и соединенного с измерительным прибором;

б) измерение деформации стенки, находящейся под действием давления;

в) измерение посредством датчика давления, преобразующего входной сигнал (давление) в выходной электрический

сигнал, несущий информацию о величине давления и его изменениях во времени.

**Приемник давления.** Если датчик расположен вблизи приемника давления, то ошибка измерения, связанная с запаздыванием и присутствием измерительного прибора, невелика при условии, что объем канала и датчика мал по сравнению с полным объемом жидкости, давление или разрежение в которой измеряются.

**Непосредственное измерение давления.** Помещая на ограничивающей стенке, находящейся под давлением, измерительные тензоэлементы (гл. 8), можно измерить их деформацию в зависимости от приложенного давления.

Труба, в частности, может играть роль эффективного чувствительного элемента, деформирующегося под действием давления. Но она может подвергаться деформации также из-за изменения окружающих условий, вызывающих механические или термические напряжения, вследствие чего изменяются ее форма или свойства материала (например, модуль упругости  $Y$ , который зависит от температуры).

Если речь идет о системе трубопроводов, то предпочтительно установить параллельно исследуемому трубопроводу специальную манометрическую трубку. Такая трубка, выполненная из специально подобранного материала, может сочетать большую деформацию, позволяющую увеличить чувствительность, с требованиями точности, что связано с нагружением ниже предела текучести, малым коэффициентом линейного расширения и т. д.

Реализованная таким образом измерительная трубка, по существу, представляет собой датчик давления.

**Датчики давления.** Чувствительным элементом датчика давления в большинстве случаев является динамометрический элемент, какой-либо из параметров которого (например, геометрический) может изменяться под действием силы  $F=ps$ .

Если трубка закрыта с одного конца (рис. 13.1), то приложенное давление  $p$  вызывает одновременно ее осевое удлинение и радиальное растяжение. Такая трубка, снабженная средствами преобразования этих механических величин в электрический сигнал и передачи этого электрического сигнала, представляет собой основной элемент датчика.

Размеры трубки определяют в зависимости от максимального допустимого напряжения. Деформации вычисляются по формулам, приведенным в подписи к рис. 13.1.

Свободный объем трубчатых датчиков может достигать нескольких кубических сантиметров, но он практически остается неизменным, так как деформация трубы очень мала. Датчики такого типа имеют хорошую чувствительность, поскольку фор-

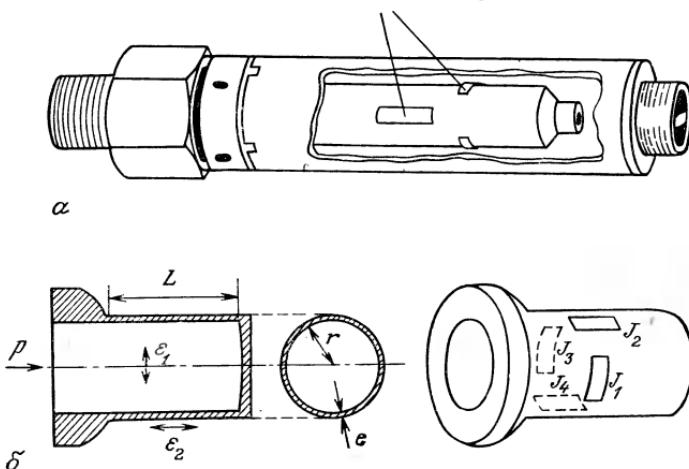
*Тензодатчики*

Рис. 13.1. Датчик давления в виде трубки, закрытой с одного конца.

**а** — конструкция датчика; **б** — разрез чувствительного элемента и расположение тензодатчиков.

Формулы для поперечных ( $\varepsilon_1$ ) и продольных ( $\varepsilon_2$ ) деформаций ( $Y$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона). Случай длинной трубы ( $L \gg r$ ):  $\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \frac{p}{Y} \frac{r}{e} \approx 0,85 \frac{p}{Y} \frac{r}{e}$ ,  $\varepsilon_2 = \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \frac{p}{Y} \frac{r}{e} \approx 0,20 \frac{p}{Y} \frac{r}{e}$ . Случай короткой трубы ( $L > r$ ):  $\varepsilon_1 = -\left(\frac{L}{L+2r} - \frac{\nu}{2}\right) \frac{p}{Y} \frac{r}{e}$ ,  $\varepsilon_2 = \left(\frac{1}{2} - \nu \frac{L}{L+2r}\right) \frac{p}{Y} \frac{r}{e}$ .

ма прибора не реагирует на измеряемое давление и изменение объема во всем диапазоне измерений пренебрежимо мало (разд. 13.3.2).

В качестве чувствительного элемента можно использовать также мембрану. Разность давлений по обе ее стороны соответствует результирующей силе  $F$ , а деформацию можно характеризовать следующими величинами: в любой точке мембранны — радиальной и тангенциальной составляющими, в центре мембранны — ее прогибом (рис. 13.2).

При одном и том же давлении  $p$  деформация мембранны тем больше, чем больше радиус  $R$  и чем меньше ее толщина  $e$ . Чувствительность измерений повышается с увеличением деформации, но при этом возрастают и внутренние напряжения, что вызывает опасность отклонения характеристики от линейности. Могут также возникать гистерезисные явления, связанные с неполной обратимостью деформаций. Следует отметить, что с увеличением отношения  $R/e$  уменьшается собственная частота  $f_0$ , выражение которой приведено в подписи к рис. 13.2. Поэтому величину отношения  $e/R$  нужно выбирать компромиссной, учитывая, с одной стороны, допустимые напряжения, а с другой стороны — собственную частоту, которую желательно иметь

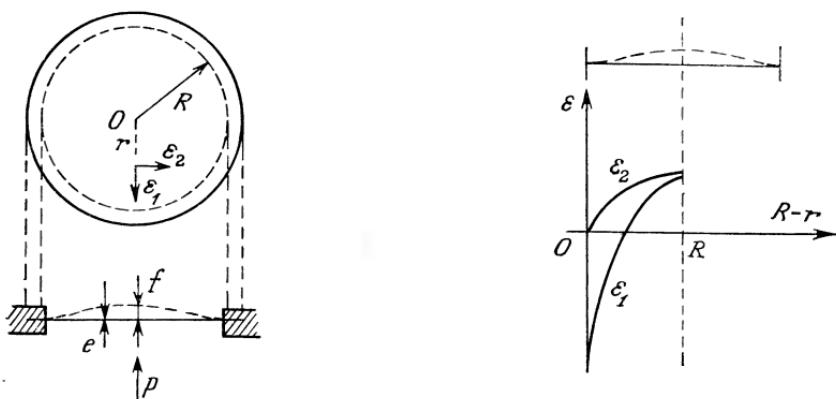


Рис. 13.2. Деформация жестко закрепленной мембраны.

Прогиб ( $r=0$ ):  $f = \frac{3}{9} (1 - v^2) \frac{p}{Y} \frac{R^4}{2e^3}$ ; уравнение деформации:  $z = \frac{3}{16} (1 - v^2) \frac{p}{Y} \times \frac{(R^2 - r^2)^4}{e^3}$ ; радиальная деформация:  $\varepsilon_1 = \frac{3}{8} (1 - v^2) \frac{p}{Y} \frac{R^2 - 3r^2}{e^2}$ ; тангенциальная деформация:  $\varepsilon_2 = \frac{3}{8} (1 - v^2) \frac{p}{Y} \frac{R^2 - r^2}{e^2}$ ; собственная частота, Гц:  $f_0 = 0,47 \frac{e}{R^2} \times \sqrt{\frac{Y}{\rho (1 - v^2)}}$ ;  $\rho$  — плотность.

как можно более высокой. Выбор величины этого отношения зависит от характеристик материала мембраны (табл. 10.2).

Действие мембранны может сводиться к преобразованию давления в силу, и динамометрический элемент, находящийся на мемbrane, обеспечивает измерение этой силы. В зависимости от конкретных условий пользуются трубкой или кольцом, работающими на сжатие, либо тонкой пластинкой или скобой, работающими на изгиб. Мембрана, играющая, по существу, роль поршня, может в этом случае быть достаточно жесткой, а ее чувствительность обеспечивается гофрировкой (см. разд. 13.4).

На рис. 13.3 схематически представлены чувствительные элементы нескольких типов, различающихся формой и упругостью материала. Кроме трубок и мембран, на рисунке показаны манометрические коробки (капсулы) и сильфоны, являющиеся элементом барометра — анероида. Изменение объема сильфона может достигать  $50 \div 100 \text{ mm}^3$  в зависимости от диапазона измерений.

В капсулах, образованных двумя гофрированными мембранами с загнутыми краями, спаянными по окружности, может создаваться разрежение путем откачки воздуха (барометрические капсулы), либо, наоборот, они могут снабжаться отверстием для закачки жидкости под известным давлением  $p_0$  — давлением отсчета.

Трубке Бурдона можно придавать форму дуги или спирали

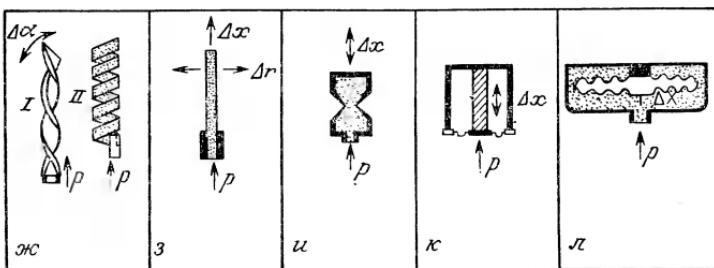
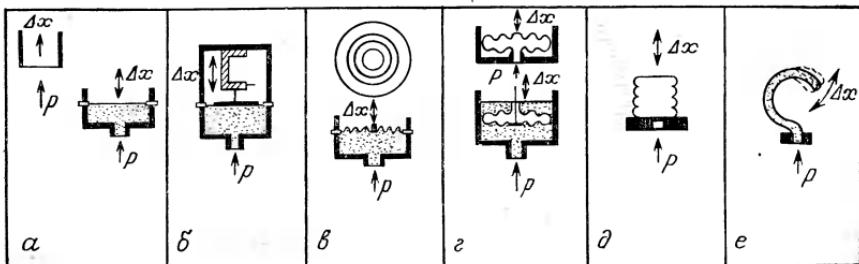


Рис. 13.3. Различные чувствительные элементы, преобразующие давление в перемещение, деформацию или силу.

*α* — плоская жестко закрепленная мембрана; *β* — поршень с пружиной (например, со скобой); *γ* — гофрированная мембрана; *δ* — открытая манометрическая коробка; *ε* — сильфон; *жс* — I) витая трубка, II) геликоид; *з* — трубка, закрытая с одного конца (деформируемый цилиндр); *и* — биконическая капсула; *к* — деформируемый поршнем пьезоэлектрик; *л* — закрытая манометрическая капсула.

эллиптического или сплющенного поперечного сечения. Она деформируется под действием давления и может быть снабжена датчиком, измеряющим деформацию. Ее свободный перемещающийся конец может нести датчик положения (рис. 13.22) или динамометрический элемент (рис. 13.10).

Точно так же витая трубчатая пружина, раскручиваясь, может перемещать элемент системы, преобразующей перемещение в электрический сигнал (рис. 13.20).

В датчиках, реализующих равновесие неизвестной силы  $F = ps$  и переменной, но известной силы  $F_1$ , чувствительный элемент служит только указателем расхождения. К нему не предъявляются высокие требования, но его следует выбирать с учетом характеристик чувствительности. Быстродействие этих датчиков зависит от способа балансировки и может быть менее  $10^{-3}$  с (разд. 13.6).

### 13.2.2. Движущаяся жидкость

В движущейся жидкости различают три вида давления: статическое давление неподвижной жидкости  $p_s$ , способы измерения которого описаны в разд. 13.2.1, динамическое давление  $p_d$ , обусловленное скоростью  $v$  движущейся жидкости, и, наконец, полное давление  $p_t$ , представляющее собой сумму этих двух давлений:

$$p_t = p_d + p_s.$$

Динамическое давление, действующее на поверхность, нормальную направлению течения, увеличивает статическое давление на величину, пропорциональную квадрату скорости течения  $v$ :

$$p_d = \rho v^2/2,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости.

Измерение этих давлений в движущейся жидкости может быть выполнено с помощью двух отдельных датчиков, соединенных с выходными отверстиями трубы Пито, один из которых показывает статическое (датчик 1), а второй — полное давление (датчик 2). Сопоставляя выходные сигналы этих датчиков, получают величину динамического давления (рис. 13.4, а).

Трубку Пито можно снабдить двумя миниатюрными датчи-

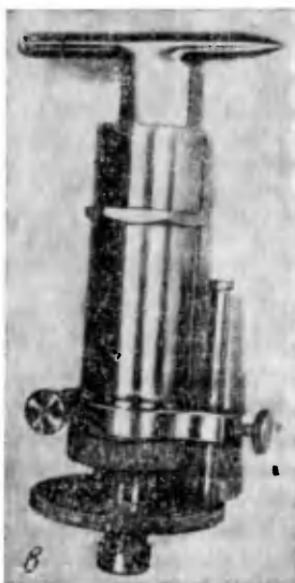
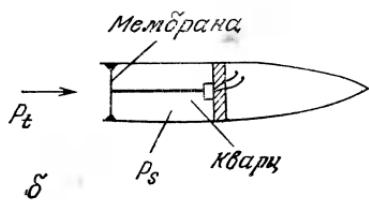
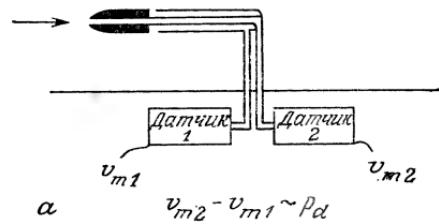


Рис. 13.4. Измерение динамического давления.

**а** — трубка Пито; **б** — датчик динамического давления  $p_t - p_s$  с пьезоэлектрическим преобразованием сигнала; **в** — общий вид датчика.

ками так, чтобы мембрана одного из них была перпендикулярна оси приемного канала (направлению течения), а второго — параллельна этой оси. Проще всего выполнить конструкцию так, чтобы измеряемое также независимо статическое давление действовало на заднюю поверхность мембранны, а полное давление — на ее переднюю поверхность (рис. 13.4, б). Таким образом, любой датчик, имеющий входное отверстие для давления сравнения, т. е. датчик избыточного давления, пригоден для измерения динамического давления.

Вязкость жидкости оказывает влияние в случае, когда нельзя пренебречь паразитным объемом датчиков или когда мал диаметр и велика длина магистралей, соединяющих датчик с полостью, находящейся под давлением. Наличие препятствий на стенке, содержащей приемник давления в движущейся жидкости, возмущает течение вдоль стенки и также вносит ошибку в показания. Поэтому предпочтительно размещать датчик так, чтобы его мембрана находилась заподлицо со стенкой, на которой измеряется давление (стенка цилиндра машины, трубопровода, аэродинамической модели и т. д.).

Чтобы удовлетворить требованиям приборного оснащения тонких аэrodинамических профилей, в ONERA (Национальное управление аэрокосмических исследований) разработаны, в частности, датчики давления «пленоочного» типа, которые имеют площадь  $4 \times 6 \text{ мм}^2$  и выступают над поверхностью не более чем на 80 мкм. Эти датчики — емкостные (см. разд. 13.5.2); они пригодны для измерения давления на элементах турбомашин (решетка лопаток, рабочее колесо и т. д.).

### 13.2.3. Коммутация измерений

При испытаниях паровых и газовых турбин, теплообменников, компрессоров, а также при экспериментах в аэродинамических трубах предусматриваются десятки и даже сотни точек измерения. В таких случаях прибегают к многоканальным системам измерения. Для этого используют вращающиеся распределительные устройства (типа сканирующего клапана Scanivalve), обеспечивающие коммутацию 47 каналов, соединенных с приемниками давления в различных точках измерения и подведенных к одному датчику, поставляющему в информационную измерительную систему последовательные сигналы, соответствующие различным измерительным каналам. Эти сигналы идентифицируются с помощью кодов, поступающих в командный блок коммутационного устройства. Используя один канал для подачи опорного давления, можно в каждом цикле воспроизводить сигнал градуировки датчика и, таким образом, градуировать всю систему измерений.

Эти распределительные устройства, вращательные или ко-

лебательные, могут коммутировать до 25 измерительных линий в секунду, и их можно соединять в синхронизированные группы. Пока они рассчитаны на давления, не превосходящие 3,5 бар. Кроме того, длина измерительных линий ограничивает передачу пульсаций давления.

Можно также указать на систему пьезорезистивных датчиков (см. разд. 13.5.1) с кремниевой мембраной, сгруппированных в блоки по 6, 12 или 36 шт. Благодаря встроенной электронике возможна коммутация от 5 до 20 000 измерительных линий в секунду; кроме того, обеспечиваются приведение к нулю и градуировка датчиков. Наконец, пользуясь вращающимся пневматическим распределительным устройством, можно подвести к каждому датчику несколько измерительных линий.

Модульный принцип построения предъявляет к основным компонентам оборудования, входящим в систему измерений давления, требование, чтобы измеряемые давления не превосходили нескольких бар.

### 13.3. Критерии применимости и метрологические характеристики

#### 13.3.1. Область применения

Датчик давления характеризуется прежде всего областью применения и надежностью его использования в этой области. Давление является параметром процесса и может изменяться со временем. Оно может быть квазистационарным или медленно меняющимся в случае статического давления, либо более или менее быстро изменяющимся в случае динамического давления. Чтобы отслеживать эти изменения, датчик должен обладать такими свойствами, как а) высокая собственная частота, обеспечивающая высокое быстродействие; б) минимальное обратное влияние на измеряемую величину, позволяющее избежать искажения пульсаций на поверхности чувствительного элемента (рис. 13.5).

Другой важной характеристикой является допустимая для датчика величина давления, определяющая диапазон измерений ( $0 \div 10$  бар,  $0 \div 500$  бар,  $\pm 500$  мбар), т. е. диапазон, в котором возможны измерения с высокой точностью (погрешность  $0,1\%$ ,  $0,5\%$ ,  $1\%$ ...). Эта точность ограничивается ошибками, связанными с отклонением от линейности или гистерезисными явлениями.

Кроме номинальной области применения, можно рассматривать расширение этой области до некоторой ограниченной величины перегрузки. За областью перегрузки можно определить область неразрушения (см. разд. 2.3). Например, датчик с диапазоном измерения  $0 \div 5$  бар может допускать в конкретном

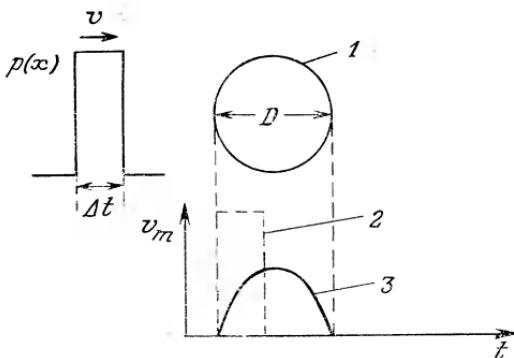


Рис. 13.5. Искажение выходного сигнала в случае волны давления длительностью  $\Delta t$ , распространяющейся со скоростью  $V$  перед мембраной, диаметр которой  $D$  больше произведения  $V\Delta t$ .

1 — мембрана; 2 — идеальный сигнал; 3 — реальный сигнал.

исполнении перегрузку до 7,5 бар и иметь область неразрушения, почти не превосходящую эту величину, хотя для других датчиков разрушение может происходить при давлении, втрое превышающем верхний предел номинального диапазона измерений. К области использования перегрузки относят, в частности, случайные забросы давления, которые может выдержать датчик без изменения его метрологических характеристик. Можно, например, допускать заброс давления на 50% от верхнего предела диапазона измерений, если это не нарушает линейности характеристики и не увеличивает гистерезис до неприемлемой величины (например, 0,5% от диапазона измерений).

Хорошим способом защиты от перегрузок является ограничение деформации чувствительного элемента посредством специальных ограничителей. Сохраняя точность датчика, они позволяют избежать необратимых деформаций упругих элементов, в частности, мембран. Для этого при некотором предельно допустимом давлении мембрана должна приводиться в соприкосновение с ограничителем по жесткой профилированной поверхности, повторяющей деформированную поверхность мембранны.

Область применимости датчика зависит также от природы жидкости, точнее, от совместимости с этой жидкостью материала датчика, с ней соприкасающегося. Среди используемых конструкционных материалов можно назвать кадмированную сталь, нержавеющую сталь, инконель, хастеллой, медно-никелевый сплав монель, титан и т. п. Кроме коррозионно-активных жидкостей, датчик может находиться в контакте с жидкостями или газами, содержащими взвешенные частицы, которые могут заблокировать проход к чувствительному элементу или из-

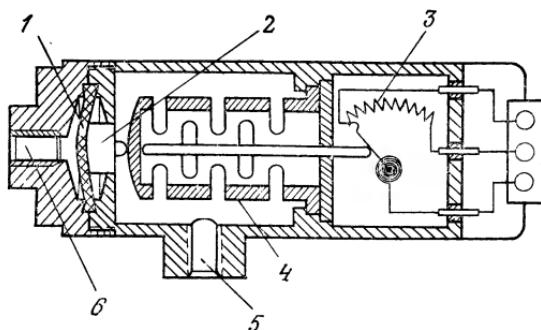


Рис. 13.6. Датчик давления для коррозионно-активных жидкостей (фирма SFIM).

Герметичная мембрана передает измеряемое давление непосредственно поршню, перемещение которого сжимает пружину; деформация последней приводит в движение ползунок потенциометра. 1 — герметичная мембрана; 2 — поршень; 3 — потенциометр; 4 — пружина; 5 — атмосферное давление; 6 — измеряемое давление.

менить его чувствительность. Иногда этого можно избежать, применяя механические фильтры. В некоторых случаях пользуются системой, обеспечивающей непрямую передачу давления через жидкостную пробку (например, из силиконового масла) или мембрану, снабженную изоляцией из нержавеющей стали или другого материала, совместимого с жидкостью, давление в которой измеряется. Мембрана может быть защищена также тонкой пленкой инертного материала, например керамического. Наконец, можно изолировать разделительное устройство датчика, обеспечив передачу давления посредством гибкой или жесткой трубы. Так как жидкостная пробка более или менее сжимаема, желательно связать изолирующую мембрану с измерительной или с другим динамометрическим элементом посредством жесткого соединительного элемента (рис. 13.6).

### 13.3.2. Влияющие факторы

Влияющие на процесс измерений факторы (вибрации, ускорения, удары, температура, влажность, заедание и т. д.) могут изменять механические свойства датчика или вносить ошибки, приводящие к увеличению погрешности измеряемой величины давления. Эти факторы могут относиться как к рабочей среде, так и к окружающим условиям.

Влияние температуры жидкости и окружающей среды может вызвать изменение градуировочной характеристики, смещение нуля датчика и изменение чувствительности по сравнению с ее номинальной величиной. В пределах допустимых температур (например, от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ ) можно установить, с учетом желательной точности, величины ошибок, связанных с

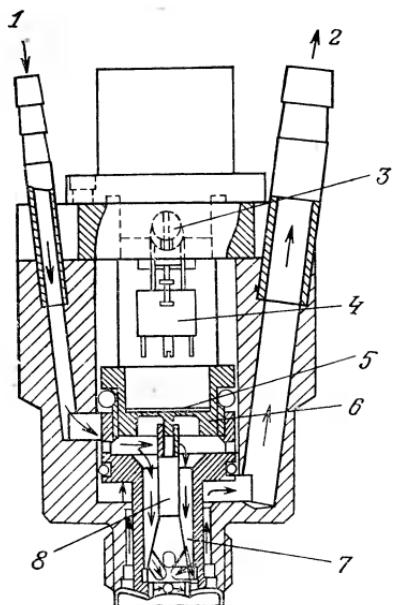


Рис. 13.7. Датчик давления, охлаждаемый принудительной циркуляцией воды (фирма Philips).

Охлаждается измерительная мембрана и деталь, соединяющая ее с мембраной, соприкасающейся с нагретой жидкостью. 1 — подвод воды; 2 — выход воды; 3 — точка коммутации автоматической градуировки; 4 — коммутатор; 5 — термодатчики; 6 — основная мембрана; 7 — первичная мембрана; 8 — механическая связь между мембранными.

Можно также осуществить тепловое разъединение мембранных соприкасающейся с жидкостью, давление в которой измеряется, и конструкции датчика; кроме того, можно защитить мембранный керамическим слоем. Для тепловой изоляции мембранные достаточно ввести в качестве соединительного органа мембранные с динамометрическим элементом жесткий стержень из малотеплопроводного материала — плавленого кварца, керамики и т. п. (рис. 13.7).

Другой способ термостабилизации состоит во введении в схему преобразования сигнала такого элемента, тепловая чувствительность которого противостоит влиянию температуры на остальные части прибора. Таким элементом можно осуществлять тепловую компенсацию как деформации конструкции (путем выбора материала, стойкого к тепловому расширению), так и изменения характеристик элементов, составляющих электрическую цепь, формирующую измерительный сигнал.

изменением чувствительности и с уходом нуля. (Допустимые рабочие температуры не следует путать с предельными неразрушающими температурами.) Погрешности выражаются в процентах от диапазона измерений на  $1^{\circ}\text{C}$  изменения температуры и обычно составляют от нескольких тысячных до  $10^{-6}$  на  $1^{\circ}\text{C}$ . Использование систем охлаждения с регулируемым в зависимости от выходной температуры расходом охладителя позволяет поддерживать температуру датчика в допустимых пределах, т. е. стабилизировать ее при изменении температур рабочей или окружающей среды и защитить датчик, в случае необходимости, от тепловых ударов. В последнем случае необходимо установить допустимую продолжительность теплового удара, совместимую с соответствующим повышением температуры чувствительных элементов датчика ( $400^{\circ}\text{C}/5\text{ с}, 1000^{\circ}\text{C}/0,5\text{ с}$ ). Можно также осуществить тепловое разъединение мембранных соприкасающейся с жидкостью, давление в которой измеряется, и конструкции датчика; кроме того, можно защитить мембранный керамическим слоем. Для тепловой изоляции мембранные достаточно ввести в качестве соединительного органа мембранные с динамометрическим элементом жесткий стержень из малотеплопроводного материала — плавленого кварца, керамики и т. п. (рис. 13.7).

Другой способ термостабилизации состоит во введении в схему преобразования сигнала такого элемента, тепловая чувствительность которого противостоит влиянию температуры на остальные части прибора. Таким элементом можно осуществлять тепловую компенсацию как деформации конструкции (путем выбора материала, стойкого к тепловому расширению), так и изменения характеристик элементов, составляющих электрическую цепь, формирующую измерительный сигнал.

Внешняя среда, окружающая датчик, может быть химически активной (коррозионно-активная жидкость, среда, содержащая пузырьки, пары, пыль, испытывающая ионизирующие излучения, и т. д.). Некоторые воздействия, например, влажности и пыли, можно исключить путем герметизации рабочих полостей и изоляции чувствительных элементов датчиков. Влияние магнитных и электрических полей можно ослабить соответствующим выбором материала корпуса датчика, обеспечивающим экранирование (материалы с высокой магнитной проницаемостью, покрытие толстым слоем меди и т. д.).

Вибрации и удары, кроме их разрушающего воздействия на конструкцию датчика в целом, порождают паразитные сигналы или, в лучшем случае, шумовой фон, снижающий точность показаний. Иногда можно защитить датчик от вибраций путем демпфирования узла крепления, но предпочтительнее ввести упругую систему, не воспринимающую давление, но испытывающую те же самые вибрации и генерирующую компенсирующий сигнал, противоположный измерительному. Последний способ является более общим: например, в кварцевый датчик вводят вторую пластинку или вторую кольцевую прокладку, не воспринимающую измеряемое давление, но создающую под действием вибраций электрические сигналы, компенсирующие (из-за противоположных полярностей) заряды, вызванные вибрациями в измерительной пластинке или кольцевой прокладке. В разд. 13.4 уточняются свойства защитных устройств, обеспечиваемые соответствующим выбором собственной частоты чувствительного элемента.

Наконец, изменение метрологических характеристик может быть вызвано деформацией конструкции датчика в результате сжатия либо самого корпуса (запрессовка), либо резьбового крепления (растяжение ниток резьбы при завинчивании). Это устраняют путем тщательной конструктивной изоляции чувствительного элемента от узла крепления или другой деформируемой части корпуса. В частности, мембранны, заделанные заподлицо с поверхностью, не должны соединяться с узлами крепления; мембранны, вырезанные в корпусе, должны быть расположены в средней части корпуса, испытывающей минимальные неконтролируемые воздействия; мембранны для передачи давления должны быть герметичными.

### 13.3.3. Срок службы

Датчик должен сохранять свои метрологические характеристики в течение некоторого достаточно продолжительного времени. Срок его службы можно определить, кроме требований к хранению на складе, числом циклов применения его в своем

диапазоне измерений без изменения точности (сопротивление усталости). Рабочий ресурс снижается, по меньшей мере, на порядок при перегрузках датчика. С вероятностью 0,9 можно указать среднее значение рабочего ресурса, равное  $10^4$  циклов для датчика, работающего с перегрузкой, и  $10^6$  для датчика, работающего в номинальном диапазоне измерений давления. На практике достижимы сроки службы порядка  $10^5$  циклов для кремниевых мембран и даже  $10^9$  циклов для некоторых датчиков с трубчатым упругим элементом и специальных датчиков.

### 13.4. Механические конструкции

Выбор чувствительного элемента — мембранные, закрытой с одного конца трубки, капсулы и т. д. — зависит от характера измеряемого давления, его величины, а также от предполагаемого способа преобразования перемещения или деформации чувствительного элемента в электрический сигнал. Чувствительный элемент характеризуется, среди прочих параметров, жесткостью (отношением приложенной силы к перемещению), которая одновременно определяет его чувствительность (отношение перемещения к приложенной силе) и собственную частоту. Чувствительность обратно пропорциональна жесткости  $r$ , а собственная частота  $f_0$  увеличивается с возрастанием  $r$ :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{r}{M}},$$

где  $M$  — масса чувствительного элемента и других деталей, жестко с ним связанных (стержней, мембран, арматуры).

Увеличение отношения  $r/M$ , прежде всего, улучшает устойчивость к вибрациям и ускорениям. Далее, увеличение собственной частоты одновременно повышает быстродействие. Однако при этом полезная чувствительность, наоборот, уменьшается, так как более жесткий чувствительный элемент меньше деформируется; пропорционально снижается и уровень выходного сигнала, что может уменьшить отношение сигнал/шум и ухудшить точность.

Поэтому необходимо компромиссное решение, и этот компромисс должен учитывать нелинейность характеристики преобразования датчика и гистерезис, чтобы последний не превышал, например, 0,1% от диапазона измерений. Но для увеличения уровня выходного сигнала необходимо выполнить повышенные требования, предъявляемые к чувствительному элементу. Отметим, кстати, что стекло из плавленого кварца, используемое обычно для изготовления динамометрических трубок, практически не имеет гистерезиса, и единственным ограничением в этом случае является риск разрушения.

Для каждого типа чувствительных элементов существует инвариант в виде формулы, связывающей массу  $M$ , чувствительность  $S$  и собственную частоту  $f_0$ :  $MSf_0^2 = \text{const}$ . В случае круглой мембранны  $MSf_0^2 = 0,043$ , а в случае стержня, зажатого с двух концов,  $MSf_0^2 = 0,25$ .

Отметим также, что слишком большой жесткости чувствительного элемента сопутствуют увеличение его толщины и уменьшение свободного объема датчика.

Жесткость, деформации и перемещения чувствительного элемента датчика практически всегда связаны с ограничениями, которые нельзя нарушать и которые зависят от свойств материала, выбранного для изготовления чувствительного элемента. Выбор материала определяется возможностью получения приемлемых метрологических характеристик. В табл. 10.2 приведены данные, относящиеся к алюминиевым сплавам, бериллиевой бронзе и хром-кремний-молибденовой стали. Могут также использоваться инвар, обладающий малым коэффициентом теплового расширения ( $\sim 10^{-6}$ ), и другие железоникелевые сплавы с постоянным модулем упругости (элинвар, нишпан). Относительное удлинение материала при одной и той же приложенной силе тем больше, чем меньше модуль Юнга для этого материала. Предел упругости обычно соответствует нагружению, для которого после прекращения действия приложенной силы остаточная деформация составляет 0,2 %. Для чувствительных элементов обычно принимают условие, чтобы в рабочем диапазоне измерений относительная деформация  $\Delta l/l$  не превосходила, например,  $10^{-3}$  при нагрузке 720 бар в случае цикрала (алюминиевый сплав) и 2000—2200 бар в случае стали. В этих условиях можно ожидать, что остаточная деформация будет составлять  $10^{-6}$  или даже меньше.

Путем механической (давлением) или термической обработки можно увеличить предел упругости. Для железоникелевых сплавов он может быть увеличен более чем вдвое — от 3200 до 7500 бар. Это повышение предела упругости связано с изменением структуры сплава при его обработке, но ему может сопутствовать недостаточная стабильность характеристик.

Механическая обработка также вызывает холодную деформацию материала, поэтому после соответствующих операций следует производить полный отжиг и последующую обработку в течение нескольких суток для стабилизации структуры и характеристик материала. Чтобы избежать возможного изменения номинальных размеров в процессе отжига и предотвратить изменение характеристик из-за холодной деформации при механической обработке резанием, окончательную доводку осуществляют путем шлифовки или электролитического полирования. Эти предосторожности относятся, прежде всего, к изготов-

лению мембран, вырезанных в массе металлического блока до изготовления корпуса датчика или, по крайней мере, его основной детали. Далее, во избежание концентрации напряжений на периферии мембранны, при ее соединении с корпусом должен быть обеспечен достаточный радиус закругления.

Можно также прибегнуть к обработке электроэррозией, что снимает проблему напряжений, или к электроформовке, что позволяет изготавливать тонкие мембранны и сильфоны постоянной толщины.

При вырезании мембранны в массе металлического блока устраняется проблема заделки. Мембрана, зажатая болтами или вставленная в оправу, подвержена опасности проскальзывания в заделке, что может привести к утечке жидкости. Чтобы компенсировать возможные люфты, производится небольшое предварительное натяжение мембранны, обеспечивающее начальное напряжение и ликвидирующее «хлопанье», т. е. существование в состоянии покоя двух устойчивых положений равновесия. С этой целью можно пользоваться также мембранными с небольшой коничностью, что увеличивает, кроме того, и жесткость мембранны.

Напротив, если желательно получить более податливую мембранны (в случае, когда мембрана только обеспечивает герметичность или служит для преобразования давления в силу, т. е. соединена с динамометрическим элементом), можно образовать на ней кольцевые гофры, число и глубина которых определяются желательной степенью податливости мембранны.

Для мембранны, вырезанных из монокристаллов кремния, функции чувствительного элемента и преобразования напряжений, возникающих при прогибе, объединяются. Действительно, путем соответствующей обработки можно в кристалл вмонтировать полупроводниковые датчики. Чаще всего пользуются четырьмя датчиками, образующими мост Уитстона, отклонение которого от равновесия преобразует прогиб мембранны в сигнал. Известен также измерительный прибор с одним датчиком (разд. 13.5.1); он, кроме прочего, представляет интерес из-за простоты его изготовления.

Деформацию мембранны можно определить, пользуясь обобщенным законом Гука. В этом случае показатель упругости ( $1/Y$ ) обычно принимают равным  $5 \cdot 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>, а максимально допустимое напряжение — равным 3500 бар. Эти величины могут изменяться в зависимости от способа изготовления мембранны и способа нагружения при определении этих данных. Для мембранны из кремния разумно ограничиться напряжениями ~700 бар.

Эти нагрузки, характеризующие величину давления, определяют также и толщину мембранны. Практически можно изго-

тавлять мембранные толщиной от 5 до 100 мкм и диаметром от 25 до 10 мм.

### 13.5. Способы преобразования сигнала (рис. 13.8)

#### 13.5.1. Преобразование сигнала изменением сопротивления

**Потенциометр** (см. разд. 7.1). Ползунок потенциометра связан (посредством понижающей передачи или без нее) с мембраной, трубкой Бурдона или мембранный коробкой (рис. 13.9) таким образом, чтобы деформация чувствительного элемента приводила к перемещению  $x$  ползунка. Для потенциометра с полным сопротивлением  $R_n$ , питаемого источником э. д. с.  $e_s$ , напряжение  $v_m$  между ползунком и одним из концов потенциометра выражается формулой

$$v_m = e_s (R(x)/R_n),$$

где  $R(x)$  — сопротивление участка между ползунком и концом потенциометра. Так как деформация чувствительного элемента пропорциональна измеряемому давлению  $p$ , перемещение ползунка  $x$  пропорционально деформации, а сопротивление  $R(x)$  пропорционально  $x$ , то

$$v_m = k e_s p,$$

где  $k$  — постоянная для данного прибора величина. Типовые метрологические характеристики измерительного потенциометра (по порядку величины) следующие: линейность от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1\%$  от диапазона измерений (Д.И.); гистерезис от  $\pm 0,1$  до  $\pm 1\%$  от Д.И.; разрешение лучше  $0,03\%$  (от диапазона измерений); постоянная времени запаздывания — от 15 до 100 мс; выходной сигнал порядка нескольких вольт. Достоинства прибора: большой выходной сигнал, позволяющий пользоваться прибором без усилителей, возможность приспособления к нелинейному закону изменения давления. Недостатки: ограниченность срока службы, чувствительность к вибрациям.

**Пленочные тензометрические датчики** (разд. 8.3.2). Широко распространенные пленочные тензодатчики, наклеенные на чувствительный элемент, обеспечивают прямое преобразование деформации  $\varepsilon$  в изменение сопротивления  $\Delta R/R$ . В сочетании с мостом Уитстона они позволяют осуществить температурную компенсацию, а также повысить чувствительность вследствие дополнительных деформаций, обусловленных сжатием. Если выбрать импеданс на выходе измерительной диагонали моста больше внутреннего сопротивления построенного таким обра-

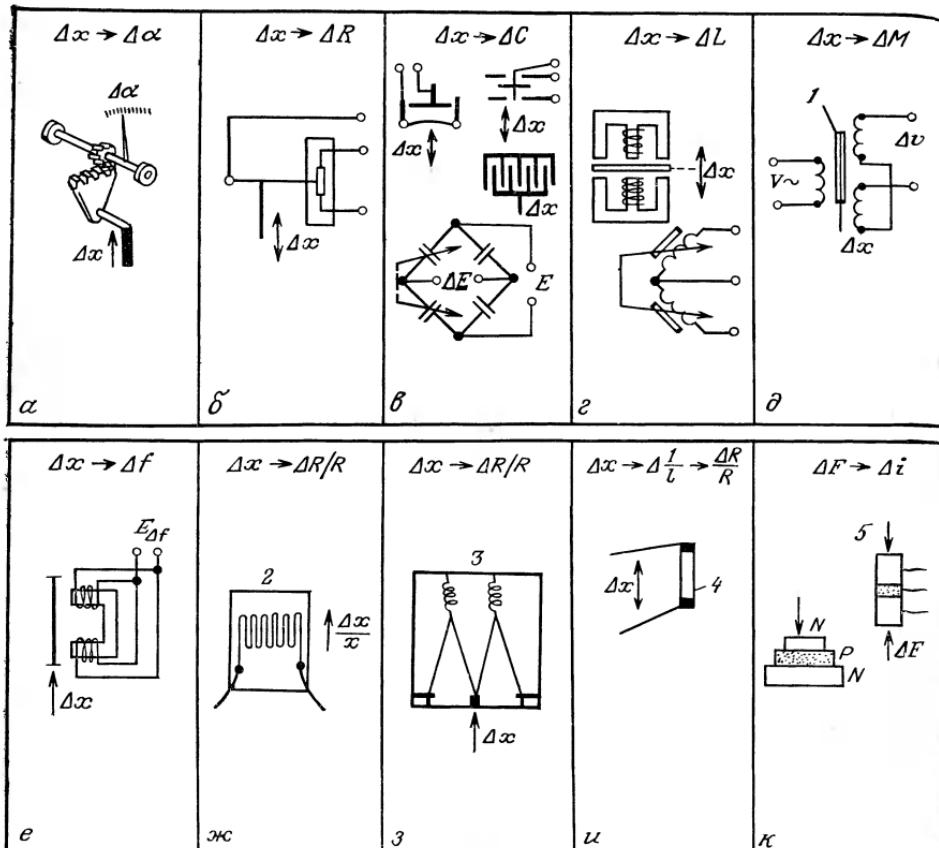
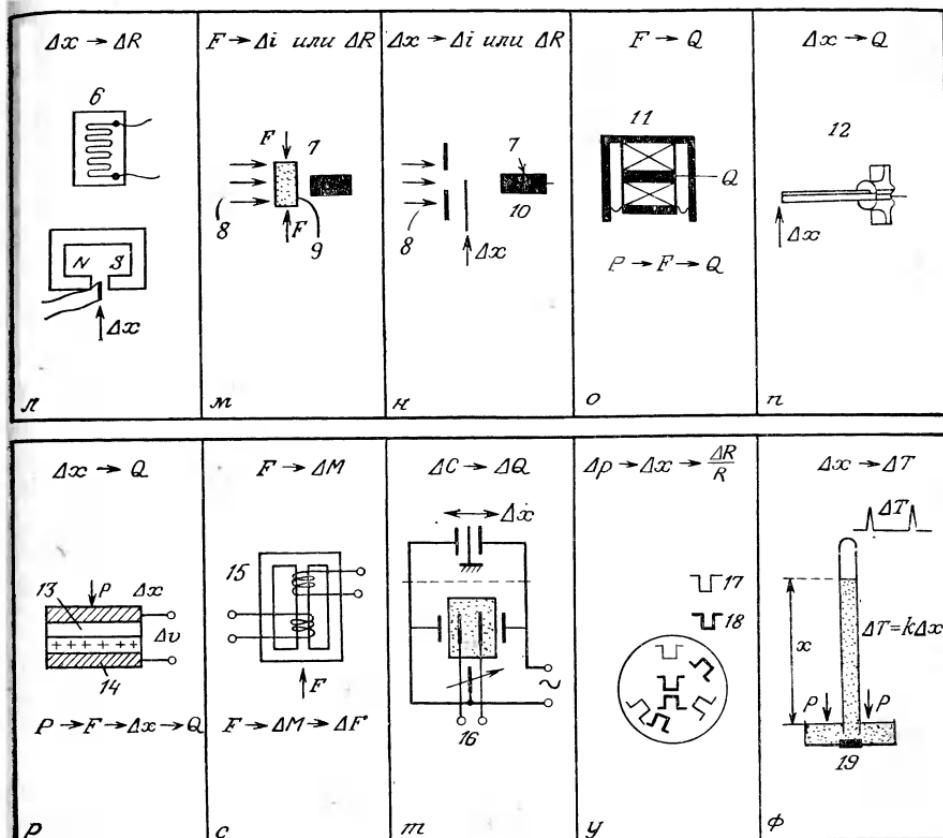


Рис. 13.8. Схемы преобразования сигнала давления, генерируемого чувствительными элементами

зом моста, то получается выходной сигнал вида

$$v_m = \frac{E}{4} \sum \frac{\Delta R}{R} = K' p.$$

Тензодатчики следует изготавливать с учетом знаков и величин изменения их сопротивления. Так, в случае закрытой с одного конца трубы (разд. 13.2.1) продольный и поперечный датчики наклеиваются рядом. Такое расположение тензодатчиков позволяет получить хорошую температурную компенсацию, не изменяя чувствительности.



тельным элементом, в измеряемый сигнал.

емкости;  $g$  — изменение индуктивности;  $\delta$  — дифференциальный трансформатор;  $e$  —  $z$  — изменение сопротивления;  $u$  — изменение удельного сопротивления;  $k$  — изменение освещенности;  $o-p$  — изменение электрического заряда;  $c$  — изменение магнитной удельной сопротивления;  $\phi$  — изменение длительности воздействия.  
 пьезорезистивный датчик;  $5$  — полевой пьезотранзистор;  $6$  — магниторезистор;  $7$  — подвижная створка;  $11$  — кольца из пьезоэлектрика;  $12$  — двухслойный пьезоэлектрик; тензодатчики (вакуумное осаждение);  $18$  — датчики диффузионного внедрения в

Вместо прямой упругой трубки можно пользоваться также изогнутой трубкой, например, Бурдона. Датчики такого типа пригодны для измерения давлений от нескольких до тысяч бар.

Трубка Бурдона может быть связана с гибкой балочкой, на которую наклеиваются тензодатчики (рис. 13.10, а). Можно также поместить внутри динамометрической скобы сильфон; тогда гибкая балочка динамометра работает практически на изгиб по окружности (рис. 13.10, б).

Для давлений меньше атмосферного выбирают либо мембранные, снабженные тензодатчиками (которые используются

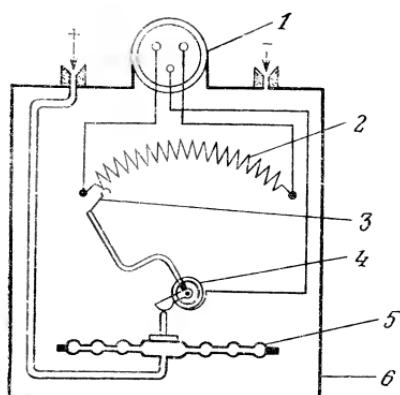


Рис. 13.9. Дифференциальный датчик давления с преобразованием сигнала посредством потенциометра (фирма SFIM).

1 — приемник; 2 — потенциометр; 3 — ползунок; 4 — спиральная пружина; 5 — капсула; 6 — корпус.

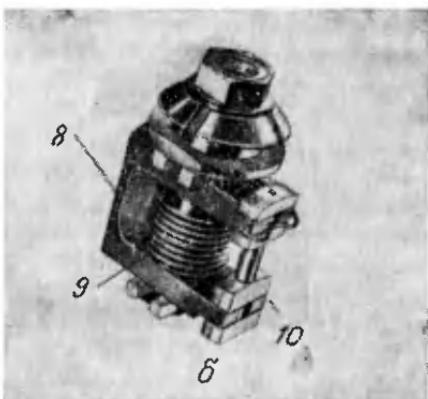
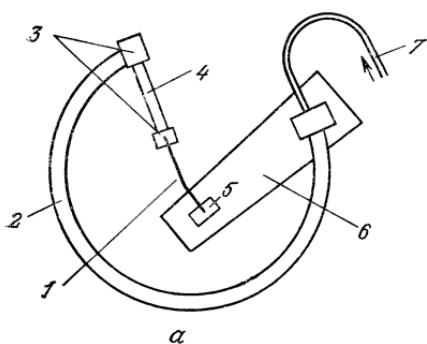


Рис. 13.10. Примеры датчиков давления с динамометрическими элементами, оснащенными тензодатчиками.

*α* — трубка Бурдона с гибкой балочкой; 6 — сильфон и скоба с предохранительным упором. 1 — гибкая балочка (с тензодатчиками); 2 — трубка Бурдона; 3 — крепления пластиинки; 4 — жесткая пластиинка; 5 — крепления на основании; 6 — основание; 7 — отбор давления; 8 — скоба; 9 — сильфон; 10 — упор.

также и в диапазоне измерения более высоких давлений), либо соединение мембранны с динамометрическим элементом (пластинкой, кольцом и т. п.). Для прямого преобразования деформации мембранны в изменение электрического сопротивления можно, например, расположить два тензодатчика в радиальном, а два — в тангенциальном направлениях, соединив их в мостовую схему, либо использовать только два радиальных тензодатчика, поместив один из них в центре мембранны, а второй, обеспечивающий температурную компенсацию, — вблизи заделки, в точке перемены знака напряжения (тогда удлинение этого тензодатчика в среднем равно нулю, см. рис. 13.2).

Пленочные тензометрические датчики имеют следующие метрологические характеристики (по порядку величины): линейность и гистерезис — от  $\pm 0,2$  до  $\pm 1\%$  от Д.И.; разрешение лучше  $0,02\%$  от Д.И.; погрешность от 0,5 до 2% от Д.И.; частотная характеристика — собственная частота от 1 до 100 кГц и более (в зависимости от типа чувствительного элемента); выходной сигнал — несколько милливольт в диапазоне измерений. Достоинства датчика: высокая точность, малая чувствительность к вибрациям и, при наличии тепловой компенсации, — к температуре. Слабый выходной сигнал и возможную пластическую деформацию следует отнести к его недостаткам.

**Тензодатчики в виде нанесенного слоя.** Простые в эксплуатации наклеенные тензодатчики имеют ограниченный ресурс из-за старения клеев и их текучести. Этот недостаток можно устранить путем нанесения непосредственно на чувствительный элемент слоя сопротивления, образующего тензодатчики прямо на теле элемента.

**Тензодатчики в виде тонкого слоя.** Используются два способа нанесения тонкого слоя. Согласно первому способу изолирующий материал (двуокись кремния или окись алюминия) сначала испаряют, а затем, конденсируясь на незащищенных покрытием участках чувствительного элемента, он образует изолирующий слой толщиной около 10 мкм. На эту подложку осаждают таким же путем металлическую пленку толщиной 0,5 мкм или менее, причем защитное покрытие воспроизводит конфигурацию тензодатчика. По второму способу металл распыляют и осаждают методом ионной бомбардировки, которая переносит ионы металла от катода, подвергающегося распылению, к чувствительному элементу, образующему анод; разность потенциалов имеет порядок нескольких киловольт.

Для предварительной подготовки чувствительного элемента требуется специальная методика: подготовка поверхностей (суперфинишная обработка, электролитическое полирование), припаивание соединительных проводов термопрессованием и(или) стабилизирующая термообработка, лазерная юстировка номинальных размеров и т. д.

**Тензодатчики в виде толстого слоя.** Такие тензодатчики получают путем прямого осаждения и изготовления печатной схемы из пьезорезистивной краски на керамической мембране (96% окиси алюминия). Их характеристики являются промежуточными между характеристиками тензодатчиков в виде тонкого металлического слоя и полупроводниковых тензодатчиков. Сравнительные характеристики (по порядку величины) этих и других пленочных тензодатчиков приведены в таблице.

Метрологические характеристики тензодатчиков в виде нанесенного слоя: линейность и гистерезис — от  $\pm 0,2$  до  $\pm 0,5\%$ .

Технология изготовления тензодатчика	$K$	$\alpha_R, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_k, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Долгосрочная стабильность характеристик
Тонкие металлические слои	$2 \div 4$	20	100	Превосходная
Распыленные полупроводники	$50 \div 200$	1500	1000	Хорошая
Толстые слои сопротивления	$10 \div 20$	50	100	Очень хорошая

от Д.И.; разрешение — лучше 0,05% от Д.И.; погрешность — от 0,1 до 0,5% от Д.И.; частотная характеристика — собственная частота от 1 до 100 кГц и более, в зависимости от типа чувствительного элемента; выходной сигнал — несколько милливольт в диапазоне измерений. Достоинства датчика — нечувствительность к вибрациям и ударам, высокая надежность; недостаток — чувствительность к электрическим разрядам.

**Пьезорезистивные датчики, внедряемые диффузией** (разд. 8.6). Сигнал тонкопленочного тензодатчика лишь немнogo превышает 20 мВ в диапазоне измерений датчика. Однако его можно значительно увеличить в случае пьезорезистивных датчиков, внедряемых диффузией в кремниевую подложку. Кремний применяется непосредственно для изготовления чувствительных элементов датчиков давления, например, мембран или динамометрических балочек. Монокристаллы кремния имеют отличную упругость, что обеспечивает пренебрежимо малый гистерезис характеристики, а его полупроводниковые и пьезорезистивные свойства позволяют путем планарной диффузии внедрить непосредственно в чувствительный элемент систему датчиков, из которых можно образовать мост. Кристаллическая подложка  $p$ -типа обеспечивает преобразование приложенного давления во внутренние напряжения. Примеси  $p$ -типа внедряются диффузией в зонах, ориентация которых относительно осей кристалла, в сочетании с напряжениями, развивающимися при деформации подложки, обеспечивает хорошую чувствительность. Так, в случае, изображенном на рис. 13.11, мембрана имеет ориентацию (100) и в ней расположены 4 прямоугольных датчика, причем два из них размещены вблизи центра мембраны вдоль направления (110), а два других — вблизи заделки под углом 60° относительно направления (100). Таким образом, изменения сопротивления в зависимости от внутренних напряжений для двух пар датчиков равны и противоположны по знаку:

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4 = \Delta R.$$

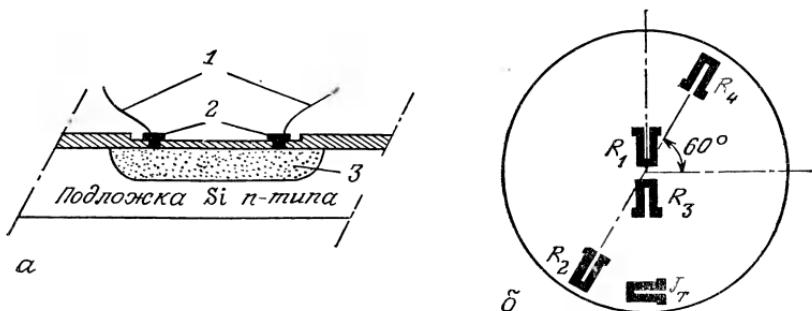


Рис. 13.11. Пьезорезистивные датчики диффузионного внедрения.

*а* — устройство; *б* — пример расположения в мемbrane. 1 — соединительные провода из золота; 2 — металлизация; 3 — примеси типа *p*, внедряемые диффузией.

Напряжение  $v_m$  на концах измерительной диагонали моста, питаемого постоянным током  $I$ , определяется по формуле

$$v_m = \frac{I}{4} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) = I \Delta R.$$

Относительное изменение сопротивления в зависимости от напряжения  $\sigma$  равно

$$\Delta R/R_0 = \pi \sigma,$$

где  $\pi$  — коэффициент пьезорезистивности кристалла (например,  $4 \cdot 10^{-10}$  Па $^{-1}$ ).

Измеряемое напряжение можно записать еще в таком виде:

$$v_m = \pi I R_0 \sigma.$$

В зависимости от геометрии мембранны и силы тока  $I$  чувствительность датчика может изменяться от 0,1 до 3 мВ/мбар для низких давлений и от 0,2 до 12,5 мВ/бар для давлений от нескольких сот миллибар до нескольких сот бар. Практически это соответствует выходному сигналу от 100 до 300 мВ в диапазоне измерений.

Приборы с внедряемыми диффузией тензодатчиками пригодны для использования в диапазоне температур от  $-40$  до  $125^\circ\text{C}$ ; их можно компенсировать по температуре (по крайней мере, в ограниченном диапазоне температур, например, от  $-20$  до  $80^\circ\text{C}$ ) путем соответствующего выбора содержания примеси. Можно также компенсировать термические изменения сопротивлений датчиков, вводя в схему формирования сигнала устройство коррекции, управляемое по сигналам температурного зонда  $J_t$ , внедренного с этой целью в мембрану (рис. 13.11).

Пьезорезистивные диффузионные датчики имеют следующие метрологические характеристики (по порядку величины): линейность и гистерезис — от  $\pm 0,2$  до  $\pm 2\%$  от Д.И.; разрешение — лучше 0,1% от Д.И.; погрешность — от 0,1 до 0,5% от

Д. И.; частотные характеристики — собственная частота от 50 кГц до 1 МГц (в зависимости от диаметра и толщины мембранны); выходной сигнал 50÷100 мВ. Достоинства датчика: очень малые размеры, почти нулевая масса; возможность реализации мембранны диаметром порядка 1 мм; нечувствительность к вибрациям и ударам. Недостатки: чувствительность к температуре, ограничение по температуре до 150 °С.

Конфигурацию из четырех датчиков, образующих мост Уитстона, можно заменить одним датчиком, расположенным у заделки мембранны под углом 45° к краю (рис. 13.12). Такой датчик подвергается кручению и срезу, что соответствует большему коэффициенту пьезорезистивности, чем гомологические коэффициенты продольных и поперечных напряжений в датчиках, образующих мост Уитстона. В этом случае измерительный сигнал возникает вследствие явления, называемого эффектом поля, которое порождает напряжение, перпендикулярное направлению тока. Это напряжение линейно зависит от давления, приложенного к мембрани.

Соответствующая схема формирования сигнала (рис. 13.13) обеспечивает а) компенсацию влияния термических изменений напряжения датчика с помощью системы постоянных сопротивлений (термисторов), включаемых последовательно с питанием датчика; б) восприятие измеряемого напряжения и его усиление с помощью дифференциального усилителя, располагающего регулируемыми сопротивлениями, позволяющими свести к нулю изменения напряжения усилителя и датчика.

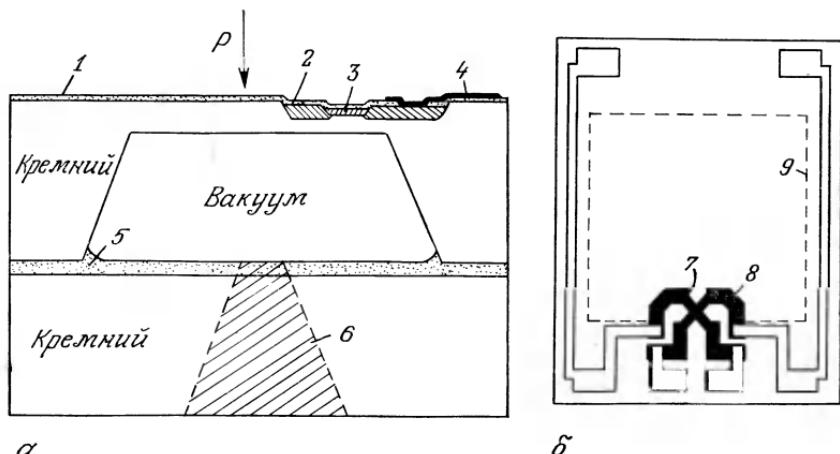


Рис. 13.12. Датчик давления с полевым тензорезистором (фирма Motorola). а — разрез; б — расположение измерительного элемента и электродов. 1 — пассивирование; 2 — диффузия; 3 — диффузионный датчик напряжений; 4 — металлизация; 5 — соединительный слой из стекла; 6 — гнездо для дифференциальных датчиков; 7 — измерительный датчик; 8 — приемник измеряемой величины; 9 — граница мембранны.

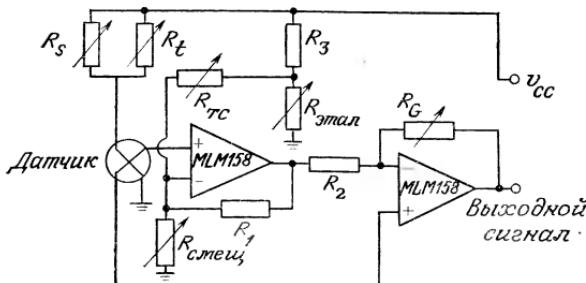


Рис. 13.13. Схема формирования сигнала для датчика, оснащенного полевым тензорезистором (фирма Motorola).

**Струнные датчики.** Датчики давления с натянутыми металлическими струнами сходны по некоторым их свойствам с датчиками в виде тонкого слоя, однако они больше последних по габаритам. В силу своих конструктивных особенностей струнные датчики недостаточно прочны: они чувствительны к ударам и вибрациям. В зависимости от конструкции собственная частота таких датчиков может изменяться от 1000 до 40 000 Гц.

Струнные датчики отличаются широким диапазоном их применимости по температуре и стабильностью характеристик, что особенно важно при измерениях в течение длительного срока.

Струны, натянутые между неподвижной точкой корпуса датчика и чувствительным элементом, например, мембраной, предварительно напряжены. Их сопротивление может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от направления перемещения точки крепления струны к динамометрическому элементу. С целью уменьшения габарита датчика можно натянуть струны, намотав их вокруг изолированных подвижных столбиков; смещаясь к центру или удаляясь от него, они изменяют натяжение струн. Такая конструкция изображена на рис. 13.14, а. Давление через посредство мембранны вызывает прогиб расположенных крестообразно упругих пластинок. Сапфировые столбики, расположенные над пластинками, сближаются, а те, что расположены ниже пластинок — удаляются друг от друга. При этом натяжение струн 1 и 2 уменьшается, а струн 3 и 4 — увеличивается. В другой конструкции, благодаря наличию пружин, изменяются в противоположных направлениях сопротивления двух половин струны, на один конец которой воздействует чувствительный элемент, в данном случае — мембрана (рис. 13.14, б). Давление, действуя на мембрану, вызывает перемещение точки крепления *a* вниз. Датчик *ac* укорачивается и, следовательно, вызывает перенос натяжения пружины на датчик *bc*, который удлиняется. Такой способ, использованный, например,

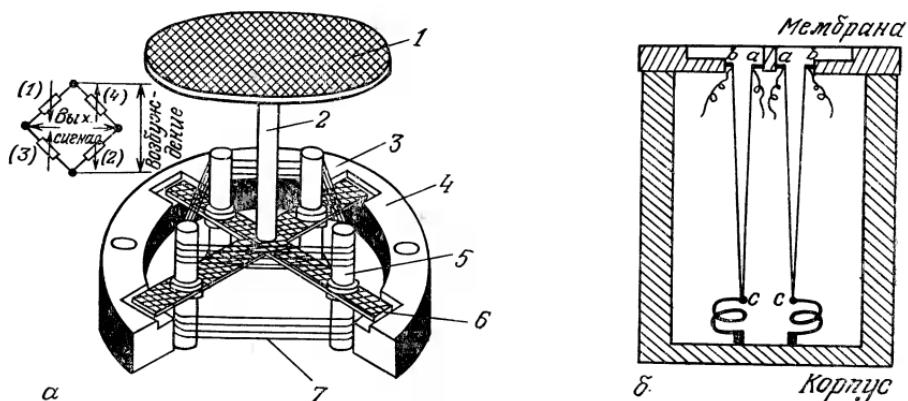


Рис. 13.14. Примеры реализации струнных датчиков давления.

1 — мембрана; 2 — стержень; 3 — струнные датчики 1, 2; 4 — монтажное кольцо; 5 — сапфировые столбики; 6 — упругая пластина; 7 — струнные датчики 3, 4.

фирмой Statham, позволил получить выходные сигналы величиной около 25 мВ/В в номинальном диапазоне измерений.

Метрологические характеристики струнных датчиков (по порядку величины) следующие: линейность и гистерезис — от  $\pm 0,1$  до  $\pm 1\%$  от Д.И.; разрешение — лучше 0,01% от Д.И.; погрешность — от 0,1 до 1% от Д.И.; частотная характеристика — собственная частота  $1 \div 50$  кГц (в зависимости от устройства крепления); выходной сигнал 10 мВ в диапазоне измерений. Достоинства датчика — высокая надежность, малый уход нуля; недостаток — чувствительность к перегрузкам и ударам.

**Датчики с манганиновой проволокой.** Для измерения высоких давлений можно использовать датчики, чувствительным элементом которых является манганиновая проволока, намотанная без натяжения на цилиндрический сердечник. Под действием гидростатического давления изменяется электрическое сопротивление проволоки в соотношении  $2,33 \cdot 10^{-6}$ /бар. Точность таких датчиков может достигать 0,1%. Они используются, в частности, для измерения давления в экструдерах.

### 13.5.2. Преобразование сигнала изменением емкости (см. разд. 7.3)

Простые по принципу действия емкостные датчики являются в силу этого достаточно прочными. Емкость можно изменить, воздействуя на один из параметров, изменяющих электрическое поле между двумя проводниками, образующими две обкладки конденсатора. Одна из этих обкладок может находиться на чувствительном элементе (например, на мембране), а вместе они образуют конденсатор, изменение емкости  $C$  кото-

рого определяется прогибом мембранны. В этом случае параметром, воздействующим на  $C$ , может служить площадь поверхности  $A$  рассматриваемой обкладки, линейно зависящая от прогиба  $\Delta X$ , но можно также изменять расстояние между обкладками  $D$  (случай двух параллельных электродов) или, наконец, характеристики среды (введение твердого диэлектрика между обкладками). Площадь  $A$  можно изменять перемещением обкладок, как в случае цилиндрического конденсатора (рис. 13.15), для которого реализуется линейный закон изменения площади. Если гистерезис мембранны мал, то ошибка вследствие отклонения от линейности для датчика с цилиндрическим конденсатором остается меньше 0,1% от диапазона измерений.

Если изменяется расстояние  $D$  между обкладками, то при условии малых изменений ( $d \ll D_0$ ) можно принять линейную зависимость для  $C$ :

$$\Delta C/C_0 = -d/D_0.$$

На практике, когда в качестве обкладок конденсатора используются неподвижный изолированный электрод и деформируемый «подвижный» электрод (мембрана), закон намного сложнее. В этом случае, чтобы ошибка из-за отклонения от линейности не превышала заданной величины  $n$  (%), необходимо ограничить перемещение мембранны величиной  $d$  из условия

$$d < (n/50) D_0.$$

При  $D_0 = 50$  мкм и  $n = 0,5\%$  этому условию соответствует прогиб 0,5 мкм.

Нелинейность можно также частично скомпенсировать, вво-

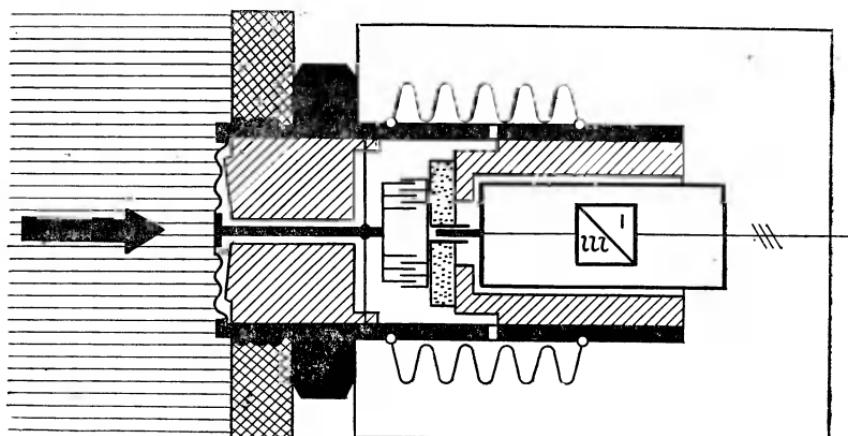


Рис. 13.15. Схема конструкции емкостного датчика давления (фирма VEGA).

дя между двумя электродами пластинку слюды и оставляя, разумеется, пространство, допускающее перемещение мембранны.

Емкостные датчики с мембраной, заделанной заподлицо со стенкой, и короткими заполненными каналами приемников давления, устроенные в стенках, практически не имеют паразитных объемов. Кроме того, благодаря достаточно высокой собственной частоте ( $f_0 = 2,5e/r$  [кГц] для стали, где  $e$  и  $r$  — толщина и радиус мембранны), их можно использовать для измерений быстропеременных давлений.

Заметим, что при прямом контакте мембранны с жидкостью, плотностью которой пренебречь нельзя, собственная частота уменьшается. В этом случае при определении  $f_0$  необходимо вводить поправочный множитель  $\alpha$  вида

$$\alpha = \left( 1 + 0,66 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{r}{e} \right)^{-1/2},$$

где  $\rho_1$  — плотность жидкости, а  $\rho_2$  — плотность мембранны. Например, резонансная частота мембранны толщиной  $22 \cdot 10^{-5}$  м и радиусом  $5 \cdot 10^{-3}$  м в воздухе равна 22 кГц, а в воде — всего 2,5 кГц. Снижение собственной частоты тем значительнее, чем больше радиус мембранны. Так, в некоторых диапазонах измерений могут потребоваться мембранны радиусом  $(7,5 \div 12,5) \cdot 10^{-3}$  м, но их собственная частота в области низких давлений всегда будет более низкой, вследствие чего малым будет и быстродействие датчика.

Уход нуля и чувствительность в зависимости от температуры имеют порядок  $0,05\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но могут достигать и  $1\%/\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этих случаях необходимо предусмотреть систему охлаждения, расположенную, насколько это возможно, на уровне мембранны (рис. 13.16, а).

Гистерезис емкостных датчиков с прогибом мембрани не более 0,5 мкм не превышает 0,2% от диапазона измерений.

Третий параметр, влияющий на емкость  $C$ , а именно  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость — также может регулироваться, например, путем перемещения между обкладками конденсатора соединенной с чувствительным элементом пластинки из диэлектрика с большой проницаемостью. Деформация чувствительного элемента, вызывающая перемещение точки крепления пластинки на расстояние  $\Delta X$ , приводит к изменению емкости на величину

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 a}{D_0} (\epsilon_r - 1) \Delta X,$$

где  $a$  — ширина обкладок,  $D_0$  — расстояние между ними,  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость, а  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

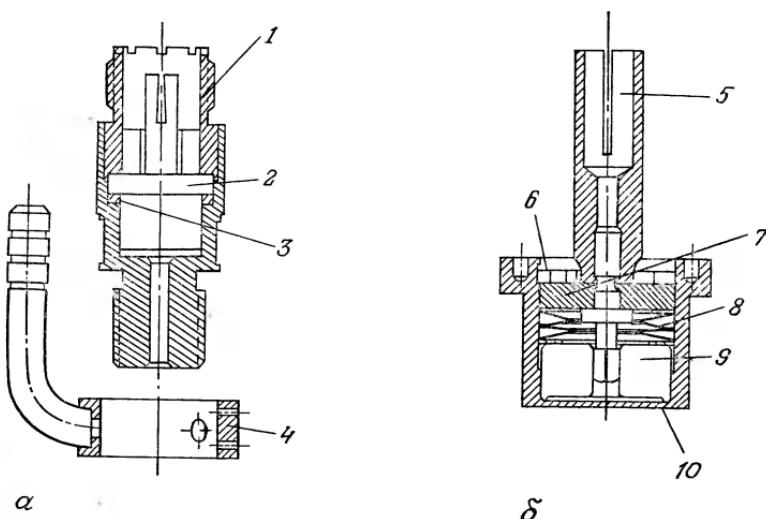


Рис. 13.16. Датчик для измерения больших давлений при высокой температуре среды (фирма DISA).

*a* — разрез; *б* — деталь конструкции датчика. 1 — корпус из нержавеющей стали; 2 — чувствительный элемент; 3 — соединение; 4 — рубашка охлаждения; 5 — штырек; 6 — кольцевой замок; 7 — керамический диск; 8 — пружины; 9 — кварцевые электроды с обращенной к мембране металлизированной поверхностью; 10 — мембрана из закаленной нержавеющей стали.

Преобразование изменения емкости  $\Delta C$  в электрический сигнал можно осуществить одним из ранее рассмотренных способов (см. разд. 3.3.2 и 7.3.4).

В электронных преобразователях давления такого рода фирма Rosemount использует дифференциальное изменение емкости. На рис. 13.17 показано устройство емкостного элемента с мембраной, центр которой перемещается между двумя неподвижными электродами  $A_1$  и  $A_2$  максимально на 50 или 100 мкм (в зависимости от модели). Электроды объединены с жесткими изоляторами и образуют с ними два конденсатора емкостью  $C_1$  (со стороны высокого давления  $p_1$ ) и  $C_2$  (со стороны низкого давления  $p_2$ ).

Давления  $p_1$  и  $p_2$  переда-

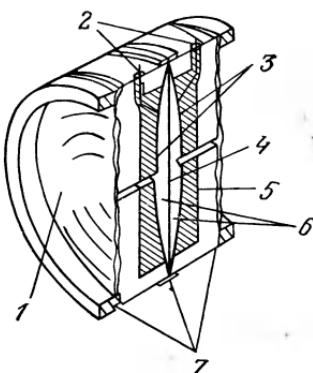


Рис. 13.17. Емкостный дифференциальный датчик давления (фирма Rosemount).

1 — мембрана из изолирующего материала; 2 — проводники; 3 — обкладки конденсатора; 4 — измерительная мембрана; 5 — жесткий изолятор; 6 — силиконовое масло; 7 — паяное соединение.

ются через мембранны из изолирующего материала и силиконо-  
вое масло к деформируемой измерительной мембране, которая  
перемещается между двумя неподвижными электродами на  
расстояние, пропорциональное разности давлений  $p_1 - p_2$ . Изме-  
рительный сигнал определяется выражением

$$i_m = K \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = K' (p_1 - p_2).$$

Емкости  $C_1$  и  $C_2$  находятся в одинаковых окружающих ус-  
ловиях, поэтому форма измерительных сигналов также одна-  
кова, и обеспечивается очень хорошая компенсация влияния  
старения, термических изменений и механических напряжений.

В Национальном управлении аэрокосмических исследований  
ONERA (Франция) для препарирования тонких аэродинамиче-  
ских профилей разработаны пленочные датчики давления тол-  
щиной 80 мкм с твердым или газообразным диэлектриком (рис. 13.18).

Особый вид емкостных датчиков представляют приборы, в  
которых можно исключить внешний источник питания благодаря  
использованию мембранны, сохраняющей постоянную элек-  
трическую поляризацию (электретный эффект). Такую мембра-

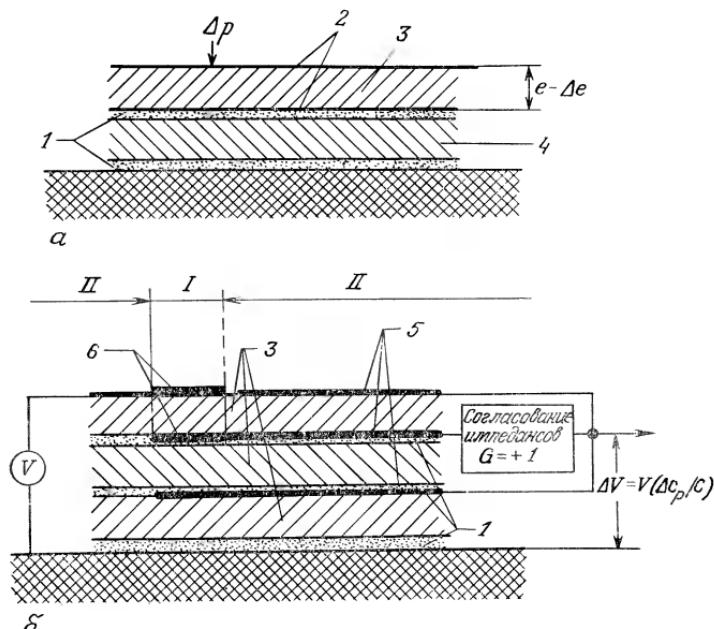


Рис. 13.18. Пленочный датчик давления, вид в разрезе (ONERA).

**а — схема устройства; б — электрическая схема.** 1 — клевые слои; 2 — осажденный метал; 3 — пластина из диэлектрика (модуль упругости  $E$ ); 4 — изолятор; 5 — за-  
щитные интегральные схемы; 6 — электроды.

ну, сделанную, например, из полиэфирной пленки толщиной 15 мкм с металлизированной внешней поверхностью, можно поместить на металлический электрод, поверхность которого имеет углубления, заполненные воздухом (рис. 13.19). Чувствительность таких датчиков, изменяющаяся в зависимости от температуры, составляет от 1 до 20 мВ/мбар для различных моделей ONERA, а диаметр не превышает 5 мм при толщине 1,5 мм. Датчики необходимо связать с согласующим устройством, например, на полевых транзисторах.

Метрологические характеристики емкостных датчиков давления следующие: линейность  $0,5 \div 2\%$  от Д.И.; гистерезис — менее  $0,02\%$  от Д.И.; разрешение — лучше  $0,1\%$  от Д.И.; воспроизводимость  $0,1 \div 2\%$  от Д.И.; погрешность от 0,2 до 0,5% от Д.И.; частотная характеристика — собственная частота от 50 до 200 кГц (в зависимости от диаметра и толщины мембраны); выходной сигнал  $20 \div 200$  мВ. Достоинства датчика — малая масса и малая чувствительность к ускорениям; недостатки — чувствительность к температуре (кроме дифференциальной схемы включения) и высокий выходной импеданс.

### 13.5.3. Преобразование сигнала изменением индуктивности и взаимной индукции

В индуктивных датчиках давления используется, по существу, изменение магнитного сопротивления цепи вследствие изменения одного или нескольких воздушных промежутков.

На рис. 13.20, *а* показано соединение витой трубчатой пружины Бурдона с магнитным контуром. Пластиночка, являющаяся элементом контура, присоединена к свободному концу трубки и при приложении давления поворачивается вокруг точки своего крепления. Этот поворот приводит к дифференциальному изменению воздушных промежутков на  $+\Delta e$  и  $-\Delta e$  (например, на  $0,05 \div 0,10$  мм). Возникающее при этом изменение индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  (рис. 13.20, *б* и 13.20, *в*) можно преобразовать в измерительный сигнал посредством мостовой схемы, связанной с двумя индуктивностями, двумя резисторами постоянного сопротивления или просто с двумя половинами вторичной обмотки входного трансформатора в линии несущего тока (см. разд. 3.2.2 и разд. 3.3.2).

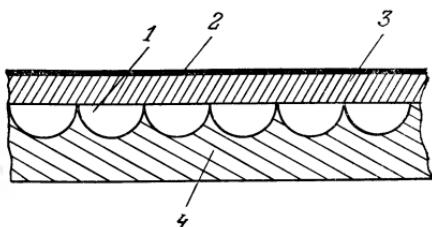


Рис. 13.19. Принцип устройства датчика на электретном эффекте.

*1* — воздушный объем; *2* — металлизация; *3* — мембрана, обладающая электретным эффектом; *4* — электрод.

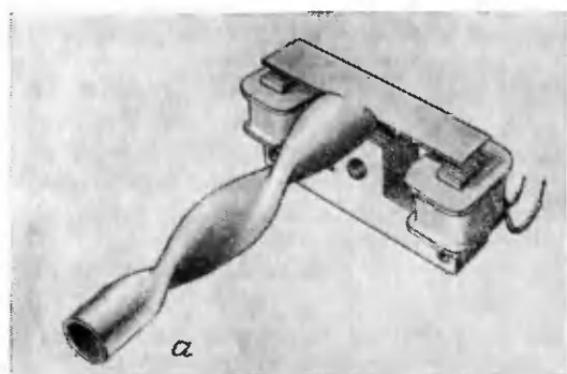


Рис. 13.20. Индуктивный датчик давления.

*а* — общий вид датчика; *б* — полумостовая измерительная схема; *в* — полная мостовая схема, образованная дифференциальным соединением двух магнитных контуров.

Сопротивление магнитного контура можно также изменить, используя магнитные свойства материала, из которого изготовлен чувствительный элемент. В этом случае чувствительный элемент играет роль подвижной пластинки в магнитном контуре (деформация мембранны изменяет воздушный промежуток контура).

Можно также использовать симметричный М-образный контур, состоящий из двух магнитных полуконтуров и общей подвижной пластинки; такая схема обеспечивает изменение взаимной индукции (рис. 13.21). В этой схеме последовательно соединены две первичные обмотки; две вторичные обмотки также соединены последовательно, но снабжены расположенным между ними включателем. Первичный ток  $i$  остается практически постоянным, так как воздушные промежутки величиной

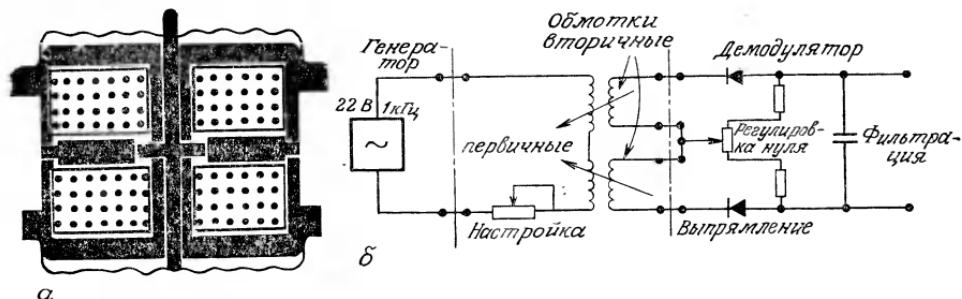


Рис. 13.21. Дифференциальный датчик давления, основанный на принципе изменения взаимной индукции (фирма Ener tec — Schlumberger).

*а* — устройство датчика; *б* — измерительная схема.

~150 мкм изменяются в противоположных направлениях соответственно на  $+\Delta e$  и  $-\Delta e$ . Индуцированные во вторичных обмотках э.д.с., обозначаемые  $v_1$  и  $v_2$ , зависят только от коэффициентов взаимной индукции, обратно пропорциональных магнитным сопротивлениям магнитных контуров (т. е. в первом приближении — соответствующим воздушным промежуткам  $e+\Delta e$  и  $e-\Delta e$ ). Напряжения  $v_1$  и  $v_2$  противоположны по знаку, и на концах вторичных обмоток получаем сигнал

$$v_m = v_1 - v_2 = f(2\Delta e / [e^2 - (\Delta e)^2]) \approx f(2\Delta e / e^2).$$

Типовые метрологические характеристики индуктивных датчиков давления следующие: линейность  $\pm 0,5 \div 3\%$  от Д.И.; гистерезис  $\pm 0,1 \div 1\%$  от Д.И.; разрешение  $0,01\%$  от Д.И.; погрешность  $0,5 \div 2\%$  от Д.И.; полоса пропускания сигнала не превышает нескольких кГц; выходной сигнал  $100 \div 400$  мВ. Достоинством датчика является большой выходной сигнал; его недостатки — чувствительность к вибрациям, ударам, магнитным полям, а также необходимость стабилизировать питание по амплитуде и частоте.

С помощью дифференциальных трансформаторов (см. разд. 7.2.3) можно несколько упростить схему использования индуктивных датчиков и, кроме того, улучшить линейность их характеристики при больших деформациях чувствительного элемента, достигающих, например, одного миллиметра.

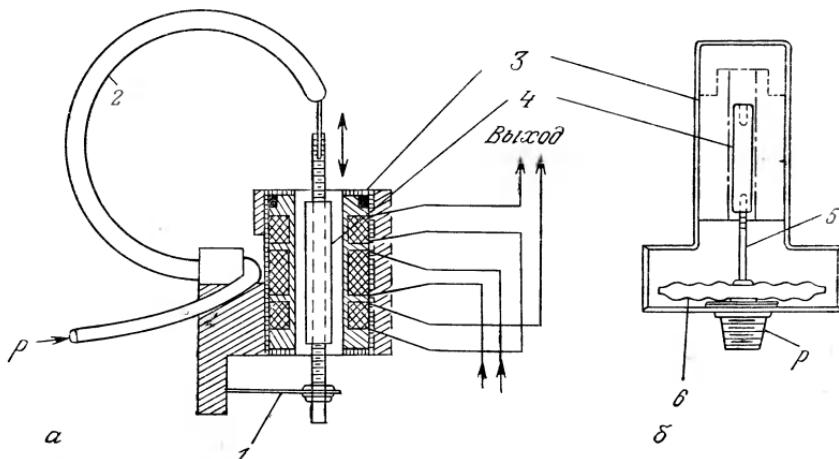


Рис. 13.22. Датчики давления с различными чувствительными элементами и преобразованием сигнала в дифференциальном трансформаторе (фирма Schaeivitz).

**α** — трубка Бурдона; **б** — сильфонная коробка. **1** — пружина; **2** — трубка Бурдона; **3** — дифференциальный трансформатор; **4** — сердечник; **5** — стержень; **6** — сильфон.

Сигнал, несущий информацию об амплитуде и направлении перемещения  $\Delta x$ , передается к сердечнику, связанному с мембранный, мембранный коробкой или сильфоном, на которые действует давление или разность давлений (рис. 13.22).

Датчики давления с дифференциальным трансформатором имеют следующие типовые метрологические характеристики: линейность  $0,5 \div 1\%$  от Д.И.; гистерезис — менее  $0,05\%$  от Д.И.; разрешение  $0,001\%$  от Д.И.; собственная частота  $5 \div 250$  кГц; выходной сигнал  $50 \div 500$  мВ. Достоинствами датчика являются малый гистерезис, очень хорошее разрешение, сравнительно большой выходной сигнал, возможность применения в агрессивной среде, например, в присутствии ионизирующих излучений; недостаток датчика — чувствительность к вибрациям и ударам.

#### 13.5.4. Преобразование сигнала с использованием пьезоэлектрического эффекта

Пьезоэлектрические материалы, используемые в качестве чувствительного элемента, обеспечивают прямое преобразование механических напряжений, появляющихся в материале приложении силы  $F$ , в электрический сигнал  $Q$  (см. разд. 10.1.1). Так, в пластинке, вырезанной из кристалла кварца перпендикулярно одной из трех его электрических осей и снабженной металлическими обкладками, при сжатии (или растяжении) возникает диэлектрическая поляризация, которая вызывает на обкладках появление заряда  $Q$ :

$$Q = kF,$$

где  $k$  — пьезоэлектрическая постоянная<sup>1)</sup>, а  $F$  — приложенная сила. Для кварца  $k = 2,32 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н.

Площадь поверхности колец или пластинок из пьезоэлектрического материала определяется в зависимости от максимального допустимого напряжения. Оно составляет 9500 бар для кварца, 8000 бар для титаната бария и 1400 бар для сегнетовой соли. Максимальное допустимое напряжение существенно зависит также от качества контакта между кристаллом и электродами. Поэтому параллельность контактирующих поверхностей должна быть обеспечена с точностью не менее 10 мкм, а их плоскость должна быть изготовлена с точностью лучше 1 мкм. Тщательное тонкое шлифование и полирование поверхностей до зеркального блеска, ликвидирующие неровности — точечные выступы, — могут привести к местным концентрациям

<sup>1)</sup> Для характеристики пьезоматериалов используется ряд пьезоконстант; величину  $k$  обычно называют пьезомодулем. — Прим. перев.

напряжений, превосходящим разрушающую нагрузку. Поэтому разумно ограничивать эффективные приложенные напряжения в диапазоне измерений одной десятой или даже одной двадцатой максимально допустимой величины. Трубчатая форма преобразователя позволяет увеличить нагрузку и упростить способы соединения отдельных деталей. Для такой конструкции

$$Q = kF \frac{4dh}{D^2 - d^2},$$

где  $d$  и  $D$  — внутренний и внешний диаметры трубы,  $h$  — высота ее металлизированной части. Биметаллическая труба изготавливается путем соединения двух элементов с противоположной относительно плоскости ее симметрии полярностью (рис. 13.23, а).

Трубчатые конструкции применяются в датчиках давления, охлаждаемых циркулирующей водой, находящейся в контакте с металлизированной частью кристалла и герметизирующей мембраной (рис. 13.23, б). Заметим также, что в таком датчике передача давления осуществляется жесткой металлической деталью, служащей, кроме того, креплением герметизирующей мембранны. Эта деталь продолжается в виде штанги или распорки, обеспечивающей посредством сильной пружины предва-

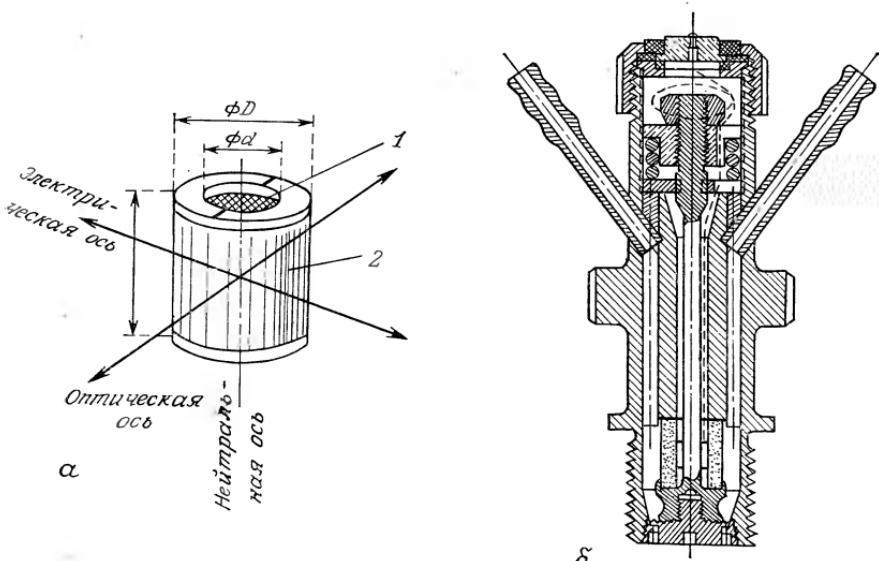


Рис. 13.23. Датчик давления с преобразованием сигнала в трубчатом пьезоэлектрическом элементе.

**а** — конструкция кварцевого трубчатого элемента; **б** — конструкция датчика.  
1 — внутренняя металлизация; 2 — внешняя металлизация.

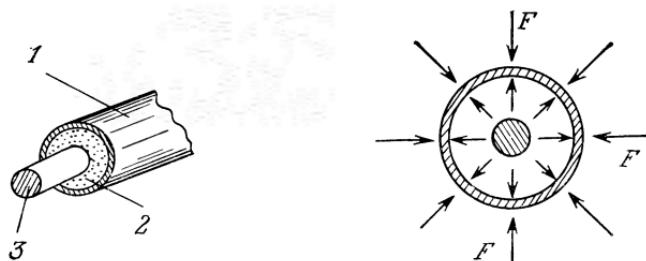


Рис. 13.24. Конструкция и распределение сил пьезоэлектрического кабеля Vibrocoax (фирма SODERN).

1 — металлическая оболочка; 2 — керамический пьезоэлектрик; 3 — центральный проводник.

рительное поджатие, компенсирующее все люфты и улучшающее линейность. Благодаря этому начальному поджатию можно измерять и давления, меньшие атмосферного.

Фирмой SODERN разработаны специальные трубчатые конструкции пьезоэлектрических датчиков в виде бронированного коаксиального кабеля диаметром 1÷3 мм, сердечник и металлическая оболочка которого разделены керамическим пьезоэлектриком, поляризованным в радиальном направлении (вивроаксиал). Под действием внешнего давления такой кабель генерирует заряд  $Q$ , пропорциональный этому давлению. Кабель (рис. 13.24) можно использовать для измерения малых изменений давления в среде с высоким давлением, для управления движением и т. п.

Пьезоэлектрические датчики давления легко миниатюризировать. Датчик цилиндрической формы может быть сделан диаметром меньше нескольких миллиметров, а диаметр его мембранны, вмонтированной заподлицо с поверхностью, может не превышать 1 мм.

Вообще говоря, область измерений пьезоэлектрическими датчиками составляет от нескольких миллибар до нескольких тысяч бар, например, 5000 бар и даже больше. Часто также один и тот же датчик позволяет охватить диапазон давлений, пределы которого относятся как 1:100. Чувствительность этих датчиков в зависимости от типа конструкции и диапазона измерений может изменяться от 0,05 до 1 пКл/бар или от 1 до 25 мВ/бар для датчиков со встроенной электроникой.

Постоянная времени датчика зависит от параллельно включенных емкостей, сопротивлений изоляции и используемой электроники. Возникающие заряды сохраняются от 1 до 24 ч, но постоянная времени для некоторых датчиков не превышает 1 с. Требуемое сопротивление изоляции должно быть больше  $10^{10}$  Ом, что не всегда возможно осуществить. Во всяком слу-

чае, выходной проводник должен быть изолирован тефлоном или кварцем или, наконец, керамикой с большим удельным сопротивлением.

Преобразование сигналов пьезоэлектрических датчиков осуществляется с помощью усилителей напряжения или заряда (см. разд. 10.1.5).

Пьезоэлектрические датчики имеют следующие метрологические характеристики (по порядку величины): линейность — от  $\pm 0,1$  до  $\pm 1\%$  от Д.И.; гистерезис — менее  $0,0001\%$  от Д.И.; разрешение  $0,001\%$  от Д.И.; собственная частота от 50 кГц до 1 МГц (в зависимости от конструкции); выходной сигнал  $5 \div 100$  мВ. К достоинствам датчика относятся превосходные характеристики по частоте, пригодность для измерения быстроизмененных давлений, миниатюризация, очень малая чувствительность к ускорениям (меньше  $0,001\% / g$ ), отсутствие блока питания. Недостатками датчика являются чувствительность к температуре и необходимость использования специальных соединительных кабелей, в частности, малошумных.

### 13.5.5. Преобразование сигнала электромеханическими генераторами колебаний

Генераторы этого типа содержат элемент, совершающий механические колебания, частота которых зависит, кроме прочих параметров, от сил, приложенных к этому элементу. Сила давления, прямо или косвенно воздействующая на колеблющийся элемент, изменяет частоту колебаний в зависимости от величины силы; таким образом, частота является сигналом, излучаемым генератором. Информация, связанная с частотой, обладает преимуществами, которые могут быть существенными во многих отношениях; это — меньшая зависимость от шумов и паразитных влияний, защита информации от ослабления при ее передаче, простота преобразования в численную форму.

Генераторы колебаний в виде колеблющейся струны, пластинки или трубы. Чувствительный элемент, на который действует измеряемое давление, должен быть связан с колеблющимся элементом — струной или стальной пластинкой, прикрепленной, с одной стороны, к неподвижной точке корпуса, а с другой — к мембране или сильфону (рис. 13.25, *а* и *б*), либо должен сам колебаться, как в случае колеблющейся трубы, закрытой с одного конца (см. разд. 13.2.1 и рис. 13.25, *в*).

Незатухающие колебания поддерживаются двумя катушками: измерительная катушка генерирует напряжение, индуцированное колеблющимся стальным элементом; это напряжение усиливается и питает возбуждающую катушку (рис. 8.24).

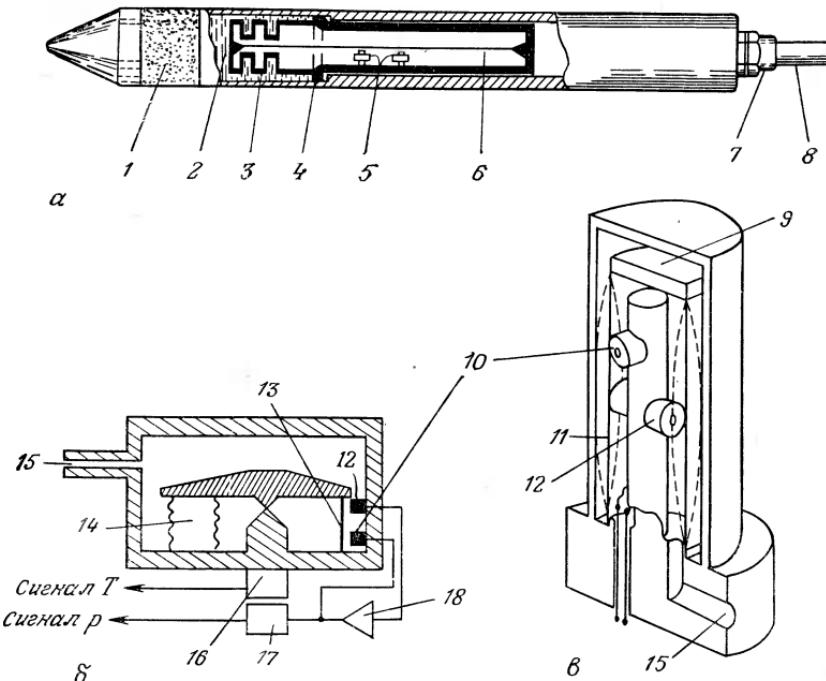


Рис. 13.25. Датчики давления с преобразованием сигнала в электромеханическом генераторе.

*a* — колеблющаяся струна (фирма Telemac); *б* — колеблющаяся пластина (фирма Crouzet); *в* — колеблющаяся трубка (фирма Bell & Howell). 1 — пористый элемент; 2 — вода; 3 — упругий элемент; 4 — паяное соединение; 5 — катушки возбуждения и измерения; 6 — колеблющаяся струна; 7 — кабельный ввод с эластичным уплотнением; 8 — мягкий кабель; 9 — объем эталонного вакуума; 10 — катушка возбуждения; 11 — колеблющаяся трубка; 12 — измерительная катушка; 13 — колеблющаяся пластина; 14 — вакуумированный сильфон; 15 — отбор давления; 16 — измерение температуры; 17 — формирование сигнала; 18 — усилитель обратной связи.

Частота механических колебаний  $f$  зависит от формы и размеров колеблющегося элемента (его длины  $l$ , площади сечения  $s$ ), от физических свойств материала (например, от его плотности  $\rho$ ) и от приложенных сил. Так, в случае колеблющейся струны имеем

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho s}},$$

где  $F$  — сила натяжения струны. Для колеблющейся трубы соответствующее соотношение принимает вид

$$p = A(f - f_0) + B(f - f_0)^2 + C(f - f_0)^3.$$

Здесь  $f_0$  и  $f$  — частоты колебаний при давлении, равном нулю, и при измеряемом давлении  $p$ , соответственно;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — константы для данного датчика.

**Примеры реализации.** Манометрическая капсула CL1 (фирма-изготовитель Telemac, рис. 13.25, а). Используется для измерения давления жидкостей в технических системах, в частности, во внутренних течениях. Жидкость под давлением, пройдя через пористый элемент, вызывает продольную деформацию упругого блока, который изменяет натяжение струны и, следовательно, частоту колебаний.

Диапазоны измерений датчика  $0 \div 2$ ,  $0 \div 5$ ,  $0 \div 10$ ,  $0 \div 20$  бар; разрешение  $0,1\%$  от Д.И.; погрешность  $0,3\%$  от Д.И.

Датчик давления типа 50 (фирма-изготовитель Grouzet, рис. 13.25, б). Датчик абсолютного давления с колеблющейся пластинкой, предназначенный, в частности, для авиационных приложений. Натяжение пластинки осуществляется герметичным сильфоном, вакуум в котором служит уровнем отсчета для измерения абсолютного давления. Частота колебаний зависит от температуры, которая также измеряется. Точная величина давления вычисляется по измеренным частоте колебаний и температуре с помощью полиномиального выражения, коэффициенты которого хранятся в блоке памяти информационной измерительной системы.

Диапазоны измерений датчика от  $0 \div 1100$  до  $0 \div 3000$  мбар; погрешность от  $\pm 0,01$  до  $\pm 0,02\%$  от диапазона измерений; полоса пропускания 15 Гц (при  $-3$  дБ).

Достоинства датчиков с колеблющейся струной, пластинкой или трубкой следующие: перенос информации частотой; высокий уровень выходного сигнала; превосходные воспроизводимость, разрешение и точность. К недостаткам датчика следует отнести его нелинейность, ограниченную полосу пропускания, значительные габариты, а также чувствительность к температуре, вибрациям и ударам.

**Кварцевые генераторы колебаний.** Изменяя толщину слоя воздуха между осциллирующим кристаллом и одним из его электродов, можно изменять частоту колебаний с шагом около  $0,1\%$ . Так, например, при перемещении одного из электродов на 20 мкм частота осциллирующего кристалла, равная 2 МГц, изменяется на 1000 Гц. Перемещение электрода осуществляется посредством его жесткого соединения с мембраной или капсулой, деформирующейся под действием давления. Сигнал переменной частоты можно смешать с сигналом постоянной частоты, полученным от эталонного кварцевого генератора. Тогда частота биения укажет величину давления.

В другом подходе используется изменение резонансной частоты кварцевого генератора колебаний под действием приложенной к нему силы. В датчике, основанном на этом принципе (фирма-изготовитель Gould), сила  $F$  приложена на краю кварцевого диска малой толщины. На этом диске в двух точках на-

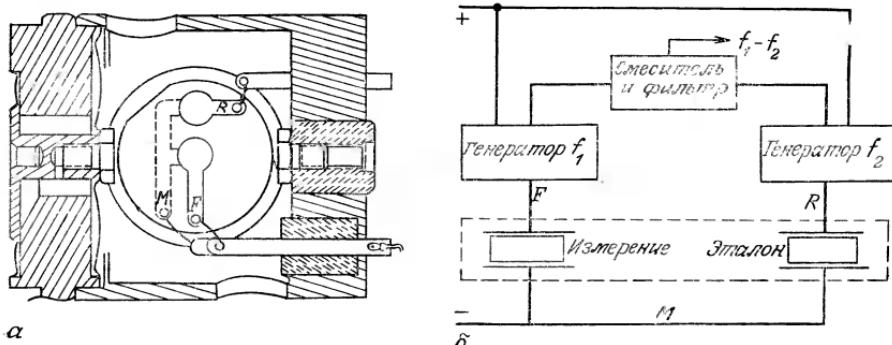


Рис. 13.26. Датчик давления с преобразованием сигнала в кварцевом генераторе (фирма Gould).

*α* — расположение электродов; *б* — измерительная схема.

нанесены контакты, каждый из которых позволяет поддерживать колебания высокой частоты. Один из этих контактов расположен в зоне, находящейся под действием напряжения, вызванного приложенной силой, а второй используется как эталон и расположен в области, где напряжений нет (рис. 13.26, *а*).

Выходной сигнал (см. рис. 13.26, *б*) формируется частотой биения двух частот колебаний, которая после усиления разрешаемой умножается на целочисленный множитель  $n$  ( $2 < n < 32$ ).

Метрологические характеристики датчика: диапазон измерений  $0 \div 1$  бар; ошибка из-за нелинейности и гистерезиса менее  $\pm 0,025\%$  от Д.И.; воспроизводимость лучше  $\pm 0,025\%$  от Д.И. Уход нуля и изменение чувствительности очень малы ( $0,009\%$  от Д.И./ $^{\circ}\text{C}$ ). В действительности в области от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  эти уходы практически компенсируются, если два кварцевых генератора колебаний вмонтированы в один и тот же кристалл.

Передача сигнала посредством осциллирующего кристалла кварца реализована также в серии датчиков на диапазоны измерений от  $0 \div 0,413$  до  $0 \div 62$  бар (фирма-изготовитель Рагосcientific), предназначенных для авиационных приложений.

Рис. 13.27, на которомображен датчик абсолютного давления (вакуум, господствующий внутри корпуса, служит уровнем отсчета), иллюстрирует некоторые особенности этой схемы. Сила давления, приложенного к сильфону, внешняя поверхность которого находится в вакууме, передается посредством коромысла, шарнирно сочлененного в точке 0, к кварцевой пластинке. Коромысло уравновешивается двумя подвижными грузами, что позволяет привести центр масс всей системы в точку 0. С помощью этого устройства практически исключаются силы, вызванные вибрациями и ускорениями, влияние которых сводится к  $0,0008\%$  от Д.И. на  $1g$ .

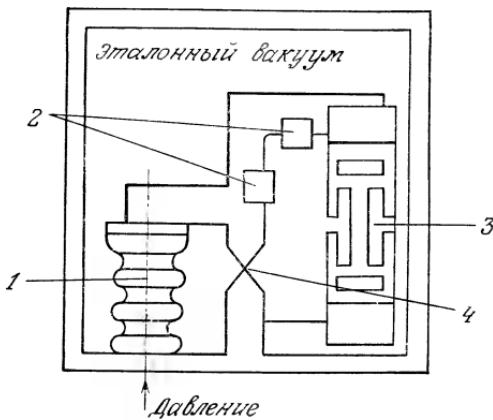


Рис. 13.27. Датчик давления с преобразованием сигнала в кварцевом генераторе (фирма Paroscientific).

1 — сильфон; 2 — уравновешивающие грузы; 3 — кварцевый генератор; 4 — шарнир.

Сжатие кварца в осевом направлении уменьшает его резонансную частоту; она изменяется от 40 кГц при давлении, равном нулю, до 36 кГц при давлении, соответствующем номинальному диапазону датчика.

Частота колебаний  $f$  связана с давлением  $p$  соотношением

$$p = A(f_0 - f) - B(f_0 - f)^2,$$

где  $f_0$  — частота колебаний при  $p=0$ ;  $A$ ,  $B$  — постоянные коэффициенты для кристалла кварца.

Пользуясь часами на 10 МГц и микропроцессором, определяют длительность 1000 периодов колебаний кварца, что позволяет получить разрешение около 0,003% от полного диапазона в 25 мс.

Торцы кварцевой пластинки, образующие механический фильтр низких частот, исключают передачу энергии пластинки к конструкции. Эта особенность, а также тот факт, что пластинка находится в вакууме, сводит затухание колебаний к минимуму.

Воспроизводимость и гистерезис характеристики составляют 0,005% от диапазона измерений. Температурные уходы равны соответственно 0,0002% Д.И./°C для ухода нуля и 0,0014% Д.И./°C для чувствительности.

Другой тип электромеханического генератора колебаний, применяемого для измерения давления, основан на распространении упругих волн к поверхности кварцевого основания. В разд. 7.5.1 показано, что распространение упругой волны позволяет реализовать линию задержки с  $T=l/V$ , где  $l$  — расстоя-

ние между излучателем и приемником волны, а  $V$  — скорость ее распространения. Включение линии задержки в контур обратной связи усилителя позволяет образовать генератор гармоник с частотой

$$f = n/T = nV/l,$$

где  $n$  — целое число, определяемое размерами кварцевого основания и нелинейностями усилителя.

В одной из конструкций датчика давления мембрана изготовлена из кварцевой пластинки, на которую нанесена линия задержки (рис. 13.28,  $a$ ). Деформация мембранны под действием давления вызывает изменение  $l$  и, следовательно, частоты колебаний  $f$ . Чувствительность  $S = \Delta f / \Delta p$  по порядку величины составляет 20 кГц/бар для частот около 100 МГц. Однако датчик такой конструкции довольно чувствителен к температуре. Чувствительность можно уменьшить путем использования дифференциальной схемы. С этой целью в двух зонах мембранны, деформации которых под действием давления противоположны по знаку, монтируются две линии задержки, соединенные с генераторами колебаний. Соответствующие изменения частот генераторов имеют противоположные знаки: например, 18 кГц/бар и  $-22$  кГц/бар. Смешение частот колебаний  $f_1$  и  $f_2$ , излучаемых двумя генераторами, образует частоту биения  $f = f_1 - f_2$ , изменение которой под действием давления в рассматриваемом

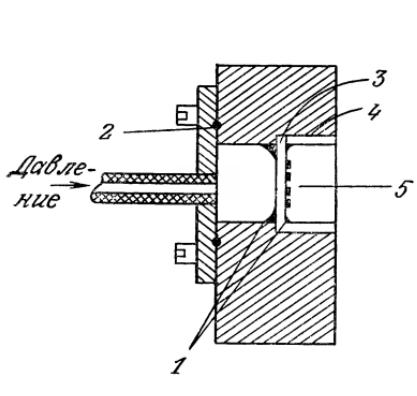
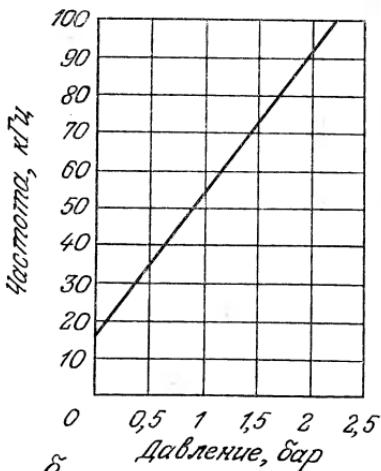
 $\alpha$ 

Рис. 13.28. Датчик давления с преобразованием сигнала посредством поверхностных волн.

$\alpha$  — устройство датчика (фирма Hewlett Packard);  $\delta$  — зависимость частоты биения от давления при дифференциальном соединении двух линий задержки (фирма Thomson). 1 — эпоксидная смола; 2 — торoidalное уплотнение; 3 — кварцевая мембрана; 4 — манжета; 5 — резонатор поверхностных волн.

примере равно 40 кГц/бар. Линейность характеристики датчика превосходная (см. рис. 13.28, б). При этом влияние температуры на частоту биения  $f$ , почти одинаковое для частот  $f_1$  и  $f_2$ , существенно уменьшается.

### 13.5.6. Другие способы преобразования сигнала

**Фотоэлектричество.** Перемещение или деформацию чувствительного элемента можно преобразовать в изменение освещенности с помощью рассеяния или постепенной отсечки световых лучей, испускаемых источником света. Отсечку можно осуществить посредством подвижной створки, соединенной с чувствительной мембраной или сильфоном. Рассеяние происходит, например, в результате деформации отражающей поверхности чувствительного элемента (полированная поверхность мембранны) или соединенного с ним зеркала. В случае мембранны на точность могут повлиять изменение альбедо, нестабильность степени окисления полированной поверхности, а также тепловые эффекты.

Свет (также модулированный) воспринимается фотодиодом либо непосредственно, либо через световод (например, из оптического волокна).

Интенсивность поляризованных призмой Николя лучей пучка также можно модулировать, пропуская их через стеклянный блок, который под действием давления становится двоякопереломляющим. Перед оптическим детектором, принимающим проходящие лучи, устанавливают второй николь — анализатор. Такой принцип использован, в частности, в разработке ONERA.

**Пьезотранзисторы.** В пьезотранзисторах типа  $n-p-n$ , применяемых на излучателях, посредством силы  $F$  и иглы можно изменить проводимость соединения излучатель — основание.

Это устройство позволяет получить в контуре усилителя с одним из таких транзисторов электрический сигнал, пропорциональный приложенной силе  $F$ . Датчик давления с пьезотранзистором содержит, кроме него, мембрану, соединенную с иглой, действующей на излучатель (рис. 13.29).

Датчики этого типа позволяют охватить диапазон измерений от нескольких миллибар до 1,5 бара. Их средняя чувствительность составляет

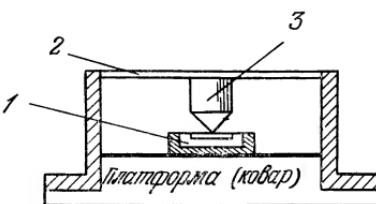


Рис. 13.29. Датчик давления с преобразованием сигнала в пьезотранзисторе (докум. Stow. Lab.).  
1 — кремниевый транзистор типа  $n-p-n$ ;  
2 — медиоберилиевая мембрана;  
3 — алмазная игла.

0,1 В/мбар при напряжении питания 10 В. Уход нуля, в зависимости от модели, изменяется от  $\pm 50$  до  $\pm 400$  мВ/°C, погрешность из-за нелинейности и гистерезиса равна 1% для выходного сигнала 1 В, температурный коэффициент составляет 0,2%/°C (допустимая температура применения датчика не превышает 40 °C). Собственная частота может достигать 0,15 МГц.

Полевые транзисторы, специально предназначенные для таких приложений (пьезофеты), также позволяют реализовать преобразователи, сравнимые по характеристикам с полупроводниковыми тензодатчиками. Действительно, под действием напряжений вдоль одной из осей ток насыщения, проходящий через транзистор, изменяется пропорционально его относительному удлинению  $\Delta l/l$ .

### 13.6. Следящие системы с уравновешиванием силы

В датчиках давления со следящей системой измерительный сигнал после его усиления используется для создания силы  $F'$ , уравновешивающей силу  $F=ps$ , приложенную к чувствительному элементу.

На рис. 13.30 представлен датчик такого типа. Давление вызывает деформацию капсулы, что влечет за собой перемещение коромысла 5, соединенного с капсулой и несущего на другом конце сердечник индуктивного датчика перемещений 7, используемого в качестве указателя нулевого положения, т. е. положения равновесия коромысла. Сигнал этого датчика усиливается и демодулируется (2 и 3), а затем воздействует на электродинамический двигатель. Этот двигатель создает восстанавливающую положение равновесия силу  $F'=aBli$ , где  $B$  — индуктивность постоянного магнита 10 двигателя,  $l$  — длина обмотки подвижной восстанавливающей катушки 9, а  $i$  — сила тока, протекающего через катушку, которая пропорциональна сигналу, поступающему от датчика перемещений.

В положении равновесия, т. е. при  $F'=F$ , имеем

$$ps = aBli, \text{ откуда } i = bp,$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для данной конструкции величины.

Благодаря следящей системе деформация чувствительного элемента очень мала (удлинение менее 0,2 мкм), поэтому гистерезис составляет лишь  $5 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-4}$  от диапазона измерений. Линейность характеристики преобразования также очень хорошая — отклонение от линейности порядка 0,05% от диапазона измерений.

Несмотря на эти и другие прекрасные качества (превосходная стабильность параметров по времени, высокая точность,

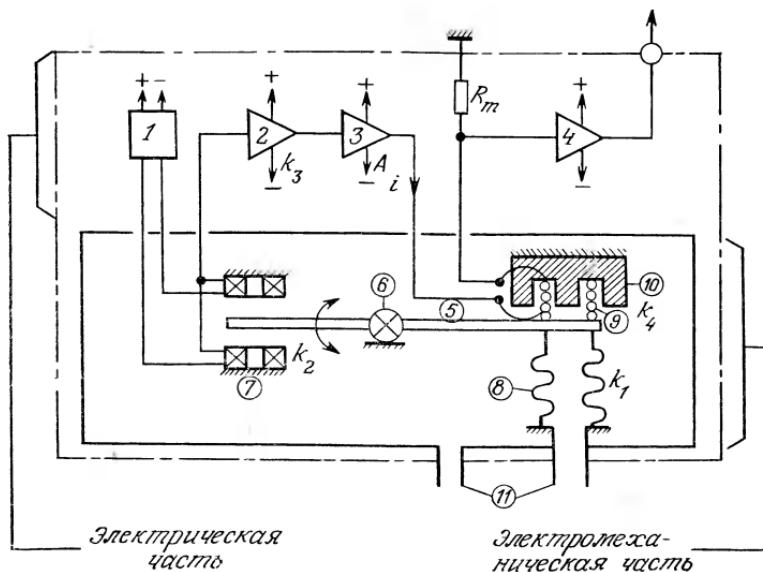


Рис. 13.30. Схема датчика давления с уравновешиванием сил (фирма Сгouzett).

1 — генератор колебаний; 2 — усилитель-демодулятор; 3 — усилитель постоянного тока; 4 — оконечный усилитель; 5 — коромысло; 6 — шарнир; 7 — указатель нулевого положения; 8 — капсула; 9 — восстанавливающая катушка; 10 — постоянный магнит; 11 — приемники давления;  $R_m$  — измеряемое сопротивление.

при которой погрешность может быть порядка  $10^{-4}$  от диапазона измерений), следящие приборы с уравновешиванием сил уступают, по крайней мере в качестве преобразователей давления, емкостным или тонкопленочным датчикам. Эти последние дешевле, прочнее, имеют меньшие габариты и менее чувствительны к ударам и вибрациям, чем датчики с уравновешиванием сил.

Но для следящих систем остаются еще две области преимущественного применения. Первая — это точные измерения квазистационарных давлений в фиксированной точке. В таком случае можно использовать прибор с подвижным грузом, перемещаемым с помощью микрометрического винта. Например, в цифровом измерительном приборе фирмы Desgranges et Huot сила давления на поршень, находящийся в цилиндре, уравновешивается толкающим усилием коромысла весов, снабженного подвижной массой. Передвигая с помощью сервомотора эту массу до достижения положения равновесия, приводят в действие кодирующее устройство, которое преобразует в цифровое показание возникающую силу (уравновешивающую силу давления).

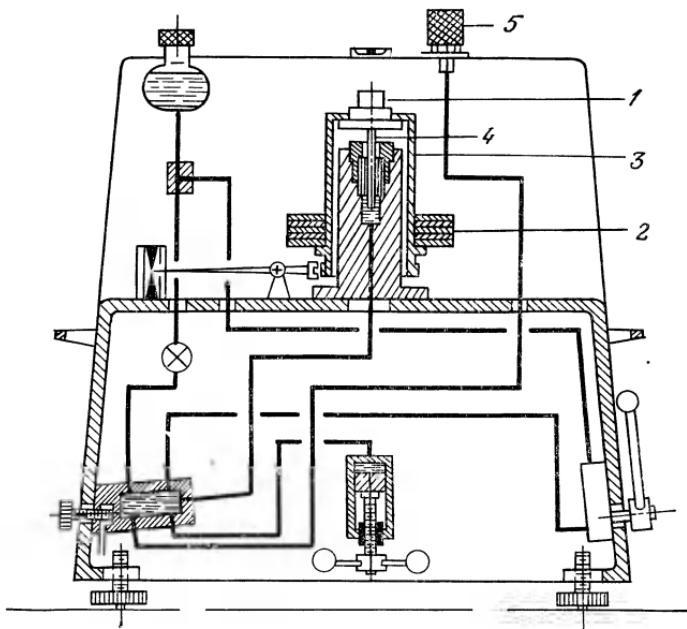


Рис. 13.31. Схема манометрических весов с грузами (фирма Desgranges et Huot).

Полная масса  $M$  (состоящая из переменных грузов  $1$  и  $2$  и держателя грузов  $3$ ) действует на поршень  $4$  сечением  $s$  с силой  $Mg$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести. Эта сила уравновешивается силой  $ps$  гидравлического давления жидкости  $p=Mg/s$ . Градуируемый датчик присоединяется в точке  $5$ .

Вторая область применения — это датчики с прямым отсчетом. Например, в датчике с дифференциальным трансформатором перемещение подвижного сердечника порождает аналоговый сигнал. Но этот сигнал после усиления можно использовать для привода сервомотора, который, в свою очередь, может перемещать опору, несущую катушки трансформатора. Их перемещение относительно сердечника приводит к обнулению сигнала. Короче говоря, здесь нулевой метод применяется для измерения перемещения сердечника. Но если, кроме того, соединить сервомотор с показывающим прибором, снабженным градуированной лентой, то можно получить скользящую шкалу. Такой способ эффективно используется в некоторых барометрических высотомерах.

### 13.7. Градуировка

Градуировка датчика давления осуществляется приложением давления, величина которого известна, с точной записью выходного сигнала. Градуировку можно выполнить на градуиро-

вочном стенде с грузами (рис. 13.31) или путем сравнения с показаниями эталонного прибора.

Манометрические весы позволяют получить точность, обеспечивающую погрешность не более 0,001 %. Эта точность относится только к стационарным величинам давления.

Что же касается точности градуировочной кривой, т. е. показаний, получаемых затем при переменных давлениях, то она зависит от частотных характеристик датчика. Поэтому необходимо определить амплитудную и фазовую частотные характеристики при переменном давлении. Для этого можно использовать генераторы переменного давления. Вращающиеся распределительные устройства (с пластинками или барабанами) дают пилообразные импульсы, частота которых не превышает  $200 \div 300$  имп/с. Реальный спектр зависит от характера нарастания давления. Для более высоких частот можно использовать генераторы гармоник, которые могут обеспечить частоту в несколько тысяч герц, но они ограничены по амплитуде, так что этот метод применяется только для датчиков низкого давления.

## Библиография

### Монографии

1. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов, 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1981.
2. Barat M., Les mesures de pression à l'aide de prises à la paroi, dans Techniques de mesure dans les écoulements, Paris, Eyrolles, 1974.
3. Combe M., La mesure des fluctuations de pression: capteurs à faible temps de réponse et leur étalonnage, dans Techniques de mesure dans les écoulements, Paris, Eyrolles, 1974.
4. Zelbstein U., Applications industrielles des mesures électroniques, La Chappelle Montligeon, Orne, Editions de Montligeon, 1950.

### Периодические и другие издания

5. Buse D. W., Digital differential pressure transducer, Colorado Springs, Colorado, U. S. Air Force Academy, 1980.
6. Chevallier J. J., Taillet J., Récents progrès dans les techniques de mesure en hypersonique, Progress in Aerospace Sciences, № 12, 1972, p. 273.
7. Dieulesaint E., Royer D., Lignes à ondes de surface, *Onde électrique*, 56, 184 (1976).
8. Karrer E., Ward R., A low range quartz resonator pressure transducer, *ISA Transact.*, 16, 91 (1977).
9. Kellock B. C., Production of Bell and Howell pressure transducers, *Production Engineering* (oct. 1974).
10. Kling R., Contribution à l'étude du fonctionnement des pompes d'injection et des injecteurs, *Note technique G. R. A.*, 2 (1946).
11. La Balme M., Caractéristiques et domaines d'application des scanners de pression électroniques, Nancy, Institut des Sciences de l'Ingénieur, 1978.
12. Lopez J., d'Humieres Ch., Etalonnage dynamique des capteurs de pression par créneaux périodiques, *Mesures*, 3, 1972.

13. Malon J. R., Kurtz A., Static performances of integrated sensor transducers, *I. S. A. Instrumentation Symposium*, Anaheim, Californie, 1979.
14. Meyer R. C., A new digital pressure transducer, *ISA Transact.*, **12**, 156 (1973).
15. Micheron F., Vers une nouvelle génération de capteurs grâce aux polymères piézoélectriques, *Mesures*, **11**, 73 (1981).
16. Paros J. M., Precision digital pressure transducer, *ISA Transact.*, **12**, 173 (1973).
17. Portat M. et al., Les capteurs pelliculaires et leurs applications, *Mesures*, **11**, 65 (1985).
18. Wrathall T., Miniature pressure cells, *ISA Journal*, 50 (mai 1953).
19. Zelbstein U., Méthodes et appareils de mesure des pressions dans les moteurs à combustion interne (279 références bibliographiques), *S. D. I. T.*, 29E, Ministère de l'Air, Paris (1950).
20. Zelbstein U., Utilisation industrielle des structures piézoélectriques tubulaires en capteurs de pression, *E. M. I.*, **171**, 57 (1973).
21. Zelbstein U., L'utilisateur face au marché des capteurs de pression, *A. I. I.*, **70**, 28 (1978).

#### **Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке**

- Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. — Л.: Машиностроение, 1986.
- Иванова Г. М., Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Петунин А. И. Измерение параметров газового потока. — М.: Машиностроение, 1974.
- Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы, 3-е изд. — М.: Энергия, 1978.

## **14. ВАКУУММЕТРЫ**

Вакуумметрами принято называть датчики, предназначенные для измерения давления газа, не превышающего атмосферное.

Понятие давления обычно рассматривается с позиций макромеханики как сила, действующая на единичную площадь. Этот подход, хотя и является универсальным, теряет свою ценность в области низких и очень низких давлений, так как измеряемая величина определяется средним числом молекул в единице объема газа, считаемого однородным. В самом деле, при использовании вакуумной техники обычно стремятся свести к минимуму:

а) помехи, создаваемые молекулами газа пучкам частиц (атомов, электронов, протонов, гелионов и т. д.), при вакуумной пайке, электронной или ионной микроскопии, в исследованиях с использованием ускорителей и ядерной техники;

б) соударения молекул с поверхностью (для предотвращения адсорбции, окисления, коррозии) при получении чистых поверхностей, например для изготовления очень тонких пленок в микроэлектронике.

### **14.1. Краткий обзор физических свойств газов**

#### **14.1.1. Определение давления газа**

Согласно кинетической теории, молекулы газа движутся равномерно и прямолинейно, меняя направление своего движения лишь при столкновении друг с другом. Траектория молекулы между двумя соударениями представляет собой отрезок прямой, на котором молекула движется с постоянной скоростью, причем направление движения после соударения не связано с направлением движения до него. Таким образом, в целом траектория движения молекулы представляет собой ломаную линию, среднее значение длины прямолинейных участков которой  $\lambda$  называют средней длиной свободного пробега. Поскольку газ заключен в некоторый сосуд, молекулы также сталкиваются с его стенками, и давление, оказываемое ими на стеки, определяется интенсивностью этих соударений. Вакуум

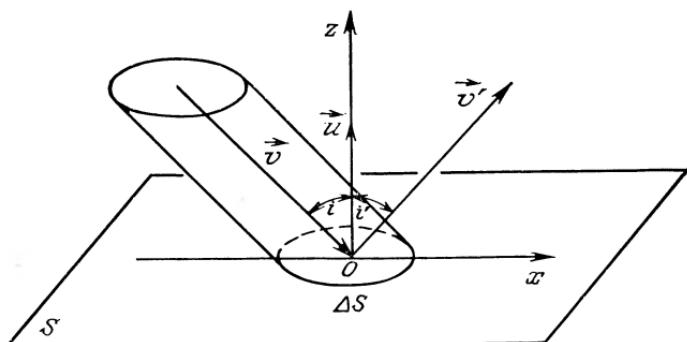


Рис. 14.1. Иллюстрация упругого соударения молекулы с поверхностью.

часто характеризуют числом Кнудсена  $K = \lambda/l$ , которое связывает среднюю длину свободного пробега  $\lambda$  со средним размером  $l$  сосуда.

Рассмотрим элемент  $\Delta S$  поверхности стенки, находящейся в газе с молекулярной массой  $M$ , и молекулу газа, предполагая последнюю точкой, которая сталкивается с этой поверхностью со скоростью  $v$  под углом  $i$  (рис. 14.1). Введем допущение, что не происходит ни конденсации этой молекулы на поверхности, ни ее адсорбции (коэффициент прилипания равен нулю). Поэтому молекула отражается без каких-либо потерь кинетической энергии. Из законов сохранения энергии и количества движения применительно к системе молекула — поверхность следует:

а) согласно первому закону Декарта, молекула отражается поверхностью при  $i = i'$ ;

б) скорость  $v$  после соударения остается прежней  $|v| = |v'| = v$ , поскольку масса молекулы очень мала по сравнению с массой стенки.

Изменение количества движения  $\Delta P$  молекулы в результате удара уменьшается на величину изменения его составляющей в направлении  $z$ , перпендикулярном  $\Delta S$ , т. е.

$$\Delta P_z = -2mv_z u \quad (v_z < 0).$$

Если с поверхностью  $\Delta S$  за единицу времени  $\Delta t$  соударяется  $\Delta v$  молекул, имеющих одинаковую скорость  $v$ , то соответствующее изменение количества движения составит

$$\Delta P_z / \Delta t = -2\Delta v m v_z u.$$

Согласно основному закону динамики, при этом на поверхность  $\Delta S$  со стороны соударяющихся с ней молекул действует сила  $\Delta F$ , направленная противоположно  $u$ :

$$\Delta F = 2\Delta v m v_z u.$$

Если предположить, что в единичном объеме газа содержится в среднем  $n$  молекул и в начальный момент времени все они движутся с одинаковой скоростью, то среди них  $n/2$  молекул имеют скорость  $v$  и  $n/2$  молекул — скорость  $-v$ ; число молекул внутри косого цилиндра с образующей  $v$ , соударяющихся с основанием цилиндра  $\Delta S$ , составляет:

$$\Delta v = -(n/2) \Delta S v_z \quad (v_z < 0).$$

Тогда выражение для силы  $\Delta F$  запишется в виде

$$\Delta F = -nmv^2 z \Delta S u.$$

Соответствующее давление, оказываемое на основание цилиндра, равно

$$p = |\Delta F| / \Delta S = nmv^2 z.$$

В действительности скорости всех молекул различны, поэтому следует заменить  $v_z^2$  на среднее значение, составляющее  $\bar{v^2}/3$ ; тогда выражение для давления  $p$  принимает вид

$$p = \frac{1}{3} nm \bar{v^2} = \frac{2}{3} n \frac{1}{2} m \bar{v^2}.$$

Член  $(1/2)m\bar{v^2}$  представляет собой среднюю кинетическую энергию движения молекул, которая связана с абсолютной температурой  $T$  газа соотношением

$$\frac{1}{2} m \bar{v^2} = \frac{3}{2} kT,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>. Окончательно выражение для давления можно записать в виде

$$p = nkT.$$

Таким образом, давление газа определяется числом молекул, содержащихся в единичном объеме, и их температурой.

Согласно закону Авогадро моль любого газа, т. е.  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  молекул (число Авогадро), занимает при заданных давлении и температуре объем  $V_A$ , который не зависит от природы газа. Поэтому

$$n = N_A / V_A \quad \text{и} \quad p = (N_A / V_A) kT,$$

откуда

$$pV_A = N_A kT = RT.$$

Здесь  $R = N_A k$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 8,314$  Дж·моль<sup>-1</sup>К<sup>-1</sup>. Для  $N$  молей, занимающих при температуре  $T$  объем  $V$ , получаем  $pV = NRT$ , т. е. уравнение состояния идеального газа.

### 14.1.2. Средняя длина свободного пробега

Среднее расстояние, преодолеваемое молекулой между двумя соударениями, зависит, с одной стороны, от размеров молекулы, т. е. от ее природы, и, с другой стороны, от их концентрации, т. е. от давления газа. Эффективный объем молекулы можно определить, предполагая ее сферической; около этой сферы имеется область с радиусом  $\sigma$ , называемая запрещенным объемом, в который не может проникнуть другая молекула. Легко показать, что молекула, движущаяся со скоростью  $v$ , испытывает за секунду  $v_c$  соударений  $v_c = \pi \sigma^2 v n$ ; при этом длина свободного пробега составляет

$$\lambda_0 = v/v_c = 1/\pi\sigma^2 n,$$

где  $n$  — число молекул, содержащихся в единичном объеме.

С учетом распределения скоростей (закон Максвелла — Больцмана) выражение для длины среднего свободного пробега молекул можно записать в виде

$$\lambda = \frac{1}{\pi \sqrt{2} \sigma^2 n} = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} \sigma^2} \frac{1}{p}.$$

Следовательно, для данного газа при температуре  $T$  длина среднего свободного пробега обратно пропорциональна давлению. Расчет для молекулы кислорода при нормальных условиях ( $\sigma = 3,16 \text{ \AA}$ ) приводит к среднему свободному пробегу  $600 \text{ \AA}$ . Число соударений за 1 секунду, рассчитанное для средней скорости  $450 \text{ м/с}$ , имеет порядок  $10^{10}$ . Если уменьшить давление в  $10^5$  раз, то число соударений в секунду составит  $10^5$ . Эти данные характеризуют скорость установления статистического равновесия в газах.

### 14.1.3. Явления сорбции

Термин «сорбция» объединяет, с одной стороны, абсорбцию, т. е. внедрение атомов или молекул в объем твердого тела, и, с другой стороны, адсорбцию — закрепление атомов или молекул на поверхности твердого тела. К явлению абсорбции можно отнести также присутствие примесей или инородных атомов в рассматриваемом твердом теле: газовых включений, ловушек в дефектах кристаллов, твердых растворов. В этих двух процессах сорбции способность фиксации атомов или молекул на поверхности или в объеме зависит от природы их связи с твердым телом, т. е. от физико-химических характеристик пары абсорбат (или адсорбат) и подложка. Эти явления играют важную роль в вакуумной технике. В самом деле, при нагревании

материала может происходить диффузия содержащихся в нем примесей, их распад на поверхности и десорбция в исследуемую газовую среду наряду с примесями, адсорбированными на поверхности. Такая дегазация может привести к изменению, с одной стороны, давления в газовой среде и состояния поверхности датчиков, с другой.

Например, полная десорбция монослоя атомов ( $\sim 10^{19}$  ат/м<sup>2</sup>) с поверхности площадью около 1 м<sup>2</sup>, охватывающей объем около 100 л, приводит к дегазации, соответствующей парциальному давлению  $\sim 4 \cdot 10^{-1}$  Па при комнатной температуре.

Дегазация может быть вызвана нагреванием (горячей сушки установок) наряду с соударениями атомов, ионов или электронов с поверхностью, что может, кроме того, привести к испарению твердого вещества (распылению).

Адсорбционное состояние поверхности определяет:

— ее способность к дальнейшей адсорбции, характеризуемую коэффициентом прилипания, который соотносит количество молекул, захватываемых поверхностью, с общим количеством молекул, входящих в контакт с ней;

— способность поверхности к теплообмену с газом, которая характеризуется коэффициентом аккомодации  $\beta = (T' - T_0) / (T - T_0)$ , где  $T$  — температура молекулы, соударяющейся с твердым телом,  $T_0$  — температура твердого тела,  $T'$  — температура молекулы после отрыва (температура молекул связана с их скоростью соотношением  $kT = 1/2mv^2$ );

— ее способность испускать электроны (при термоионном эффекте или фотэмиссии она определяется работой выхода электрона и ее изменениями в зависимости от адсорбции, а при вторичной эмиссии под действием соударений ионов или электронов она характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии).

## 14.2. Различные области вакуума. Типы датчиков

Традиционно шкалу низких давлений разделяют на четыре (довольно грубо определенные) области вакуума, т. е. четыре диапазона давления (табл. 14.1). Внутри каждой из этих областей некоторые характеристики или свойства газа могут изменяться различным образом и им соответствует тип вакуумметра, основанный на выбранном физическом свойстве.

Соотношения между некоторыми единицами, все еще широко используемыми для измерения давления, и паскалем (Па), выбранным в качестве единицы системы СИ, представлены в табл. 13.1.

Таблица 14.1. Различные области вакуума

Характеристики	Вакуум	Первичный	Промежуточный	Высокий	Сверхвысокий
	Па	$10^2 \div 10^5$	$10^{-1} \div 10^2$	$10^{-5} \div 10^{-1}$	$< 10^{-5}$
Область давлений	мбар	$1 \div 10^3$	$10^{-3} \div 1$	$10^{-7} \div 10^{-3}$	$< 10^{-7}$
Число молекул в 1 см <sup>3</sup> (порядок величины)		$10^{16} \div 10^{19}$	$10^{13} \div 10^{16}$	$10^9 \div 10^{13}$	$< 10^9$
Средняя длина свободного пробега (порядок величины), см		$10^{-3} \div 10^{-6}$	$1 \div 10^{-3}$	$1 \div 10^4$	$> 10^4$
Режим течения	Ламинарный (вязкостный)	Промежуточный	Молекулярный	—	

Вакуумметры можно разделить на три основные группы в соответствии с зависящим от давления физическим эффектом или свойством, положенным в основу принципа действия прибора. Это: датчики на основе механических или тепловых эффектов, а также датчики, использующие электрические характеристики газа.

В датчиках, основанных на механических эффектах, корпус датчика деформируется под действием разности давлений; деформация является вторичной измеряемой величиной, которая преобразуется в электрический сигнал с помощью датчика смещения или деформации.

У датчиков теплового типа чувствительным элементом служит нагревательный элемент, равновесная температура которого зависит от давления окружающей среды. Таким образом, в роли вторичной измеряемой величины здесь выступает температура.

С помощью датчиков третьей группы измерения в газах проводятся непосредственно: число молекул определяется количеством образуемых ими ионов в виде электрического тока.

В табл. 14.2 приведены характеристики наиболее употребительных типов датчиков, в которых используется зависимость электрического сигнала от давления, а также области давления, в которых они применяются.

Таблица 14.2. Области применения вакуумметров различных типов

Типы датчиков	$\lg p$ , Па
Деформационные	С трубкой Бурдона 5÷2(0) <sup>1)</sup>
	Мембранный емкостной 5÷—2(—3)
	Мембранный пьезосопротивления 5÷—1
С нитью накала	Типа Пирани (5)4÷—2 Термопарный 2÷—2
Ионизационные	Типа Пенningа (0)—1÷—5(—6)
	Нормальный триод 2÷—5
	Типа Байярда — Альперта —1÷—8(—10)
	С радиоактивным источником 3÷—2

<sup>1)</sup> В скобках указаны расширенные пределы измерений для некоторых моделей особой конструкции.

### 14.3. Вакуумметры деформационного типа

Ограничимся описанием деформационных датчиков, которые используются в области низких давлений. Однако следует отметить, что датчики этой группы в равной степени могут быть использованы и для измерения высоких давлений (разд. 13.4).

#### 14.3.1. Датчики на основе трубки Бурдона

Чувствительным элементом датчика является тонкостенная (металлическая или кварцевая) трубка кругового или плоского сечения, свернутая в спираль. Внутренняя часть трубы соединена с объемом, в котором измеряется давление, тогда как внешняя часть трубы находится на открытом воздухе либо помещена в замкнутый объем, давление в котором остается постоянным (давление сравнения). Если в этом объеме создать вакуум ( $\sim 10^{-1}$  Па), то датчик будет указывать абсолютное давление. Разность давлений между внутренней и наружной поверхностями трубы вызывает ее деформацию. Один из концов спиральной трубы зафиксирован, и ее упругая деформация под действием перепада давления приводит к смещению другого конца, который соединен с датчиком смещения — потенциометром, переменной емкостью и т. д. (разд. 13.5).

**Одновитковый датчик.** Датчик состоит из металлической спирали, изготовленной из нержавеющей стали или инконеля, которая соединена с датчиком смещения.

Диапазон измерений такого датчика охватывает от  $10^2$  до  $10^5$  Па при точности до 1% и времени запаздывания  $\sim 0,2$  с. Это достаточно прочный и сравнительно недорогой манометр, который позволяет измерять абсолютное давление в сухих или влажных газах и некоторых химически активных газовых средах. Однако для него характерны явления старения и гистерезиса, которыми нельзя пренебречь. Кроме того, при измерениях необходимо учитывать температуру использования. В качестве связанного с ним датчика смещения часто используют индуктивный датчик.

**Многовитковый датчик.** Чувствительным элементом этого датчика является трубка Бурдона, изготовленная из плавленого кварца и представляющая собой примерно 30-витковую спираль (рис. 14.2). Увеличение числа витков существенно повышает чувствительность датчика по сравнению с предыдущей моделью, что позволяет расширить диапазон измерений до  $1 \div 10^5$  Па при пренебрежимо малом гистерезисе и отклонениях от линейности не более 1%. Датчик этого типа требует введения температурной коррекции, так как используется при высоких температурах (вплоть до  $500^\circ\text{C}$ ). Кроме того, поскольку свободный конец трубки Бурдона не должен испытывать иного механического воздействия, кроме давления, определение его деформации производится оптическим способом.

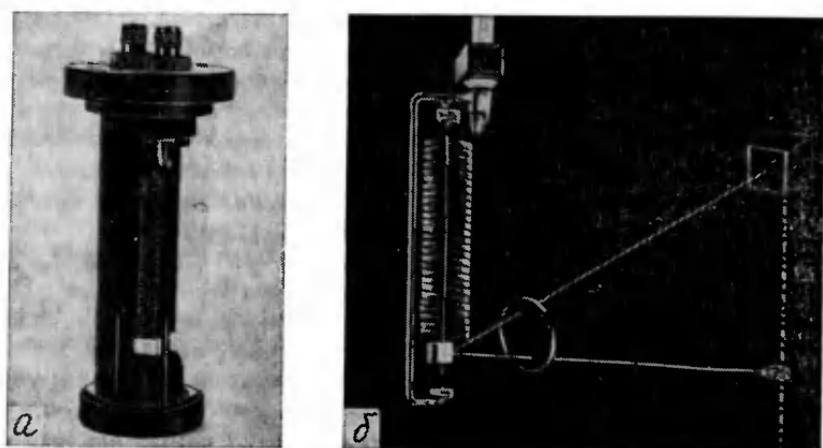


Рис. 14.2. Манометр Бурдона с многовитковой спиральной трубкой (материалы фирмы Texas Instruments — Techmatron).

*а* — внешний вид; *б* — деталь трубки со схемой оптических измерений ее деформации.

### 14.3.2. Мембранные датчики

Функционирование датчиков этого типа основано на упругой деформации герметичной плоской или гофрированной тонкой мембраны (диафрагмы) под действием разности давлений по обе стороны от нее: на одну из поверхностей мембраны давит исследуемый газ, тогда как другая контактирует с контрольной средой, которая может представлять собой либо тот же самый газ, либо другой газ при заданном давлении или же высокий вакуум. Мембрана обычно изготавливается из нержавеющей стали, инконеля, палладия или кварца, обработанного таким образом, чтобы снизить механический гистерезис материала. Выбирается такая конфигурация датчика, чтобы выполнялось линейное соотношение между его обратимой деформацией и приложенным давлением (разд. 13.2.1).

**Датчик на основе пьезосопротивления.** В манометре этого типа деформация мембранны преобразуется в электрический сигнал с помощью датчиков пьезосопротивления (разд. 8.6), прикрепленных на одной из ее поверхностей. Мембрана изготавливается из тонкого ( $\sim 10^{-2} \div 10^{-1}$  мм в зависимости от диапазона измерений) листа нержавеющей стали диаметром 12—15 мм либо из кварцевой пластинки. В первом варианте пьезорезистивные датчики прикрепляются к мемbrane, а во втором их наносят на поверхность непосредственно путем вакуумного осаждения. Эти два варианта пьезорезистивных датчиков позволяют расширить диапазон измеряемых величин в сторону высоких давлений ( $> 10^5$  Па). Однако существуют модели, предназначенные для использования в области более низких давлений, например, в интервале от  $2 \cdot 10^{-1}$  до  $2 \cdot 10^5$  Па с отклонением от линейности около 0,5%, разрешением  $10^{-6}$  и погрешностью, обусловленной гистерезисом, не более 0,2% от верхнего предела измерений. Как и манометры на основе трубы Бурдона, датчики этого типа требуют температурной компенсации в стандартных рабочих условиях ( $+10 \div +50^\circ\text{C}$ ). Это — достаточно прочные датчики, малочувствительные к вибрации; их постоянная времени зависит от частоты собственных колебаний мембранны и составляет обычно 20—50 мкс. Они пригодны для использования в химически активных газовых средах для измерения как абсолютного, так и относительного давления. Мертвый объем датчика и тепловое расширение его объема малы — порядка  $\text{см}^3$  и долей  $\text{мм}^3$  соответственно.

Пьезорезистивные датчики деформации обычно устанавливаются группой из четырех штук, два из которых работают на сжатие, а два других — на растяжение. Их включают в плечи моста, питаемого постоянным напряжением или постоянным током (разд. 13.8.9).

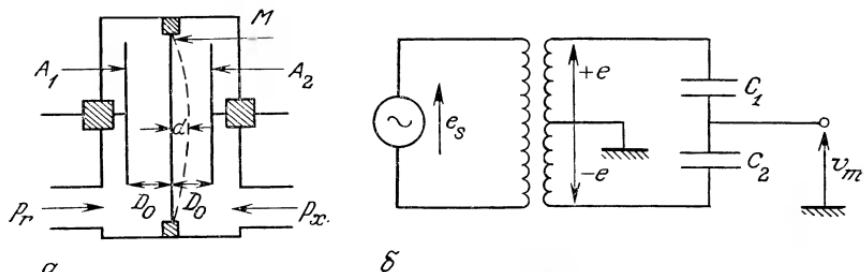


Рис. 14.3. Емкостной датчик с симметричным расположением обкладок.  
а — принципиальная схема; б — электрическая схема.

**Емкостные манометры.** Круглая плоская металлическая мембрана  $M$  датчика предварительно напряжена в радиальном направлении, чтобы свести к минимуму механический гистерезис.

В каждой из двух сред (исследуемое вещество  $p_x$  и вещество сравнения  $p_r$ ) симметрично по отношению к мемbrane устанавливаются обкладки  $A_1$  и  $A_2$  конденсатора. При деформации мембранны под действием разности давлений  $\Delta p = p_x - p_r$  ее центр смещается на расстояние  $d$ , пропорциональное  $\Delta p$ . Это приводит к уменьшению емкости  $C_1$  между  $A_1$  и  $M$  и соответствующему увеличению емкости  $C_2$  между  $A_2$  и  $M$ , или наоборот, — в зависимости от знака  $\Delta p$  (рис. 14.3, а). Емкости  $C_1$  и  $C_2$  образуют дифференциальный конденсатор, который возбуждается с помощью преобразователя, установленного в нейтральном положении и выдающего синусоидальное напряжение  $\pm e = \pm E \cos \omega t$  (например,  $E = 15$  В,  $f = \omega / 2\pi = 10$  кГц).

Выходной сигнал  $v_m$ , снимаемый непосредственно с мембранны согласно схеме, показанной на рис. 14.3, б, имеет величину

$$v_m = e \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}.$$

При смещении  $d$  мембранны из ее начального положения в плоскости симметрии емкости  $C_1$  и  $C_2$  изменяются пропорционально соответственно  $1/(D_0 + d)$  и  $1/(D_0 - d)$ ; в результате получается электрический сигнал

$$v_m = -e (d/D_0) = -E (d/D_0) \cos \omega t.$$

Сигнал  $v_m$  пропорционален смещению мембранны  $d$  и, следовательно, разности давлений. В действительности это выражение не выполняется из-за кривизны мембранны. Линейность может быть улучшена путем придания обкладкам  $A_1$  и  $A_2$  слегка вогнутой формы; также пригодны методы линеаризации на этапе

формирования сигнала (разд. 4.2.1). Кроме того, поскольку диэлектрическая постоянная газа обычно не меняется в диапазоне давлений, измеряемых датчиком, электрический сигнал не зависит от природы газа, если по обе стороны мембранны находятся один и тот же газ. Напротив, если исследуемый газ отличается от газа сравнения, это может повлиять на сигнал  $v_m$ , в особенности при работе с частично ионизованным газом, и на показания датчика в этом случае полагаться нельзя.

Поскольку измерение давления основано на определении малых смещений мембранны, стабильность нуля и градуировочной характеристики зависит от теплового расширения мембранны и способа ее крепления. Эту проблему можно решить либо путем подбора материалов с противоположными изменениями коэффициентов расширения, либо путем подключения защитной обкладки, располагаемой концентрически по отношению к измерительной обкладке, которая играла бы роль датчика положения и сигнал которой служил бы для корректировки термического дрейфа. Другое решение состоит в стабилизации температуры корпуса датчика путем добавления небольшого термостатирующего устройства.

Указанные технические характеристики придают емкостному датчику высокую чувствительность и отличное разрешение. Однако он требует обработки сигнала с использованием синхронного детектирования (разд. 4.4.2).

Диапазон применения датчиков этого типа простирается от  $10^{-2}$  Па до  $10^5 \div 10^6$  Па. Одна модель может охватывать интервал в  $4 \div 5$  порядков с точностью примерно 0,1—0,03% от величины показания и отклонением от линейности около 0,02%; разрешение при этом может достигать  $10^{-5}$  от верхнего предела измерений. Постоянная времени запаздывания, определяемая, в частности, размерами канала для забора давления, составляет от нескольких миллисекунд до 0,1 с. Емкостные манометры изготавливаются из таких материалов, как керамика, нержавеющая сталь, инконель, никель, палладий, что придает им высокую коррозионную и температурную стойкость (возможна сушка при  $450^\circ\text{C}$ ) и делает их пригодными для измерения давления горячих газов (вплоть до  $150^\circ\text{C}$ ).

Комплекс этих характеристик делает емкостной датчик очень удобным прибором; его недостатки заключаются в невысокой прочности и значительной стоимости. Разработаны, тем не менее, модели упрощенной конструкции и более дешевые, хотя и с более скромными характеристиками.

Неудобством емкостного датчика с симметричными обкладками является то, что одна из них контактирует с газом, давление которого измеряется. В случае особо коррозионных газов (например, фтористых соединений) она может подвергнуться

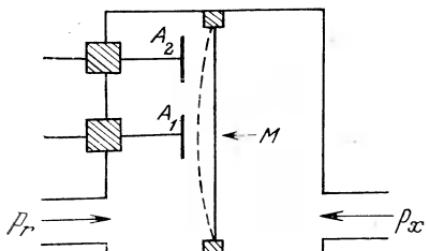


Рис. 14.4. Принципиальная схема емкостного датчика с несимметричным расположением обкладок.

повреждению, если не принять специальных мер. Кроме того, на работоспособность датчика влияет присутствие проводящего газа; эти две причины побудили к разработке варианта датчика, в котором обе обкладки  $A_1$  и  $A_2$  находятся по одну сторону мембранны (рис. 14.4). Обе емкости  $C_1$  (между  $A_1$  и  $M$ ) и  $C_2$  (между  $A_2$  и  $M$ ) изменяются при этом в одном направлении.

Однако эти изменения не одинаковы, поскольку положение обкладок несимметрично по отношению к оси прогиба мембранны, которая деформируется в центре больше, чем по краям. Электрический сигнал соответствует этой разности и не зависит от диэлектрической постоянной исследуемого газа даже при высоком давлении, в присутствии влаги, паров органических соединений, ионизованных газов (плазмы) или радиоактивности.

Цепь питания и схема формирования сигнала датчика аналогичны соответствующим подсистемам датчика с симметричными обкладками. Характеристики их достаточно близки, за исключением того, что при подобных размерах постоянная времени запаздывания для датчика с обкладками по одну сторону мембранны значительно меньше. Для измерения абсолютных давлений датчик герметически закрывают со стороны обкладок.

#### 14.4. Датчики с нитью накала

Функционирование датчиков этого типа основано на изменении теплопроводности газа с изменением давления в диапазоне примерно  $10^{-3} \div 10^{-1}$  Па.

##### 14.4.1. Теплоперенос в газе

Некоторые свойства газа, например вязкость и теплопроводность, связаны с переносом энергии и импульса. Поскольку такой перенос осуществляется через соударения молекул, понятно, что эти свойства зависят от относительных значений средней длины  $\lambda$  свободного пробега молекул и от расстояния  $l$  между зоной появления возмущения и зоной его обнаружения. Действительно, если в данной зоне повысится энергия (или импульс) определенного числа молекул, она со временем распределится по всему газу так, чтобы установилось новое термоди-

намическое равновесие, соответствующее новому максвелловскому распределению скоростей. Возмущение рассеивается по совокупности ближних частиц газа, если число межмолекулярных соударений велико, т. е. если средний свободный пробег  $\lambda$  мал ( $\lambda \ll l$ ), другими словами, при высоком давлении. Напротив, когда  $\lambda$  по порядку величины близка к  $l$  (или  $\lambda > l$ ), молекулы, выходящие из зоны зарождения возмущения и несущие это возмущение, переходят границу зоны его измерения без заметного взаимодействия с другими молекулами газа, т. е. возмущение передается почти непосредственно. Таким образом, в рассматриваемом случае передаваемая энергия пропорциональна числу возбужденных молекул, т. е. давлению. При  $\lambda \gg l$  число молекул, передающих возмущения, значительно снижается и явления переноса становятся несущественными.

Если в газе имеется градиент температуры в направлении  $x$ , то устанавливается тепловой поток в направлении, обратном градиенту температуры  $dT/dx$ , так что

$$Q = -K(dT/dx),$$

где  $K$  — коэффициент теплопроводности газа.

Если средняя длина свободного пробега  $\lambda$  значительно меньше расстояния  $l$ , разделяющего источник тепла (горячая стена) и элемент, являющийся теплоприемником (холодная стена), то  $K$  не зависит от давления.

При  $\lambda$  порядка  $10^{-3} \div 10^{-2} l$ , что обычно соответствует давлениям около нескольких килопаскалей,  $K$  уменьшается с давлением по довольно сложному закону, а при  $\lambda \sim l$  между  $K$  и  $p$  наблюдается практически прямая пропорциональность. Следует, однако, отметить, что использование этой зависимости для определения давления существенно ограничивается при расчетах теплового потока наличием граничных условий, т. е. геометрией датчика, а также теплообменом между газом и поверхностью конструкции (коэффициент аккомодации). Таким образом, все датчики, принцип действия которых основан на теплопроводности газа, нуждаются в тщательной градуировке.

#### 14.4.2. Принцип действия датчика с нитью накала

Чувствительным элементом датчика является прямолинейная металлическая нить, располагающаяся вдоль оси цилиндрической оболочки и подвергаемая джоулеву нагреву. Внешняя поверхность этой оболочки контактирует с окружающей атмосферой (рис. 14.5).

Температура нити накала зависит главным образом от тепловых потерь в результате теплопроводности в газе, которые

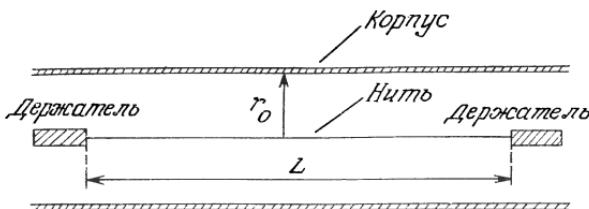


Рис. 14.5. Принципиальная схема манометра с нитью накала.

тем больше, чем выше давление; таким образом, измерения температуры нити или мощности, необходимой для поддержания этой температуры постоянной, позволяют определить давление. Температуру нити можно определить путем измерения ее сопротивления (датчик Пирани) либо с помощью термопары, прикрепленной к нити (или используемой непосредственно в качестве нити накала).

На установившемся режиме теплопереноса мощность  $P_J$ , передаваемая нити в результате эффекта Джоуля, имеет три составляющие:

- мощность  $P_{c_1}$ , рассеиваемую путем теплопроводности в газе;
  - мощность  $P_{c_2}$ , теряемую в результате теплопроводности через держатели нити;
  - излучаемую мощность  $P_r$ ;
- таким образом:

$$P_J = P_{c_1} + P_{c_2} + P_r.$$

Мощность, рассеиваемая вследствие теплопроводности газа, зависит от поперечного распределения температуры, которое определяется радиусом корпуса датчика  $r_0$ , его теплоемкостью и температурой, которая, в свою очередь, зависит от внешнего окружения. На установившемся режиме, когда температура трубы  $T_0$  и температура нити  $T_f$  постоянны, выражение для мощности  $P_{c_1}$  в первом приближении можно записать так:

$$P_{c_1} = aK(T_f - T_0) = a'(p/\sqrt{M})(T_f - T_0),$$

где  $p$  и  $M$  соответственно давление и молекулярная масса газа, а  $a'$  — коэффициент, определяемый площадью поверхности нити (т. е. радиусом  $r$  и длиной  $L$  нити) и ее коэффициентом аккомодации.

Принимая, что температура держателей одинакова и равна  $T_0$  и что температура нити постоянна по ее длине, т. е. градиент температуры  $T_f - T_0$  распределяется по участку нити, длина ко-

торого пренебрежимо мала по сравнению с ее общей длиной  $L$ , можно найти потери вследствие теплопроводности:

$$P_{c_2} = bK_f(T_f - T_0).$$

Здесь  $K_f$  — теплопроводность металла нити, а  $b$  — постоянная, зависящая от конструкции нити и держателей.

Излучаемая мощность  $P_r$  определяется законом Стефана — Больцмана

$$P_r = \sigma(\varepsilon_f T^4_f - \varepsilon_0 T^4_0),$$

где  $T$  — абсолютная температура, а  $\varepsilon_f$  и  $\varepsilon_0$  — излучательные способности нити с температурой  $T_f$  и оболочки с температурой  $T_0$  соответственно,  $\sigma$  — постоянная Стефана для черного тела ( $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт·м $^{-2}$ ·К $^{-4}$ ), а  $c$  — коэффициент, зависящий от площади поверхности нити.

В уравнении энергетического баланса от давления газа зависит только  $P_{c_1}$ , поэтому желательно свести к минимуму члены  $P_{c_2}$  и  $P_r$ , что можно сделать, например, уменьшая  $r$ ,  $K_f$  и  $\varepsilon_f$ . Чувствительность датчика тем выше, чем больше  $P_{c_1}$ , т. е. разность  $T_f - T_0$ ; однако, поскольку излучаемая мощность  $P_r$  изменяется очень быстро с изменением этой разности, температура нити  $T_f$  ограничивается сравнительно низким значением между 100 и 200°C, а  $T_0$  обычно равна комнатной температуре.

#### 14.4.3. Манометр Пирани

Классическая схема манометра Пирани часто реализуется в виде конструкции, где нить накала, с одним или несколькими прямолинейными участками, помещена в цилиндрический корпус из металла или стекла, внешняя сторона которого находится в контакте с окружающей газовой средой. Поскольку чувствительность датчика тем выше, чем длиннее и тоньше нить накала, обычно используют нить малого диаметра (~10 мкм), свернутую в спираль, или очень тонкую ленту, изготовленную из металла, стойкого к окислению, например чистой платины или ее сплавов, вольфрама, никеля (рис. 14.6, а, б).

Роль схемы формирования сигнала в датчике Пирани играет мост Уитстона, в котором нить накала датчика является одним из плеч. Питание на него может подаваться в следующих режимах:

— при постоянном напряжении сигнал представляет собой напряжение разбаланса моста; последний предварительно уравновешивается при опорном давлении, которое представляет собой либо атмосферное давление, либо, чаще, вакуум, соответ-

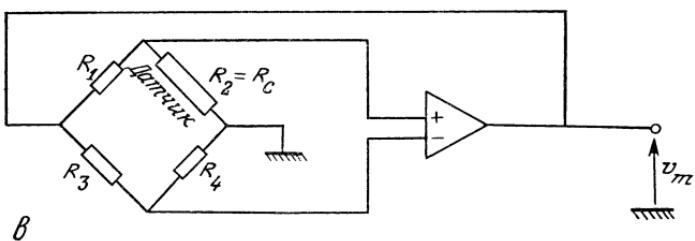
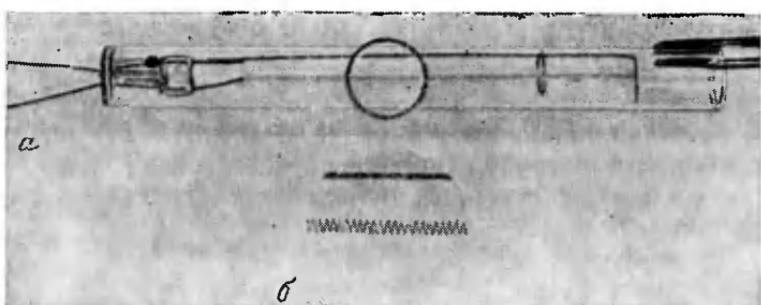


Рис. 14.6. Датчик Пирани (материалы фирмы Edwards — Zivy).

*а* — пример исполнения (в натуральную величину); *б* — увеличенное изображение нити ( $\times 2,5$ ); *в* — принципиальная измерительная схема с нитью постоянной температуры.

ствующий давлению ниже рабочего диапазона давлений датчика;

— при переменном напряжении, изменяющемся таким образом, чтобы температура нити поддерживалась постоянной; мост в этом случае работает в режиме автоподстройки, которая осуществляется с помощью дифференциального усилителя с большим коэффициентом усиления (рис. 14.6, *в*).

В последней, часто используемой схеме измеряемый сигнал  $v_m$  представляет собой изменение напряжения питания моста при выходе последнего из равновесия, соответствующего высокому вакууму. Для снижения влияния температуры  $T_0$  корпуса, который контактирует с внешней средой, смежное сопротивление моста  $R_1$  иногда заменяют компенсационным датчиком, идентичным первому, но запаянным при высоком вакууме. Другую возможность предоставляют измерительный датчик с дву-

мя нитями накала и такой же компенсационный датчик, запаянnyй при высоком вакууме, включенные в схему измерительного моста. При этом две нити накала измерительного датчика включаются в противоположные плечи моста, что позволяет свести к минимуму влияние температуры окружающей среды, а также увеличить вдвое чувствительность. Третья возможность, часто используемая, заключается в последовательном включении в схему моста, содержащую простой, показанный на рис. 14.6, *a* датчик, терморезистора для диапазона окружающих температур, изменение сопротивления которого с температурой компенсирует соответствующее изменение для нити накала. Помимо базовой схемы для расширения диапазона измерений были разработаны различные варианты датчика.

В области низких давлений чувствительность датчика можно повысить путем использования максимально длинной нити накала с наименьшим возможным диаметром, а в области высоких давлений — максимально уменьшая расстояние между нитью накала и корпусом при одновременной оптимизации конвекции в газе. Для этого датчик размещается таким образом, чтобы его катод был горизонтальным; нагретый газ, находящийся в контакте с нитью накала, поднимается в результате конвекции к верхней части корпуса, тогда как охладившийся там газ вновь опускается к нити накала, вызывая ее охлаждение. В общем балансе теплообмена этот механизм также необходимо учитывать, хотя его влияние становится ощутимым только в области  $10^4 \div 10^5$  Па (рис. 14.7).

Для нити накала с температурой  $T_f$  эти энергозатраты и, как следствие, соответствующее повышение чувствительности возрастают с увеличением расстояния нить накала — корпус, что противоречит предыдущему требованию. Компромисс достигается при расстоянии между нитью накала и корпусом около 10 мм и температуре катода  $\sim 150^\circ\text{C}$ .

В некоторые модели манометра Пирани внесен ряд интересных упрощений, например, в качестве нити накала можно использовать вольфрамовую спиральную нить, размещаемую в

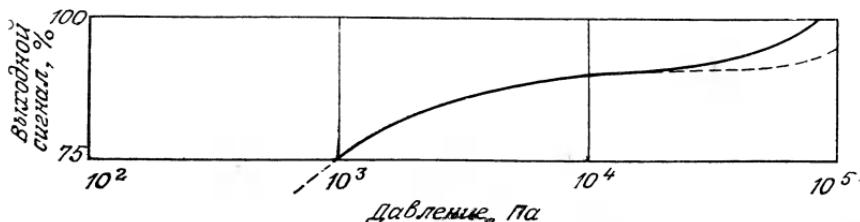


Рис. 14.7. Влияние расположения нити манометра Пирани на чувствительность в области первичного вакуума (докум. фирмы Alcatel).

— горизонтальное положение нити; — — вертикальное положение.

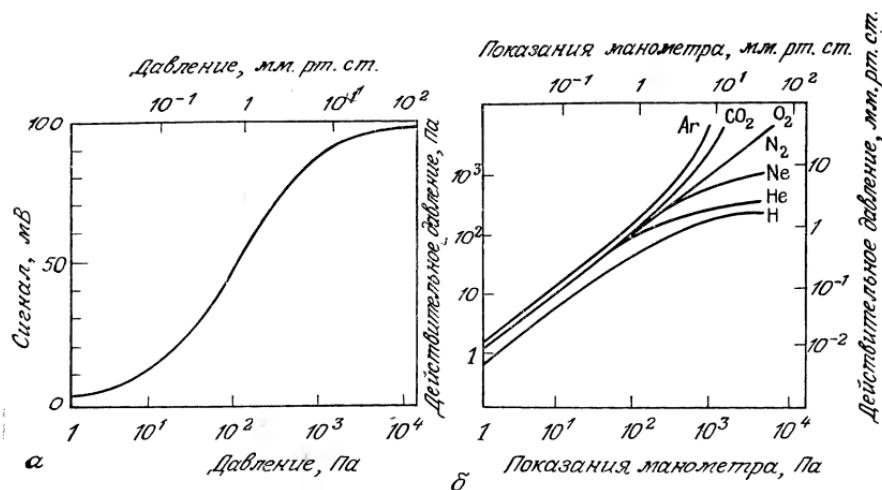


Рис. 14.8. Манометр Пирани (фирмы Alcatel тип Pi 1) с постоянной температурой нити.

*а* — градуировочная кривая, полученная для азота; *б* — влияние природы газа: зависимость измеряемого давления от действительного давления в системе.

маленькой стеклянной колбе (типа осветительных), вместо использования прямолинейной коаксиальной конструкции. Теоретический расчет теплопереноса представляет в этом случае определенные трудности, хотя, в конечном счете, значение его невелико ввиду необходимости градуировки датчика.

Датчики с нитью накала типа Пирани обычно достаточно прочны, и их стоимость, включая схему формирования сигнала, невысока. Возможная область их использования простирается практически от атмосферного давления ( $10^5$  Па) до  $10^{-2}$  Па; диапазон измерений одной модели охватывает три порядка давления. Выходной сигнал не является линейной функцией давления, а максимальная чувствительность достигается в середине рабочего диапазона (рис. 14.8, *a*). Поэтому в некоторых случаях схема формирования сигнала содержит устройства линеаризации. Кроме того, датчик необходимо градуировать для каждого газа (рис. 14.8, *b*).

Постоянная времени датчика сравнительно невелика и составляет  $0,02 \div 0,2$  с. Точность зависит от модели и составляет обычно  $\sim 10 \div 20\%$  от величины показания. Воспроизводимость может быть достаточно хорошей при работе в высоком вакууме. Однако при использовании датчика в форвакууме воспроизводимость результатов измерений ухудшается вследствие попадания масла из форвакуумного или из высоковакуумного насоса (а также ртути, конденсирующихся паров и т. д.), что вызывает значительное изменение теплообмена вследствие изменения

коэффициента аккомодации. Кроме того, наличие горячей нити не позволяет применять датчик для измерения давления некоторых газов, которые способны разлагаться при нагревании.

#### 14.4.4. Термопарный датчик

Температура нити, нагреваемой постоянным током, измеряется с помощью термопары, прикрепленной к нити накала капелькой изолирующего материала.

Область изменения температуры нити ограничивается сотней градусов (от 100 до 200 °C). Поскольку термо-э. д. с. изменяется сравнительно слабо, используют термопары с высокой термоэлектрической способностью и очень низкой теплоемкостью. Как и манометр Пирани, термопарный датчик чувствителен к колебаниям температуры его корпуса. Поэтому в его конструкцию вводят компенсационную термопару (холодный спай), находящуюся при температуре, равной температуре корпуса. Рабочий диапазон измерений и характеристики датчика этого типа во многом аналогичны описанным в предыдущем разделе. В одной из наиболее распространенных конструкций термопарного датчика используются одна или несколько термопар, которые нагреваются непосредственно пропусканием переменного тока. Для выделения сигнала термо-э. д. с., на который налагается ток нагревателя, возможно использование различных схем, например, представленной на рис. 14.9. Здесь две одинаковые термопары  $M_2$  и  $M_1$  соединены последовательно таким образом, чтобы цепи  $CS_1$  и  $CS_2$  были аналогичны, и нагреваются переменным током через трансформатор низкого напряжения, помещенный в средней точке. Третья термопара, аналогичная предыдущим, закрепляется на корпусе датчика и служит для компенсации температурного влияния среды (холодный спай). Она включается между точкой  $C$ , общей для  $S_1$  и  $S_2$ , и точкой съема выходного сигнала, так что ее э. д. с.  $e(T_0)$  вычитается из э. д. с. двух нагреваемых термопар. При этом сигнал  $v_m$  в первом приближении может быть выражен следующим образом:

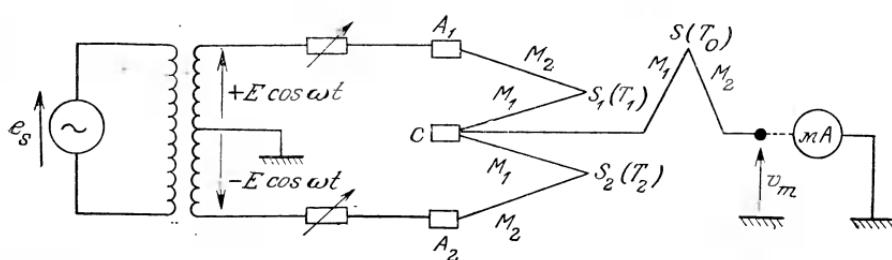


Рис. 14.9. Вариант электрической схемы термопарного датчика.

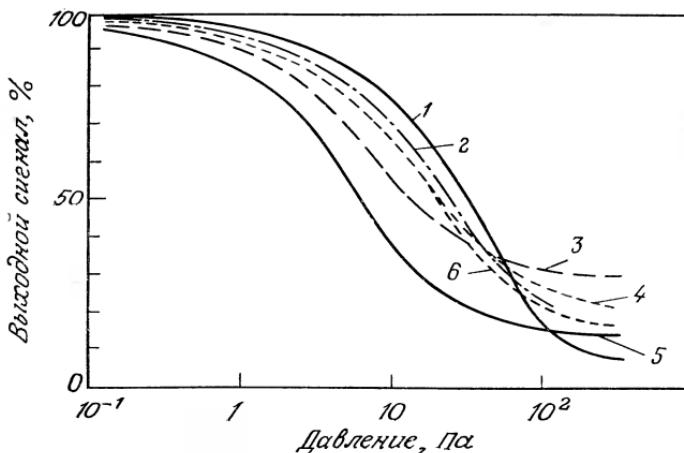


Рис. 14.10. Примерные градуировочные кривые термопарного датчика (модель 531 фирмы Varian) для различных газов.

1 — Не; 2 — водяной пар; 3 — хладон-12; 4 — CO<sub>2</sub>; 5 — ацетон; 6 — сухой воздух.

$$v_m = \frac{e_1(T_1) + e_2(T_2)}{2} - e(T_0) = e(T_f) - e(T_0).$$

Для получения хорошей чувствительности используют термопары с высокой термоэлектрической силой, например, хромель-алюмелевые ( $40 \text{ мкВ}\cdot\text{K}^{-1}$ ) или медь-копелевые ( $34 \text{ мкВ}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Рабочий диапазон измерений современных датчиков рассматриваемого типа заключается между  $10^{-1}$  и несколькими сотнями Па; зависимость его показаний от давления не является линейной, а чувствительность уменьшается к границам диапазона измерений; датчик необходимо градуировать для каждого газа (рис. 14.10).

Значение выходного сигнала, зависящее от температуры и типа термопары, составляет примерно  $5 \div 10 \text{ мВ}$  в диапазоне измерений. Для улучшения чувствительности в некоторых конструкциях датчиков используется ряд из нескольких термопар. Датчик с нагреваемой термопарой уступает по точности манометру Пирани, и эта точность зависит от условий использования (глубины вакуумирования). Постоянная времени рассматриваемого датчика порядка  $0,1 \text{ с}$ , т. е. значительно больше, чем у манометра Пирани.

#### 14.5. Ионизационные датчики

Датчики этого типа основаны на явлении ионизации молекул или атомов, составляющих газ, в результате соударения с электронами или ионами. Число образующихся при этом ионов

зависит от природы газа и его давления: ионный ток, собираемый соответствующим электродом, пропорционален давлению.

Различают ионизационные манометры трех типов:

а) манометр с холодным катодом, или манометр Пенninga, в котором ионизация самопроизвольно возникает, поддерживается и прекращается (газовый разряд);

б) датчик с горячим катодом, в котором ионизация, индуцированная электронами, испускаемыми нитью накала, поддерживается на определенном уровне (различают датчик на основе простого триода и манометр Байярда — Альперта);

в) датчик с источником радиоактивности, обеспечивающим регулируемую ионизацию.

#### 14.5.1. Ионизация газа

Если нейтральному атому, рассматриваемому изолированно, передать энергию посредством нагрева, соударения или облучения, то атом может поглотить эту энергию полностью или частично, что вызовет его переход на более высокий энергетический уровень, т. е. произойдет возбуждение атома. Если эта энергия достаточно велика, то атом может потерять электрон, превращаясь в положительный ион; соответствующая энергия  $W_i$  называется энергией ионизации, и в настоящее время ее принято выражать в электрон-вольтах (эВ). Она зависит от природы атома и составляет от 24,5 эВ для гелия до 3,9 эВ для цезия. Атом может потерять не один электрон, но также второй, третий и т. д.; в этом случае говорят, что атом является двукратно ионизированным, трехкратно ионизированным и т. д. Чем глубже расположен уровень, с которого выходит электрон, тем выше соответствующая энергия.

**Ионизация в результате соударения с электроном.** При неупругом соударении между электроном с энергией  $W$  и изолированным атомом, который считается неподвижным и находящимся в основном (невозбужденном) состоянии, часть этой энергии  $W_i$  может поглощаться, приводя к ионизации атома, а другая часть преобразуется в кинетическую энергию как ионизирующего электрона, так и образующейся пары ион — электрон. При этом условие ионизации запишется в виде  $W \geq W_i$ . Однако все соударения между пучком первичных электронов и отдельными атомами, как это обычно происходит в случае разреженных газов, не очень эффективны. В самом деле, даже если указанное условие реализуется, распределение энергии может происходить нежелательным образом: атом переходит в возбужденное состояние, а остальная энергия преобразуется в кинетическую. Вероятность образования положительных ионов зависит от природы газа и от энергии первичных электронов.

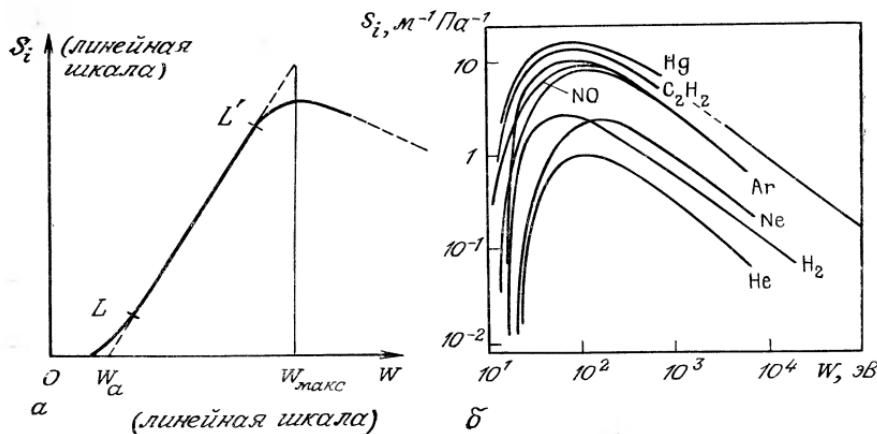


Рис. 14.11. Коэффициент ионизации [33].

*α* — зависимость от энергии первичных электронов; *β* — влияние природы газа.

На практике коэффициент ионизации определяется как среднее число пар ион — электрон на один первичный электрон с заданной энергией при единичной длине пробега и единичном давлении. На рис. 14.11, *α* приведен общий вид зависимости коэффициента ионизации от энергии первичных электронов.

Экстраполяция близкой к прямолинейной части кривой  $LL'$  в сторону низких энергий определяет вероятность появления ионов  $W_a$ , потенциал которых несколько ниже потенциала ионизации  $W_i$ ; это связано с тем, что не все атомы газа обязательно находятся в момент ионизации в основном состоянии. Кроме того, вблизи некоторого потенциала  $W_{\max}$ , составляющего в зависимости от природы газа 50–100 эВ, эффективность соударений, как и число образующихся ионов, снижаются. В диапазоне энергий, соответствующем части  $LL'$  кривой, коэффициент ионизации изменяется практически пропорционально энергии первичных электронов. При заданной энергии ток образующихся ионов пропорционален числу первичных электронов и числу нейтральных атомов, присутствующих в единице объема газа, т. е. его давлению. Форма кривой ионизации примерно одинакова для обычных газов (рис. 14.11, *β*), однако она может быть более сложной для некоторых многоатомных органических молекул. Кроме того, кривая, изображенная на рис. 14.11, *α*, получена в предположении отсутствия взаимодействия других нейтральных атомов газа с ионами и вторичными электронами. На самом деле последние захватываются электрическим полем и, ускоряясь им, могут приводить к образованию новых пар ион — электрон, вызывая каскадный эффект. Так обстоит дело при достаточно высоких давлениях

( $p \geq 1$  Па); при этом устанавливается режим разряда, для которого соотношение между давлением и током ионов может быть использовано для определения  $p$ , хотя оно и не является простым. Напротив, для давлений  $p \leq 10^{-1}$  Па средняя длина свободного пробега атомов газа достаточно велика, и указанными эффектами в первом приближении можно пренебречь, так что ионный ток представляет собой линейную функцию давления.

**Ионизация, вызываемая ядерным излучением.** Частицы, возникающие при ядерном распаде, например  $\alpha$ -излучение некоторых радиоактивных веществ, способны оказывать ионизирующее воздействие на атомы или молекулы. Энергия таких частиц очень велика по сравнению с рассмотренным ранее случаем электронов (5,3 МэВ для  $\alpha$ -частиц полония, 4,8 МэВ для  $\alpha$ -частиц радия); этим объясняется тот факт, что одна  $\alpha$ -частица в результате неупругих соударений с молекулами газа может вызвать образование большого числа пар ион — электрон до того, как она потеряет значительную часть энергии и будет захвачена стенкой камеры, в которой находится газ. Коэффициент ионизации для  $\alpha$ -частиц примерно в  $10^4$  раз больше, чем для электронов. Общее число пар, создаваемых источником  $\alpha$ -радиоактивности, зависит от активности источника и от длины свободного пробега  $\alpha$ -частиц в газе, которая определяется его природой и, очевидно, давлением. Возникающий в результате ток линейно зависит от давления, если последнее не превышает нескольких килопаскалей. При более высоких давлениях эффективность ионизации снижается в силу возрастающей нейтрализации ионов в результате рекомбинации с электронами.

#### 14.5.2. Датчик с холодным катодом — манометр Пенninga

Датчик этого типа, представленный схематически на рис. 14.22, *a*, состоит из трубки, в которой расположены парал-

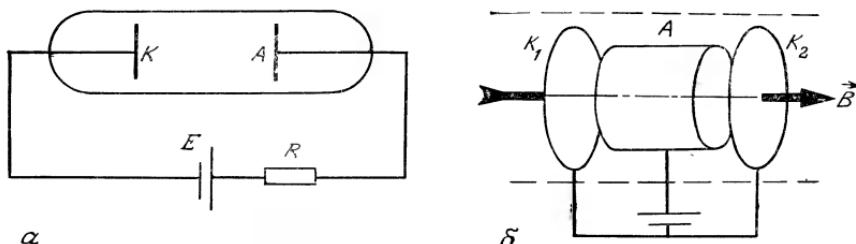


Рис. 14.12. Ионизационный вакуумметр с холодным катодом.  
*а* — разрядная трубка; *б* — датчик Пеннига.

лько друг другу плоские металлические катод  $K$  и анод  $A$ ; к ним приложена высокая разность потенциалов  $V$ , составляющая около 2000 В. В поляризационный контур последовательно включается ограничивающее ток сопротивление порядка МОм.

При давлениях, превышающих  $5 \cdot 10^{-1}$  Па, в газе устанавливается самоподдерживающийся разряд, сопровождающийся характерной люминесценцией. Этот разряд возбуждается несколькими свободными электронами либо фотоионизацией молекул газа, вызванной проникающим в трубку излучением либо эмиссией электронов с шероховатой поверхности катода. Электроны, высвобождаемые в результате ионизации при соударениях, а также испускаемые в результате соударений ионов с катодом, поддерживают режим разряда.

При давлении ниже примерно  $5 \cdot 10^{-1}$  Па самоподдерживающийся разряд прекращается и ионный ток становится очень слабым, поскольку средняя длина свободного пробега электронов в газе становится сравнимой с расстоянием между электродами, которые не создают более достаточного числа пар ион — электрон. Чтобы увеличить длину пробега электронов в газе и, следовательно, коэффициент ионизации  $S_i$ , Пеннинг поместил вокруг разрядной трубки постоянный магнит, создающий в на-

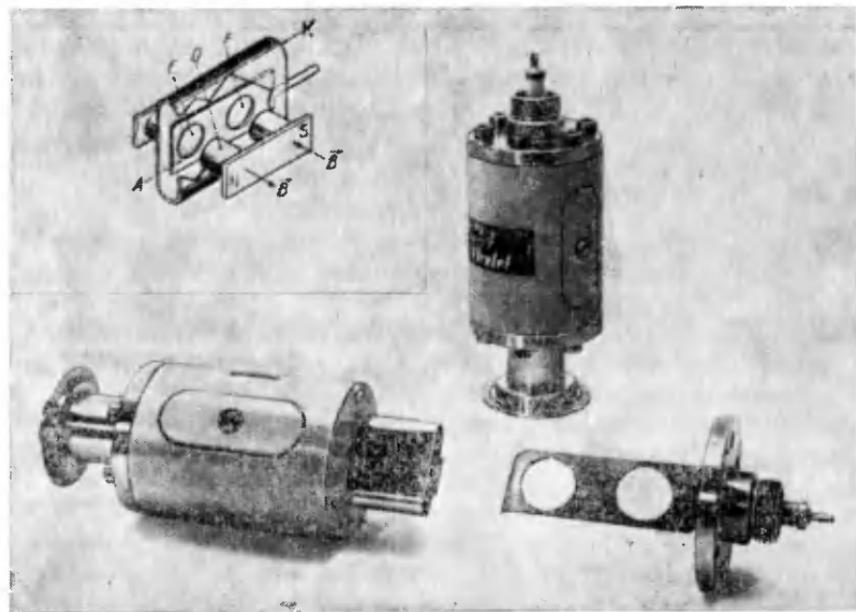


Рис. 14.13. Ионизационный вакуумметр с холодным катодом и двумя плазменными источниками (материалы фирмы Alcatel).

$A$  — анод;  $B$  — магнитная индукция;  $K$  — катод;  $D$  — постоянный магнит;  $E$  — первая плазма;  $F$  — вторая плазма;  $N$ ,  $S$  — полюсы магнита.

правлении, перпендикулярном электродам, магнитную индукцию **B** порядка 0,1 Тл. При этом электроны приобретают спиральные траектории относительно вектора **B**, и их пробег значительно увеличивается, вследствие чего разряд поддерживается вплоть до давлений порядка  $10^{-5}$  Па. Величина предельного давления зависит от многих параметров конструкции датчика.

На рис. 14.13, б показана принципиальная схема симметричного манометра Пеннинга; между двумя катодами  $K_1$  и  $K_2$ , имеющими форму плоских дисков, установленных один напротив другого, помещается цилиндрический анод  $A$ , окружающий область разряда. Направление магнитной индукции **B** совмещается с продольной осью системы. Электрический сигнал в форме тока  $i$ , циркулирующего в поляризационной цепи между анодом и катодом, представляет собой сумму тока электронов, захватываемых анодом, и тока ионов, захватываемых катодом. Соотношение между током  $i$  и давлением  $p$  довольно сложное и зависит от конструкции датчика и природы газа. Однако чувствительность  $S = \Delta i / \Delta p$  манометра остается сравнительно постоянной в диапазоне давлений, охватывающем два или три порядка, и равна примерно  $5 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{Па}^{-1}$ . Постоянная времени запаздывания составляет около 0,5 с для работающего датчика (возобновление разряда).

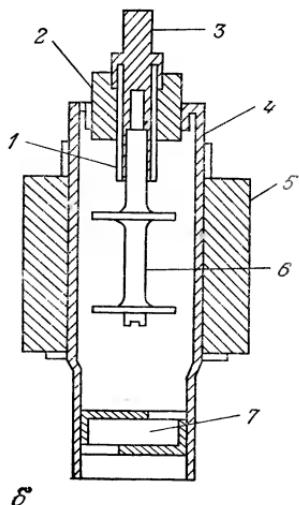


Рис. 14.14. Ионизационный датчик магнетронного типа с холодным катодом (материалы фирмы Alcatel).

*a* — общий вид датчика; *б* — схематическое изображение поперечного сечения: 1 — стеклянная трубка; 2 — керамика; 3 — высокотемпературный контакт; 4 — корпус (анод); 5 — постоянный магнит; 6 — катод; 7 — перегородка.

Были разработаны и изготовлены также датчики другой конструкции, позволяющие избавиться от таких недостатков основной модели, как

- возникновение колебаний умеренных частот в ионизированной плазме;
- эффект накачки, типа ионного насоса, вызванный разрушением катода ионами;
- сложность возбуждения начального самоподдерживающегося разряда при низких давлениях.

На рис. 14.13 и 14.14 представлены две усовершенствованные модели исходной конструкции. Первая имеет две одинаковые спаренные ионизационные ячейки. Преимущество этой конструкции заключается в возможности корректировки электрических нестабильностей двух плазменных разрядов. Кроме того, каждый источник плазмы служит ловушкой для примесей по отношению к другому.

В другой модели магнитное поле перпендикулярно электрическому (рис. 14.14). Эта конструкция, подобная магнетрону с холодным катодом Редхеда, позволяет значительно расширить диапазон измерений в сторону низких давлений вплоть до  $10^{-7}$  Па с практически неизменной чувствительностью порядка  $4 \cdot 10^{-4}$  А·Па<sup>-1</sup>, начиная от  $10^{-2}$  Па.

#### 14.5.3. Манометры с горячим катодом — нормальный триод и триод Байярда — Альперта

В датчике этого типа обычно используются три цилиндрических, размещаемых coaxialno электрода: испускающий электроны катод, нагреваемый вследствие эффекта Джоуля, ускоряющий электроны и собирающий их анод, на который подается положительный по отношению к катоду потенциал, и коллектор, который захватывает положительные ионы, образующиеся в результате соударений электронов с молекулами газа.

В зависимости от взаимного расположения электродов различают два типа конструкций:

— нормальный триод с анодной металлической цилиндрической сеткой, которая окружает катод, расположенный вдоль ее оси, и коллектор в виде внешней по отношению к катоду и аноду металлической трубы (рис. 14.15, а, б); наряду с этим используются плоские конфигурации (например, в датчике Шульца и Фелпса);

— триод Байярда — Альперта с обратным расположением катода и коллектора по отношению к сетке-аноду; в этой конструкции коллектор представляет собой тонкую металлическую нить, размещенную вдоль оси сетки (рис. 14.16, а, б), что позволяет уменьшить некоторые недостатки предыдущего варианта.

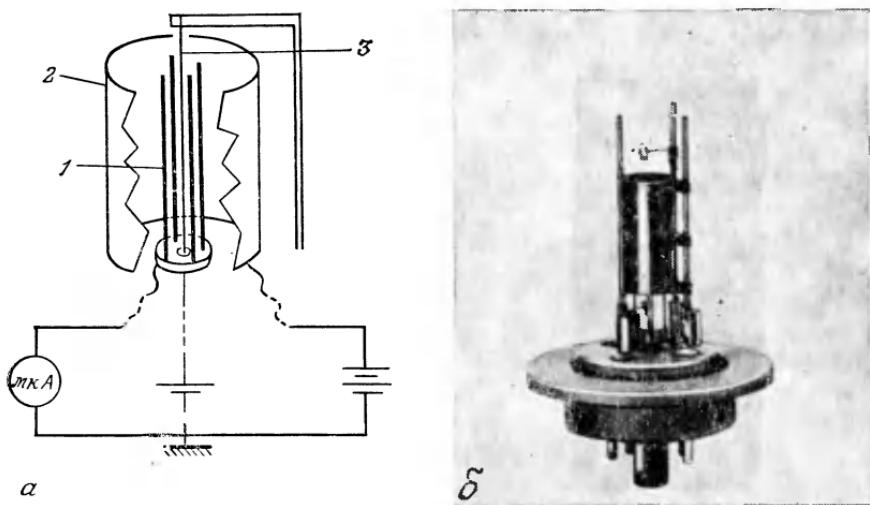


Рис. 14.15. Ионизационный датчик с горячим катодом (нормальный триод) (материалы фирмы Balzers).

*а* — принципиальная схема; *б* — пример исполнения. 1 — коллектор ионов; 2 — анод; 3 — нить (катод).

Нормальный триод пригоден для измерения давления выше примерно  $10^{-5}$  Па; прибор Байярда — Альперта позволяет расширить рабочий диапазон измерений в сторону очень низких давлений вплоть до  $10^{-9} \div 10^{-8}$  Па, а для некоторых моделей — даже больше. Оба типа датчиков основаны на одном и том же принципе. На сетку анода подается положительный потенциал  $+150 \div +200$  В по отношению к коллектору, соединенному с корпусом измерительного прибора, а на катод — также положительный потенциал  $+30 \div +50$  В по отношению к коллектору. Электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности потенциалов между сеткой и катодом. Часть из них создает ионы в пространстве между сеткой и катодом, что также сопровождается энергетическими потерями, и захватывается сеткой. Другая часть электронов с более высокой энергией проиникает в область между сеткой и коллектором через отверстия в сетке и также ионизирует газ, теряя при этом свою энергию. Те электроны, которые не претерпевают соударений и обладают в силу этого максимальной энергией, не выходят за пределы эквипотенциальной зоны, соответствующей потенциальному катода, и возвращаются назад. Они также могут участвовать в ионизации газа и совершать затухающие колебания (колебания Баркгаузена — Курца) относительно сетки, после чего захватываются ею. Это может приводить к увеличению длины пробега

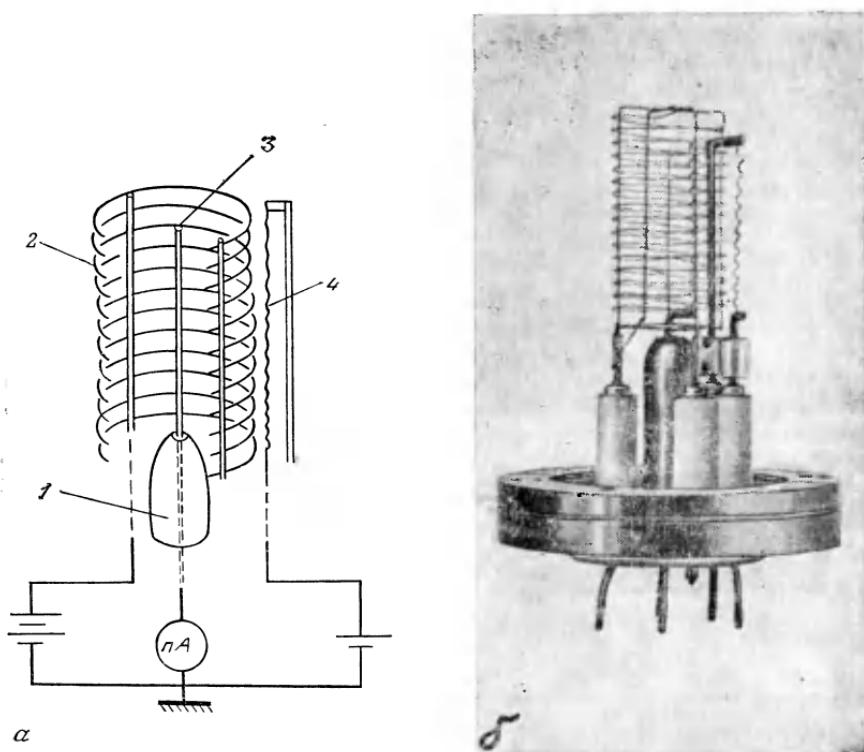


Рис. 14.16. Вакуумметр Байярда — Альперта (материалы фирмы Varian).  
а — принципиальная схема; б — пример исполнения. 1 — полый цилиндр; 2 — сетка (анод); 3 — коллектор ионов; 4 — нить (катод).

электронов и увеличивать также число создаваемых пар ион — электрон. Ионы, образующиеся в пространстве между сеткой и коллектором, захватываются последним и создают ток коллектора  $i_i$ . Электроны захватываются сеткой, образуя ток  $i_e$ , который практически равен току катодной эмиссии. Поскольку число образующихся при этом ионов пропорционально числу ионизирующих электронов и числу встреченных молекул газа, т. е. давлению газа  $p$ , можно записать:

$$i_i = S i_e p.$$

Отношение  $i_i/i_e$ , называемое коэффициентом вакуумирования нормального триода, всегда меньше единицы. Чувствительность датчика  $S$  выражается обычно в  $\text{Па}^{-1}$  (или в  $\text{мбар}^{-1}$ ). Ее зависимость от геометрических параметров датчика (расстояний между электродами, проницаемости сетки и т. д.) и природы

газа определяется коэффициентом ионизации (разд. 14.5.1). Обычно приводимая в качестве справочной величина  $S$  по отношению к азоту составляет  $10^2 \div 5 \cdot 10^2 \text{ Па}^{-1}$  для различных моделей обычного триода и  $10^3 \div 3 \cdot 10^3 \text{ Па}^{-1}$  для датчиков типа Байярда — Альперта; таким образом, датчики этих двух типов не являются абсолютными и требуют градуировки.

У датчиков обычной триодной конфигурации (часто называемых датчиками «высокого давления») чувствительность довольно постоянна на протяжении более четырех порядков величины давления, изменяясь в пределах  $\sim 15\%$ . Интервал измерений ограничен в сторону высоких давлений ( $\sim 1 \div 10 \text{ Па}$  для различных моделей) режимом разряда в газе, а со стороны низких давлений — появлением в коллекторе остаточного тока того же знака, что и ионный ток. Этот остаточный, не зависящий от давления ток обусловлен выбыванием из коллектора фотоэлектронов под действием мягкого рентгеновского излучения, вызванного ударами электронов о поверхность металлической сетки. Соответствующий предел рабочего давления датчика обычно составляет  $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ Па}$ .

В вакуумметрах Байярда — Альперта этот эффект сводится к минимуму путем уменьшения площади коллектора, который изготавливается в виде вольфрамовой нити малого диаметра (порядка 0,1 мм и даже меньше). Это позволяет сдвинуть предел измерений в сторону низких давлений примерно до  $10^{-9} \text{ Па}$ . Поскольку чувствительность  $S$  вакуумметров Байярда — Альперта примерно в 10 раз выше, чем для описанных выше датчиков, верхний предел измеряемых давлений при удовлетворительной линейности характеристики находится в интервале  $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ Па}$ .

Ввиду широкого диапазона давлений, охватываемых этими датчиками, ток ионов в коллекторе может изменяться в широких пределах. Чтобы их сузить и ограничиться измерением ионных токов выше  $10^{-12} \text{ А}$ , возбуждение датчика осуществляется посредством нагрева со стороны катода, что стабилизирует поток испускаемых им электронов до номинальных значений, на которые датчик настраивается (вручную или автоматически) в зависимости от рабочего диапазона давлений. Обычно этот ток эмиссии для вакуумметра с нормальным триодом ограничен уровнем  $\sim 100 \text{ мкА}$  (в типичном случае принимая два значения — 5 и 50 мкА), а для вакуумметра Байярда — Альперта — около 10 мА (обычно три значения — 0,04, 0,4 и 4 мА). Подстройка тока коллектора осуществляется через преобразователь ток — напряжение с линейным либо логарифмическим выходом. Выходной сигнал датчика Байярда — Альперта в принципе линеен в широком диапазоне давлений; однако, поскольку существуют различные помехи (особенно в области низких дав-

лений), которые в различных моделях более или менее снижены, этот датчик изготавливают в двух конструктивных вариантах: его сборка либо размещается в стеклянной ампуле, приспособленной для работы в вакууме, либо закрепляется на подвеске и полностью погружается в рабочий объем. Второму варианту конструкции часто отдается предпочтение, поскольку он позволяет избежать помех, вызванных электростатическими зарядами, скапливающимися на стекле, и дегазацией со стенок (иногда на поверхность ампулы наносится платиновая пленка). В этой модели также сведена к минимуму газовая эфузия — перемещение молекул вследствие градиента температуры, вызванного нагревом газа в ампуле горячим катодом. Кроме того, материалы, из которых изготавливаются катоды, сетки и коллекторы, подбираются таким образом, чтобы связанные с ними эффекты сорбции (откачка) и десорбции (дегазация) были минимальны. Тем не менее, все ионизационные датчики перед применением следует дегазировать путем бомбардировки сетки и коллектора интенсивным током электронов, испускаемых катодом. Принимая во внимание малость измеряемого ионного тока ( $\sim 10^{-12}$  А), очень важно поддерживать хорошую электрическую изоляцию коллектора. Поэтому, чтобы избежать осаждения металла на базе коллектора, она маскируется по отношению к катоду и сетке с помощью металлического коаксиального экрана (рис. 14.16, а, б).

В области очень низких давлений ( $< 10^{-8}$  Па) влияние рентгеновского излучения, испускаемого сеткой, на эмиссию фотоэлектронов, минимизированную путем использования особого состава материала коллектора (иридий, покрытый торием), снова становится значительным. Его можно либо исключить, как это делается в датчике со скрытым коллектором типа Грошковского, либо скомпенсировать, как в случае датчика Редхеда, снабженного модулятором. В датчике Грошковского сетка имеет форму цилиндра с отверстием для пропускания ионов, и ионы захватываются коллектором, который помещен в защитный кожух. Во втором датчике нитевидный электрод, аналогичный коллектору и называемый электродом модуляции, помещается внутри сетки. На него поочередно подаются потенциалы сетки и коллектора. Вычитание токов коллектора, получаемое при таком изменении потенциала, позволяет исключить ток электронов, вызванный фотоэлектронами, поскольку доля тока ионов, захватываемых модулятором, известна (около 40%).

Два описанных выше варианта конструкции вакуумметра Байярда — Альперта позволили отодвинуть нижний предел измеряемых давлений вплоть до  $10^{-11}$  Па.

#### 14.5.4. Ионизационный датчик с источником радиоактивности

Радиоактивный источник, испускающий ионизирующие  $\alpha$ -частицы, содержит соли радия или полония с активностью порядка 100 мкКи. Вещество наносится тонким слоем на металлическую пластинку и покрывается сверху также тонкой металлической пленкой, которая предотвращает потери радиоактивного вещества в результате коррозии и исключает нежелательную диффузию радона, возникающего при радиоактивном распаде, в вакуумированное пространство. Пластинка укрепляется на дне металлической цилиндрической колбы, которая играет роль ионизационной камеры (рис. 14.17).

Коллектор ионов (нитевидный или с ребристой поверхностью) заряжается отрицательно по отношению к камере (порядка 50–100 В) и должен быть очень хорошо изолирован от нее электрически ввиду малости получаемых ионных токов. Интервал измеряемых давлений при линейной характеристике расположен примерно от  $10^{-2}$  до  $10^3$  Па. Верхний предел устанавливается повышением рекомбинации ион — электрон, а нижний — остаточным током вторичных электронов, высвобождающихся в результате бомбардировки коллектора  $\alpha$ -частицами.

Чтобы измеряемые ионные токи были не слишком малы ( $>10^{-15}$  А), размеры ионизационной камеры выбираются в зависимости от рабочего диапазона измеряемых давлений (около 3 порядков величины давления для каждой модели), с тем чтобы получить чувствительность порядка  $10^{-12}$  А·Па<sup>-1</sup>. Чувствительность датчика зависит от природы газа (она может изменяться в пределах порядка); эти измерительные приборы также требуют градуировки. Градуировка остается в силе достаточно долго из-за большого периода полураспада радия (1600 лет). Другие ионизирующие излучения, испускаемые радиоактивными источниками (например,  $\beta$ -излучение трития), требуют использования высоких активностей. Следует, однако, отметить, что, несмотря на относительную простоту конструкции (отсутствие нагревательного катода) и линейность характеристики, датчики этого типа пока не нашли широкого применения из-за опасности работы с радиоактивными веществами.

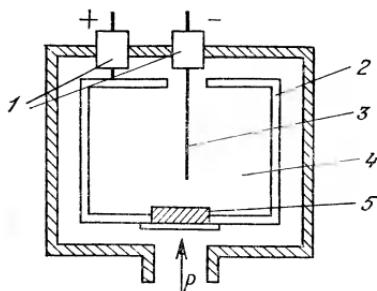


Рис. 14.17. Принципиальная схема ионизационного датчика с радиоактивным источником.

1 — керамические изоляторы; 2 — анод; 3 — коллектор ионов; 4 — ионизационная камера; 5 — радиоактивный источник.

## 14.6. Приборы для градуировки вакуумметров

Ни один из датчиков, описанных в настоящей главе, не позволяет осуществлять прямое измерение абсолютных давлений; все они обязательно нуждаются в градуировке. Кроме того, показания всех этих приборов, за исключением деформационных датчиков, зависят от природы газа.

В области низкого вакуума наиболее простым и чаще всего используемым на практике эталонным прибором является гидростатический жидкостный манометр в форме U-образной трубы. Он позволяет достаточно просто измерять давления в интервале  $10^2 \div 10^5$  Па с точностью порядка нескольких процентов.

В промежуточном интервале давлений между  $10^{-3} \div 10^{-2}$  Па и  $10^2$  Па обычно используют манометр Мак-Меода, принцип действия которого основан на изотермическом сжатии известного объема газа  $V$ , находящегося при давлении  $p$ , которое необходимо измерить, до объема  $V'$  при давлении  $p'$ , так что:

$$p' = (V/V') p = cp,$$

где  $c = V/V'$  — коэффициент сжатия, характеризующий используемый датчик.

Поскольку давление  $p$  мало, для получения достаточно большого  $p'$  прибор должен иметь значительный коэффициент  $c$ . На

рис. 14.18 показана принципиальная схема манометра Мак-Леода, состоящего из вертикальной манометрической трубы  $T$ , соединенной с газом, находящимся под давлением  $p$ , которое необходимо определить, и ртутным резервуаром  $R$ . В начальный момент измерений ртуть находится на уровне  $N$  с перепадом высот  $H$ , соответствующим разности давлений между окружающей атмосферой и газом. Затем резервуар  $R$  поднимается; объем газа  $V$ , находившегося в колбе  $B$ , сжимается в капилляре  $C_1$ ; новое давление в нем  $p'$  можно измерить путем определения разности  $h$  между уровнем ртути  $N'$  во вторичном капилляре  $C_2$  и его уровнем в  $C_1$ . Зная  $c$ , можно вычислить начальное давление газа  $p$ .

Датчики этого типа обычно ис-

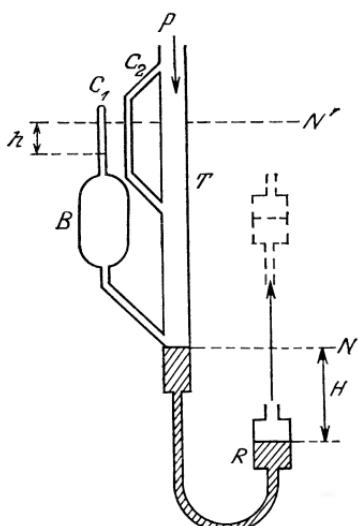


Рис. 14.18. Принципиальная схема датчика Мак-Леода.

пользуют для измерения давления не-конденсирующихся газов<sup>1)</sup>, подчиняющихся законам идеальных газов. Точность измерения разности уровней можно повысить путем использования интерферометрии. Точность измерений зависит от модели датчика и составляет от 1 до 10%.

Благодаря своим характеристикам емкостный датчик и датчик на основе спиральной трубы Бурдона могут служить вторичными эталонными приборами, не зависящими от природы газа в диапазонах  $10^{-2} \div 10^5$  Па и  $10^1 \div 10^5$  Па соответственно.

В области умеренного вакуума ( $10^{-1} \div 10^{-5}$  Па) для градуировки используется радиометрический датчик Кнудсена (рис. 14.19). В нем имеется подвижный элемент, подвешенный на закручивающейся нити, контроль за положением которого осуществляется с помощью маленького зеркальца  $M$ . Этот элемент снабжен двумя вертикальными пластинками  $P_1$  и  $P_2$ , помещенными напротив двух стационарных пластиночек  $P_1'$  и  $P_2'$ . Первоначально система находится в механическом равновесии при постоянной температуре газа, давление которого хотят измерить. При нагревании пластин  $P_1'$  и  $P_2'$  в результате эффекта

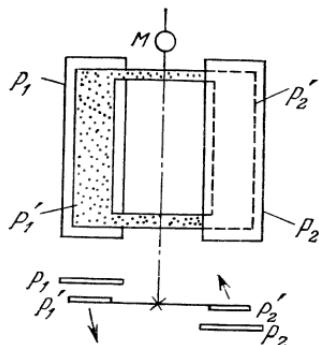


Рис. 14.19. Принципиальная схема датчика Кнудсена.

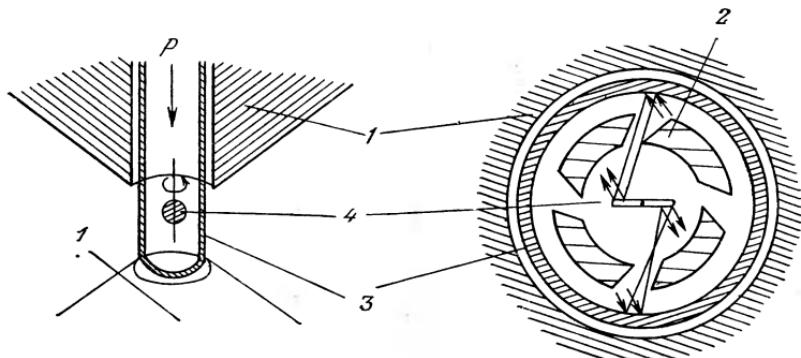


Рис. 14.20. Термолекулярный датчик с диамагнитной супензией [20].  
1 — электромагнитная система; 2 — холодный источник; 3 — корпус датчика (горячий источник); 4 — графитовый диск.

<sup>1)</sup> Имеются в виду газы, находящиеся при температурах выше критической. — Прим. перев.

Джоуля подвижный элемент поворачивается под действием момента сил и занимает новое положение равновесия. Каждая из этих сил представляет собой разность между силой, обусловленной соударениями «горячих» молекул о поверхность пластиинки, подвижной по отношению к неподвижной пластиинке, и силой, вызванной «холодными» молекулами, соударяющимися с противоположной стороной этой пластиинки. Угол поворота пропорционален давлению газа  $p$ . Этот датчик позволяет измерять абсолютное давление с точностью около 2%.

В области давлений  $10^{-8} \div 1$  Па используется также термо-молекулярный датчик Эврара и Бофиса с диамагнитной суспензией (рис. 14.20), представляющий собой вариант датчика Кнудсена. Измерение давления основано на уменьшении угловой скорости вращения маленького графитового диска, запускаемого и стабилизируемого в пространстве с помощью электромагнитной системы. На диск, вращающийся вокруг оси инерции, которая совпадает с одним из его диаметров, действуют силы трения. Происхождение этих сил обусловлено, как и для датчика Кнудсена, соударениями соответственно «горячих» и «холодных» молекул с противоположными сторонами диска. Источником нагрева служит корпус датчика, находящийся при температуре окружающей среды, а сток тепла осуществляется в систему охлаждаемых ловушек (например, с жидким азотом), расположение которых таково, что охлажденные молекулы соударяются лишь с одной стороной диска. Датчик этого типа используется, в частности, как эталон в Национальной метрологической лаборатории (LNE) в Париже.

В заключение можно отметить, что в области высокого вакуума для градуировки используются также датчики, основанные на методе «регулируемой проводимости» с точностью порядка 5% (ссылки на соответствующие источники приведены в списке литературы).

## Библиография

### Монографии

1. Brown S. C., *Basic data of plasma physics*, N. Y., Wiley, 1959.
2. Bruhat G., *Thermodynamique*, 5ème édition remaniée par A. Kastler, Paris, Masson, 1962.
3. Delafosse J., Mongodin G., *Les calculs de la technique du vide*, Le Vide, n° 92, 1961.
4. Duval P., *Le Vide*, Collection «Que sais-je?», Paris, P. U. F., 1975.
5. Franklin J. L., Dillard J. G., *Ionization potentials, appearance potentials and heats of formation of gaseous positive ions*, N. S. R. D. S., NBS26, United States Department of Commerce, 1969.
6. Grigorov G., Kanev V., *Le vide poussé au laboratoire et dans l'industrie*, adaptation française par E. Thomas, Paris, Masson Cie, 1970.

7. Henry R. P., Cours de science et technique du vide, Paris, Société Française des Ingénieurs et Techniciens du vide, 1968, Tomes I, II.
8. Massey H. S. W., Burhop E. H. S., Gilbody H. B., Electronic and ionic impact phenomena, Oxford, Clarendon, 1969, Vol. I, II.
9. Papoular R., Phénomènes électriques dans les gaz, Monographies Dunod, Paris, Dunod, 1962.
10. Roberts R. W., Vanderslice T. A., L'ultra-vide et ses applications, Paris, Dunod, 1967.
11. Roboz J., Introduction to mass spectrometry, instrumentation and techniques, Interscience, N. Y., Wiley, 1968.
12. Trapnell B. M. W., Chemisorption, London, Butterworths and Co, 1964.
13. Von Engel A., Steenbeck M., Elektrische Gasenladungen, Bd. I, Berlin, Springer, 1932.

### Периодические и другие издания

14. Bayard R. T., Alpert D., Extension of the low pressure range of the ionization gauge, *Rev. Sci. Inst.*, 21, 571 (1950).
15. Benvenuti C., Hauer M., Low pressure limit of the Bayard-Alpert gauge, *Nucl. Instr. and Meth.*, 140, 453 (1977).
16. Bernardet H., Choumoff P. S., Mativet J., Sauneuf R., Etalonnage absolu en ultra-vide par la méthode de la conductance réglable, *Le Vide*, 146, 84 (mars — avril 1970).
17. Choumoff P. S., Lapteff B., Etude des limites inférieures de mesure de jauge à ultra-vide, *Electron. Fis. Apli.*, 14, 49 (1970).
18. Choumoff P. S., Lapteff B., De quelques problèmes posés par l'étalonnage des jauge à ionisation, *Electron. Fis. Apli.*, 17, 1—2 (1er et 2ème trimestre 1974).
19. Duval P., Vide, *Techniques de l'Ingénieur, Mesure et Contrôle*, R. 2050.
20. Evrard R., Beaufils P., Etalonnage des jauge à ionisation au moyen de la jauge absolue à suspension diamagnétique, *Le Vide*, 116, 116 (1965).
21. Gourjault J. D., Lefevre J., Choumoff P. S., Search for accuracy in absolute calibration, *J. Vac. Sc. and Techn.*, 9, n° 1, 206, (1972).
22. Gourjault J. D., Rubet L., Mesures dans le domaine du vide, *Bulletin B. N. M.*, 5 (juillet 1977).
23. Groszkowski J., La sensibilité de la jauge à collecteur caché, *Le Vide*, n° 136, 240 (1968).
24. Laurent J. M., Benvenuti C., Scalabrin F., Pressure measurements for the ISR CERN, Proc. 7th Intern. Vac. Congr., Vienne 1977, p. 1.
25. Loriot G., Moran T., Reliability of a capacitance manometer in the range  $2 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^{-6}$  torr, *Rev. Sc. Instr.*, 46, 140 (1975).
26. Poulter K. P., Calcatelli A., Choumoff P. S., Lapteff B., Grosse G., Inter-comparison of vacuum standards of countries within the european community in the range  $8 \cdot 10^{-5}$  to  $8 \cdot 10^{-2}$  Pa, *J. Vac. Sci. Techn.*, 17, 3 (1980).
27. Readhead P. A., Modulated Bayard-Alpert Gauge, *Rev. Sc. Instr.* 31, 343 (1960).
28. Sullivan J. J. K., Modern capacitance manometers, *Transducer technology* (july — august 1979).

### Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке

- Лекк Дж. Измерение давления в вакуумных системах. — М.: 1966.  
 Востров Г. А., Розанов Л. Н. Вакуумметры. — М.: 1967.  
 Ничипорович Г. А. Вакуумметры. — М.: 1977.

## 15. АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

### 15.1. Выбор измеряемых величин

#### 15.1.1. Методы исследования, используемые для различных типов поля

Звуковые волны проявляются главным образом через вызываемые ими изменения давления и скорости. Часто звуковое поле в точке оказывается результатом суперпозиции многочленно отраженных волн; возникает, следовательно, диффузное поле, усредненные характеристики которого мало зависят от положения точки измерения, а определяются главным образом мощностью источников и характеристиками поглощения звука средой и стенками. Поскольку направление скоростей частиц среды постоянно меняется, звуковое поле лучше всего можно охарактеризовать с помощью давления звука — аддитивной скалярной величины, к которой чувствительно ухо. Акустики используют свойства диффузационного поля для оценки общей мощности источника (метод отражающих камер).

В других случаях, среди которых идеальным является безэховая<sup>1)</sup> камера, существует область, называемая свободным полем, в которой отражения от стенок пренебрежимо малы. Эта область характеризуется волнами, перемещающимися от источника к наблюдателю. Установлено, что в таких случаях давление содержит необходимую информацию для детального исследования источников или их регистрации, не затрагивая области ближнего поля, расположенной в непосредственной близости от источника. Ближнее поле в действительности представляет собой область, где наблюдаются явления интерференции, возникающие в результате комбинации вкладов различных зон излучения.

Разработка новых технологий датчиков (миниатюризация) и измерительных систем позволяет в настоящее время приступить к измерению энергетических величин. В простом случае плоских волн, как будет показано в дальнейшем, в отличие от измерения давления в точке, измерение интенсивности или потока звуковой энергии показательно даже в одной интерференционной зоне. Измерения интенсивности, таким образом, не подчиняются указанному выше ограничению и могут быть вы-

<sup>1)</sup> В отечественной литературе более употребителен термин «заглушенная камера». — Прим. перев.

полнены в ближнем поле источников. Можно отметить, что ближнее поле в силу его высокой интенсивности мало возмущается отражениями от стенок измерительной камеры. Разработка усовершенствованных методик измерения интенсивности позволит исследовать некоторые источники в их реальном окружении.

### 15.1.2. Исследование распространяющейся плоской волны

Для физического описания течения используются законы сохранения массы и количества движения и уравнение состояния. С помощью этих трех соотношений можно показать, что возмущение малой амплитуды распространяется со скоростью  $c_0$ , определяемой выражением

$$c_0 = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0},$$

где  $p_0$  — среднее давление,  $\rho_0$  — средняя плотность жидкости среды, а  $\gamma$  — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Это распространение возмущения сопровождается изменением давления, скорости, плотности и температуры.

Для плоской гармонической волны с круговой частотой  $\omega$ , перемещающейся вдоль оси  $x$ , давление  $p(x, t)$  можно представить в непрерывном режиме с помощью составной амплитуды:

$$p(x, t) = p_0 e^{jk(c_0 t - x)},$$

где  $k = \omega/c_0$ ; соответствующее выражение представляет собой решение волнового уравнения, записанного для давления.

С помощью линеаризованного уравнения динамики

$$-\partial p / \partial x = \rho_0 (\partial u / \partial t)$$

можно определить скорость  $u(x, t)$  частиц жидкости среды:

$$u(x, t) = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c_0} p_0 \exp jk(c_0 t - x).$$

Отсюда следует, что в случае плоской волны скорость и давление изменяются синфазно.

С другой стороны, переносимая волной интенсивность звука  $I$  (средний поток звуковой энергии на единицу площади) выражается с помощью осредненного по времени произведения давления на скорость, или с использованием критериев подобия:

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (p u^*) = \frac{p_0^2}{2\rho_0 c_0}.$$

Отсюда видно, что распространение волны полностью описывается давлением  $p$ . На практике эта величина выражается с использованием относительной шкалы акустических децибел:

$$20 \lg(p_0/p_r), \text{ где } p_r = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па.}$$

### 15.1.3. Исследование произвольной плоской волны

Плоскую волну можно получить, возбуждая цилиндрическую трубку конечной длины с помощью поршня, колеблющегося, например, вдоль оси  $x$ . На торце поршня происходит отражение возмущения, и поле давления можно описать следующим образом:

$$p(x, t) = p^+ e^{ik(c_0 t - x)} + p^- e^{ik(c_0 t + x)}.$$

Величины  $p^+$  и  $p^-$  представляют соответственно составные амплитуды падающей и отраженной волн. Поле скоростей находим, как в разд. 15.1.2, используя уравнение динамики:

$$u(x, t) = \frac{p^+}{\rho_0 c_0} e^{ik(c_0 t - x)} - \frac{p^-}{\rho_0 c_0} e^{ik(c_0 t + x)}.$$

Эти выражения показывают, что изменение амплитуды  $p$  и  $u$  происходит уже не синфазно, а зависит от абсциссы  $x$ , проходя через максимумы и минимумы (стационарные волны).

Интенсивность  $I$  вычисляется по уравнению

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(pu^*) = \frac{|p^+|^2}{2\rho_0 c_0} - \frac{|p^-|^2}{2\rho_0 c_0}.$$

Значение  $I$  не зависит от  $x$  и представляет собой разность между падающим и отраженным потоками, т. е. поток излучения, зависящий от расстояния. Таким образом, видно, что присутствие явлений отражения делает важным измерение интенсивности.

### 15.1.4. Подход к трехмерному случаю

Волны в этом случае не являются плоскими, и происходит уменьшение амплитуды с увеличением расстояния от источника до точки наблюдения (закон сохранения энергии). По крайней мере, для случая свободного пространства в звуковом поле можно выделить две области: область ближнего поля, в которой колебания давления и скорости не совпадают по фазе (что свидетельствует о присутствии стационарных, не распространяющихся составляющих), и область дальнего поля, где давление

и скорость снова находятся в одной фазе, как в случае распространяющихся плоских волн.

Случай сферического источника с пульсирующим потоком энергии  $a e^{i\omega t}$  хорошо иллюстрирует это различие. Выражения для давления, радиальной скорости и интенсивности в этом случае имеют вид

$$p = \frac{j k p_0 c_0}{4\pi r} a e^{jk(c_0 t - r)}, \quad k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$u_r = \frac{1}{4\pi r^2} (jkr - 1) a e^{jk(c_0 t - r)};$$

$$I_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (p u_r^*) = \frac{p_0^2(r)}{p_0 c_0}, \quad \text{где} \quad p_0(r) = \frac{k p_0 c_0 a}{4\pi r}.$$

Отсюда видно, что:

а) граница между ближним и дальним полями находится при  $kr \approx 1$ , или  $r \approx \lambda/2\pi$ , т. е. при величине  $r$ , составляющей долю длины волны;

б) радиальная составляющая интенсивности  $I_r$  убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника при любых  $r$ .

Отметим, что интенсивность, как и скорость, является векторной величиной.

### 15.1.5. Заключительные замечания об измеряемых величинах

Из двух основных механических величин, связанных с звуковой волной,— давления и скорости—легко можно измерить только давление, а скорости частиц жидкости, соответствующие звуковым волнам, слишком малы, и, следовательно, их нельзя измерить обычными анемометрическими методами. Кроме того, описать диффузное поле с помощью скорости очень трудно.

Однако компоненты скорости звука можно определить косвенным образом с использованием уравнения динамики, связывающего градиент давления и производную скорости по времени. Эту операцию можно произвести, используя датчик, применяемый для измерения разности давлений. Этот датчик, основанный на измерении градиента давления, называется микрофоном. Другой часто используемый метод состоит в обработке с помощью электроники разности сигналов давления с двух микрофонов.

Как указывалось выше, измерение интенсивности позволяет оценить величину и направление потока звуковой энергии вблизи источника. Этот метод исследования оказывается единствен-

но пригодным в случае, когда источник исследуется при наличии шумов (отсутствие области свободного поля). После рассмотрения микрофонов мы перейдем далее к используемым в настоящее время измерениям интенсивности.

## 15.2. Микрофоны: общее рассмотрение

### 15.2.1. Принципы действия микрофонов

Микрофон представляет собой датчик, преобразующий акустический сигнал в электрический. В основу микрофона могут быть положены различные принципы, в большинстве случаев используется комбинация механоакустического и электромеханического преобразования: движение молекул воздуха приводит в движение упругий элемент (мембранны), что, в свою очередь, вызывает электрический сигнал.

Широко распространенный микрофон (рис. 15.1), применяемый в телефонных трубках, основан на необратимом явлении: под действием давления происходит изменение сопротивления контакта частиц угеля, заполняющих объем, закрытый мембраной. Микрофон этого типа, хотя и является весьма чувствительным, не приспособлен для физических измерений, поскольку имеет гистерезис и ограниченную полосу пропускания.

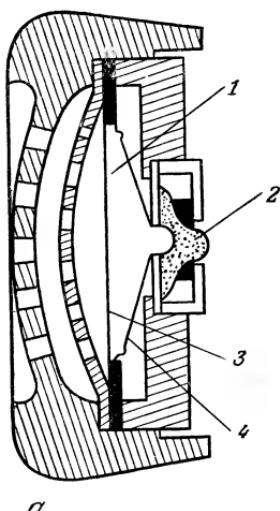


Рис. 15.1. Угольный микрофон.

*a* — конструкция; *б* — частотная характеристика, полученная для давления (отношение выходного сигнала к давлению на диафрагму, штриховая кривая) и для свободного поля (отношение выходного сигнала к давлению перед микрофоном, сплошная кривая). 1 — полость; 2 — угольная капсула; 3 — непроницаемая мембрана; 4 — диафрагма.

Описание и детальное исследование микрофона этого типа представлены в работах [5, 7].

Для создания измерительных микрофонов, по-видимому, предпочтительнее методы преобразования, основанные на обратимых явлениях электромагнитного, электростатического, пьезоэлектрического или магнитострикционного типов.

### 15.2.2. Влияние явлений дифракции

Одним из требований, которым должны отвечать датчики любого типа, является отсутствие искажений, вносимых процессом измерения в наблюдаемое физическое явление. Однако в рассматриваемом случае диапазон измеряемых частот очень широк (10 октав), и длины волн, отвечающие высоким частотам, могут иметь такой же порядок величины, что и геометрические размеры встречающихся материальных препятствий. В этом случае материальное тело ведет себя как фиктивный источник звука, создающий свое собственное звуковое поле, взаимодействующее с приложенным полем. Такое явление называется акустической дифракцией по аналогии с явлением, известным под аналогичным названием в оптике.

В теоретических расчетах эффектов дифракции следует учитывать, с одной стороны, форму и угол падения исследуемых звуковых волн, а с другой — форму и размеры датчика. На практике в качестве основной гипотезы принимается граничное условие, налагаемое на звуковое поле, а именно: в непосредственной близости от твердого тела скорости частиц среды обычно равны нулю. Поэтому расчет представляет трудности, и практически задача не может быть решена в аналитическом виде при переходе от простых форм к более сложным.

Случай цилиндра с круговым основанием, близкого по форме к микрофону, рассматривался Винером. Результаты, приведенные на рис. 15.2, показывают, что отношение  $p/p_0$  измеренного давления к давлению в свободном пространстве существенно варьируется с изменением угла падения.

Эти результаты могут быть сопоставлены с экспериментальными кривыми, которые приведены на рис. 15.3 и указывают на наличие аналогичных тенденций: так, сигнал микрофона диаметром 2,4 см значительно искажается за пределами 13 кГц.

На рис. 15.3 также показана осредненная кривая, называемая сигналом в диффузионном поле. Эта кривая отвечает усредненному по углам значению (случайный угол падения), и ее следует использовать в качестве опорной для случая многочленных отражений. В дальнейшем будет показано, что можно использовать затухание микрофона, чтобы скорректировать

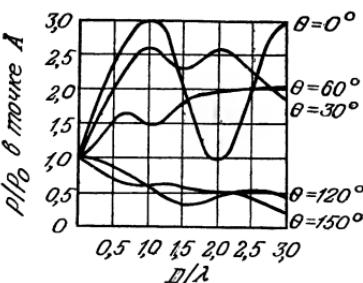
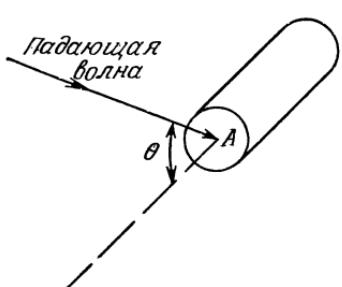


Рис. 15.2. Дифракция в случае цилиндра с круговым основанием.

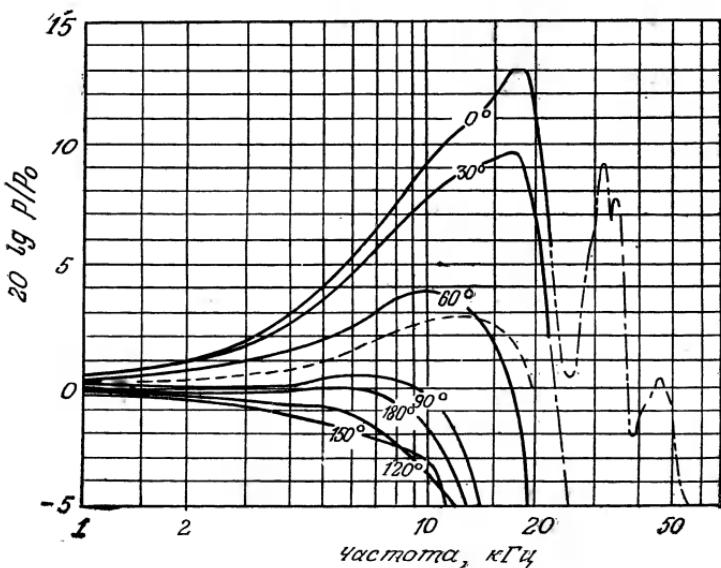


Рис. 15.3. Частотные характеристики микрофона для различных углов падения (данные фирмы Brüel & Kjaer).

— — — характеристика для диффузного поля.

частотную характеристику и частично скомпенсировать эффекты дифракции.

Микрофоны можно разделить на 3 группы:

- микрофоны, оптимизированные для свободного поля; они характеризуются очень большим затуханием, что позволяет получить лучшую полосу пропускания при нулевом угле падения, и требуют ориентации к источникам;
- микрофоны, оптимизированные для случайных углов падения (их следует использовать для измерений в отражающей среде);

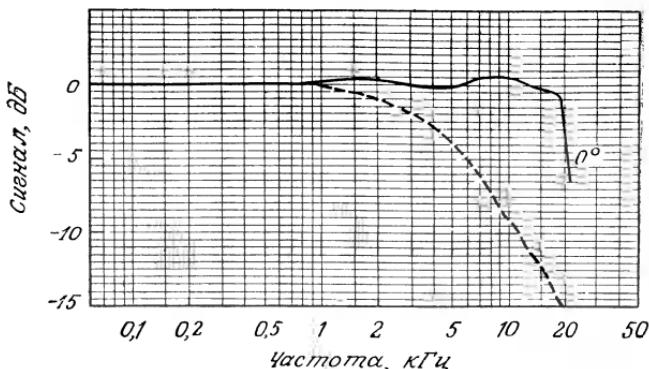


Рис. 15.4. Градуировочная кривая для микрофона (данные фирмы Brüel & Kjaer).

— свободное поле; - - - давление.

в) микрофоны, оптимизированные для давления; они настраиваются для получения лучшей полосы пропускания при градуировке, осуществляя путем моделирования в отсутствие явлений, связанных с распространением звуковых волн, а следовательно, и дифракцией. Такие микрофоны предназначены для использования в ограниченных пространствах и монтируются на стенке.

Следует отметить, что эти различия микрофонов появляются в градуировочных кривых (рис. 15.4), и относятся только к характеристике преобразования в высокочастотной части спектра.

### 15.3. Основные типы микрофонов

#### 15.3.1. Классификация микрофонов

Если не рассматривать проблемы дифракции, влияние которой исследуется в разд. 15.2.2, то в случае микрофонов, чувствительных к давлению, их можно классифицировать по величинам, на которые они должны реагировать [1, 2]. В результате, как отмечалось в разд. 15.1.5, выделяются группы микрофонов, предназначенных для измерения давления, и микрофонов, используемых для определения градиента давления. Первые, в принципе, осуществляют физические измерения давления, а вторые — физические измерения скорости звука. Важным преимуществом микрофонов, предназначенных для измерения градиента давления, является их чувствительность к направлению распространения волны. Если желательна минимальная чув-

вительность к паразитным звукам и к эффектам отражения, то можно также выделить промежуточную категорию микрофонов. Отметим, что для получения более выраженной направленности можно также использовать микрофоны, чувствительные ко второму градиенту.

В дальнейшем детально рассматриваются принципы функционирования этих трех типов микрофонов, объединяемых общим случаем микрофонов с диафрагмами. Здесь в первую очередь встает проблема расчета соотношения между акустическим полем и силой, действующей на диафрагму, независимо от принципа, использованного для преобразования этой силы в электрическую величину.

### 15.3.2. Электромехано-акустические аналогии

**Аналогия течения — ток.** Сопоставляя уравнения для электрических цепей и уравнения, используемые для описания некоторых механических и акустических явлений, можно обнаружить некоторые аналогии. В дальнейшем будет показано, что некоторые электрические и акустические величины можно поставить в соответствие друг другу для получения однотипных уравнений. Возьмем акустическую схему, показанную на рис. 15.5, в которую входят трубка сечения  $A$ , капилляр и полость объемом  $V$ . Предположим, что размеры каждого из этих элементов малы по сравнению с длиной звуковой волны  $\lambda = c_0/f$ , что справедливо для элементов микрофона. Поэтому в данной схеме явление распространения волн отсутствует. Поскольку равенство давлений по разные стороны разграничающих плоскостей означает равенство плотностей, из закона сохранения массы вытекает, что расход  $U = Au$ , или течение при переходе через эти плоскости сохраняется. Это течение можно рассматривать как аналог электрического тока.

**Акустическая масса.** Рассмотрим колебательное движение газа в трубке. При этом заметного сжатия не наблюдается

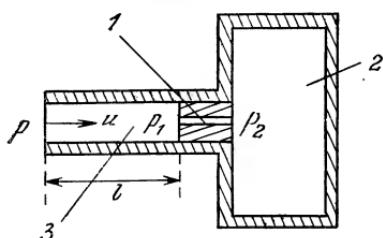


Рис. 15.5. Простой акустический контур.  
1 — капиллярный канал; 2 — полость; 3 — трубка.

( $l \ll \lambda$ ). Это означает, что находящийся в трубе газ массой  $m$  перемещается как целое под действием разности давлений  $p - p_1$ . Запишем выражение для основного закона динамики:

$$p - p_1 = \frac{m}{A^2} \frac{d(Au)}{dt}.$$

Это уравнение близко по форме к уравнению механики  $f = m(dv/dt)$  и выражению для

закона Ома  $e = L(di/dt)$ . Существует, таким образом, аналогия между механической массой  $m$ , акустической массой  $m/A^2$  и индуктивностью  $L$ . Перемещение массы при этом играет роль тока, а разность давлений соответствует разности потенциалов.

**Акустическое сопротивление.** Падение давления в капилляре, вызванное вязкостью, пропорционально скорости (ламинарное течение). Таким образом, получаем

$$p_1 - p_2 = R(Au),$$

где  $R$  является аналогом гидравлического сопротивления и называется акустическим сопротивлением.

**Акустическая упругость.** Из-за малых размеров сжатие газа в полости происходит практически без смещения его центра массы. Процесс сжатия описывается законами термодинамики. Предполагая это сжатие адиабатическим, получаем

$$pU^\gamma = \text{const}, \quad \text{или} \quad \Delta p/p = -\gamma(\Delta V/V),$$

откуда, подставляя

$$\Delta p = p_2, \quad p \simeq P_0 \quad \text{и} \quad \Delta V = - \int (Au) dt,$$

приходим к

$$p_2 = (\gamma P_0/V) \int (Au) dt.$$

Член  $V/\gamma P_0$  служит, таким образом, аналогом емкости: это — упругость, или акустическая емкость  $C$ .

**Уравнение акустического канала.** Для представленной на рис. 15.5. схемы дифференциальное уравнение, связывающее давление  $p$  с потоком  $Au$ , записывается в виде

$$p = (p - p_1) + (p_1 - p_2) + p_2,$$

$$\text{т. е.} \quad p = \frac{M}{A^2} \frac{d(Au)}{dt} + R(Au) + \frac{\gamma P_0}{V} \int (Au) dt.$$

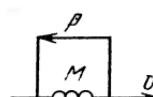
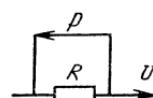
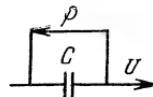
Это уравнение подобно закону Ома для последовательно включенных  $R$ ,  $L$  и  $C$ :

$$e = L(di/dt) + Ri + (1/C) \int i dt$$

и механическому уравнению, описывающему затухание осциллятора с одной степенью свободы:

$$f = m(dv/dt) + rv + k \int v dt.$$

Таблица 15.1. Электромехано-акустические аналогии

Электрическая величина	Механическая величина	Акустическая величина	Графическое обозначение
Электродвижущая сила $e$	Механическая сила $f$	Акустическое давление $p$	
Ток $i$	Линейная скорость $v$	Объемный расход $U=Au$	
Индуктивность $L$	Масса $m$	Акустическая масса $M=m/A^2$	
Электрическое сопротивление $R$	Механическое сопротивление $r$	Акустическое сопротивление $R$	
Емкость $C$	Податливость (обратная жесткость) $1/k$	Упругость, акустическая емкость $C=V/\gamma P_0=A^2/k$	

Сопоставление этих трех уравнений указывает на наличие аналогий с активными и реактивными сопротивлениями, соответствующие обозначения для которых приведены в табл. 15.1.

**Эквивалентная схема микрофона.** Все электроакустические системы можно более или менее условно разделить на три части: акустическую, механическую и электрическую. Руководствуясь изложенными выше принципами, можно составить электрическую схему, эквивалентную первым двум вместе взятым частям системы (механической и электрической), которые образуют чувствительный элемент акустического датчика. При

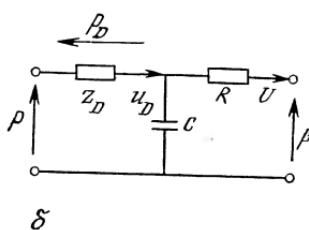
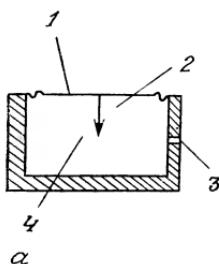


Рис. 15.6. Микрофон, чувствительный к давлению.

*a — конструктивная схема; б — эквивалентная электрическая схема. 1 — диафрагма; 2 — полость; 3 — капиллярный канал; 4 — механическая связь с преобразователем.*

в этом все элементы схемы, через которые проходит один и тот же поток, размещаются последовательно, а элементы, соответствующие частям общего потока, — параллельно. Заметим, что в большинстве случаев сложение потоков проявляется в емкостях. Один простой пример приведен в разд. 15.3.3. В полость микрофона, чувствительного к давлению (рис. 15.6, *a*), поступает поток, проходящий через диафрагму с импедансом  $Z_D$  (масса и упругость), и поток, проходящий через капиллярный канал с сопротивлением  $R$ . Отсюда получаем эквивалентную схему с двумя цепями, показанную на рис. 15.6, *b*.

Если перемещение чувствительного объема датчика известно (определяется путем вычисления потока, проходящего через эквивалентную схему механо-акустической части), то остается перейти к схеме электрической части системы. Эта задача более проста, чем предыдущая, и будет исследоваться в каждом случае в соответствии с используемым принципом преобразования. Обычно бывает достаточно ввести в эквивалентную схему механо-акустической части датчика соответствующий преобразователь.

### 15.3.3. Микрофоны, чувствительные к давлению

В микрофонах этого типа флуктуации  $p$  акустического давления приводят к смещению диафрагмы. Напротив, изменения атмосферного давления не вызывают какого-либо эффекта из-за наличия капиллярного канала для выравнивания давления. Подобные микрофоны содержат три элемента: полость, диафрагму и канал для прохода воздуха, которые можно представить соответственно с помощью емкости  $C$ , импеданса реактивного типа  $Z_D$  и активного сопротивления  $R$ . Эквивалентная акустическая схема, построенная на основе аналогии с активным и реактивным сопротивлениями, представлена на рис. 15.6, *b*. Предполагается, что давления, действующие на диафрагму и в отверстии, одинаковы. Учитывая малость активного сопротивления  $R$  по сравнению с общим импедансом (включающим, кроме того, член, пропорциональный частоте), получаем на практике для потока  $U \gg U_D$ , откуда

$$U \simeq -\frac{jC\omega}{1 + j\omega RC} p.$$

Сила, действующая на диафрагму, определяется выражением

$$f_D = Ap_D = A[p - (p + RU)] = \frac{jRC\omega}{1 + jRC\omega} Ap.$$

Значение  $R$  можно подобрать таким образом, чтобы оно всегда оставалось меньше  $Z_D$  и постоянная времени  $RC$  была больше 0,1 с; этими параметрами определяется нижняя граничная частота, ниже которой ослабление сигнала достигает 6 дБ на октаву.

#### 15.3.4. Микрофоны, чувствительные к градиенту давления

Практически градиент можно определить, используя приближение  $(p_1 - p_2)/\Delta l$ , где  $p_1$  и  $p_2$  — давления, измеренные в двух точках, расстояние между которыми равно  $\Delta l$ . Такой микрофон можно изготовить с помощью круговой мембранны, поддерживаемой жесткой оправой в направлении оси  $x$  (рис. 15.7). Толщина этой оправы приблизительно равна теоретической толщине  $\Delta l$ . Это устройство невелико, и ему присущи явления дифракции (разд. 15.2.2).

Пусть плоская волна направлена вдоль оси  $x_0$ , образующей с осью  $x$  угол  $\theta$ ; тогда

$$p = p_0 e^{j(\omega t - kx_0)},$$

где  $\omega = kc_0$ ; при  $k\Delta l \ll 1$  получаем

$$p_2 - p_1 = (\partial p / \partial x_0) \Delta l \cos \theta = -jk p_0 \Delta l \cos \theta e^{j(\omega t - kx_0)}.$$

Сила  $f_x$ , действующая на диафрагму площадью  $A$ , равна

$$f_x = -A(p_2 - p_1) = j(\omega p_0 / c_0) A \Delta l \cos \theta e^{j(\omega t - kx_0)}.$$

Для плоской волны имеем

$$p_0 = \rho_0 c_0 u_0$$

(разд. 15.1.2), откуда

$$f_x = j\omega u_0 \cos \theta \rho_0 A \Delta l e^{j(\omega t - kx_0)}.$$

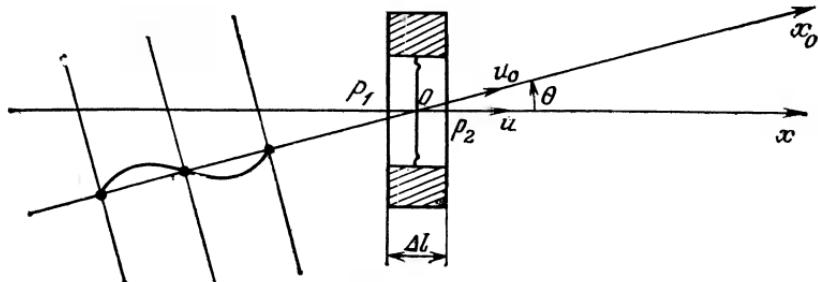


Рис. 15.7. Принцип работы микрофона, чувствительного к градиенту давления.

Этот результат показывает, что амплитуда силы, действующей на диафрагму, пропорциональна произведению линейной скорости на круговую частоту  $\omega$ .

Этот вывод не зависит от формы волны. В самом деле, основное уравнение динамики имеет вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = j\omega \rho_0 u,$$

что приводит, независимо от вида волны, к

$$f_x = -A(p_2 - p_1) = -A(\frac{\partial p}{\partial x}) \Delta l = j\omega \rho_0 A \Delta l.$$

Напротив, чувствительность к давлению  $S_p = f_x/p$  зависит от формы волны, по крайней мере в ближнем поле. Так, в случае плоской волны с углом падения  $\theta$ , для которой  $u = u_0 \cos \theta$  и  $p_0 = \rho_0 c_0 u_0$ , получаем

$$S_p = j(\omega/c_0) A \Delta l \cos \theta.$$

Для сферической волны с радиусом  $r$  и центром на оси  $0x_0$ , удовлетворяющей условию

$$p = (a_0/r) e^{j(\omega t - kr)},$$

получаем

$$\frac{\partial p}{\partial r} = (-a_0/r)(1/r + jk)e^{j(\omega t - kr)}.$$

Откуда с учетом  $dx = dr \cos \theta$  можно определить чувствительность к давлению:

$$S_p = \frac{1 + j\omega r/c_0}{r} A \Delta l \cos \theta.$$

Если микрофон, чувствительный к градиенту давления, используется для измерения давлений, то возникают две особенности:

а) двунаправленная характеристика, обусловленная членом, включающим  $\cos \theta$ , которая представляется в логарифмическом виде, как показано на рис. 15.8;

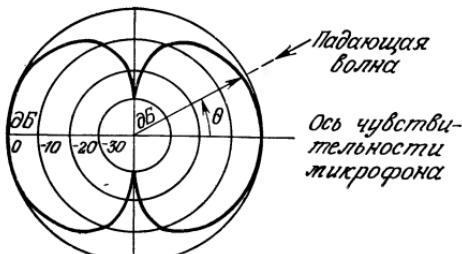


Рис. 15.8. Диаграмма направленности микрофона, чувствительного к градиенту давления.

б) выделение низких частот для  $\omega r < c_0$  в случае сферических волн (по сравнению с плоскими волнами чувствительность  $S_p$  увеличивается в  $-jc_0/\omega$  раз,  $S_p = (1/r)A\Delta l \cos \theta$ ; сравните с  $j(\omega/c_0)A\Delta l \cos \theta$ ). Этот эффект широко используется для регистрации голоса при положении микрофона вблизи губ (акцентирование низких звуков).

### 15.3.5. Микрофоны смешанного типа (чувствительные как к давлению, так и к градиенту давления)

Рассмотрим далее микрофон, полость которого закрыта с одной стороны диафрагмой, а на противоположной стенке имеется окно, регулируемое акустическим сопротивлением (рис. 15.9, а). Эквивалентная схема такого микрофона (рис. 15.9, б) мало отличается от схемы микрофона, чувствительного к давлению. Заметим, что вследствие существования зазора  $\Delta l$  между двумя поверхностями давления  $p_1$  и  $p_2$ , приложенные к этим поверхностям, различаются. Для случая плоской монохроматической волны, образующей с осью микрофона угол  $\theta$ , получаем

$$p_2 = p_1 \left( 1 - j \frac{\omega}{c_0} \Delta l \cos \theta \right).$$

Отметим, кроме того, что акустическое сопротивление  $R$  здесь значительно меньше, чем в случае, рассмотренном в разд. 15.3.3, поскольку относится к окну, а не к капиллярному отверстию.

Используя акустическую аналогию с активными и реактивными сопротивлениями и рассматривая две части эквивалентной схемы, можно записать два уравнения:

$$\begin{aligned} p_1 &= U_D \left( Z_D + \frac{1}{j\omega C} \right) - \frac{U_0}{j\omega C}, \\ -p_2 &= -\frac{U_D}{j\omega C} + U_0 \left( R + \frac{1}{j\omega C} \right). \end{aligned}$$

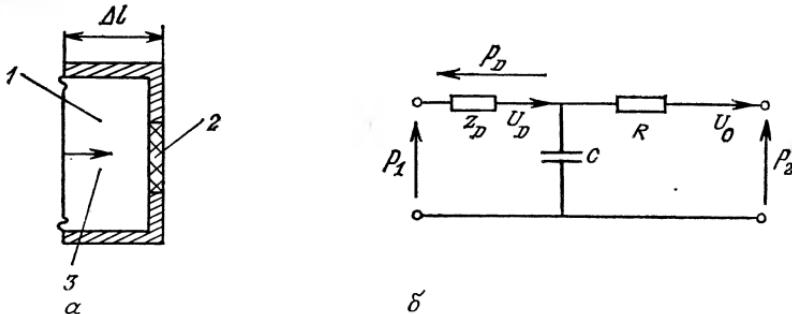


Рис. 15.9. Микрофон, чувствительный как к давлению, так и к градиенту давления.  
а — конструктивная схема; б — эквивалентная электрическая схема. 1 — полость;  
2 — сопротивление; 3 — механическая связь с преобразователем.

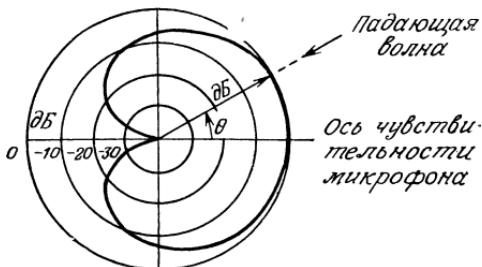


Рис. 15.10. Диаграмма направленности микрофона, чувствительного и к давлению, и к градиенту давления.

Из трех вышеприведенных уравнений следует выражение для силы  $f_D$ , действующей на диафрагму:

$$f_D = p_D A = AU_D Z_N = p_1 A \frac{Z_D [R + (\Delta l \cos \theta / c_0 C)]}{Z_D R - j[(R + Z_D)/\omega C]}.$$

При условии  $R \ll Z_D$  это выражение упрощается до

$$f_D \simeq p_1 A \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} (1 + B \cos \theta),$$

где  $B = \Delta l / c_0 R C$ , что позволяет рассматривать описанные выше типы микрофонов как частные случаи:

а) при  $B \approx 0$  либо достаточно большом  $R$  получаем случай микрофона, чувствительного к давлению;

б) при  $B \gg 1$  либо достаточно малом  $R$  получаем случай микрофона, чувствительного к градиенту давления.

Заметим, что условие  $B \gg 1$  влечет за собой  $RC\omega \ll 1$ , откуда  $\omega \Delta l / c_0 < 1$ . Последнее является допущением о возможности приближенного описания разности давлений с помощью формулы градиента. Случай  $B = 1$  приводит к диаграмме направленности в виде кардиоиды, встречающейся довольно часто (рис. 15.10).

### 15.3.6. Основные схемы микрофона в зависимости от направленности

Микрофон, чувствительный к давлению, как было показано, в отсутствие эффектов дифракции является однородным. Кроме того, на его диафрагму действует сила, не зависящая от частоты. Поэтому его можно считать механоэлектрическим преобразователем, выходной сигнал которого пропорционален приложенной силе. Так дело обстоит в случае конденсаторного микрофона, в котором в качестве обкладки используется мембрана при частотах ниже ее резонансной частоты (являющихся мерой деформации мембранны).

Напротив, в направленном микрофоне, функционирование которого основано на чувствительности к давлению (либо к градиенту и давлению), действующая на диафрагму сила пропорциональна частоте:  $f_D \sim \omega r_1$ , откуда  $RC\omega \gg 1$ . Эта зависимость требует компенсации. Поэтому направленные микрофоны обычно являются электродинамическими; в них на мембрану подается возбуждение с частотой выше резонансной, а измеряется скорость смещения мембранны.

## 15.4. Конденсаторные микрофоны

### 15.4.1. Принцип действия и классификация конденсаторных микрофонов

Среди всех типов микрофонов, используемых в настоящее время, микрофоны на основе конденсаторов считаются наиболее перспективными. На рис. 15.11 представлена принципиальная схема конденсаторного микрофона. Измеряемое давление воздействует на гибкую и тонкую (толщиной  $10 \div 20 \text{ мкм}$ ) диафрагму, играющую роль подвижной обкладки в датчике смещения емкостного типа. Другая обкладка фиксирована и имеет отверстия для демпфирования: при движении диафрагмы воздух протекает через эти отверстия, происходит вязкостная диссиpация энергии. Это демпфирование используется для контроля резонансной амплитуды диафрагмы и позволяет скорректировать высокочастотную часть характеристики преобразования в соответствии с объектом измерений (давление, свободное поле, диффузное поле или падение под случайным углом, разд. 15.2.2).

Как было показано в разд. 15.3.3, капиллярный канал позволяет уравнять среднее давление по обе стороны мембранны. Он определяет низкочастотный отклик и обеспечивает защиту по отношению к колебаниям атмосферного давления.

В зависимости от типа мембранны различают три типа емкостных микрофонов: измерительные микрофоны с использованием внешнего напряжения питания, измерительные электретные микрофоны и бытовые электретные микрофоны.

В первых двух типах микрофонов используются пред-

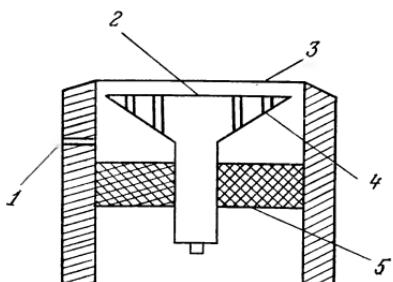


Рис. 15.11. Конструктивная схема микрофона на основе конденсатора.

1 — капиллярный канал; 2 — фиксированная обкладка; 3 — диафрагма; 4 — демпфирующие отверстия; 5 — изолятатор.

варительно напряженные металлические мембранны, а в третьем—мембранны из предварительно поляризованной пластмассы. В микрофоне второго типа электретная мембрана плотно прилегает к фиксированной обкладке и не играет никакой механической роли. Значительное различие между измерительными и бытовыми микрофонами состоит, следовательно, в природе силы, действующей на мембрану: акустическое усилие в случае металлических мембранны и изменение объема воздуха за пластмассовой мембраной. Заметим, что в настоящее время изготовление пластмассовых мембранны, которые сохраняли бы механическое напряжение в течение длительного времени, представляют значительную сложность. Таким образом, микрофоны с пластмассовой мембраной являются обычными микрофонами с более узкой частотной полосой пропускания, чем у микрофонов с металлической мембраной.

#### 15.4.2. Измерительные микрофоны с внешним источником питания

**Функционирование при постоянном заряде.** Электрическая схема, эквивалентная системе микрофон с внешним источником питания—предусилитель, показана на рис. 15.12. Использованы следующие обозначения:  $C_m$ —емкость головки микрофона,  $V_0$ —внешнее напряжение питания,  $R_0$ —сопротивление, включенное последовательно в цепь питания,  $C_c$ —емкость соединения,  $R_i$  и  $C_i$ —входные активное и реактивное сопротивления предуслителя,  $v_0$ —переменное напряжение на клеммах микрофона,  $v$ —переменное напряжение на входе усилителя.

Обозначим  $R_T = R_0/R_i$  и  $C_T = C_m + C_c + C_i$ . Обычно применяют такие схемы, чтобы постоянная времени  $R_T C_T$  была большой по сравнению с периодом изменения звукового давления; система функционирует, следовательно, при постоянном заряде. Получаем, таким образом:

$$\frac{v_0}{V_0} = -\frac{\Delta C_m}{C_T}, \quad [\text{или}] \quad v = -\frac{\Delta C_m}{C_T} V_0 \frac{j\omega R_T C_m}{1 + j\omega R_T C_T}.$$

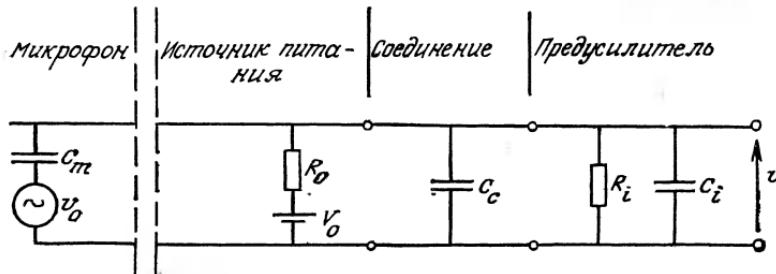


Рис. 15.12. Электрическая схема микрофонного аппарата.

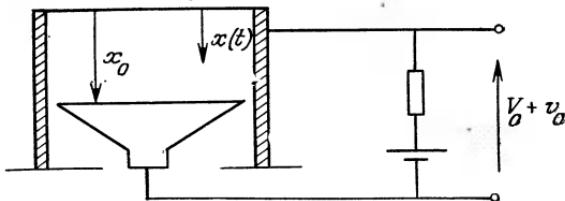


Рис. 15.13. Связь электрических и механических параметров конденсаторного микрофона.

Из условия  $\omega R_c C_T \gg 1$  следует

$$v = -\frac{\Delta C_m}{C_T} V_0 - \frac{C_m}{C_T}.$$

Отсюда видна выгода максимально приблизить  $C_T$  и  $C_m$ , что осуществляется путем монтажа головки микрофона прямо на предусилителе. Далее предположим, что заряд постоянен и  $C_T \approx C_m$ . Для более глубокого изучения низкочастотных характеристик микрофона рекомендуется ознакомиться с монографией [4].

**Эквивалентная электрическая схема головки микрофона.** Определим соотношения, устанавливающие связь электрических и механических параметров в конденсаторе (рис. 15.13). Заряд плоского конденсатора  $Q$ , на который подается разность потенциалов  $V_0$ , определяется выражением

$$Q = \epsilon_0 A V_0 / x_0,$$

где  $x_0$  — расстояние между обкладками в состоянии покоя. Пусть  $x(t)$  — малое смещение мембранны с постоянным зарядом, а  $v_0$  — соответствующее ему изменение напряжения:

$$-x(t)/x_0 \approx v_0/V_0.$$

Для устойчивого синусоидального режима получаем

$$j\omega x = u \quad \text{и} \quad v_0 = -\frac{V_0}{j\omega x_0} u,$$

т. е. выражения, в которых  $x$ ,  $u$  и  $v_0$  являются комплексными величинами.

Восстанавливающую силу мембранны можно рассчитать, исходя из ее потенциальной энергии  $W$ , являющейся суммой электростатической энергии

$$W_1 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_m} = \frac{1}{2} \frac{Q^2 [x_0 - x(t)]}{\epsilon_0 A}$$

и упругой энергии

$$W_2 = \frac{1}{2} kx^2(t) = \frac{1}{2} \frac{A^2}{C_D} x^2(t),$$

где  $k$  — жесткость мембранны, а  $C_D$  — ее акустическая емкость (табл. 15.1). Отсюда получаем

$$-\frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\epsilon_0 A} - \frac{A^2}{C_D} x(t) = f_1 + f_2(t),$$

где  $f_2(t)$  — восстанавливающая упругая сила, противодействующая силе давления. Эта упругая сила и давление выражаются следующим образом:

$$f_2 = -\frac{u}{j\omega} \frac{A^2}{C_D} \quad \text{и} \quad p = \frac{u}{j\omega} \frac{A}{C_D} = -\frac{Ax_0}{C_D V_0} v_0.$$

Связь между давлением  $p$  и напряжением  $v_0$  на обкладках конденсатора иллюстрируется эквивалентной схемой, представленной на рис. 15.14.

Рассмотрим теперь микрофон в целом, без учета пропускания воздуха через капилляр, которое исследовалось в разд. 15.3.3. Следует учитывать инерцию мембранны  $M_A$  и ее импеданс, обусловленный излучением  $M_D$ , истечением воздуха через отверстия в фиксированной обкладке ( $M_s + R_s$ ) и заднюю полость ( $C_2$ ). Общая эквивалентная электрическая схема приведена на рис. 15.15, а. Помимо объяснения связи электрических и механических параметров, приведенного ранее, отметим на этой схеме:

- акустическую массу диафрагмы  $M_A + M_D$  (эффективная масса + кажущаяся масса излучения), через которую проходит такой же ток  $uA = U_D$ , что и через емкость  $C_D$  диафрагмы ( $M_A$ ,  $M_D$  и  $C_D$  соединены, таким образом, последовательно);

- акустическую массу  $M_s$ , сопротивление  $R_s$ , соответствующее отверстиям в задней обкладке, через которые проходит такой же ток, что и через заднюю полость с емкостью  $C_2$  (т. е.  $C_2$ ,  $M_s$  и  $R_s$  также соединены последовательно);

- наличие узла  $N$ , обусловленное тем, что объем воздуха позади диафрагмы ( $C_1$ ) поддерживается поочередно смещением диафрагмы (ток  $uA$ ) и током, поступающим от задней полости ( $C_2$ ).

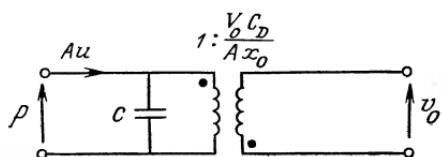


Рис. 15.14. Эквивалентная электрическая схема, иллюстрирующая связь электрических и механических параметров емкостного преобразователя.

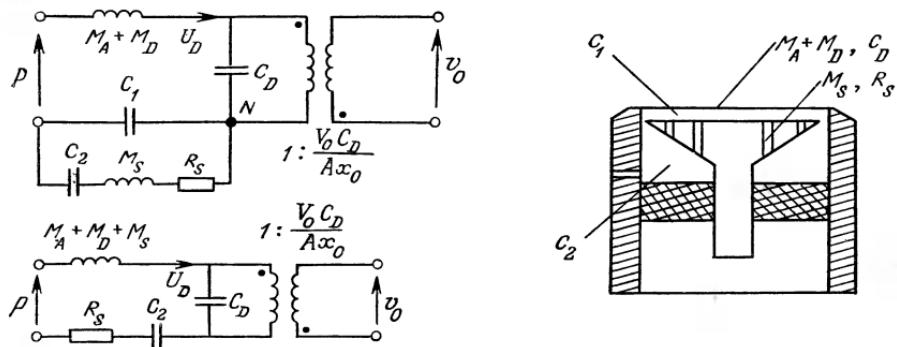


Рис. 15.15. Конденсаторный микрофонный аппарат и его эквивалентная электрическая схема.

**Частотная характеристика конденсаторного микрофона.** Если исключить из рассмотрения очень низкие частоты, то поведение конденсаторного микрофона характеризуется прежде всего резонансом системы напряженная мембрана — задняя полость (объем воздуха позади мембранны мал). Эквивалентная электрическая схема при этом упрощается до последовательной резонансной схемы, представленной на рис. 15.15, б.

С использованием упрощенных обозначений

$$M = M_A + M_D + M_s, \quad C = C_2 C_D / (C_2 + C_D)$$

уравнение для тока  $Au = U_D$  принимает вид

$$Mj\omega u + Ru + u / (j\omega C) = p/A.$$

Отметим, что для микрофонов с сильно напряженной металлической мембраной  $C \approx C_D$ , и выходное напряжение определяется выражением

$$v_0 = \frac{p}{\sqrt{\omega^2 R^2 + (\omega^2 r - \omega^2)^2 M^2}} \frac{V_0}{A x_0}, \quad \text{где } \omega^2 r = 1/MC.$$

В зависимости от величины  $\omega$  на частотной характеристике можно выделить следующие области (рис. 15.16):

— при частоте ниже резонансной,  $\omega \ll \omega_r$ ,

$$v_0 \approx p (CV_0 / Ax_0)$$

и сигнал не зависит от  $\omega$  (зона II);

— при резонансной частоте,  $\omega = \omega_r$ ,

$$v_0 = p \frac{CV_0}{Ax_0} \frac{1}{R\omega_r} \quad (\text{зона III});$$

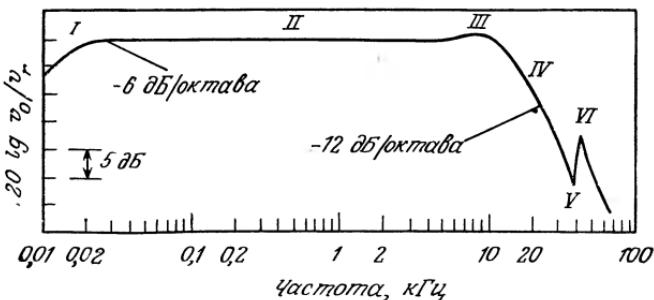


Рис. 15.16. Частотная характеристика конденсаторного микрофона.

— при частоте выше резонансной,  $\omega > \omega_r$ ,

$$v_0 \approx p \frac{V_0}{Ax_0 M \omega^2}$$

и сигнал ослабляется на 12 дБ/октава (зона IV).

При более высоких частотах теоретически должен существовать антирезонанс параллельного контура, включающего  $M_s$  и  $C_1$  (область V), и, кроме того, резонанс последовательного контура, образуемого  $M_A + M_D$  и емкостями  $C_D$  и  $C_1$ , т. е. второй резонанс микрофона, создаваемый мембранный и полостью, расположенной позади диафрагмы (зона VI). В реальных микрофонах эффекты дифракции играют доминирующую роль.

При очень низких частотах ( $f \ll 1/2\pi R C_T$ ) к влиянию капиллярного канала (ослабление 6 дБ/октава, зона I,  $f \ll 1/2\pi R C_2$ ) может добавляться электронный эффект, вызванный непостоянством заряда. Подобный эффект, описанный Дёбелином, проявлялся в дополнительном ослаблении сигнала 6 дБ/октава.

#### 15.4.3. Электретные микрофоны

**Физика электрета. Типы микрофонов.** Электретами называют диэлектрики с постоянной поляризацией. Поэтому их можно использовать в конденсаторных микрофонах для создания электрического поля без внешнего источника напряжения. Можно выделить два типа распределения заряда, приводящие к электретному эффекту: дипольные заряды, образуемые некоторыми молекулами, которым придана предпочтительная ориентация в каком-либо направлении, и слои с пространственным зарядом, внедренные, а затем зафиксированные в телах с очень низкой проводимостью. Относительная величина этих распределений и их стабильность зависят от материала и способа изготовления электрета.

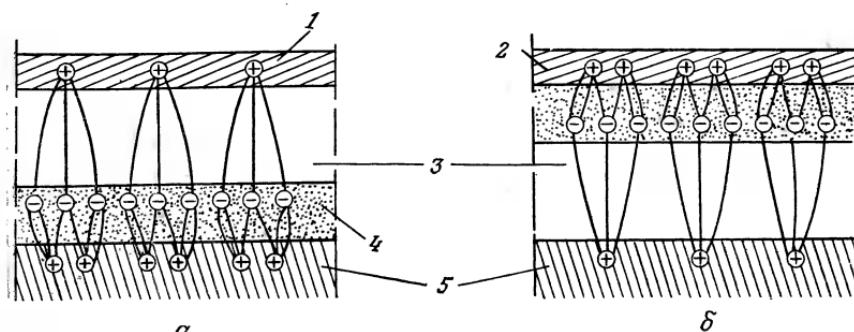


Рис. 15.17. Распределение зарядов в электретном микрофоне.

**α** — измерительный микрофон; **δ** — бытовой микрофон. **1** — металлическая диафрагма; **2** — лист металлизированного электрета; **3** — воздушный зазор; **4** — электрет; **5** — задняя обкладка.

В конструкциях микрофонов используется электрет в виде тонкого листа. Прекрасно подходят для этой цели материалы с хорошими изолирующими свойствами — галогенуглеродные и, в частности, фторуглеродные (тефлон) полимеры. Перед заряжением лист полимера либо металлизируют с одной стороны, либо скрепляют с металлическим электродом. Затем производится инъектирование электронного слоя с использованием коронного разряда или, что более предпочтительно, путем бомбардировки электронами с контролируемой энергией. Если такой лист электрета поместить затем рядом с металлической обкладкой, то в результате происходит разделение зарядов, подобное представленному на рис. 15.17. Показанные на рисунке два случая соответствуют классификации электретных микрофонов, приведенной в разд. 15.4.1: измерительные микрофоны, в которых диафрагма, испытывающая давление, изготавливается из металла либо лист электрета приклеивается к внутренней обкладке, и бытовые микрофоны, в которых электретный лист металлизирован и сам играет роль диафрагмы.

**Срок службы электретов.** Срок службы электретов может быть очень большим, поскольку локализованные заряды могут смещаться только при активации энергией, пороговое значение которой тем выше, чем меньше плотность постоянных свободных зарядов. Поэтому обычно выбирается компромисс между создаваемой плотностью зарядов (и, следовательно, чувствительностью микрофона) и сроком службы электрета. С этой целью электреты подвергают циклу термического старения. На рис. 15.18 графически представлена минимальная продолжительность службы электретного микрофона на основе тефлоновой мембранны, заряженной до  $20 \text{ нКл}/\text{см}^2$ , полученная путем изучения старения при температурах  $80 \div 200^\circ\text{C}$ . Следует отме-

тить, что если вместо тefлона используется майлар (полиэфир), то продолжительность службы уменьшается примерно в 50 раз.

Хорошие результаты, полученные при эксплуатации в течение 10 лет при  $50^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 95%, позволяют применять электретные микрофоны в «тропической» атмосфере. При использовании металлических диафрагм преимущество электретных микрофонов заключается в возможности подавления фоновых шумов, связанных, с одной стороны, с потерями в цепях под действием влажности и, с другой стороны, с необходимостью использования в обычных конденсаторных микрофонах высокого напряжения (200 В). Дополнительным преимуществом диафрагм из пластмассы является их коррозионная стойкость.

**Эквивалентное напряжение внешнего источника.** Единственное различие между двумя типами электретных микрофонов (измерительные и бытовые) с точки зрения электрической схемы состоит в противоположных ролях обкладок и, следовательно, в знаке напряжения. Ограничимся поэтому рассмотрением только измерительного микрофона, представленного схематически на рис. 15.19.

Лист электрета толщиной  $x_1$  ( $15 \div 25$  мкм) с относительной проницаемостью  $\epsilon_1$  отделен от диафрагмы слоем воздуха толщиной  $x_0$  ( $10 \div 30$  мкм) и несет на внешней стороне заряд с

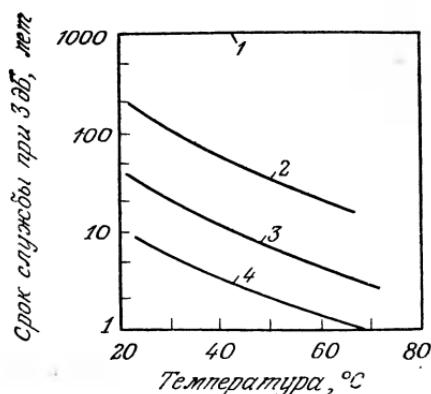


Рис. 15.18. Влияние температуры и влажности на срок службы электретного микрофона.

1 — тefлоновая мембрана; 2 — сухой воздух; 3 — относительная влажность воздуха 95%; 4 — относительная влажность воздуха 99%.

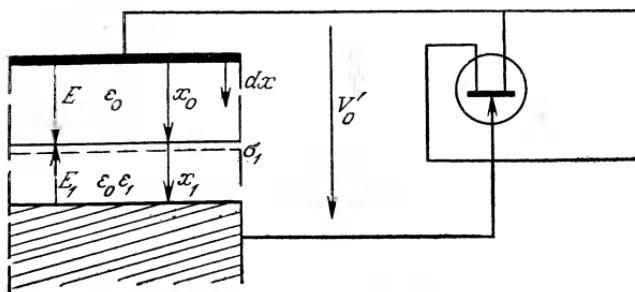


Рис. 15.19. Электрические поля в измерительном электретном микрофоне.

плотностью  $\sigma_1$ ; пусть  $E_1$  — напряженность поля внутри элек-тreta.

Обозначая через  $E$  напряженность электрического поля в воздухе, запишем уравнение теоремы Гаусса применительно к границе раздела воздух — диэлектрик:

$$-E - \epsilon_1 E_1 = \sigma_1 / \epsilon_0.$$

Напряжение  $V'_0$  между обкладками связано с напряженностя-ми  $E_1$  и  $E$  соотношением

$$V'_0 = +x_1 E_1 - x_0 E.$$

Комбинируя эти два уравнения, получим выражение для  $E$ :

$$E = -\frac{\sigma_1 x_1 / \epsilon_0 + \epsilon_1 V'_0}{x_1 + \epsilon_1 x_0} \approx -\frac{-\sigma_1 x_1}{\epsilon_0 (x_1 + \epsilon_1 x_0)}.$$

Величина  $V'_0$  мала по сравнению с отношением  $\sigma_1 x_1 / \epsilon_0 \epsilon_1$ , сос-тавляющим от 50 до 200 В. Для создания такого же электри-ческого поля в микрофоне с внешним источником потребова-лось бы напряжение  $V_0$ :

$$V_0 = -x_0 E = -\frac{\sigma_1 x_1 x_0}{\epsilon_0 (x_1 + \epsilon_1 x_0)}.$$

**Частотная характеристика.** Предположим, что, как и в слу-чае измерительных микрофонов с внешним источником питания (разд. 15.4.2), заряд на внешних обкладках остается постоян-ным для самых малых измеряемых частот. Следовательно, электрические поля не изменяются под действием давления, а меняется только  $x_0$  и, исходя из изложенного выше, можно за-писать:

$$dV_0 = -E dx \approx -\frac{\sigma_1 x_1}{\epsilon_0} \frac{dx}{x_1 + \epsilon_1 x_0}.$$

Если заряд  $\sigma_1$  образован электронами, то  $dV_0$  и  $dx$  имеют один знак.

Для микрофона с внешним питанием  $\sigma_1 = 0$ ,  $x_1 = 0$  и

$$dV_0 = -E dx = -(V_0/x_0) dx.$$

В этом случае, если напряжение питания положительно, то  $dV_0$  и  $dx$  имеют противоположные знаки. Измерительные элек-третные микрофоны дают, таким образом, сигнал в одной фазе с давлением, тогда как микрофоны классических типов и быто-вые электретные микрофоны дают сигнал в противоположной с давлением фазе.

Если вновь обратиться к эквивалентной электрической схе-ме головки микрофона, можно констатировать, что единствен-ное различие между электретным и конденсаторным микрофо-

нами заключается в связи электрических и механических параметров (разд. 15.4.2). В самом деле, видно, что член  $V_0/x_0$  в выражении для коэффициента преобразования этой связи следует заменить на  $\sigma_1 x_1 / [\epsilon_0 (x_1 + \epsilon_1 x_0)]$ ; при частотах больше или меньше резонансной получаем эквивалентную электрическую схему, представленную на рис. 15.20.

Подставляя, как в разд. 15.4.2, выражения  $M = M_A + M_D + M_s$  и  $C = C_2 C_D / (C_2 + C_D)$ , получаем в области, где частотная характеристика является равномерной, следующее выражение для чувствительности:

$$S = \frac{e}{p} = \frac{C}{A} \frac{\sigma_1 x_1}{\epsilon_0 (x_1 + \epsilon_1 x_0)}.$$

Круговая частота резонанса не изменяется и имеет вид

$$\omega_r = 1/\sqrt{MC}.$$

Пусть напряжение диафрагмы равно  $T$ ; тогда получаем  $C_D = A^2/k = A^2/8\pi T$ , и значение  $C_2$  определяется объемом задней полости в соответствии с выражением

$$C_2 = s_0 A / \gamma P_0,$$

где  $s_0$  обозначает эквивалентную толщину этой полости. Для микрофонов с металлической диафрагмой имеем  $C_D \ll C_2$ , так что  $C \approx C_D$ . Таким образом, для чувствительности  $S$  и резонансной круговой частоты  $\omega_r$  получаем следующие выражения:

$$S \approx \frac{\sigma_1 x_1}{\epsilon_0 (x_1 + \epsilon_1 x_0)} \frac{A}{8\pi T},$$

$$\omega_r \approx \frac{1}{A} \sqrt{8\pi T/M}.$$

**Сопоставление различных микрофонов с внешним источником питания и электретных микрофонов.** Как указывалось выше, можно изготовить электретные микрофоны, близкие по характеристикам (чувствительность, полоса пропускания и т. п.) микрофонам с металлической мембраной и внешним источником питания. Для этого достаточно использовать слой электрета, дающий такое же электрическое поле, что и внешнее напряжение  $V_0$ , т. е.:

$$V_0 = \frac{\sigma_1 x_1}{\epsilon_0} \frac{x_0}{x_1 + \epsilon_1 x_0}.$$

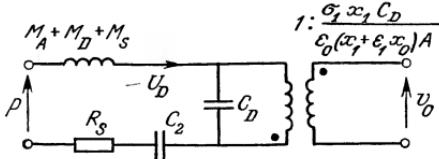


Рис. 15.20. Упрощенная эквивалентная электрическая схема электретного микрофона.

Так, например, напряжение, эквивалентное 200 В, достигается при  $\sigma_1 = 2 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $x_1 = 30$  мкм,  $x_0 = 25$  мкм,  $\epsilon_1 \approx 2$ .

Это подтверждается путем сравнения двух микрофонов одного диаметра (1/2 дюйма) с одинаковыми металлическими мембранными. Сравнение микрофона ВК 4165 с внешним источником питания (200 В) и электретного микрофона ВК 4155 с таким же эквивалентным напряжением показывает, что их характеристики близки: чувствительности равны и составляют 50 мВ/Па, а частотная характеристика, типичная для свободного поля, простирается вплоть до 20 кГц ( $\pm 2$  дБ) при нулевом угле падения. Некоторые различия наблюдаются лишь в отношении фоновых шумов в зависимостях чувствительности от температуры.

Как видно из рис. 15.21, фоновые шумы, связанные с движениями мембранны под влиянием тепловых эффектов, доминируют при частотах выше 300 Гц. При низких частотах доминирующими являются шумы предусилителя, имеющего высокий входной импеданс. Небольшое различие в емкостях электретного микрофона (15 пФ) и микрофона с внешним источником питания (19 пФ) практически не ощущается. Основной фоновый шум составляет 16 дБ·А (измерения проводятся при нормировании площадью А).

Зависимость чувствительности от температуры связана главным образом с увеличением напряжения диафрагмы в случае микрофона с внешним источником питания. Этот эффект меньше в случае электретного микрофона вследствие расширения электретного слоя, вызывающего уменьшение толщины воздушной прослойки и повышение эквивалентного напряжения  $V_0$ . Зависимость чувствительности от температуры составляет примерно 0,015 дБ/К у микрофонов с внешним питанием и около 0,01 дБ/К у измерительных электретных микрофонов (рис. 15.22). Из графиков этого рисунка видно также, что у

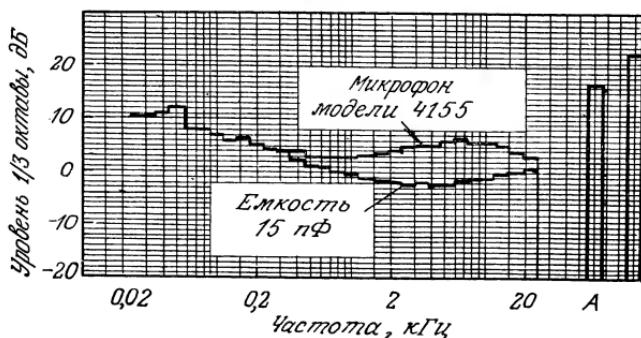


Рис. 15.21. Фоновый сигнал измерительного электретного микрофона (данные фирмы Brüel & Kjaer).

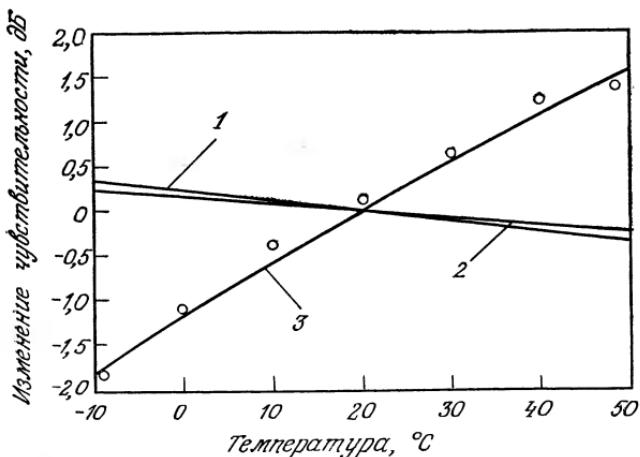


Рис. 15.22. Изменение чувствительности с температурой для микрофонов различных типов диаметром 1/2дюйма (данные фирмы Brüel & Kjaer).  
 1 — микрофон с внешним питанием типа ВК 4165; 2 — электретный микрофон типа ВК 4155; 3 — электретный микрофон с пластмассовой мембраной.

бытового микрофона с пластмассовой мембраной температурная зависимость чувствительности значительно больше и составляет 0,06 дБ/К.

При сопоставлении различных измерительных микрофонов между собой следует учитывать, что в соответствии с формулами, приведенными в разд. 15.4.3, чувствительность обратно пропорциональна напряжению диафрагмы, а резонансная частота пропорциональна корню квадратному из этого напряжения. Следует, однако, отметить, что увеличение полосы пропускания сопровождается снижением чувствительности (эта взаимосвязь иллюстрируется сопоставлением характеристик двух 1/2-дюймовых микрофонов моделей 4165 и 4133 (фирмы Brüel & Kjaer) со свободным полем, табл. 15.2). Кроме того, лучшая чувствительность микрофона LEA 71L по сравнению с микрофоном ВК 4133 объясняется, несомненно, большим затуханием  $R_s$  и

Таблица 15.2. Сравнительные характеристики измерительных конденсаторных микрофонов

Фирма-разработчик	Модель	Частотный диапазон ( $\pm 2$ дБ)	Чувствительность	Емкость
Brüel & Kjaer	4165	3 Гц ÷ 20 кГц	50 мВ/Па	19 пФ
Brüel & Kjaer	4133	4 Гц ÷ 40 кГц	12,5 мВ/Па	18 пФ
LEA	71	5 Гц ÷ 40 кГц	35 мВ/Па	18 пФ

более высокой акустической упругостью  $C_2$ , если не используется более тонкая мембрана.

**Бытовые электретные микрофоны.** Как указывалось выше в этом разделе, мембрana таких микрофонов представляет собой лист тефлона, металлизированного с внешней стороны. Тефлон не выдерживает высоких механических напряжений; обычно принимается  $T \approx 10$  Н/м, так что

$$C_2 = \frac{s_0 A}{\gamma P_0} \ll C_D = \frac{A^2}{8\pi T}.$$

Чувствительность этих микрофонов описывается выражением

$$S = \frac{C_2}{A} \frac{\sigma_1 x_1}{\varepsilon_0 (x_1 + \varepsilon_1 x_0)} = \frac{\sigma_1 x_1 s_0}{\varepsilon_0 (x_1 + \varepsilon_1 x_0) \gamma P_0},$$

т. е. она не зависит от площади поверхности  $A$  микрофона. Принимая численные значения  $\sigma_1 = 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $x_1 = 10$  мкм,  $s_0 = 1$  мм,  $x_0 = 20$  мкм,  $\varepsilon_1 = 3$ , получаем  $S = 11,5$  мВ/Па, или  $-39$  дБ/В/Па.

Резонансная частота такого микрофона  $\omega_r / 2\pi \approx (1/2\pi)\sqrt{\gamma P_0 A / s_0 m}$  составляет примерно 13 кГц при  $m/A = 2 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>2</sup>. Микрофоны этого типа обычно используют в переносных аппаратах. Например, микрофон Mitsubishi-064 принадлежит к этому типу; в его цилиндрическом корпусе диаметром 6 мм и высотой 7 мм размещен полевой транзистор, обеспечивающий согласование импеданса. Фоновый шум, вызванный наличием этого транзистора, достигает примерно 30 дБ·А.

Фоновый шум можно снизить, используя большие поверхности (15 дБ·А при диаметре 1 см). Полосу пропускания можно также расширить, используя заднюю полость в качестве резонатора. Так, для микрофона Neutrik 3281, размещенного в цилиндре диаметром 12 мм, равномерная частотная характеристика в свободном поле (с точностью  $\pm 2$  дБ) простирается вплоть до 20 кГц при чувствительности 10 мВ/Па и уровне шумов 27 дБ·А.

Цан предложил усовершенствование, состоящее в размещении электретного слоя на заднем электроде и использовании мембрana из майлара: благодаря своим высоким механическим свойствам она может выдерживать напряжение до 500 Н/м. Чувствительность такого микрофона определяется выражением

$$S = \frac{A}{8\pi T} \frac{\sigma_1 x_1}{\varepsilon_0 (x_1 + \varepsilon_1 x_0)}.$$

Принимая численные значения  $\sigma_1 = 1,6 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>,  $x_1 = 20$  мкм,  $x_0 = 12$  мкм,  $\varepsilon_1 = 2$ ,  $A = \pi r^2$  при  $r = 3$  мм, получаем  $S = 11$  мВ/Па.

Резонансная частота приближенно определяется формулой:

$$\omega_r/2\pi \approx (1/2\pi) \sqrt{8\pi T/m},$$

т. е.  $\omega_r \approx 24$  кГц при  $m/A = 2 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>2</sup>. Полоса пропускания в этом случае вдвое шире, чем у микрофонов с тефлоновой мембраной.

Представленные выше результаты демонстрируют преимущества бытовых микрофонов, когда нет необходимости в получении абсолютных показаний. Действительно, один из основных недостатков бытовых микрофонов заключается в их чувствительности к изменению температуры (см. выше). Напротив, их чувствительность к вибрациям и влажности мала; кроме того, благодаря использованию в них полевых транзисторов они просты в обращении.

## 15.5. Электродинамические микрофоны

### 15.5.1. Принцип действия

В электродинамических микрофонах движение диафрагмы преобразуется в электрический сигнал в результате перемещения в магнитном поле проводника, скрепленного с этой диафрагмой. Возникающая при этом э.д.с. равна (разд. 12.3.1)

$$e = Blu,$$

где  $B$  — магнитная индукция, создаваемая постоянным магнитом,  $l$  — длина проводника и  $u$  — скорость перемещения диафрагмы.

Для описания функционирования этих микрофонов достаточно знать скорость  $u$ , которую можно оценить на основе эквивалентной электрической схемы, построенной с использованием импедансной аналогии, разработанной в разд. 15.3.2.

В зависимости от формы используемого проводника электродинамические микрофоны подразделяются на два основных типа: микрофоны с подвижной катушкой, которые можно отнести скорее к классу микрофонов, чувствительных к давлению, и ленточные микрофоны, которые близки к микрофонам, чувствительным к градиентам давления. Кроме того, в обоих случаях можно построить микрофоны смешанного типа с диаграммой направленности, близкой к кардиоиде. К различиям в диаграммах направленности, упоминавшимся выше (разд. 15.3.5), в случае ленточного микрофона добавляются более низкая чувствительность (малая  $l$ ) и лучшие характеристики преобразования, особенно в области низких частот. В самом деле, для получения равномерной частотной характеристики с использованием микрофона смешанного типа проводник должен

колебаться с частотой выше резонансной (разд. 15.3.6). При использовании ленты резонансная частота находится в интервале  $10 \div 20$  Гц, что позволяет успешно использовать микрофон этого типа, начиная с 50 Гц. У микрофона с подвижной катушкой резонансная частота обычно выше (например, 100 Гц), и для улучшения рабочих характеристик микрофона в области низких частот используют метод создания противодавления с обратной стороны диафрагмы. Функционирование микрофонов с подвижной катушкой, которые получили наиболее широкое распространение, рассматривается более подробно в последующих разделах. С учетом указанных различий ленточный микрофон можно рассматривать в первом приближении как упрощенный вариант микрофона смешанного типа с подвижной катушкой.

### 15.5.2. Электродинамический микрофон с подвижной катушкой, чувствительный к давлению

Такой микрофон схематически представлен на рис. 15.23, а. Помимо диафрагмы с акустической массой  $M_D$ , образующей емкость  $C_D$ , он состоит из сопротивления демпфирования  $R_S$  и трех полостей с емкостями  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , одна из которых ограничивается сеткой микрофона ( $C_1$ ), а другая — диафрагмой ( $C_2$ ). Задняя полость ( $C_3$ ) соединяется с внешней средой посредством трубы уравнивания давления с акустическим сопротивлением  $R_T$  и акустической массой  $M_T$ . Комбинация  $C_3$ ,  $R_T$  и  $M_T$  образует низкочастотный резонатор, тогда как  $C_1$ ,  $R_G$  и  $M_G$  дают высокочастотный резонатор.

Предположим, что ко входу трубы и сетке приложено одинаковое переменное давление  $p$  (разд. 15.3.3). Эквивалентная

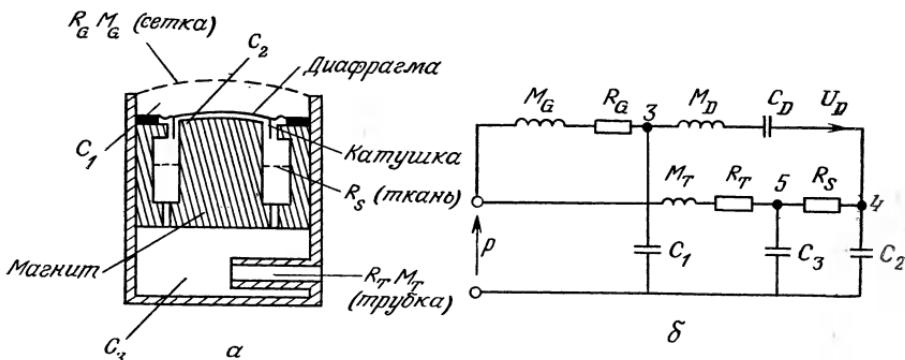


Рис. 15.23. Электродинамический микрофон, чувствительный к давлению. а — конструктивная схема; б — эквивалентная электрическая схема.

электрическая схема (рис. 15.23, б) становится понятной при рассмотрении акустических потоков в трех узловых точках схемы:

а) узел 3 — емкость  $C_1$  позади сетки питается потоком через сетку ( $M_G$ ,  $R_G$ ) и акустическим потоком  $U_D = Au$  на уровне диаграммы ( $M_D$ ,  $C_D$ );

б) узел 4 — емкость  $C_2$  позади диафрагмы питается тем же потоком  $U_D$  и потоком через сопротивление демпфирования  $R_S$ ;

в) узел 5 — емкость  $C_3$  питается потоком через  $R_S$  и потоком через  $R_T$ . Для анализа схемы допустим, что выполняются следующие неравенства:

$$C_3 > C_2 > C_1 \quad \text{и} \quad R_T > R_S \approx R_G.$$

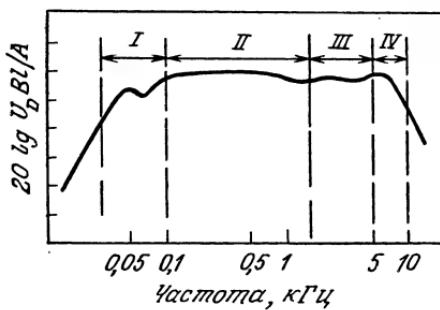
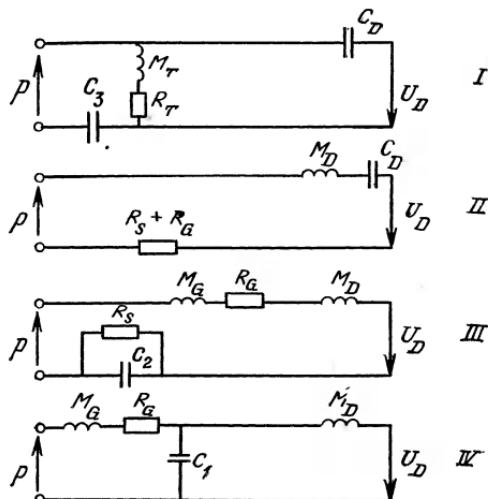


Рис. 15.24. Частотная характеристика электродинамического микрофона, чувствительного к давлению.

Частотную характеристику микрофона можно определить, измеряя ток  $U_D = Au = Ae/B\dot{l}$ , соответствующий акустическому потоку на уровне диафрагмы. Можно выделить на ней четыре области (рис. 15.24).

Область I соответствует резонансу задней полости. Импедансы, соответствующие емкостям  $C_1$  и  $C_2$ , очень велики; изменения давления слишком малы и без резонанса не могут создать разности давлений по разные стороны диафрагмы.

Область II отвечает резонансу диафрагмы, который должен в значительной мере ослабляться сопротивлениями  $R_s$  и  $R_G$ ; емкость  $C_3$  соответствует практически закорачиванию цепи.

Области III и IV отвечают соответственно резонансу воздуха позади диафрагмы и между диафрагмой и сеткой.

Таким образом, оптимальное сочетание различных акустических элементов позволяет расширить полосу пропускания.

### 15.5.3. Электродинамический микрофон с подвижной катушкой, чувствительный и к давлению, и к градиенту давления

Микрофон такого типа представлен схематически на рис. 15.25. Позади диафрагмы расположены две полости с акустическими упругостями  $C_2$  и  $C_3$ , разделенные сеткой ( $M_3, R_3$ ). Звуковое давление передается в область за диафрагмой через зазор и проходы в каркасе магнита, чему противодействует акустический поток с сопротивлением  $R_2$  и массой  $M_2$ . Эквивалентную электрическую схему этого микрофона можно построить, рассматривая узел 3, соответствующий поступлению в полость, расположенную позади диафрагмы, трех потоков: про-

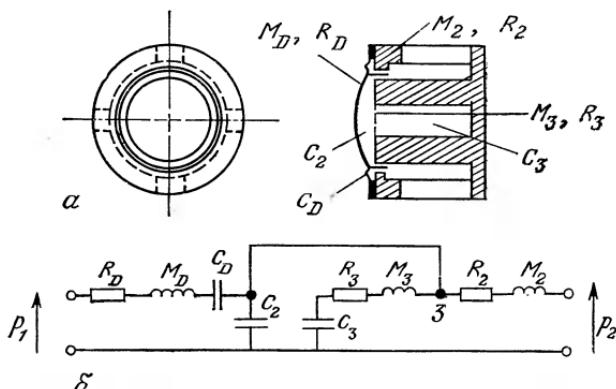


Рис. 15.25. Электродинамический микрофон смешанного типа.  
а — конструктивная схема; б — эквивалентная электрическая схема.

ходящего через сетку ( $M_3, R_3$ ), проходящего через зазор ( $M_2, R_2$ ) и вызванного смещением диафрагмы.

Если обратиться к расчету, проведенному в разд. 15.3.5, то сила  $f_D$ , действующая на диафрагму, запишется в виде

$$f_D = U_D Z_D = p_1 \frac{Z_D (Z_2 + j\omega Z (\Delta l/c_0) \cos \theta)}{Z_D Z_2 + (Z_2 + Z_D) Z},$$

где  $Z_D$  — импеданс диафрагмы, а  $Z$  — импеданс, соответствующий упругой восстанавливающей силе, обусловленной наличием цепи  $R_3, M_3, C_3$ , параллельной емкости  $C_2$ , а  $Z_2$  — импеданс, соответствующий сбросу давления позади диафрагмы.

Учитывая значения, которые эти импедансы принимают на практике, существует полоса частот, где

$$Z_2 \ll Z_D \quad \text{и} \quad Z_2 \ll Z$$

и для которой предыдущее выражение упрощается до

$$U_D \approx p_1 \frac{Z_2}{Z_D Z} \left( 1 + j\omega \frac{Z}{Z_2} \frac{\Delta l}{c_0} \cos \theta \right),$$

откуда можно получить диаграмму направленности, соответствующую микрофону смешанного типа. Кроме того, видно, что коэффициент  $Z_2/Z_D Z$  можно рассматривать как не зависящий от частоты, если  $Z_2$  — сопротивление, а  $Z$  — акустическая упру-

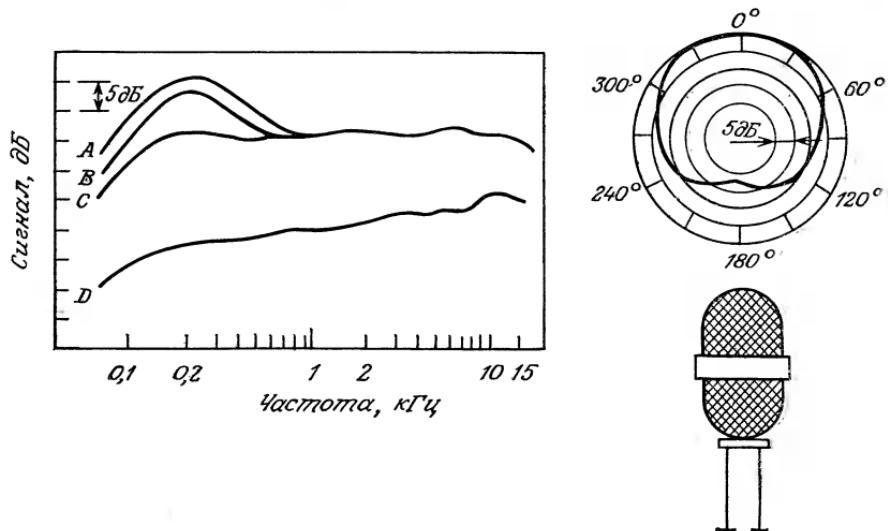


Рис. 15.26. Частотные характеристики электродинамического микрофона смешанного типа (Electro Voice DS 35).

*A* — сигнал вдоль оси микрофона,  $r=6$  мм; *B* — то же,  $r=51$  мм; *C* — то же,  $r=92$  см; *D* — сигнал в противоположном направлении,  $r$  — расстояние от микрофона.

гость или емкость. Для получения равномерной частотной характеристики необходимо, следовательно, чтобы частота колебаний диафрагмы была выше резонансной ( $Z_D \approx jM_D\omega$ ). Задача разработчика, таким образом, состоит в том, чтобы путем подбора различных параметров сделать область пропорциональности максимально широкой по частоте.

На рис. 15.26 показаны характеристики электродинамического микрофона смешанного типа: кардиоидная диаграмма направленности и зависящая от частоты чувствительность в области низких частот (разд. 15.3.4).

В ленточном микрофоне используется плоская лента, расположенная в зазоре U-образного магнита. Без учета дифракции получается практически симметричное воздействие на ленту поля давления, что на эквивалентной электрической схеме проявляется в исчезновении параллельной ветви  $R_3$ ,  $C_3$ ,  $M_3$ . Функционирование ленточного микрофона не отличается, таким образом, принципиально от только что описанного.

## 15.6. Измерение интенсивности

### 15.6.1. Принцип измерения интенсивности звука

Интенсивность звука определяется как осредненное по времени произведение звукового давления на его скорость:

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^{T} p(t) u(t) dt.$$

Для плоских волн или в дальнем поле (разд. 15.1.4) это выражение принимает вид

$$I = \bar{p^2}/\rho_0 c_0.$$

Оно не выполняется, однако, в ближнем поле, где возникают эффекты интерференции.

Перейдем теперь к прямому определению произведения  $p u$ . Поскольку скорость звука непосредственно измерить довольно сложно, для того чтобы связать скорость и градиент давления, используют уравнение динамики

$$\partial u / \partial t = -(1/\rho_0) \operatorname{grad} p.$$

Выражение для интенсивности вдоль направления  $x$  принимает вид

$$I_x = -\frac{1}{\rho_0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^{T} p \int \frac{\partial p}{\partial x} d\tau dt.$$

При практических измерениях используют пару микрофонов, расположенных достаточно близко друг к другу, чтобы получить хорошую оценку градиента давления по конечной разности:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \simeq (p_2 - p_1)/\Delta x,$$

$$p \simeq (p_1 + p_2)/2.$$

### 15.6.2. Точность измерения интенсивности

Ошибку в измерении интенсивности порождают три основные причины:

- приближенное определение градиента;
- различие в характеристиках преобразования двух микрофонов;
- явления дифракции, обусловленные микрофонами и их окружением.

Две последние причины связаны с конструкцией зонда и его использованием; ясно, что если подобрать микрофоны с очень близкими параметрами и установить их так, чтобы эффекты дифракции были минимальны, то искажения характеристики преобразования пары микрофонов можно свести к минимуму.

Первую причину следует рассматривать с учетом природы исследуемого звукового источника. При использовании источника со сферически равномерным распространением сигнала и проведении измерений с помощью двух микрофонов, расположенных по схеме рис. 15.27, получаем

$$p = (a_0/x) e^{j(\omega t - kx)}$$

и, следовательно,

$$I_x = -\frac{1}{2\rho_0} \operatorname{Re} \left( \frac{p_1 + p_2}{2} \frac{1}{j\omega} \frac{(p_2 - p_1)^*}{\Delta x} \right),$$

$$I_x = -\frac{a_0^2}{2x^2\rho_0 c_0} \left[ \frac{\sin k \Delta x}{k \Delta x} \left( 1 - \frac{\Delta x}{x} \right) \right].$$

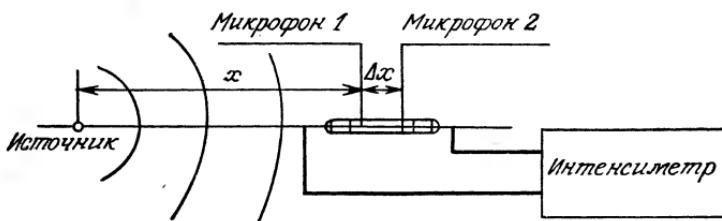


Рис. 15.27. Измерение интенсивности сферического источника (положение датчика).

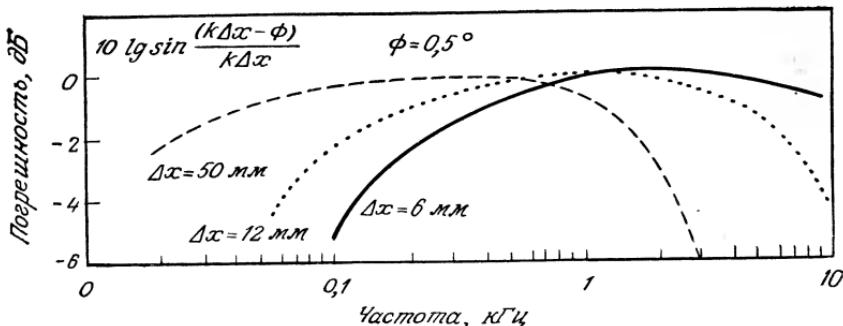


Рис. 15.28. Измерение интенсивности звука: погрешности, обусловленные приближенным определением градиента и различием в ориентации микрофонов  $0,5^\circ$ .

Член в квадратных скобках представляет собой систематическую ошибку, вызванную градиентом; поэтому необходимо, чтобы выполнялись два условия:

1. Дистанция измерений не должна быть слишком малой (должно быть справедливо соотношение  $\Delta x \ll x$ ); это — обычное эксплуатационное требование. На практике, чтобы получить ошибку менее 1 дБ, следует соблюдать соотношение  $\Delta x < 0,4x$ .

2. Член  $\sin k\Delta x/k\Delta x$  должен быть близок к 1. В противном случае необходимо вводить поправку, зависящую от частоты; это условие может быть выполнено разработчиком.

На рис. 15.28 показана ошибка (в дБ), рассчитанная для различных расстояний  $\Delta x$  и разности фаз между микрофонами  $0,5^\circ$ . Отметим, что согласование по фазе играет важную роль лишь в области низких частот, тогда как ошибка, вызванная градиентом, существенна лишь на высоких частотах (большие значения  $k$ ).

### 15.6.3. Использование датчиков интенсивности

Датчик интенсивности можно использовать либо для измерения мощности источника в его реальном окружении, либо для определения поля акустического потока.

Для измерения мощности необходимо рассчитать поток интенсивности, проходящий через поверхность  $\Sigma$ , окружающую исследуемый источник:

$$P = \int_{\Sigma} I_n d\Sigma.$$

Два микрофона, составляющие акустический зонд, должны быть направлены по нормали к исследуемой поверхности.

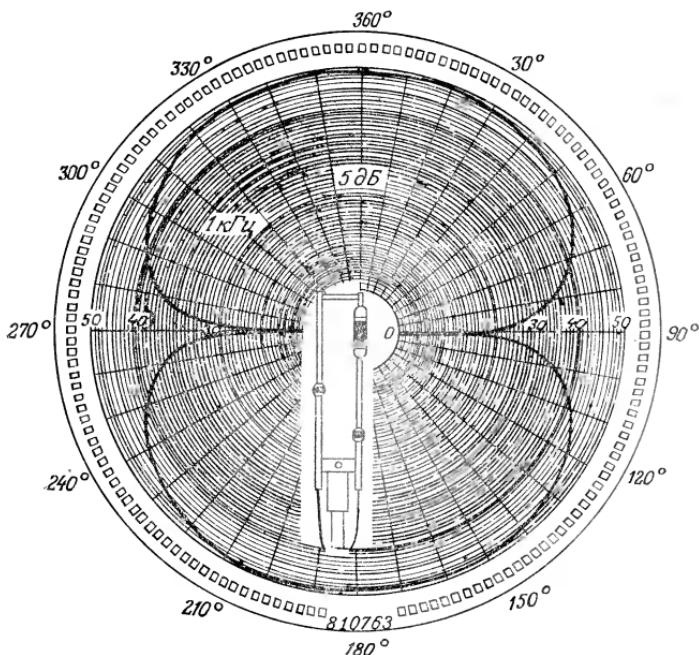


Рис. 15.29. Диаграмма направленности зонда для измерения интенсивности (данные фирмы Brüel & Kjaer).

Для определения акустического поля необходимо найти направление вектора интенсивности в каждой точке поля, что производится путем поворота зонда вокруг его акустического центра. Поскольку этот зонд имеет двухлепестковую диаграмму направленности (рис. 15.29), желательно найти минимумы диаграммы; для этого осуществляют поворот на  $\pi/2$  при соблюдении условия непрерывности знака.

Единицей измерения интенсивности принят Вт/м<sup>2</sup>. На практике для выражения интенсивности используется относительная шкала акустических децибел:

$$10 \lg (I/I_r), \text{ где } I_r = 1 \text{ пВт/м}^2.$$

Это значение  $I_r$  выбрано таким образом, чтобы обеспечивалось согласие между нулем шкалы давлений ( $p_r = 2 \cdot 10^{-5}$  Па) и нулем шкалы интенсивностей для распространения плоской волны. Действительно, для такой волны

$$p_r^2/\rho_0 c_0 = 0,904 \cdot 10^{-12} \approx 10^{-12} \text{ Вт/м}^2.$$

В случае плоской волны показания по шкале децибел, полученные с помощью прибора для измерения интенсивности и микрофона, должны быть одинаковыми.

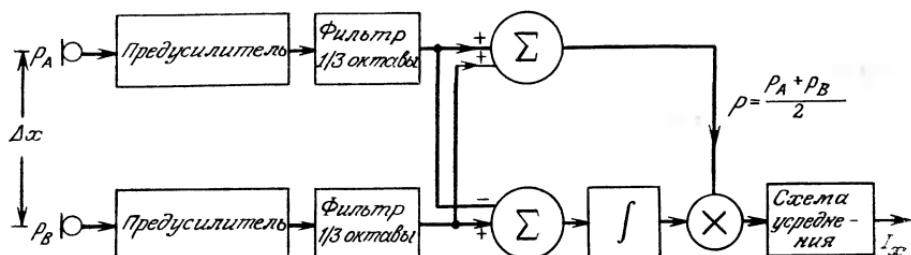


Рис. 15.30. Схемная реализация измерения интенсивности.

#### 15.6.4. Приборы для измерения интенсивности

Принцип измерения интенсивности, описанный в разд. 15.6.1, реализуется в схеме рис. 15.30 (в схеме использованы фильтры на 1/3 октавы, т. е. фильтры, полоса пропускания которых такова, что отношение верхней и нижней граничных частот равно  $2^{1/3}$ ).

В настоящее время используются системы для измерения интенсивности двух типов:

I. Система, принцип действия которой предложен фирмой Metravib; полосы пропускания для различных значений  $\Delta x$  указаны в нижеследующей таблице.

$\Delta x$	15 мм	120 мм
Микрофон WM-064	700÷5700 Гц	80÷700 Гц

II. Система, основанная на цифровом принципе, предложенном фирмой Bgiel & Kjaeg. В приборе для измерения интенсивности модели 3360, разработанном этой фирмой, используются измерительные микрофоны, а полоса пропускания в зависимости от  $\Delta x$  имеет следующие характеристики:

$\Delta x$	6 мм	12 мм	50 мм
Микрофон 1/4"	400 Гц÷10 кГц	200 Гц÷8 кГц	
Микрофон 1/2"		200 Гц÷8 кГц	50 Гц÷2 кГц

Следует подчеркнуть, что эти характеристики относятся к идеальным с точки зрения дифракции условиям.

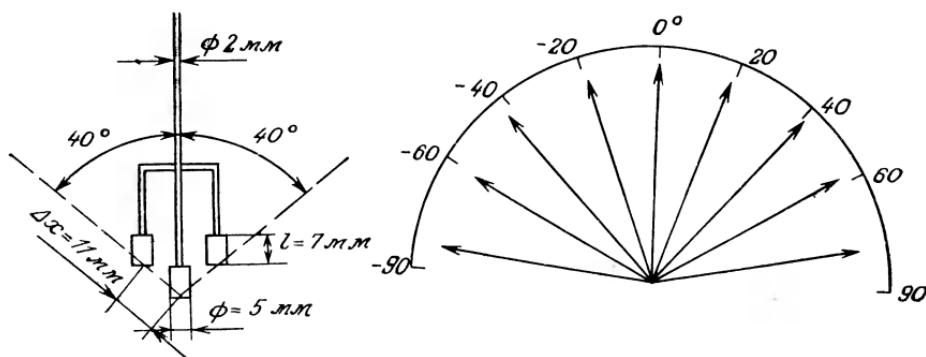


Рис. 15.31. Непосредственное измерение вектора интенсивности.

*a* — конструктивная схема зонда; *б* — диаграмма направленности при частоте 8 кГц (линейная шкала амплитуд).

### 15.6.5. Непосредственное измерение вектора интенсивности

Подобные измерения Жюве производил с помощью зонда на основе трех электретных микрофонов типа WM-064, расстояние между которыми составляло 11 мм. В основу измерений был положен принцип FFT (быстрого преобразования Фурье) в сочетании с микро-ЭВМ. Также были введены поправки на геометрию, характеристики преобразования микрофонов и приближенное определение градиента. Были получены очень хорошая частотная характеристика и диаграмма направленности в секторе  $-60^\circ \div +60^\circ$  для диапазона частот 1÷8 кГц (рис. 15.31). По-видимому, путем расфазировки микрофонов можно получить хорошую характеристику и при более низких частотах. Этот метод позволяет избежать механической ориентации датчика, что сопряжено с внесением возмущений при определении минимумов акустических полей.

## Библиография

### Монографии

1. Beranek L. L., Acoustics, N. Y., McGraw, 1954.
2. Beranek L. L., Acoustic measurements, N. Y., Wiley, 1967.
3. Clifford M., Microphones how they work and how to use them, Blue Ridge Summit, Pa, 1977.
4. Doebelin E. O., Measurement systems, N. Y., McGraw, 1975.
5. Lehmann R., Les transducteurs électro et mécanoacoustiques. Haut parlers et microphones, Chiron, Paris, 1963.
6. Morse P. M., Ingard K. U., Theoretical Acoustics, N. Y., McGraw, 1968.
7. Olson H. F., Acoustical Engineering, Princeton, P. Van Nostrand Company, 1967.

8. Sessler G. M., Electrets. Topics in Applied Physics, vol. 33, Berlin, Springer Verlag, 1980.

#### Периодические издания

9. Frederiksen E., Eirby N., Mathiasen H., Prepolarised condenser microphones for measurement purposes, *Bruël & Kjaer Tech. Rev.*, 4 (1979).
10. Juve D., Esparcieux Ph., Mesure du flux d'énergie acoustique dans le champ proche d'un jet subsonique, *ENROMECH*, 142, Lyon, 1981.
11. Sessler G. M., Electrostatic microphones with electret foil, *J. A. S. A.*, 35, 9, 1354 (1963).
12. Sessler G. M., West J. E., Foil-electret microphones, *J. A. S. A.*, 40, 6, 1483 (1966).
13. Sessler G. M., West J. E., Second-order gradient unidirectional microphones utilising an electret transducer, *J. A. S. A.*, 58, 1, 273 (1975).
14. Zahn R., Analysis of the acoustic response of circular electret condenser microphones, *J. A. S. A.*, 69, 4, 1200 (1981).

#### Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке

- Блинов Л. П., Колесников А. Е., Ланганс Л. Б. Акустические измерения. — М.: 1971.  
 Дольник А. Г., Эфруssi М. М. Микрофоны. — М.: 1967.  
 Римский-Корсаков А. В. Электроакустика. — М.: 1973.  
 Акустические кристаллы. Справочник, под ред. М. Шаскольской. — М.: 1982.

## 16. ДЕТЕКТОРЫ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиоактивные элементы являются источниками ядерного излучения, называемого так, поскольку они испускают атомные ядра. Это излучение, природа которого зависит от его источника, образуется заряженными частицами ( $\alpha$ - $, \beta$ -частицы) или незаряженными (нейтроны,  $\gamma$ -кванты). Взаимодействие ядерного излучения с веществом делает возможным, с одной стороны, его детектирование, а с другой — определение характеристик среды, через которую проходит излучение.

Датчик радиоактивности состоит из источника и соответствующего детектора; размещаемый надлежащим образом объект исследования пропускает (или не пропускает) к детектору определенную часть падающего излучения, величина которой характеризует физические параметры исследуемого вещества: толщину, плотность, уровень заполнения и т. п. (рис. 16.1, *a*, *b*, *v*). Важное достоинство датчиков радиоактивности заключается в том, что они позволяют осуществлять бесконтактные измерения, исследовать объекты, находящиеся в движении (например, прокат), поверхности стенок и объекты, доступ к которым затруднен (вследствие высоких давлений и температур) либо представляет опасность (химически активные едкие жидкости, абразивные материалы).

Радиоактивные элементы используются также в виде радиоактивных индикаторов. Определенное количество радиоактивного вещества вводится в исследуемую среду, а затем с помощью детектора или комплекса детекторов можно проследить за распределением первоначального количества вещества: а) в пространстве (определение утечки); б) во времени (определение износа); в) в пространстве и времени (измерение расхода, разд. 12.4.3).

Важно отметить, что использование радиоактивных веществ, особенно с высокой активностью, налагает строгие требования к безопасности персонала, работающего как непосредственно с источниками, так и вблизи них.

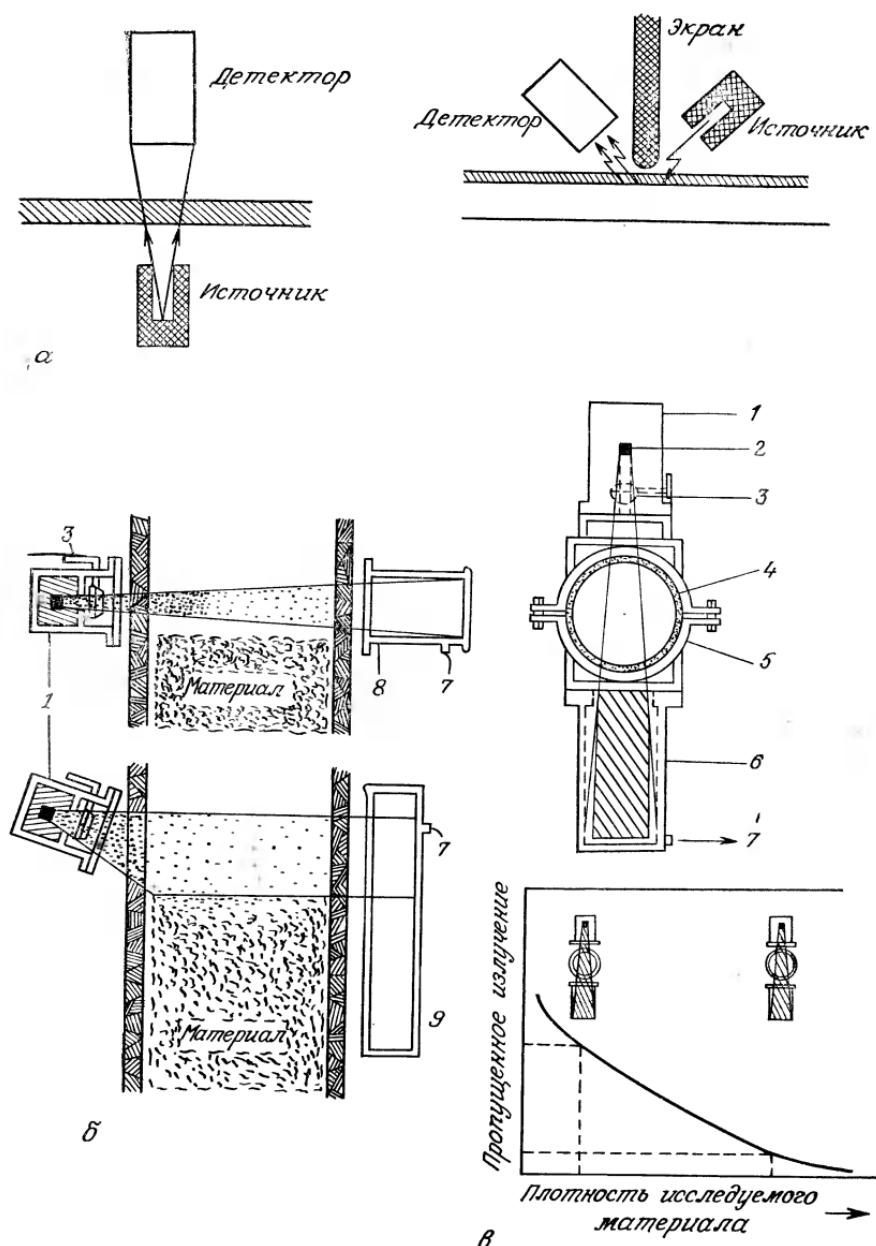


Рис. 16.1. Примеры использования датчиков радиоактивности (материалы фирмы Kay-Ray).

**α** — контроль толщины путем пропускания излучения и обратного рассеяния; **β** — измерение и определение уровня; **γ** — контроль плотности. 1 — контейнер источника радиоактивности; 2 — источник; 3 — обтюратор; 4 — емкость с исследуемой жидкостью; 5 — хомут для крепления; 6 — ионизационная камера; 7 — к электронике; 8 — детектор сигнала реле; 9 — датчик уровня заполнения.

## 16.1. Радиоактивность — общие сведения

### 16.1.1. Определения

Согласно классической модели в составе атома различают:

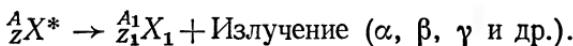
а) набор из  $Z$  электронов, удаленных от центра и разнесенных на отдельные орбиты, обозначенные по порядку (начиная от расположенных наиболее глубоко, с максимальной энергией связи) буквами  $K, L, M, N \dots$ ; заряд электрона  $q_e = 1,600 \times 10^{-19}$  Кл, его масса покоя  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг;

б) центральное ядро, образованное  $A$  нуклонами, а именно,  $Z$  протонами и  $A-Z$  нейтронами; заряд протона  $q_e$ , масса покоя протона  $m_p = 1836 m_e$ , заряд нейтрона  $q_n = 0$ , масса покоя нейтрона  $m_n = 1838 m_e$ .

Атом элемента  $X$ , характеризующийся составом ядра, называется нуклидом и обозначается с помощью символа  ${}_Z^A X$ . Разные изотопы одного и того же элемента различаются числом нейтронов в ядре, т. е. величиной  $A$  (называемой также массовым числом). Следовательно, массы этих изотопов различны, а их электронное окружение остается неизменным, т. е. они обладают одинаковыми химическими свойствами.

Некоторые ядра, содержащие избыточное число нейтронов или протонов, нестабильны. Они самопроизвольно превращаются в другие, более стабильные ядра, и называются радионуклидами или радиоизотопами. Символ такого нуклида помечается дополнительной звездочкой:  ${}_Z^A X^*$ . Превращение радиоизотопа сопровождается испусканием частиц, характеризующих данное ядерное превращение. Именно эти потоки частиц, которые испускает радиоизотоп, образуют ядерное излучение и в соответствии со своими характеристиками имеют специальные области применения в промышленности.

Самопроизвольное превращение радиоизотопа можно выразить с помощью уравнения:



Это ядерное превращение осуществляется с вероятностью, характеризующей нуклид, согласно закону вида  $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$ , где  $n(t)$  и  $n_0$  — число нуклидов  ${}_Z^A X^*$  в момент времени  $t$  и начальный момент времени соответственно, а  $\lambda$  — постоянная распада ( $s^{-1}$ ).

Период полураспада  $T$  представляет собой интервал времени, необходимый для того, чтобы половина начального количества радиоизотопа претерпела ядерный переход:

$$T = \lg 2 / \lambda = 0,693 / \lambda.$$

Значения  $T$  для различных радиоизотопов простираются в интервале от  $10^{-6}$  с до  $10^9$  лет.

Активность радиоизотопа  $A_t$  в момент времени  $t$  выражается числом переходов, происходящих в единицу времени,

$$A_t = (\Delta n / \Delta t)_t = \lambda n(t) = \lambda n_0 e^{-\lambda t},$$

т. е. зависит от массы  $m(t)$  радиоизотопа в момент времени  $t$ , его молекулярной массы  $M$  и числа Авогадро  $N_A$ :

$$A_t = \lambda N_A m(t) / M.$$

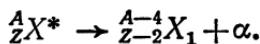
Единицей измерения активности является беккерель (Бк), соответствующий одному ядерному превращению за 1 секунду; в настоящее время для таких измерений широко используется кюри (Ки): 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Масса радиоэлемента, соответствующая активности 1 Ки, составляет:

$$\begin{aligned} {}^{238}\text{U} &- 3 \cdot 10^6 \text{ г}; \quad {}^{226}\text{Ra} - 1,00 \text{ г}; \\ {}^{137}\text{Cs} &- 12,6 \cdot 10^{-3} \text{ г}; \quad {}^{60}\text{Co} - 0,89 \cdot 10^{-3} \text{ г}. \end{aligned}$$

### 16.1.2. Виды ядерного излучения

**Альфа-частицы.**  $\alpha$ -частица представляет собой ядро атома гелия,  ${}^4_2\text{He}$ , которое образовано двумя протонами и двумя нейтронами. Ее электрический заряд положителен и равен  $2q_e$ , а масса  $\alpha$ -частицы примерно в 7000 раз превышает массу электрона.

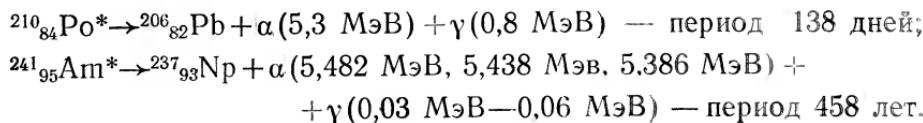
Альфа-частицы возникают в результате ядерных реакций типа



Основными источниками  $\alpha$ -частиц являются тяжелые элементы ( $Z > 82$ ). Частицы, испущенные определенным радиоизотопом, характеризуются одним или несколькими хорошо известными уровнями энергии — обычно от 3 до 10 МэВ. Эта энергия — кинетическая, и соответствующие ей скорости составляют от 12 100 км/с (3 МэВ) до 21 900 км/с (10 МэВ).

Так как после испускания  $\alpha$ -частицы ядро  $X_1$  находится в возбужденном состоянии, оно возвращается в устойчивое состояние с излучением  $\gamma$ -кванта.

Примеры источников  $\alpha$ -излучения:



Эффекты, вызываемые  $\alpha$ -частицами в веществе, обусловлены их взаимодействием с электронами на атомных орбитах и бывают двух видов.

**Ионизация.** Энергия, отдаваемая  $\alpha$ -частицами, достаточна для высвобождения электрона с орбиты атома, который становится при этом положительным ионом. Если кинетическая энергия высвобожденного электрона значительна ( $>100$  эВ), он вызывает, в свою очередь, вторичную ионизацию.

**Возбуждение.** Энергия, получаемая  $\alpha$ -частицей, может оказаться недостаточной для высвобождения электрона, который находится на внешних орбитах. При этом атом возбуждается и переходит в основное состояние, испуская в окружающую среду полученную энергию, например, в виде колебательной энергии или кванта света.

Общее число пар  $N_0$  (электрон+положительный ион), образуемых одной  $\alpha$ -частицей, пропорционально ее энергии  $W$ ; так, в воздухе  $N_0 = 2,88 \cdot 10^4 W$ , где  $W$  выражено в МэВ. Для  $\alpha$ -частицы, испущенной полонием,  $W=5,3$  МэВ и  $N_0=152\,000$ .

Длина пробега  $\alpha$ -частицы представляет собой расстояние, которое она должна преодолеть, чтобы передать окружающей среде всю свою кинетическую энергию. Это расстояние возрастает с увеличением энергии  $\alpha$ -частицы (так, в воздухе  $L$  (см) =  $=0,32W^{1,5}$ , где  $W$  выражено в МэВ (закон Гейгера)) и с уменьшением плотности среды и атомного номера частицы.

*Примерные величины пробега  $\alpha$ -частиц:*

	$W=3$ МэВ	$W=6$ МэВ
Воздух	25 мм	50 мм
Бумага, пластмасса	20 мкм	50 мкм
Железо	6 мкм	15 мкм

В промышленности применяют  $\alpha$ -излучение, например, для измерения давления газа (разд. 14.5.4) и определения толщины тонких слоев материалов и слоев материалов с малой плотностью (бумага, пластмасса).

**Бета-частицы.** Различают  $\beta$ -частицы двух видов:  $\beta^-$  — электрон с зарядом  $-q_e$ , массой  $m_e$  и  $\beta^+$  — позитрон, или антиэлектрон, с зарядом  $q_e$ , массой  $m_e$ .

В промышленных датчиках находит применение только  $\beta^-$ -излучение, и поэтому оно затронуто в данном разделе.

$\beta^-$ -частицы испускаются радиоизотопами, претерпевающими ядерный переход типа

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_{Z+1} X_1 + \beta^- + \bar{\nu},$$

где  $\bar{\nu}$  — антинейтрино — частица с нулевыми электрическим зарядом и массой покоя, не взаимодействующая со средой, в которой она движется.

Энергетический спектр  $\beta^-$ -излучения, испускаемый данным источником, непрерывен и простирается от нуля до максимального значения  $W_m$ , которое является характеристикой источника. Максимум этого спектра соответствует энергии  $W_m/3$ . Максимальные значения  $W_m$  составляют, в зависимости от вида источника, от 18 кэВ до 13 МэВ.

При равных энергиях скорость у  $\beta^-$ -частицы значительно больше, чем у  $\alpha$ -частицы, ввиду того, что ее масса покоя примерно в 7000 раз меньше: при  $W=0,7$  МэВ скорость  $\beta^-$ -частицы превышает 270 000 км/с, достигая  $0,9 c$  ( $c$  — скорость света).

Поскольку нуклид  $X_1$ , образующийся в результате ядерного перехода, находится в возбужденном состоянии, его возвращение в основное состояние происходит с выделением  $\gamma$ -кванта.

*Примеры источников  $\beta$ -частиц:*

Радиоизотоп	Максимальная энергия, МэВ	Период полу- распада
$^{63}\text{Ni}$	0,067	100 лет
$^{14}\text{C}$	0,155	5760 лет
$^{147}\text{Pm}$	0,224	2,7 года
$^{85}\text{Kr}$	0,672	10 лет
$^{90}\text{Y}$	2,18	61 ч

$\beta^-$ -частицы обладают, при равной энергии, значительно большей проникающей способностью, чем  $\alpha$ -частицы. Например, расстояние, которое преодолевают в алюминии частицы с энергией 1 МэВ, составляет: для  $\alpha$ -частицы 4 мкм, для  $\beta^-$ -частицы 1,5 мм.

Кроме того, частицы в результате взаимодействий постоянно изменяют свою траекторию, которая превращается в ломаную линию. Это вызывает рассеяние и даже отражение в обратном направлении значительной части излучения (обратное рассеяние).

Энергетические затраты, приводящие к замедлению  $\beta$ -частиц, связаны с возбуждением и ионизацией атомов окружающей среды, а также с испусканием рентгеновского излучения, называемого тормозным излучением.

Действительно, взаимодействие ядер вещества с электрическим полем, в котором движутся частицы, вызывает замедление заряженной частицы, которое тем значительнее, чем меньше ее масса. При этом заряженная частица, ускоренная или замедленная, испускает электромагнитное излучение, т. е. кванты. Это явление играет тем большую роль, чем выше атомный номер поглощающего материала и энергия  $\beta^-$ -частицы; при энергиях ниже 2 МэВ им можно пренебречь.

Линейный пробег  $L_l$  (см) представляет собой минимальную толщину материала, необходимую для полного торможения ча-

Таблица 16.1. Длина пробега  $\beta^-$ -частиц в различных веществах, мм

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Максимальная энергия $W_m$ , МэВ			
		0,1	1	2	3
Воздух	0,0013	93,3	2,9	6,6	10,2
Вода	1	0,14	4,0	9,5	15,0
Оргстекло	1,2	0,12	3,3	7,9	12,5
Алюминий	2,7	0,05	1,5	3,5	5,5
Свинец	11,3	0,01	0,35	0,83	1,33
Массовый пробег, мм/см <sup>2</sup>		13,5	400	950	1500

стиц с наибольшей энергией, испускаемых данным источником. Длина такого пробега обратно пропорциональна плотности  $\rho$  вещества, в котором движется частица; поэтому вводят понятие массового пробега  $L_m$  ( $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$ ), представляющего собой произведение линейного пробега  $L_l$  (см) на плотность  $\rho$  ( $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ). Эта величина практически не зависит от поглощающего вещества и определяется только энергией частиц (табл. 16.1).

Пробег является возрастающей функцией вида  $L_m = f(W_m)$  максимальной энергии частиц, для которой были установлены следующие эмпирические соотношения:

$$L_m = 0,542W_m - 0,133 \quad \text{для } W_m > 0,8 \text{ МэВ},$$

$$L_m = 0,407W_m^{1,38} \quad \text{для } 0,15 \text{ МэВ} < W < 0,8 \text{ МэВ}.$$

В первом приближении ослабление пучка частиц с заданной максимальной энергией  $W_m$  при прохождении через материал толщиной  $x$  подчиняется закону

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

для  $x$ , меньших длины пробега, где  $I_0$  — интенсивность падающего пучка (число частиц, попадающих на облучаемый материал за 1 с),  $I$  — интенсивность проникшего излучения,  $\mu$  — коэффициент линейного поглощения ( $\text{см}^{-1}$ , если  $x$  обозначает длину, см) и объемного поглощения ( $\text{см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ , если  $x$  представляет собой поверхностную плотность,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$ ). Значение  $\mu$  зависит от энергии  $W_m$  и от природы среды.

Толщина  $x_{0,5}$ , соответствующая ослаблению падающего пучка в два раза, составляет  $\sim 0,1$  средней длины пробега.

Ослабление пучка  $\beta^-$ -частиц в результате прохождения через среду положено в основу приборов для измерения толщины или плотности материалов с малой поверхностной плотностью (примерно  $10^{-3}$   $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$ ) — бумаги, картона, пластмасс.

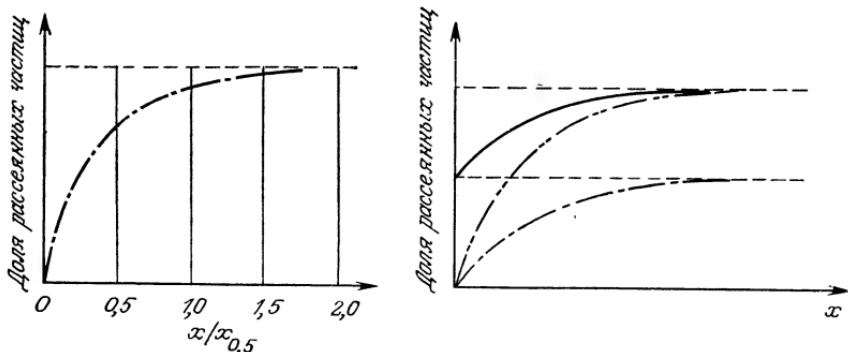


Рис. 16.2. Влияние толщины объекта (слева) и покрытия (справа) на обратное рассеяние.

— · · — подложка; — · · · — покрытие; — подложка с покрытием.

Явление обратного рассеяния  $\beta$ -частиц мишенью также может быть использовано для измерений; доля рассеянных частиц возрастает с увеличением атомного номера  $Z$  вещества среды, а также толщины материала, достигая предельного значения, называемого насыщением, при значениях толщины, превышающих примерно 30% длины пробега (рис. 16.2, а).

Обратное рассеяние находит применение в измерениях толщин покрытий при условии, что атомные номера веществ покрытий и материала подложки заметно различаются (рис. 16.2, б).

**Гамма-излучение.** Это излучение имеет ту же физическую природу, что и свет, и образовано, следовательно, фотонами, или квантами, несущими энергию  $W = h\nu$  (разд. 5.1). Энергия одного  $\gamma$ -кванта превышает энергию кванта света в  $10^4 \div 10^6$  раз.

Гамма-квант излучается при переходе радиоизотопа из возбужденного состояния с энергией  $W_1$  в основное состояние:

$$h\nu = W_1.$$

Возвращение в основное состояние иногда происходит путем последовательных переходов через промежуточные возбужденные состояния с уменьшающимися энергиями ( $W_1, W_2, W_3$ ). При этом происходит каскадное испускание квантов:

$$h\nu_1 = W_1 - W_2, \quad h\nu_2 = W_2 - W_3, \quad h\nu_3 = W_3.$$

Спектр  $\gamma$ -излучения, испускаемого источником, состоит, таким образом, из нескольких видов излучения с энергиями, характерными для данного источника. Значения энергии находятся в интервале от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ. Рассмотрим в качестве примера некоторые источники  $\gamma$ -излучения, используемые в промышленности.

Радиоизотоп  $^{60}\text{Co}$  превращается с периодом полураспада 5,5 года путем испускания  $\beta^-$ -излучения в  $^{60}\text{Ni}^*$ , ядро которого находится в одном из двух возбужденных состояний с  $W_1 = 2,5 \text{ МэВ}$  и  $W_2 = 1,30 \text{ МэВ}$ .

Возвращение в основное состояние происходит с испусканием квантов с энергией  $h\nu_1 = W_1 - W_2 = 1,20 \text{ МэВ}$  и  $h\nu_2 = W_2 = 1,30 \text{ МэВ}$ .

Радиоизотоп  $^{137}\text{Cs}$  образует путем испускания  $\beta^-$ -частиц с периодом полураспада 33 года возбужденное ядро  $^{137}\text{Ba}^*$ , которое возвращается в основное состояние с испусканием кванта с энергией 0,662 МэВ.

Взаимодействие  $\gamma$ -излучения с веществом происходит по одному из следующих механизмов: а) фотоэлектрический эффект, б) эффект Комptonа, в) материализация (образование пар). Для известных излучения и вещества преобладающий процесс определяется энергией квантов и атомными номерами  $Z$  элементов, составляющих вещество (рис. 16.3). Каждый из этих процессов сопровождается высвобождением более или менее быстрых электронов, которые теряют энергию путем ионизации и возбуждения атомов среды.

**Фотоэлектрический эффект.** При поглощении  $\gamma$ -кванта его энергия  $h\nu$  полностью передается электрону с более глубоких уровней ( $K$ ,  $L$ ) атома облучаемой среды. Этот электрон, энергия связи которого составляет  $W_l$ , испускается с кинетической энергией  $W_c$ :

$$W_c = h\nu - W_l.$$

На место электрона, удаленного с глубокого уровня, переходит электрон с одного из внешних уровней, энергия связи кото-

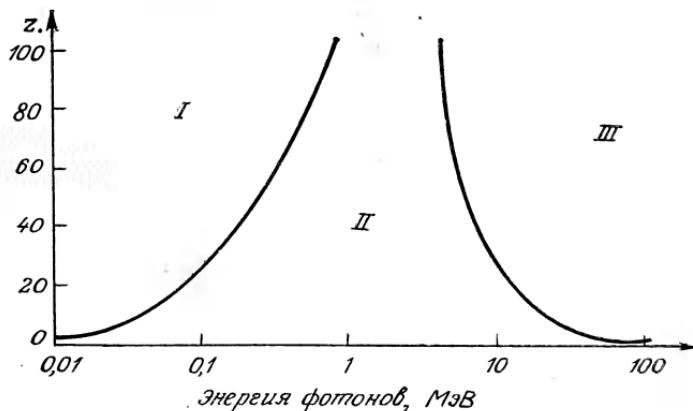


Рис. 16.3. Преобразующий процесс при воздействии  $\gamma$ -излучения в зависимости от атомного номера  $Z$  облучаемого вещества и энергии фотонов. I — фотоэлектрический эффект; II — эффект Комptonа; III — эффект материализации.

рого составляет  $W'_l$ , что вызывает испускание кванта рентгеновского излучения, т. е. флуоресценцию с энергией  $h\nu_x$ :

$$h\nu_x = W_l - W'_l.$$

**Эффект Комптона.** Этот эффект соответствует упругому соударению фотона с энергией  $h\nu$  и электрона с одного из внешних атомных уровней, энергия связи которого мала ( $W_l \ll h\nu$ ). При соударении происходят: а) освобождение электрона с кинетической энергией  $W_c$ ; б) уменьшение энергии фотона до  $h\nu' = h\nu - W_c$ ; в) рассеяние фотона, который в конечном счете либо поглощается (фотоэлектрический эффект), либо происходит его обратное рассеяние.

**Материализация.** Фотон может материализоваться с образованием одного электрона и одного позитрона (положительно заряженного антиэлектрона) при условии, что его энергия не меньше энергии масс покоя этих двух частиц:

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ},$$

где  $c$  — скорость света.

Избыточная энергия кванта по сравнению с этой величиной передается образующимся частицам в виде кинетической энергии, которая переходит к атомам окружающей среды посредством возбуждения и ионизации.

Позитрон после замедления взаимодействует с электроном окружающей среды, что приводит к аннигиляции этой пары с образованием двух квантов, каждый из которых несет энергию  $h\nu = 0,511 \text{ МэВ}$ , равную энергии массы покоя одной частицы. Дальнейшее взаимодействие этих двух квантов с окружающей средой протекает в виде эффекта Комптона или фотоэффекта.

Описанные процессы, протекающие при прохождении пучка  $\gamma$ -квантов через вещество, вызывают ослабление пучка, которое зависит от толщины материала  $x$ :

$$N(x)/N_0 = e^{-\mu x}.$$

Здесь величины  $N_0$  и  $N(x)$  — соответственно число падающих квантов и число квантов, уже присутствующих в поверхностном слое толщиной  $x$ ,  $\mu$  — линейный коэффициент поглощения,  $\text{см}^{-1}$  (если  $x$  — длина), или объемный коэффициент (если  $x$  выражено в единицах поверхностной плотности,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$ ). Величина  $\mu$  зависит от энергии фотонов и атомного номера  $Z$  элементов, образующих материал (рис. 16.4).

С практической точки зрения представляют интерес значения толщины  $x_{0,5}$  и  $x_{0,1}$ , которым отвечает снижение интенсивности пучка соответственно на 40 и 90%; выражения для

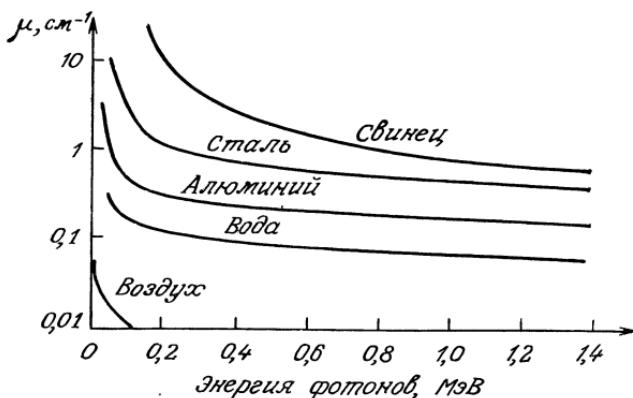


Рис. 16.4. Зависимость линейного коэффициента поглощения от энергии фотонов для различных веществ.

зависимости этих величин от  $\mu$  можно получить из уравнения ослабления:  $x_{0,5}=0,69/\mu$  и  $x_{0,1}=2,32/\mu$ .

Значения  $x_{0,5}$  в зависимости от энергии фотонов для различных веществ приведены в табл. 16.2.

Гамма-излучение, проникающее достаточно глубоко в плотные материалы (например, сталь), хотя и ослабляется ими, остается легко измеримым; так, используя источник  $^{60}\text{Co}$  ( $W \approx 1,2$  МэВ), при облучении стали получаем  $x_{0,5} \approx 1,5$  см и  $x_{0,1} \approx 5$  см.

На этом эффекте основаны приборы для измерения толщины металлических листов и приборы для измерения плотности и уровня веществ, циркулирующих в трубопроводах или хранимых в металлических резервуарах — источник излучения и детектор помещают в последнем случае снаружи с разных сторон трубопровода или резервуара (рис. 16.1, а, б).

Иногда невозможно или трудно произвести измерение путем пропускания излучения, поскольку не удается поместить источник и детектор по обе стороны излучаемой среды — например,

Таблица 16.2. Расстояние (для различных сред), необходимое для ослабления интенсивности излучения вдвое

Среда	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Энергия $h\nu, \text{МэВ}$			
		0,1	0,5	1	2
Воздух	0,0013	36 м	61 м	83 м	120 м
Вода	1	42 мм	72 мм	98 мм	140 мм
Железо	7,8	2,6 мм	10,6 мм	14,7 мм	20,6 мм
Свинец	11,3	0,11 мм	4,0 мм	8,8 мм	13,6 мм

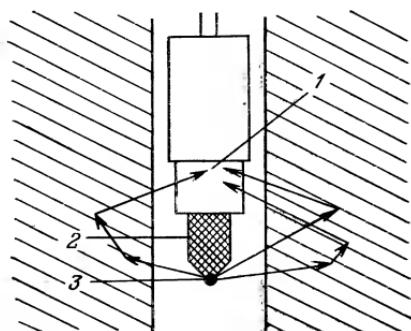


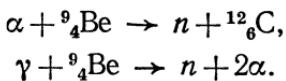
Рис. 16.5. Применение обратного рассеяния  $\gamma$ -излучения в исследовании плотности грунта.

1 — детектор; 2 — экран; 3 — источник  $\gamma$ -излучения.

на. Нейтрон нестабилен и распадается на протон и электрон в соответствии с уравнением реакции



Лишь очень немногие радиоизотопы являются источниками нейтронов (например,  ${}^{252}\text{Cf}$ , 1 г которого испускает  $2,3 \cdot 10^{12}$  нейтронов за 1 секунду). В наиболее распространенных источниках используется ядерная реакция с легкими элементами (литий, бор, чаще — бериллий), подвергнутыми облучению  $\alpha$ - или  $\gamma$ -излучением с достаточной энергией:



Нейтроны, испускаемые в ходе этих реакций, называются быстрыми, так как их кинетическая энергия велика ( $\sim 10$  МэВ и  $\sim 0,2$  МэВ соответственно). Источники быстрых нейтронов изготавливают, смешивая порошок бериллия и либо испускающий  $\alpha$ -частицы элемент ( ${}^{210}\text{Po}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}$ ,  ${}^{241}\text{Am}$ ), либо источник  $\gamma$ -излучения ( ${}^{124}\text{Sb}$ ,  ${}^{140}\text{La}$ ).

Проходя через вещество, нейтрон не взаимодействует с электронными оболочками атомов, а испытывает только упругие соударения с ядрами (рассеяние). Вероятность последнего процесса мала, поэтому глубина проникновения нейтронов в вещество велика: для нейтронов с энергией 10 МэВ, проходящих через бетон, она составляет несколько десятков сантиметров.

Средняя потеря энергии  $\Delta W$  нейтрона с энергией  $W$  при соу-

при исследовании плотности грунта в ходе бурения. В этом случае измерение может быть основано на обратном рассеянии  $\gamma$ -излучения исследуемой средой, которое зависит от ее плотности (рис. 16.5). Однако при этом приходится принимать меры предосторожности, чтобы прямое излучение не попадало в детектор (например, свинцовый экран, помещаемый надлежащим образом).

**Нейтроны.** Нейтрон — это частица с нулевым электрическим зарядом и массой покоя, очень близкой к массе прото-

дарении с ядром с массовым числом  $A$  определяется выражением

$$\Delta W = \frac{2A}{(A+1)^2} W.$$

Эта потеря энергии тем значительней, чем легче ядро. Материалы, состоящие из легких элементов (водород, углерод), такие, как вода, парафин, графит, способны значительно замедлять нейтроны и позволяют снизить энергию быстрых нейтронов до уровня равновесия со средой, что соответствует энергии теплового возбуждения ( $W \approx 0,025$  эВ). Замедленные таким образом нейтроны называют тепловыми.

Только тепловые нейтроны способны вызывать ядерную реакцию с бором:



Эта реакция позволяет косвенным образом детектировать тепловые нейтроны по испущенным  $\alpha$ -частицам. Таким образом, обычный детектор медленных нейтронов представляет собой детектор  $\alpha$ -частиц, содержащий соединение бора, например газ  $\text{BF}_3$ , который при действии тепловых нейтронов становится источником детектируемых  $\alpha$ -частиц.

Нейтронное излучение используется в промышленности для измерения концентрации водородсодержащих соединений, например, определения содержания воды в материалах: руде, угле, песке и т. п.

Быстрые нейтроны, испускаемые источником, рассеиваются и замедляются исследуемой средой до тепловой энергии пропорционально их доле в водородсодержащем соединении. Детектирование рассеянных тепловых нейтронов осуществляется указанным выше способом.

**Единицы дозиметрии излучения.** *Экспозиционная доза.* Эта величина характеризует рентгеновское или  $\gamma$ -излучение и ее единицей является рентген (Р); 1 рентген соответствует дозе облучения, которая приводит к образованию в 1 см<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях 1,293 мг количества ионов с полным зарядом (обоих знаков), равным одной электростатической единице заряда в системе СГС<sup>1</sup>), что соответствует примерно  $2,1 \cdot 10^9$  пар ионов.

Доза определяет общий эффект облучения, независимо от времени его воздействия. Мощность дозы характеризует эффект, производимый в единицу времени (с, мин, ч), и выражается

<sup>1)</sup> Согласно принятой в настоящее время Международной системе единиц (СИ), единицей измерения заряда является Кулон (Кл); 1 Кл  $\approx 3 \cdot 10^9$  ед. заряда СГСЭ. — Прим. перев.

ется в соответствии с выбранными единицами времени в Р/с, Р/мин, Р/ч.

Для других видов излучения доза выражается в фэр (физический эквивалент рентгена); это — доза, создающая в воздухе такое же число пар ионов, что и облучение рентгеновским излучением дозой 1 Р.

**Поглощенная доза.** При равной дозе облучения поглощенная энергия зависит от облучаемого вещества, природы ионизирующих частиц и их энергии. Общепринятой единицей поглощенной дозы является грэй (Гр), соответствующий поглощению одного джоуля энергии одним килограммом вещества. Поглощенную дозу выражают также в радах (рад); 1 рад соответствует энергии 100 эрг, поглощенной одним граммом вещества, т. е.  $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ .

### 16.1.3. Подход к выбору источника радиоактивного излучения

Детектор испускает электрический импульс при взаимодействии частицы с чувствительной частью его объема, называемой полезным объемом; подсчет импульсов и измерение их амплитуды являются одним из режимов использования детекторов.

В промышленности обычно используются источники, активность которых достаточно велика для того, чтобы детектор выдавал постоянный ток, пропорциональный числу достигающих его возбужденных частиц. Именно изменения этого тока соответствуют изменениям толщины, плотности или уровня заполнения исследуемых объектов.

**Энергия излучения.**  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы, а также  $\gamma$ -кванты должны обладать энергией, достаточной для того, чтобы при их прохождении через воздух, стекки и исследуемый объект не происходило уменьшение величины дозы на уровне детектора до значений ниже порога чувствительности. При изготовлении приборов для измерения толщины выбирают источник, энергия излучения которого ослабляется примерно в два раза после прохождения измеряемой толщины.

**Период полураспада радиоизотопа.** При измерении толщины, плотности материала или уровня заполнения резервуара следует принимать во внимание старение источника, приводящее к уменьшению его активности. Оно приводит к эффекту плавного уменьшения дозы, получаемой детектором, которое не следует связывать с влиянием исследуемого объекта. Поэтому переградуировку установки необходимо производить тем чаще, чем короче период полураспада используемого изотопа.

Для измерений по типу «да» — «нет» (например, определение пороговых уровней) старение источника не столь существенно, так как величина дозы, полученной детектором, достаточно для того, чтобы выработанный ток давал желаемую команду (например, переключение реле).

**Активность источника.** Мощность дозы  $D$  (мР/ч) на уровне детектора определяют:

— активность источника  $A_t$  (мКи);

— расстояние  $d$  (м) между источником и детектором (в случае конического пучка частиц мощность дозы  $D$  обратно пропорциональна  $d^2$ , тогда как в случае цилиндрического потока  $D$  не зависит от  $d$ );

— поглощение материалом среды, расположенной между источником и детектором (это поглощение определяется по всему набору толщин  $n$ , соответствующих ослаблению в 2 раза  $x_{0,5}$ , для различных материалов, помещенных на пути излучения между источником и детектором).

Так, в случае источника, испускающего конический пучок частиц, получаем:

$$D \text{ (мР/ч)} = K \frac{A_t \text{ (мКи)}}{d^2 \text{ (м)} 2^n},$$

где  $K$  — постоянная, характеризующая источник;  $K=1,32$  для  $^{60}\text{Co}$  и  $K=0,355$  для  $^{137}\text{Cs}$ .

Это соотношение позволяет рассчитать для данной установки минимальную активность источника, если известна минимальная мощность дозы, определяемая используемым детектором.

*Пример:*  $d=2$  м,  $n=5$ . 1. Детектор представляет собой трубку Гейгера — Мюллера, на уровне которой минимальная мощность дозы должна составлять  $L=0,2$  Р/ч. Минимальная активность источника составляет 20 мКи для  $^{60}\text{Co}$  и 70 мКи для  $^{137}\text{Cs}$ .

2. Детектор — ионизационная камера, на уровне которой минимальная мощность дозы должна составлять  $L=0,04$  мР/ч. Минимальная активность источника составляет 4 мКи для  $^{60}\text{Co}$  и 14 мКи для  $^{137}\text{Cs}$ .

## 16.2. Детекторы на основе ионизации газов

### 16.2.1. Принцип действия

Полезный объем газа находится между двумя электродами, к которым приложена постоянная разность потенциалов. Падающее излучение ионизирует газ, высвобождая электрические заряды, собираемые на электродах. Обычно используются ци-

линдрические электроды. Внутри корпуса детектора размещается катод (часто — соединяемый с корпусом), а в качестве анода используется тонкая нить, вдоль которой прилагается напряжение.

Среднее значение энергии  $W_1$ , необходимой для образования пары ионов, зависит, с одной стороны, от природы газа, с другой (в меньшей степени) — от энергии падающей частицы и от ее природы.

Так, например, образование ионной пары под действием  $\alpha$ -частицы, испускаемой полонием, требует в среднем 35,6 эВ в воздухе, 29,7 эВ в неоне, 23,6 эВ в ксеноне.

Если частица, проходя через полезный объем детектора, теряет энергию  $W$ , то это приводит к образованию  $N_0$  ионных пар:  $N_0 = W/W_1$ , где каждая пара состоит из 1 электрона и 1 положительного иона. Эти носители заряда перемещаются в приложенном электрическом поле со скоростью, зависящей от величины поля, природы газа и его давления. Поскольку скорость электронов значительно превышает скорость положительных ионов, они достигают анода раньше, чем ионы сколько-нибудь заметно смеются.

Если интенсивность приложенного поля велика, то электроны получают достаточно энергии для образования новых пар ионов в результате соударений с молекулами газа; при длине пробега  $dx$   $N$  электронов вызовут образование  $dN$  новых пар ионов:

$$dN = \alpha N dx,$$

где  $\alpha$  — коэффициент Таунсенда. Зависимость  $\alpha$  от давления  $p$ , электрического поля  $E$  и от природы газа выражается следующим образом:

$$\alpha/p = Ae^{-Bp/E},$$

где  $A$  и  $B$  — константы. Эта вторичная ионизация происходит в воздухе, если отношение  $E/p$  превышает 22,5 мВ/см·Па, что соответствует 2300 В/см при нормальном атмосферном давлении. Для  $N_0$  пар ионов, образуемых падающей частицей в полезном объеме детектора, количество зарядов, собранных электродами  $N$ , и, следовательно, амплитуда выходного сигнала зависят от разности потенциалов  $V$ , приложенной к электродам. В зависимости от значения  $V$  различают разные режимы функционирования детектора (рис. 16.6). Рассмотрим зоны, выделенные на этом рисунке.

*Зона I.* Этой зоне соответствует сравнительно слабое поле; рекомбинации электрон — положительный ион происходят раньше, чем носители достигнут электродов:  $N < N_0$ .

**Зона II.** Все высвободившиеся заряды собираются на электродах независимо от напряжения  $V$ :  $N=N_0$  — это режим работы ионизационной камеры.

**Зона III.** В результате соударений носителей происходит умножение:  $V=MN_0$ , где множитель  $M$  не зависит от  $N_0$  и может достигать  $10^3$ . На этом эффекте основано функционирование пропорционального счетчика.

**Зона IV.** Множитель  $M$  зависит от  $N_0$ ; это «полупропорциональный» режим.

**Зона V.** Выходной сигнал детектора не зависит от  $N_0$  — так функционирует счетчик Гейгера — Мюллера.

**Зона VI.** Функционирование неустойчиво, разряды происходят, когда приложенное напряжение достигает величины напряжения пробоя  $V_d$ .

### 16.2.2. Ионизационная камера

Поскольку газ, находящийся в детекторе, испытывает действие постоянного потока частиц, на аноде возникает ток  $I$ , пропорциональный числу частиц  $n$ , попадающих в полезный объем за 1 секунду, и числу ионных пар  $N_0$ , образуемых каждой из этих частиц:

$$I = q_e n N_0 \quad (q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}).$$

В случае рентгеновского или  $\gamma$ -излучения выражение для тока принимает вид

$$I = \frac{kvpD}{1,08} 10^{-13}.$$

Здесь  $I$  выражено в амперах, величина  $k$  постоянна для данного газа (для воздуха  $k=1$ ),  $V$  — полезный объем, см<sup>3</sup>,  $p$  — давление газа, атм, и  $D$  — мощность дозы, Р/ч.

Этот ток  $I$ , составляющий  $10^{-15}$ — $10^{-14}$  А в зависимости от мощности дозы, не зависит от приложенного напряжения  $V$  в диапазоне нескольких сотен вольт. Измеряемый сигнал представляет собой падение напряжения  $v_m$ , вызываемое этим током на большом сопротивлении  $R_m$  ( $R_m > 10^{10}$  Ом).

Газ, давление и тип окна подбираются в зависимости от природы исследуемого излучения таким образом, чтобы обеспечить

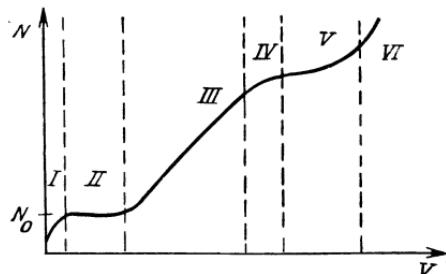


Рис. 16.6. Различные режимы функционирования ионизационных детекторов.

максимальную эффективность детектирования; эффективность детектирования определяется как отношение числа выходных импульсов к числу падающих частиц. Конструкция ионизационной камеры приспосабливается к соответствующему виду излучения.

*Излучение  $\alpha$  и  $\beta$ .* Заполняющий газ — воздух при давлении ниже атмосферного ( $p \leq p_{\text{атм}}$ ); окно — тонкое, из алюминия или бериллия.

*Рентгеновское излучение.* Тяжелые газы ( $\text{Ar}$ ,  $\text{Xe}$ ) при  $p \leq p_{\text{атм}}$ ; тонкое окно из бериллия.

*Гамма-излучение.* Тяжелые газы ( $\text{Ar}$ ,  $\text{Xe}$ ) при  $p \leq p_{\text{атм}}$ ; толщина стенок порядка средней длины свободного пробега выбираемых из них электронов, которые попадают в полезный объем, внося соответствующий вклад в ионизацию газа.

**Пример типичного исполнения.** Рассмотрим в качестве примера ионизационную камеру CRGA 11 для интенсивного  $\gamma$ -излучения (производство фирмы R.T.C.). Полезный объем камеры — 10 см<sup>3</sup>, заполняющий газ — азот при давлении 1,05 бар, заряжающее напряжение 600 В, чувствительность ( $\gamma$ -излучение  $^{60}\text{Co}$ )  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ A/P} \cdot \text{ч}^{-1}$ , максимальная мощность дозы  $10^8 \text{ P} \times \text{ч}^{-1}$ .

Для измерения тока, создаваемого в камере излучением, обычно применяют преобразователь ток — напряжение (рис. 16.7).

Определение разности выходных сигналов при использовании двух одинаковых ионизационных камер позволяет скомпенсировать влияние сопутствующих паразитных излучений (космические лучи, вторичное  $\gamma$ -излучение). Именно на этом принципе основано детектирование нейтронов в присутствии  $\gamma$ -излучения высокой интенсивности. Электрод в одной из камер покрывается тонким слоем карбида бора ( $^{10}_5\text{BC}$ ), который испускает

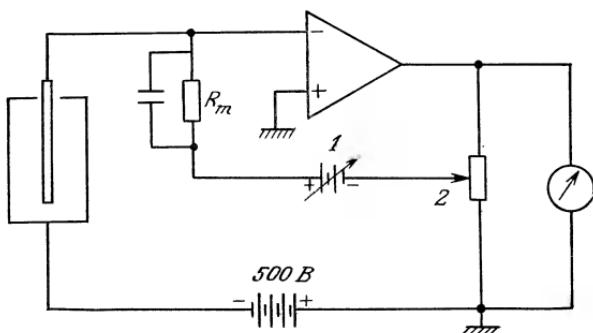


Рис. 16.7. Измерительная схема с ионизационной камерой (материалы фирмы Kay — Ray).

1 — установка нуля; 2 — регулировка диапазона.

$\alpha$ -частицы при захвате нейтронов ядрами  $^{10}_5\text{B}$ ; разность токов в камерах обусловливается ионизацией, вызванной этими  $\alpha$ -частицами.

При помощи ионизационной камеры может быть осуществлено и детектирование отдельных частиц при условии, что заряд, накапливающийся на аноде, окажется достаточным (обычно это условие не выполняется для одиночной  $\beta$ -частицы).

Форма выходного импульса напряжения зависит:

— от постоянной времени  $R_mC$ , определяемой величинами зарядного сопротивления  $R_m$  и емкости  $C$ , представляющей собой сумму емкостей на выходе камеры и на входе в измерительное устройство;

— от времени накопления электронов на аноде ( $t_1 \approx 10^{-6}$  с) и положительных ионов на катоде ( $t_2 \approx 10^{-3}$  с).

Достоинствами ионизационной камеры являются большой полезный объем и линейность выходного сигнала. Эффективность обнаружения близка к 1 для  $\alpha$ -частиц, составляет величину порядка  $0,8 \div 0,9$  для  $\beta$ -частиц и порядка  $10^{-2}$  для  $\gamma$ -квантов.

### 16.2.3. Пропорциональный счетчик

В основу этого типа детектора положена пропорциональность сигнала числу соударений исходного количества ионов  $N_0$ , образуемых в газе падающими частицами. Коэффициент пропорциональности  $M$ , обычно составляющий  $10^2 \div 10^3$ , зависит от природы газа и возрастает с повышением его давления и приложенного напряжения. Такое усиление оказывается достаточным для детектирования даже отдельной частицы;  $N_0$  образующимся ионам соответствуют накопленный заряд  $Q = MN_0q_e$  и сигнал  $V_m = MN_0q_e/C$ , где  $C$  — выходная емкость счетчика.

*Пример:*  $M = 500$ ,  $N_0 = 200$ ,  $C = 10$  пФ,  $V_m = 1,6$  мВ. Амплитуда выходного импульса пропорциональна энергии, которую теряет частица, проходя через полезный объем. Сравнение амплитуд выходных импульсов позволяет, таким образом, разделить сигналы различных видов излучения; например, возможно детектирование  $\alpha$ -частиц (большое  $N_0$ ) в присутствии  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения (малое  $N_0$ ).

### 16.2.4. Счетчик Гейгера — Мюллера

Если приложенное электрическое поле достаточно интенсивно, то первичные ионы, образуемые падающим излучением, приобретают энергию, достаточную для того, чтобы вторичные ионы, возникающие в результате соударений, перевести в возбужденное состояние. Затем эти ионы испускают фотоны в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, которые, в свою

очередь, в результате фотоэлектрического эффекта вызывают ионизацию газа и испускание электронов металлическим катодом. Лавина распространяется таким образом вдоль нити анода и приводит к образованию выходного сигнала, амплитуда которого ( $1 \div 10$  В) не зависит от числа первичных ионов, образованных активной частицей. Поэтому счетчик Гейгера — Мюллера может быть использован только для детектирования частиц, а не для измерения их энергии. Лавину можно остановить, смешивая газ счетчика (инертный) с другим газом (галогеном), который, поглощая УФ-излучение, прекратит распространение лавины; такой датчик называют самопрерывателем. С этой же целью в анодную цепь включают резистор с большим сопротивлением  $R_1$ , составляющим от 2 до 10 МОм, падение напряжения на котором при зарождении лавины уменьшает напряжение между анодом и катодом ниже порогового значения, достаточного для продолжения процесса.

Рабочий диапазон счетчика Гейгера — Мюллера в зависимости от напряжения  $V$ , приложенного к трубке, охватывает несколько сотен вольт; нижний предел, называемый пороговым напряжением, обычно составляет  $300 \div 400$  В, а верхний предел находится вблизи  $750 \div 900$  В. В этом диапазоне и для данного вида излучения число отсчетов  $n$ , т. е. число импульсов или ударений за 1 секунду, практически не зависит от напряжения  $V$  ( $\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dV}$  меньше нескольких  $10^{-4}$  В $^{-1}$ ).

Схема трубки Гейгера — Мюллера и ее принципиальная электрическая схема представлены на рис. 16.8.

Анодное сопротивление  $R_1$  помимо упомянутой функции прерывателя выполняет также защитную функцию. Измерительное сопротивление (катодное) составляет  $0,1 \div 1$  МОм. Амплитуда импульса напряжения  $V_2$ , накапливаемого на его контактах, приближенно определяется выражением

$$V_2 \simeq \frac{R_2}{R_1 + R_2} (E - V_s),$$

где  $E$  — напряжение, подаваемое на анод, а  $V_s$  — пороговое напряжение рабочего диапазона. Чтобы избежать искажения импульсов паразитными емкостями ( $C_{p1}, C_{p2}$ ) электродов и соединительных проводов, устанавливают компенсационный фильтр. Последний изготавливают на основе двух дополнительных емкостей,  $C_1$  и  $C_2$ , значения которых подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие  $(C_{p1} + C_1)R_1 = (C_{p2} + C_2)R_2$ .

Получаемые импульсы характеризуются коротким временем подъема ( $\sim$ мкс) и медленным спадом, определяемым временем затухания разряда ( $50 \div 150$  мкс).

Ниже определяются различные интервалы времени, ха-

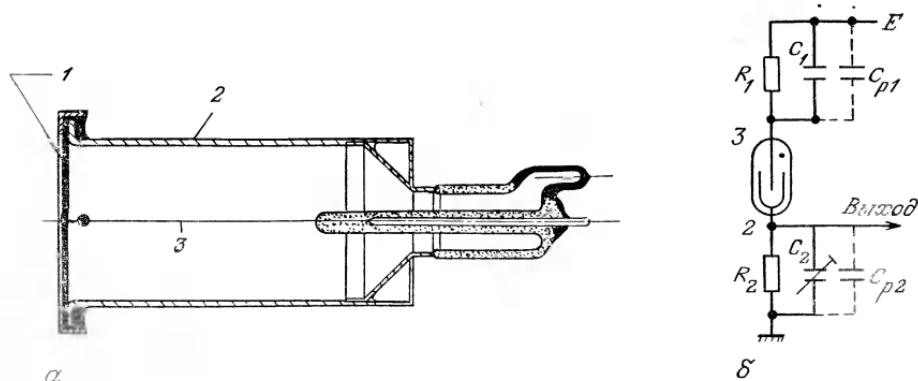


Рис. 16.8. Трубка Гейгера — Мюллера.  
а — схема конструкции (фирма L. M. T.); б — эквивалентная электрическая схема.  
1 — слюдяное окно; 2 — катод; 3 — анод.

рактеризующие процесс измерений на основе подсчета импульсов (рис. 16.9).

*Мертвое время:* время от начала нормального импульса, в течение которого трубка нечувствительна к другим ионизирующим воздействиям ( $10 \div 200$  мкс для различных трубок).

*Время разрешения:* минимальный интервал времени между двумя различными ионизирующими воздействиями.

*Время возврата в исходное состояние (восстановления):* минимальный промежуток времени между двумя ионизирующими воздействиями, дающими сигналы нормальной амплитуды.

Эффективность детектирования для  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц ограничивается прозрачностью входного окна, изготовленного из тонкого листа ( $\sim \text{мг}/\text{см}^2$ ) алюминия или слюды, и для частиц, попавших в свободный объем, достигает 100%.

Эффективность детектирования  $\gamma$ -квантов составляет менее 1%. Кванты определяются числом выбиваемых электронов, которые, проникая в полезный объем, вызывают в нем лавину.

Тепловые нейтроны могут быть обнаружены при использовании трубки, заполненной  $^{10}\text{BF}_3$ , в которой на один из электродов нанесен тонкий слой бора.

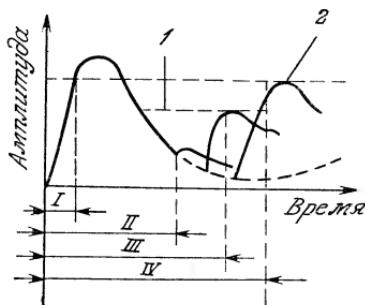


Рис. 16.9. Характеристические интервалы времени для импульсных сигналов.

I — пороговый сигнал; 2 — доля, соответствующая максимуму. I — время подъема; II — мертвое время; III — время разрешения; IV — время восстановления.

*Метрологические характеристики счетчика Гейгера—Мюллера (ZP 1410 фирмы R.T.C.).*

Область применения: детектирование  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -частиц при мощности дозы  $10^{-4} \div 3$  Р/ч; число детектируемых  $\gamma$ -квантов  $320 \text{ с}^{-1}$  при  $10^{-2}/\text{ч}$  ( $^{60}\text{Co}$ ); максимальное мертвое время  $175 \text{ мкс}$ ; окно из слюды удельной толщиной  $1,5 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$ ; стенки из Fe—Cr удельной толщиной  $910 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$ ; заполняющий газ — неон-гелиевая смесь; напряжение питания  $575 \text{ В}$ .

### 16.3. Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный детектор представляет собой комбинацию сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (разд. 5.10.5) (рис. 16.10).

Основой сцинтиллятора является вещество, которое позволяет превратить энергию попадающей в детектор активной частицы в кванты света, длина волн которых обычно соответствует области между голубым цветом и ближним ультрафиолетом. Эти кванты, поступая на фотокатод фотоумножителя, выбивают из него электроны, число которых затем умножается в результате испускания динодами вторичного излучения. Электроны собираются анодом и образуют электрический сигнал на выходе сцинтилляционного детектора.

Испускание света сцинтиллятором в результате передачи энергии частицы представляет собой явление флуоресценции. Энергия, передаваемая атомам или молекулам сцинтиллятора, приводит их в возбужденное состояние, и их возвращение в основное состояние сопровождается испусканием фотонов.

Для некоторых органических соединений (антрацен, толуол и др.) характерна люминесценция, которая проявляется на молекулярном уровне; она происходит как в твердой фазе, так и в жидким растворе. Для неорганических веществ (сульфида цинка, иодида натрия и др.) люминесценция представляет со-

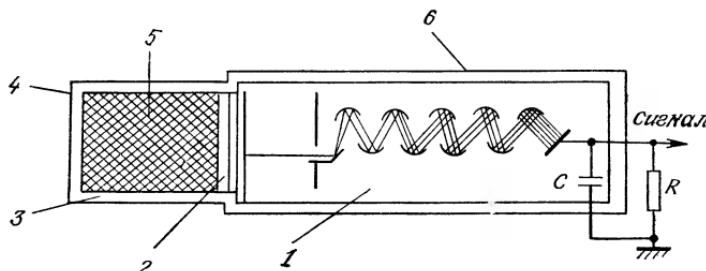


Рис. 16.10. Сцинтилляционный детектор.

1 — трубка фотоумножителя; 2 — оптическая связь; 3 — отражатель света; 4 — стенка, не прозрачная для света; 5 — сцинтиллятор; 6 — корпус, не прозрачный для света.

бой свойство кристалла, связанное с присутствием в них дефектов, называемых активными центрами (примесей, отклонений от стехиометрии).

Для детектирования заряженных частиц применяют сульфид цинка и легкие органические вещества, например антрацен.

Гамма-кванты детектируют косвенным образом по сцинтилляции, которую вызывают электроны, высвобождаемые в результате фотоэлектрического эффекта и эффекта Комптона веществом сцинтиллятора ( $\text{NaI}$ ,  $\text{CsI}$ ).

Детектирование нейтронов производится с использованием смеси бора  $^{10}\text{B}$  и сульфида цинка; при этом сцинтилляция вызывается испущенными  $\alpha$ -частицами.

После возбуждения флуоресценции падающей частицей ее интенсивность убывает в соответствии с законом экспоненциального вида  $I = I_0 e^{-t/\tau}$ , где  $\tau$  — постоянная времени характеристической флуоресценции материала;  $\tau \approx 10^{-8}$  с для органических соединений и  $10^{-5} \div 10^{-6}$  с для неорганических веществ. Очевидно, что материал сцинтиллятора должен быть прозрачен для испускаемого им излучения.

Собственная эффективность  $r_s$  сцинтиллятора определяется выражением

$$r_s = h\nu/W_1,$$

где  $h\nu$  — средняя энергия испущенных фотонов, а  $W_1$  — средняя энергия, необходимая для возбуждения атома, испускающего фотон; для различных веществ  $W_1$  находится в интервале  $10 \div 70$  эВ.

**Связь сцинтиллятора с фотоумножителем.** Пусть частица, попадающая в детектор, передает сцинтиллятору энергию  $W_1$ , она вызывает испускание  $n_s$  фотонов:

$$n_s = W/W_1 = r_s (W/h\nu).$$

Из этих  $n_s$  фотонов только  $n_k$  достигают фотокатода:

$$n_k/n_s = r_0,$$

где  $r_0$  — оптический выход пропускания.

Оптическая эффективность улучшается, с одной стороны, при сокращении потерь света путем отражения от боковых поверхностей сцинтиллятора и, с другой стороны, путем обеспечения связи с фотоумножителем через «оптический контакт», коэффициент преломления которого имеет промежуточное значение между коэффициентами преломления сцинтиллятора и стеклянного корпуса фотоумножителя;  $r_0$  составляет порядка 30%.

$n_h$  фотонов, достигающих катода, выбивают из него  $n_e$  электронов:

$$n_e = \eta_h n_h,$$

где  $\eta_h$  — квантовый выход фотокатода, составляющий в зависимости от его состава от 10 до 30%. При усилении фотоумножителя  $M$  число электронов, собираемых на аноде,  $n_a$ , равно:

$$n_a = M n_e = M \eta_h r_0 r_s (W/h\nu).$$

Так, например, для  $\alpha$ -частиц с энергией 5 МэВ, передающих энергию сцинтиллятору из сульфида цинка, получаем:  $r_s = 28\%$ ,  $h\nu = 3$  эВ ( $\lambda = 0,45$  мкм),  $n_s = 4,7 \cdot 10^5$ ,  $r_0 = 30\%$ ,  $n_h = 1,4 \cdot 10^5$ ,  $\eta_h = 10\%$ ,  $n_c = 1,4 \cdot 10^4$ ,  $M = 10^6$ ,  $n_a = 1,4 \cdot 10^{10}$ .

Амплитуда выходного сигнала для данной частицы пропорциональна теряемой ею энергии и зависит от природы частицы. Кроме того, при больших энергопотерях на единицу длины (для  $\alpha$ -частиц) диссоциированные молекулы, образующиеся в большом количестве вдоль траектории частицы, ведут себя как примеси захвата в отношении сцинтилляции и поэтому ослабляют ее.

Длительность сигнала связана с временем жизни возбужденных состояний атомов сцинтиллятора и составляет от нескольких микросекунд ( $ZnS$ ) до нескольких наносекунд (органические вещества). Она значительно ниже соответствующей характеристики пропорционального счетчика.

Достоинствами сцинтилляционных детекторов являются высокая доля регистрируемых частиц и высокая эффективность детектирования  $\gamma$ -излучения. Недостатки связаны с использованием фотоумножителя.

#### 16.4. Полупроводниковые детекторы

Частица, попавшая в детектор, вызывает в нем ионизацию атомов полупроводникового материала, т. е. образование пар электрон — дырка. Для образования одной пары необходимы энергетические затраты  $W_1$  порядка нескольких электрон-вольт (3,6 эВ для кремния при 300 К); они примерно в 10 раз меньше энергии  $W_1$ , необходимой для ионизации одной молекулы газа. Следовательно, при таких же энергозатратах будет происходить образование в 10 раз большего количества носителей и во столько же раз возрастет выходной сигнал.

Чтобы избежать немедленной рекомбинации пары электрон — дырка, эти заряды должны высвобождаться в зоне, помещенной в сильное электрическое поле, которое обеспечит в ней быстрое разделение и сбор носителей: например, в обедненной

зоне  $p-n$ -перехода (диода) с обратной поляризацией (разд. 5.7). Протяженность этой зоны  $l_d$  определяется выражением (график см. в приложении):

$$l_d \approx V \rho V,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление полупроводника вблизи перехода;  $V$  — приложенное напряжение с обратным знаком.

Приращение полезного объема детектора обеспечивается путем расширения обедненной зоны, что приводит к увеличению удельного сопротивления вещества в области вблизи перехода, с одной стороны, и к поляризации перехода при действии значительного напряжения обратного знака, хотя и недостаточного для его разрешения, с другой.

Кроме того, чтобы снизить энергозатраты частицы в мертвую зоне ее траектории (находящейся за пределами обедненной зоны), нужно сделать эту зону очень узкой, с тем чтобы обедненная зона простиралась вплоть до входной поверхности детектора. Именно эти два аспекта — расширение обедненной зоны и сокращение мертвой зоны — определяют различные варианты полупроводниковых датчиков.

**Диод с поверхностным барьером.** Переход образуется в результате поверхностного окисления кремния  $n$ -типа, причем оксидный слой относится к  $p$ -типу; затем наносится тонкий ( $\sim 200$  Å) золотой электрод (рис. 16.11,  $a$ ). При этом обедненная зона может простираться на всю глубину слоя кремния ( $\sim 1$  мм) без какой-либо мертвой зоны как перед ней, так и после нее.

Такой диод используется для детектирования  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц.

**Диод из кремния или германия, легированного литием.** Детектор этого типа изготавливают путем термодиффузии и миг-

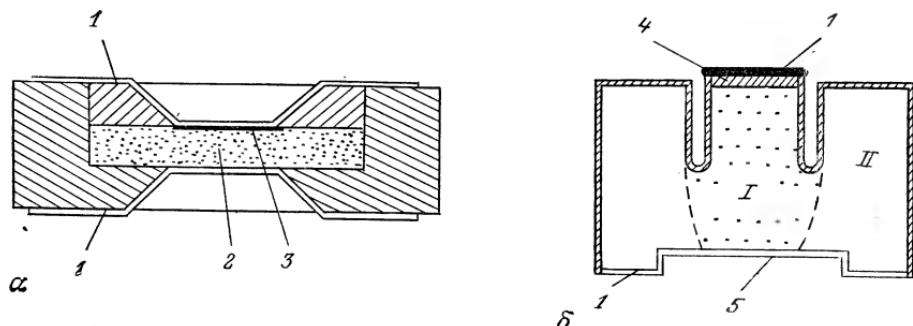


Рис. 16.11. Полупроводниковые детекторы.

$a$  — диод с поверхностным барьером;  $b$  — кремниевый диод, легированный литием.  
 1 — электрод; 2 — кремний ( $n$ -типа); 3 — оксидный слой ( $p$ -типа); 4 — обогащенная зона ( $n$ ); 5 — входное окно, I — зона собственной проводимости ( $i$ ); II — зона  $p$ -типа.

рации донорных атомов лития в электрическом поле в кремнии или германии *p*-типа при одновременной нейтрализации акцепторных примесей ( $\sim 10^{13}/\text{см}^3$ ). Строгий контроль за процессом позволяет получить диод, содержащий три области (рис. 16.11, б):

- область *n*-типа, в которой литий (*n*) с избытком компенсирует *p*-тип исходного полупроводника;
- область *i*-типа собственной проводимости с высоким удельным сопротивлением, в которой литий в точности компенсирует исходный *p*-тип;
- область *p*-типа, не модифицированную литием.

Таким образом, образуется диод с *pin*-структурой. Германиевый диод следует использовать исключительно при низкой температуре (77 К), чтобы избежать осаждения лития. Кремниевый диод можно применять вплоть до 300 К. Описанные диоды находят следующее применение: Si(Li) до 300 К —  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы; Si(Li) и Ge(Li) при 77 К — рентгеновское и  $\gamma$ -излучение.

**Диод на основе германия высокой чистоты.** Можно получить германий с очень низкой концентрацией примесей акцепторного типа ( $\approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) и, следовательно, с высоким удельным сопротивлением. Очень узкая (0,4 мкм) область *n*-типа образуется в результате имплантации донорных ионов. Обедненная зона может занимать весь объем германия *p*-типа и простираясь на глубину до нескольких сантиметров. Такой датчик пригоден для использования при комнатной температуре (детектирование рентгеновского и  $\gamma$ -излучения). Эквивалентная электрическая схема диода для детектирования ядерного излучения подобна схеме фотодиода (рис. 16.12, а); при передаче частицей энергии детектору источник тока выдает импульс  $I_d(t)$ . Соответствующий заряд  $Q_d$  преобразуется в импульс напряжения с амплитудой  $V_0$  посредством зарядового усилителя (разд. 10.1.5):

$$V_0 = Q_d/C_r,$$

где  $C_r$  — емкость обратной связи усилителя (рис. 16.12, б).

Заряд  $Q_d$  можно выразить в виде функции, с одной стороны, энергии  $W$ , передаваемой частицей детектору, и, с другой

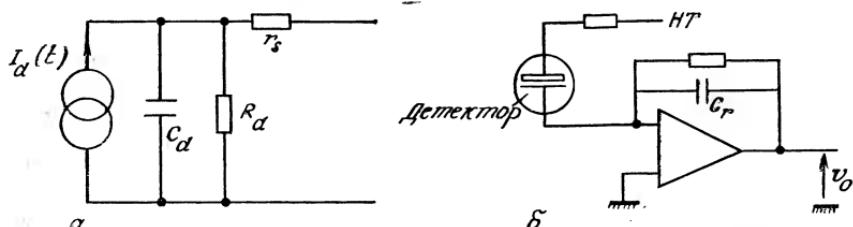


Рис. 16.12. Полупроводниковый детектор.

а — принципиальная электрическая схема; б — схема зарядового усилителя.

стороны, энергии  $W_1$ , необходимой для образования пары электрон — дырка (3,6 эВ для Si при 300 К):

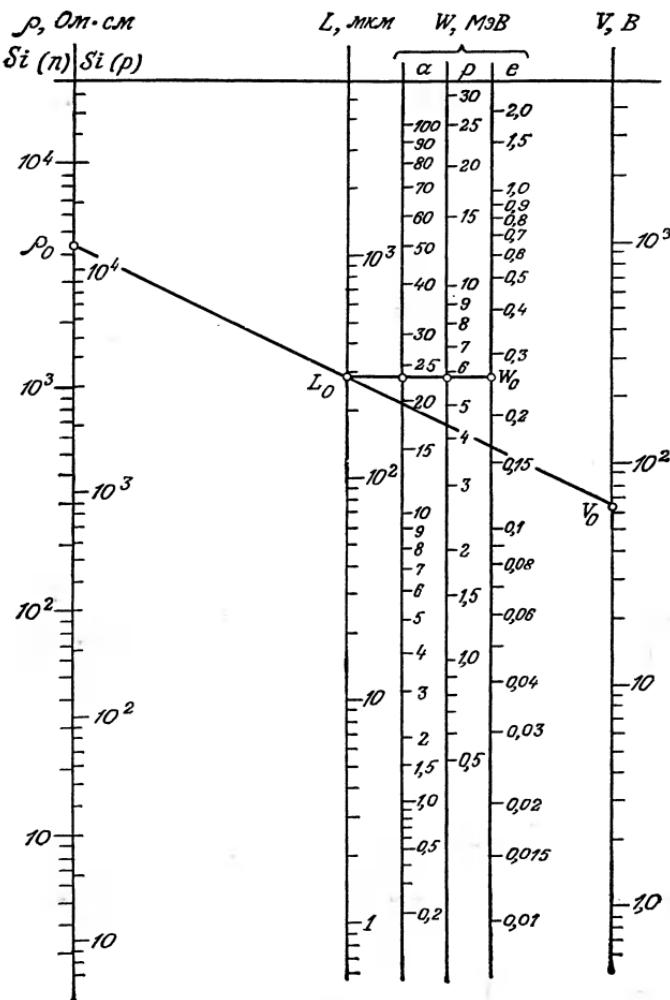
$$Q_d = (W/W_1) q_e \quad (q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}).$$

откуда

$$V_0 = \frac{W}{W_1 C_r} q_e.$$

Для кремниевого детектора при  $C_r = 10^{-12}$  Ф получаем

$$V_0/W = 44 \text{ мВ/МэВ.}$$



К достоинствам полупроводниковых детекторов относятся малые размеры, прочность; линейность (сигнал пропорционален полученной энергии); высокое быстродействие (постоянная времени запаздывания может быть снижена до  $\sim 10^{-9}$  с).

### Приложение. Номограмма для определения параметров кремниевых детекторов (стр. 321)

Для заряженной частицы ( $a - \alpha$ ,  $p$  — протон,  $e$  — электрон) с энергией  $W_0$  горизонтальный отрезок определяет величину зоны обеднения  $L_0$ , которая необходима для полной остановки частицы. Если известно удельное сопротивление  $\rho_0$  кремния, входящего в состав диода, то продолжение отрезка  $L_0\rho_0$  пересекает ось напряжения в точке  $V_0$ , определяющей значение необходимого напряжения смещения [Blankenship, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS7 (2—3), 190—195 (1960)].

## Библиография

### Монографии

1. Fisher C., Les radioéléments et leurs utilisations, Paris, Eyrolles, 1980.
2. Hansen N. J. DéTECTeurs solides de particules chargées, Paris, Dunod, 1971.
3. Kraemer R., Les radio-isotopes dans l'industrie, Paris, Editions Radio, 1965.
4. Lefort M., Les radiations nucléaires, Paris, «Que sais-je?», Presses Universitaires de France, 1980.
5. Price W. J., Nuclear radiation detection, N. Y., McGraw, 1958.
6. Simonnet G., Oria M., Les mesures de radioactivité à l'aide des compteurs à scintillateur liquide, Paris, Eyrolles, 1977.

### Периодические и другие издания

7. Constans H., Coville P., Guerre J., Developpement industriel des détecteurs neutroniques, chambres à fission, collectrons, chambres d'ionisation, *L'onde électrique*, 55, 449 (1975).
8. Rayonnements Ionisants, Numéro spécial du Bulletin d'information du BNM, № 37, 1979.

### Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке

- Прайс В. Регистрация ядерного излучения. — М.: 1960.  
 Ритсон Д. Экспериментальные методы в физике высоких энергий. — М.: 1964.  
 Калашникова В. И., Козодаев М. С. Детекторы элементарных частиц — М.: 1966.

## 17. ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ

Знание влажности воздуха и прочих газов может оказаться существенным для контроля различных физико-химических и биологических процессов. Необходимость ее измерения связана с причинами, которые можно классифицировать в соответствии с задачами, приведенными ниже.

**Бытовое кондиционирование воздуха.** Диапазон значений относительной влажности, соответствующий ощущению комфорта, довольно широк и составляет 35÷70 %. При влажности ниже 35 % могут возникать раздражения дыхательных путей, а выше 70 % происходит опасное для организма ослабление кожного дыхания и потоотделения. В качестве другого критерия можно использовать энергозатраты, необходимые для поддержания определенных климатических условий; так, поддержание высокой влажности при неправильной регулировке кондиционера повлечет за собой неоправданный перерасход энергии при сохранении такого же ощущения комфорта.

**Кондиционирование воздуха в промышленности.** Требования к влажности в промышленности существенно различаются в зависимости от вида производства. В ряде случаев необходимо поддержание постоянных условий, например, в текстильной промышленности, поскольку изменение влажности приводит к изменению характеристик волокна (механическое натяжение, электрическое сопротивление и т. д.) и может повлиять на работу станков.

В пищевой промышленности оптимальные условия хранения различаются для разных продуктов. Обычно желательны стабильные температура (около 0 °C) и очень высокая относительная влажность (85÷90 %, а в отдельных случаях даже выше), так как изменение условий хранения в сторону более высокой влажности может привести к появлению плесени, а снижение влажности приведет к потере массы в результате испарения. Это сложные требования для работы гигрометров.

**Обнаружение следовых количеств водяного пара.** Во многих технологических процессах необходимо избегать присутствия следовых количеств водяного пара, как в воздухе, так и в раз-

личных газах (углекислый газ, гексафторид серы, этилен, природный газ и т. п.), поскольку присутствие слишком большого количества пара может привести в ряде случаев либо к нежелательной побочной реакции, либо к конденсации. В наибольшей степени потребность в промышленных датчиках для измерения очень низких значений относительной влажности (порядка нескольких десятых долей процента) ощущается в ядерной энергетике, микроэлектронике, металлургии, теплотехнике, электроэнергетике высоких напряжений.

**Эксплуатация теплообменников.** Некоторые типы теплообменников основаны на использовании массопереноса, связанного с испарением воды (градирни, скруббера) или с конденсацией водяного пара (холодильные батареи, испарители кондиционеров или тепловых насосов). Эти виды переноса тесно связаны с влажностью воздуха, которую, следовательно, необходимо измерять либо для определения тепловых характеристик установки, либо для контроля за ними в ходе процесса.

**Контроль за работой сушилен.** Влажность воздуха на выходе сушильни является очень важным параметром при расчете ее энергопотребления. Действительно, в энергетическом балансе работы сушильни с горячим воздухом иногда до 80 % потерь тепла связано с уходящим воздухом. Поэтому выгодно осуществлять процесс сушки при минимальном расходе воздуха и выбрасывать воздух наружу при максимальной влажности (однако без снижения скорости сушки).

### 17.1. Основные понятия и термины, связанные с влажностью воздуха

Рассмотрим объем  $V$  влажного воздуха, находящегося при температуре  $T$ . Масса  $M$  влажного воздуха, содержащегося в этом объеме, представляет собой сумму массы сухого воздуха  $m_a$  и массы водяного пара  $m_v$ .

Общее, или барометрическое, давление  $p$  также представляет собой сумму парциальных давлений сухого воздуха  $p_a$  и водяного пара  $p_v$ .

**Массовое отношение влаги  $r$  (кг/кг).** Массовым отношением влаги называется отношение массы водяного пара  $m_v$  к массе  $m_a$  сухого воздуха, в смеси с которым находится этот водяной пар:

$$r = m_v/m_a.$$

Эта величина характеризует влажность.

**Давление насыщенного пара  $p_s(T)$ , Па.** Так обозначается давление пара, находящегося в равновесии с жидккой водой при температуре  $T$ . Это максимальное значение, которое может

принимать парциальное давление пара  $p_v$  при температуре  $T$ ; далее уже происходит конденсация. Таблица значений  $p_s(T)$  для водяного пара приведена в приложении.

*Относительная влажность  $U$ , %.* Относительная влажность есть отношение парциального давления пара воды при температуре  $T$  к давлению насыщенного пара при этой температуре:

$$U = p_v/p_s(T) \cdot 100.$$

Это наиболее часто используемый показатель влажности воздуха.

*Температура точки росы  $T_d$ , °С.* Температура точки росы — это температура, до которой необходимо охладить влажный воздух, чтобы достичь насыщения, сохраняя постоянным массовое отношение влаги в процессе охлаждения. При температуре точки росы

$$p_v = p_s(T_d).$$

*Температура влажного термометра  $T_h$ , °С.* Это температура равновесного испарения воды в воздухе в случае, когда необходимая для испарения теплота поступает только из воздуха. На практике эту температуру получают при традиционном использовании психрометра, основанного на всасывании воздуха. Для обычных воздухо-водяных теплообменников  $T_h$  является характеристикой теплообменника (холодильные башни, скруббера).

*Удельная энталпия  $i$ , кДж/кг.* Здесь энталпия — суммарная теплота, содержащаяся во влажном воздухе; принято считать, что нулевая энталпия соответствует сухому воздуху при 0°C. Удельная энталпия отнесена к единице массы сухого воздуха. Например, для того чтобы влажный воздух, масса сухого воздуха в котором равна  $m_a$ , привести от условий  $A$  ( $T=T_A$ ,  $r=r_A$ ) к условиям  $B$  ( $T=T_B$ ,  $r=r_B$ ), необходимо затратить энергию

$$(i_B - i_A) m_a,$$

где  $i_B$  и  $i_A$  — удельные энталпии, соответствующие условиям  $B$  и  $A$ .

Понятие удельной энталпии позволяет объединить в один член «измеряемую» теплоту, соответствующую изменению ( $T_B - T_A$ ) температуры при переходе от условий  $A$  к  $B$ , и «скрытую» теплоту, соответствующую изменению массовых отношений влаги ( $r_B - r_A$ ) при переходе от условий  $A$  к  $B$ :

$$i(T, r) = c_{pa}T + r(L_0 + c_{fv}T)$$

Здесь  $c_{pa}$  — удельная теплоемкость сухого воздуха (1,006 кДж/кг·°С при  $T=20^\circ\text{C}$ ),  $L_0$  — удельная теплоемкость водяного

пара ( $1,84 \text{ кДж/кг}\cdot\text{°C}$  при  $T=20\text{ °C}$ ),  $L_0$  — скрытая теплота парообразования при  $T_0=0\text{ °C}$  ( $2501,6 \text{ кДж/кг}$ ).

*Соотношения между величинами, характеризующими влажность.* Связь между массовым отношением влаги и давлением пара выражается соотношением

$$r = \delta \frac{p_v}{P - p_v}, \quad \text{где} \quad \delta = \frac{M_v}{M_a} \simeq 0,622,$$

$M_a$  и  $M_v$  — соответственно молекулярные массы воздуха<sup>1)</sup> и водяного пара. Температура влажного термометра и давление пара связаны выражением

$$\text{где} \quad A = \frac{c_{pa}}{\delta L_{T_h}} \frac{P - p_s(T_h)}{P}; \quad A = 0,00064 \quad \text{при} \quad T_h = 20 \text{ °C}.$$

## 17.2. Гигрометры — общие сведения

Гигрометры можно разделить на две группы:

а) гигрометры, основанные на физическом законе, позволяющем непосредственно определять влажность; это — конденсационные гигрометры, психрометры, электролитические и сорбционные гигрометры,

б) гигрометры, принцип действия которых основан на измерении свойств тела, связанных с влажностью, например, импедансные гигрометры.

Эти гигрометры позволяют в соответствии с принципами,ложенными в их основу, определить один из параметров влажного воздуха, описанных в разд. 17.1. Вот эти параметры и гигрометры, обеспечивающие их измерение:

а) температура точки росы  $T_d$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), определяемая конденсационными, сорбционными и электролитическими гигрометрами, а также гигрометрами на основе оксида алюминия;

б) температура влажного термометра  $T_h$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), измеряемая психрометрами;

в) относительная влажность  $U$  (%), определяемая с помощью гигрометров на основе изменения сопротивления и емкости.

Сопоставление различных типов гигрометров затруднено, поскольку они предназначаются для определения различных параметров влажного воздуха.

<sup>1)</sup> В расчетах молекулярную массу воздуха  $M_a$  обычно принимают равной 29. — Прим. перев.

При сопоставлении результатов измерения двумя гигрометрами различных типов может потребоваться перейти от одной характеристики влажного воздуха к другой.

Например, при сопоставлении показаний резистивного и конденсационного гигрометров можно сравнивать относительную влажность, которую показывает датчик первого типа, и значение, рассчитываемое из температуры точки росы и температуры сухого термометра, которые получают с помощью второго гигрометра.

Чтобы оценить точность сопоставления, необходимо учитывать, что ошибка в измерении температуры точки росы  $\Delta T_d$  приведет к ошибке в величине относительной влажности  $\Delta U$ , изменяющейся в зависимости от значений  $T_d$  и  $U$  в соответствии с линией насыщения. Действительно, погрешности в определении этих двух величин связаны между собой множителем, равным тангенсу угла наклона кривой  $(dU/dT_d)_{T=\text{const}}$ ; так, например, при показании сухого термометра  $10^\circ\text{C}$  ошибка определения  $T_d$  в  $1^\circ\text{C}$  приводит к ошибке в величине  $U$  3% при  $T_d = -5^\circ\text{C}$  и 5% при  $T_d = +5^\circ\text{C}$ .

Поэтому перед выбором типа гигрометра важно выделить параметр, который хотят измерить, и, исходя из этого, следует подбирать прибор, который позволит измерять этот параметр с минимальной погрешностью.

### 17.3. Конденсационный гигрометр

#### 17.3.1. Принцип действия и конструкция гигрометра

Тело, температуру которого в любой момент времени можно измерить, постепенно охлаждают до появления росы или инея на его поверхности. Затем процесс стабилизируют таким образом, чтобы между воздухом и каплями росы поддерживалось равновесное состояние. Измеряемая температура представляет собой, следовательно, «точку росы»,  $T_d$  (индекс  $d$  соответствует английскому dew point) или «точку инея»,  $T_f$  ( $f$  от англ. frost point). Начиная именно от этой точки росы, определяют давление пара во влажном воздухе.

Гигрометры на основе точки росы приобрели достаточную точность и стали конкурентоспособными после их автоматизации. На рис. 17.1 изображены принципиальная, конструктивная и электрическая схемы автоматического конденсационного гигрометра.

Основными элементами гигрометра являются зеркало и система регулирования его температуры, датчик для измерения температуры зеркала (платиновый термометр сопротивления

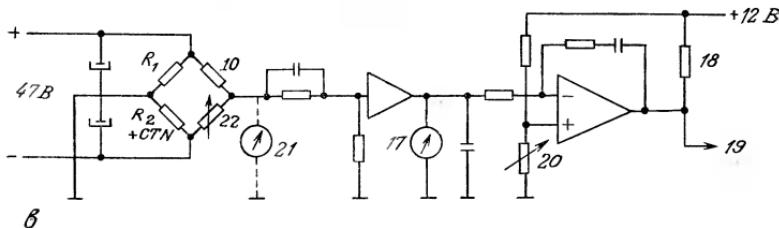
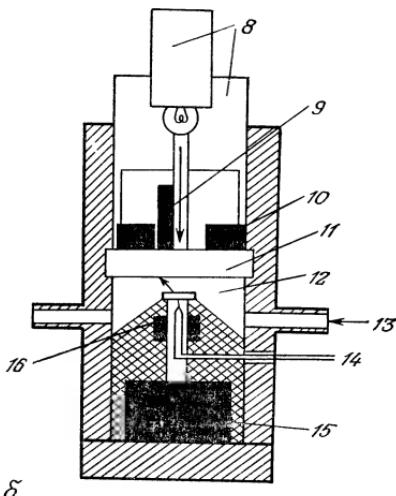
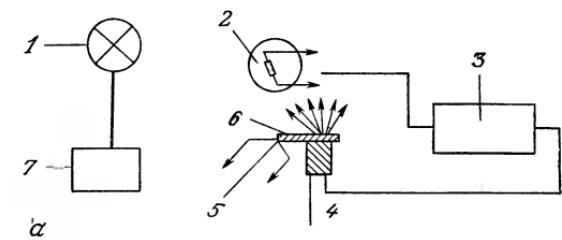


Рис. 17.1. Конденсационный гигрометр (материалы фирмы Sereg — Schlumberger).  
а — принципиальная схема; б — конструкция измерительной головки; в — схема регулировки температуры зеркала. 1 — источник света; 2 — фоточувствительный детектор; 3 — регулятор; 4 — охлаждение — нагрев; 5 — датчик температуры; 6 — зеркало; 7 — питание; 8 — оптический блок; 9 — термистор; 10 — фоторезистор; 11 — окно; 12 — зеркало; 13 — газ; 14 — измерение температуры; 15 — охлаждение (элементы Пельтье); 16 — терморезистор; 17 — «пороговый» индикатор; 18 — резистор нагрева зеркала; 19 — управление охлаждением; 20 — установка порогового уровня; 21 — измерение напряжения  $V_c$ ; 22 — градуировочный сервопотенциометр.

или термопара), источник светового пучка и оптический детектор.

Источник света освещает металлическое зеркало таким образом, чтобы в отсутствие конденсата свет на детектор не попадал. Затем производится охлаждение зеркала (эффект Пельтье, блок охлаждения, сухой лед, жидкий азот и т. п.) вплоть до появления конденсации. При появлении слоя росы или инея рассеянный свет попадает на детектор, который через систему подстройки дает команду на подогрев зеркала. При повышении температуры роса исчезает и исчезает также рассеянный свет, что вновь приводит к охлаждению зеркала. С помощью надлежащей настройки можно получить слой конденсата определенной толщины и достичь таким образом равновесного состояния между паром и его конденсатом. Датчик температуры, прикрепляемый к обратной стороне зеркала, позволяет измерить его температуру.

### 17.3.2. Влияющие факторы

**Градиенты температуры, утечки тепла.** Согласно теоретическому определению, температура точки росы относится к границе раздела воздух — вода. В материале между этой поверхностью и датчиком температуры, закрепленным с обратной стороны зеркала, существует градиент температуры. Дополнительная ошибка вносится теплопроводностью проводов датчика и саморазогревом датчика при использовании платинового термометра сопротивления. Следует, однако, отметить, что все это — систематические погрешности, которые можно учесть при градуировке гигрометра.

**Точка росы и точка инея.** При точке росы ниже 0 °С вода может находиться в виде льда либо переохлажденной жидкости. Таким образом, для одинаковых массовых отношений влаги возможны два равновесных состояния, соответствующие различным равновесным парциальным давлениям. Поэтому при данном массовом отношении влаги температура точки росы и температура появления инея могут быть различными, и этим различием нельзя пренебречь.

Парадоксально, что если осажденный слой содержит примеси, то этот эффект не проявляется. Его можно избежать различными способами, например, вибрацией зеркала или охлаждением до очень низких температур, чтобы наверняка попасть в твердофазную область, с последующим повышением температуры до точки инея.

Фазовый переход вода — лед не обязательно происходит вблизи 0 °С. Некоторые приборы могут функционировать в воде,

переохлажденной до температур ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Некоторые гигрометры снабжены средствами оптического наблюдения зеркала, какой бы ни была температура точки росы.

**Снос характеристики системы детектирования.** Детектор и связанный с ним блок электроники имеют очень высокую чувствительность. Необходимо регулярно производить градуировку гигрометров для компенсации:

- дрейфа системы детектирования;
- влияния загрязнений на поверхности зеркала, рассеивающих свет;
- появления дефектов на поверхности зеркала (царапин в результате чистки).

Для градуировки испаряют всю росу или иней и производят автоматическую компенсацию изменения отражающей способности зеркала (обусловленного главным образом загрязнением зеркала).

### 17.3.3. Метрологические характеристики

Конденсационный гигрометр — единственный, рабочий диапазон измерений которого достаточно широк: от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  (в ряде случаев даже выше). Некоторые гигрометры этого типа предусматривают возможность функционирования при температурах вплоть до  $180^{\circ}\text{C}$  для измерения точки росы кислот или для проведения измерений под давлением.

Точность определения точки росы зависит, с одной стороны, от точности измерения температуры, а с другой — от различных систематических погрешностей. Некоторые модели приборов имеют паспортную точность вплоть до  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Такая точность требует при температурах ниже  $0^{\circ}\text{C}$  знания состава конденсата.

Время запаздывания самого прибора обычно мало по сравнению с постоянной времени системы отбора проб и составляет несколько минут для температуры точки росы выше примерно  $20^{\circ}\text{C}$ . При  $-80^{\circ}\text{C}$  и расходе воздуха 10 л/ч для образования слоя льда толщиной 0,3 мкм требуется 3 ч, что дает порядок величины постоянной времени запаздывания. Важным достоинством гигрометров этого типа является их способность работать в коррозионной среде (продукты сгорания).

Сложность конструкции и хрупкость конденсационных гигрометров, их высокая стоимость и необходимость частой регулировки ограничивают применение этих приборов лабораторными исследованиями.

## 17.4. Сорбционный гигрометр

### 17.4.1. Принцип действия

Измерение влажности с помощью гигрометра этого типа основано на двух явлениях:

1. Давление пара над насыщенным раствором солей ниже давления пара над чистой водой при той же температуре (рис. 17.2).

Возьмем на диаграмме точку  $A$ , которой соответствует определенное давление пара. Массу воды нужно охладить до температуры  $T_d$  (точка росы), чтобы над ней установилось давление насыщенного пара  $p_s$  (вода,  $T_d$ ), равное  $p_v(A)$ . Напротив, насыщенный раствор хлорида лития потребуется нагреть до равновесной температуры, чтобы над ним установилось давление насыщенного пара  $p_s(\text{LiCl}, T_e)$ , равное  $p_v(A)$ :

$$p_v(A) = p_s \text{ (вода, } T_d) = p_s(\text{LiCl, } T_e).$$

2. Электропроводность кристаллической соли ниже электропроводности раствора этой же соли в  $10^3 \div 10^4$  раз. Это явление позволяет достаточно простым способом осуществить нагревание раствора и регулировку мощности нагрева.

Принцип действия сорбционного гигрометра состоит в нагревании насыщенного солевого раствора до тех пор, пока в растворе не установится давление пара, равное давлению пара

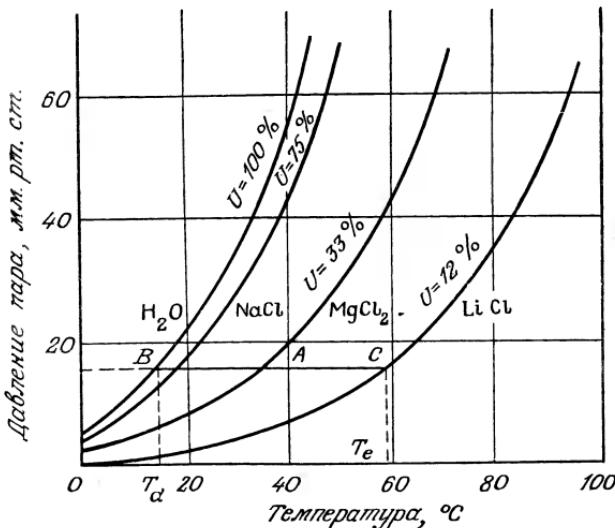


Рис. 17.2. Кривые зависимости давления пара от температуры для воды и насыщенных растворов солей.

Таблица 17.1. Равновесное давление пара над водой и над насыщенным раствором хлорида лития для различных температур [1]

Температура раствора, °C	Давление пара над водой $p_s$ (вода, $T$ ), Па	Давление пара над LiCl $p_s$ (LiCl, $T$ ), Па	Относительная влажность $U = p_s$ (LiCl, $T$ ) / $p_s$ (вода, $T$ ), %
5	872,469	119,2	13,7
10	1227,94	157,6	12,8
15	1705,32	203,6	11,9
20	2338,54	260,6	11,1
25	3168,74	353,2	11,1
30	4245,20	473,9	11,2
35	5626,45	628,7	11,2
40	7381,27	823,6	11,2
45	9589,84	1066,1	11,1
50	12344,78	1364,6	11,1
55	15752,26	1727,5	11,0
60	19933,09	2163,4	10,9
65	25023,74	2681,1	10,7

в окружающем воздухе. Зная эту температуру, можно определить давление пара и, следовательно, температуру точки росы.

Поэтому при измерениях влажности используют насыщенные растворы солей, для которых давление пара было бы при данной температуре минимальным. На практике наиболее удобен хлорид лития. Линия давления его паров приближенно соответствует линии относительной влажности 12% (табл. 17.1). Используемая область на диаграмме, соответствующая влажному воздуху, заключается между этой линией и линией насыщения. Таким образом, из рис. 17.2 видно преимущество использования хлорида лития по сравнению с другими солями.

*Пример.* При давлении пара 2163 Па температура точки росы составляет 18,8 °C (равновесие над водой), но температура равновесия насыщенного раствора хлорида лития с этим же самым паром составляет 60 °C. По этим данным с помощью табл. 17.1 можно установить соответствие между точкой росы и равновесной температурой раствора.

#### 17.4.2. Конструкция и функционирование сорбционного датчика на основе хлорида лития

Датчик состоит из трубки, обернутой тканью, которая пропитана раствором хлорида лития; на трубку намотаны два электрода, изготовленные из коррозионно-стойкого металла. На электроды подается переменное напряжение, создающее в растворе ток, который нагревает его и вызывает испарение воды.

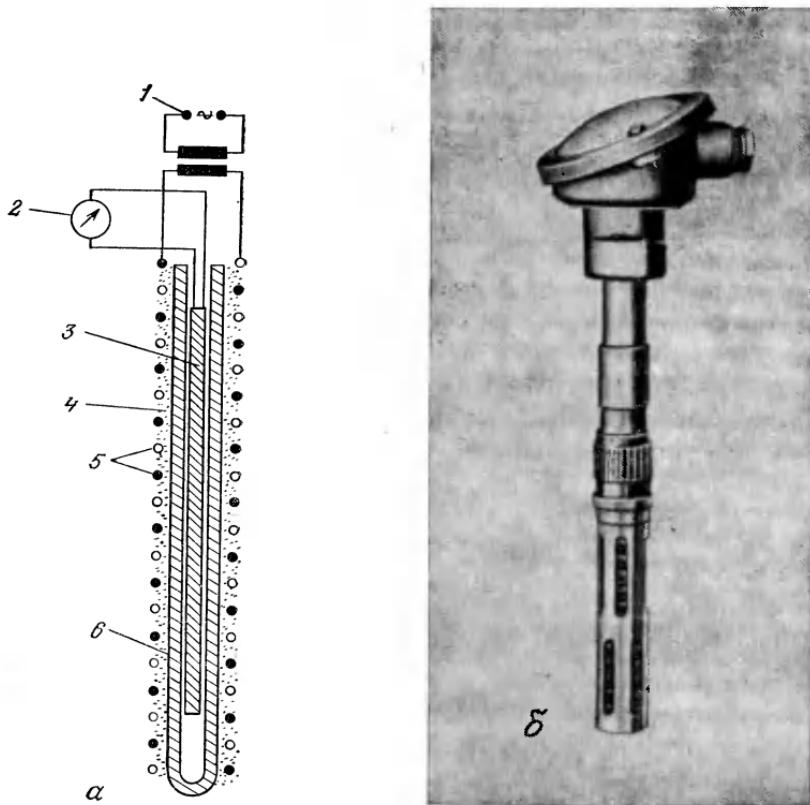


Рис. 17.3. Сорбционный датчик на основе хлорида лития.

*а* — схематическое изображение в разрезе (фирма Siemens); *б* — внешний вид (фирма Richard et Pekly). 1 — источник переменного тока; 2 — индикатор температуры; 3 — платиновый термометр сопротивления; 4 — стекловолокно; 5 — электроды; 6 — изолированная металлическая трубка.

После испарения воды ток, проходящий между электродами, резко уменьшается, поскольку проводимость кристаллического хлорида лития значительно ниже проводимости раствора, и соответственно снижается температура датчика. Одновременно хлорид лития, гидрофильность которого очень высока, снова адсорбирует водяной пар, что приводит к увеличению силы тока и температуры датчика. Таким образом обеспечивается равновесие между твердым хлоридом лития и его раствором. В соответствии с указанным принципом это равновесие наступает при температуре, непосредственно связанной с давлением пара и, следовательно, также с точкой росы, так что определяется именно эта температура. В данной системе регулировка осуществля-

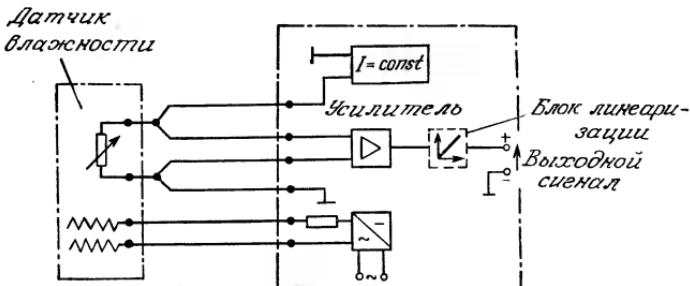


Рис. 17.4. Схема формирования сигнала сорбционного датчика на основе хлорида лития.

ляется с помощью самого хлорида лития. Пример конструкции датчика этого типа приведен на рис. 17.3.

Некоторые гигрометры на основе LiCl снабжены источником питания постоянного тока, позволяющим перевести сигнал изменения омического сопротивления датчика влажности в сигнал изменения напряжения, который усиливается и затем линеаризуется с помощью схемы формирования сигнала, выдающей значение абсолютной влажности (рис. 17.4).

#### 17.4.3. Влияющие факторы

**Скорость потока воздуха.** Большая скорость потока воздуха, обтекающего датчик на основе хлорида лития, приводит к значительному охлаждению датчика и, следовательно, к систематической ошибке в измерениях. Поэтому необходимо либо работать в совершенно спокойном воздухе, что редко бывает возможно, либо вносить поправку, либо защищать датчик кожухом, что приводит к увеличению постоянной времени запаздывания.

**Температура воздуха.** Если температура воздуха такова, что относительная влажность вблизи датчика ниже 12%, то температура датчика равна температуре окружающего воздуха. Практически пределом можно считать 15 и даже 20%; поскольку датчик сам испускает тепло, температура слоя воздуха вблизи датчика ниже температуры окружающего воздуха.

**Состав анализируемого воздуха.** Присутствие в воздухе частиц воды может вызвать замыкание катушек и, следовательно, порчу датчика. Непроводящие частицы не мешают измерению, тогда как осаждение проводящих частиц (следовые количества  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  и т. п.) приводит к ошибочным измерениям. Датчик, используемый в грязном воздухе, необходимо часто подвергать регенерации.

Ниже приведен перечень коррозионных и некоррозионных газов для датчика на основе хлорида лития.

*Коррозионные газы:* трехокись серы, высококонцентрированная двуокись серы, пары серной кислоты, аммиак, высококонцентрированная двуокись углерода, сероводород, газ с конденсирующимися тяжелыми углеводородами.

*Некоррозионные газы:* кислород, инертные газы, азот, водород, циановодород, природный газ, печной газ.

#### 17.4.4. Метрологические характеристики

Гигрометры на основе хлорида лития позволяют измерить температуру точки росы с хорошей точностью. Тот факт, что равновесная температура получается при нагреве датчика, а не при его охлаждении, обеспечивает им важное преимущество по сравнению с конденсационными гигрометрами с точки зрения простоты, надежности и цены.

Воспроизводимость датчика на основе хлорида лития может быть лучше  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , если он используется в стабильных условиях. Точность гигрометра зависит от точности встроенного датчика температур, от конструкции гигрометра и от режима его использования.

Для большинства отградуированных датчиков совокупная погрешность измерений не превышает  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  при скоростях воздушного потока  $<0,5$  м/с. Однако в переходных областях между различными кристаллическими формами LiCl точность гигрометров значительно хуже.

Датчики на основе хлорида лития обычно используются в неблагоприятных условиях и при недостаточной информации о внешних влияниях. Поэтому эффективность их использования очень часто довольно низка. В результате градуировки, тщательной настройки и соблюдения мер предосторожности (особенно по скорости воздушных потоков) можно достичь точности определения точки росы в несколько десятых долей градуса. Постоянная времени датчиков этого типа составляет несколько минут.

Температура равновесия сорбционного гигрометра может находиться в интервале от  $-40$  до  $120^{\circ}\text{C}$ , что соответствует точке росы от  $-40$  до  $65^{\circ}\text{C}$ , но при этом появляются ограничения, вызываемые образованием различных гидратов хлорида лития, которые снижают температуру точки росы. В условиях перехода могут возникать метастабильные гидраты, которым отвечают различные кривые давления пара, т. е. при медленном охлаждении чистой воды до температуры ниже  $0^{\circ}\text{C}$  происходит явление переохлаждения.

Поскольку датчики обычно используют в интервале температур от  $-10$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , для температуры точки росы можно привести два интервала точности:

- при  $-10^{\circ}\text{C} \leq T_d \leq 34^{\circ}\text{C}$  и  $41^{\circ}\text{C} \leq T_d \leq 65^{\circ}\text{C}$  точность определения  $T_d$  составляет  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- при  $34^{\circ}\text{C} \leq T_d \leq 41^{\circ}\text{C}$  точность определения  $T_d$  равна  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

## 17.5. Гигрометры на основе изменения импеданса

Гигрометры на основе переменного импеданса имеют чувствительный элемент, состоящий из гигроскопического вещества, у которого происходит изменение какого-либо электрического параметра (сопротивления или емкости) при изменении окружающей влажности.

Обычно эти чувствительные элементы имеют очень малые размеры и позволяют производить сравнительно точные измерения с малой постоянной времени.

Содержание воды в гигроскопических веществах зависит от относительной влажности воздуха, в равновесии с которым они находятся. В датчике влажности, основанном на этом принципе, используются вещества, для которых зависимость электрических свойств от содержания воды (а также от относительной влажности), обладает свойствами, которые необходимы для измерительного прибора, а именно, стабильностью во времени, обратимостью, линейностью и т. д.

Импедансные гигрометры можно разделить на три группы:

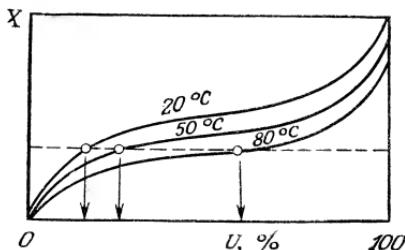
- резистивные гигрометры;
- емкостные гигрометры на основе полимерных диэлектриков;
- емкостные гигрометры на основе диэлектрического оксида алюминия.

Изменения импеданса датчика измеряются с использованием пассивных датчиков (гл. 3), а компенсацию внешних влияний, в особенности температуры, можно осуществить с помощью импеданса той же природы в условиях переменной влажности.

### 17.5.1. Гигрометр резистивного типа

**Принцип действия и конструкция.** Определенное количество гигроскопического вещества наносится на подложку небольших размеров (обычно со стороной в несколько миллиметров). На эту же подложку наносятся два металлических электрода из коррозионно-стойкого металла. Сопротивление между этими двумя электродами зависит от температуры и содержания воды (отношения массы поглощенной воды к сухой массе гигро-

Рис. 17.5. Общий вид зависимости содержания воды от влажности при различных температурах.



скопичного вещества); как видно из рис. 17.5 (изотерма сорбции), это содержание зависит, в свою очередь, от относительной влажности и от температуры окружающей среды.

В некоторых вариантах конструкции в качестве гигроскопичного вещества используется жидкость. Электролиты проводят электрический ток и их сопротивление зависит от объема, который пропорционален содержанию воды в них. Также известен способ преобразования относительной влажности в электрический сигнал. Зависимость между относительной влажностью и сопротивлением можно изобразить в виде изотермы сорбции. На рис. 17.6, а представлена типичная кривая зависимости сопротивления от относительной влажности чувствительного элемента резистивного гигрометра. Отметим, что интервал изменения сопротивления может охватывать от менее 1 до 80 Мом. В действительности сопротивление  $R_m$  гигрометра зависит одновременно от влажности и от температуры: влияние последней можно компенсировать с помощью потенциометрической схемы (рис. 17.6, б), где сопротивление  $R_A$  включается последовательно с  $R_m$  и его зависимость от температуры такая же, как у  $R_m$  (разд. 3.2.1).

**Метрологические характеристики.** Датчики этого типа позволяют измерять относительную влажность в диапазоне от 5÷10% до 95% при температурах от —10 °C до 50÷60 °C для

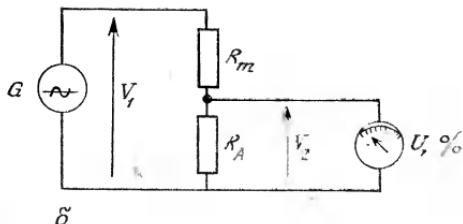
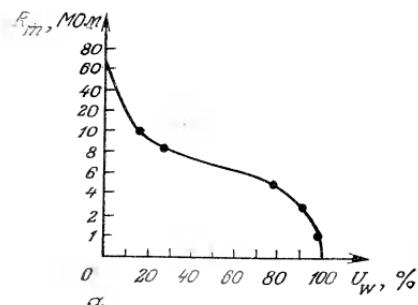


Рис. 17.6. Гигрометр резистивного типа.

а — зависимость сопротивления от относительной влажности; б — потенциометрическая измерительная схема.

наиболее распространенных бытовых гигрометров. Для промышленных моделей предельная рабочая температура может достигать 80 °С.

Постоянная времени датчика составляет около 14 секунд. Указывается паспортная точность от  $\pm 2$  до  $\pm 5\%$  для различных моделей датчиков. Большая часть этих датчиков может применяться совместно с приборами, использующими насыщенные растворы солей, которые позволяют обнаружить постепенный уход от градуировочной кривой (разд. 17.8.2).

**Меры предосторожности.** Необходимо избегать прямого контакта жидкости с чувствительным элементом, что сразу же приведет к его порче. Также необходимо избегать контакта с горючими газами, содержащими растворимые в воде химические соединения, которые также могут повредить гигроскопичное вещество чувствительного элемента.

### 17.5.2. Емкостный гигрометр на основе полимерного диэлектрика

**Принцип действия и конструкция.** Слой полимерного диэлектрика толщиной несколько микрон поглощает из окружающего воздуха молекулы воды, в результате чего устанавливается равновесие с воздухом. Это приводит к изменению диэлектрической постоянной слоя и, соответственно, изменению емкости конденсатора, в котором используется этот диэлектрик.

Опыт показывает, что при этом изменение емкости в зависимости от относительной влажности достаточно хорошо описывается линейным законом, а коэффициент пропорциональности слабо зависит от температуры.

Существуют различные способы изготовления тонкослойных конденсаторов. Описываемая ниже конструкция (рис. 17.7, а)

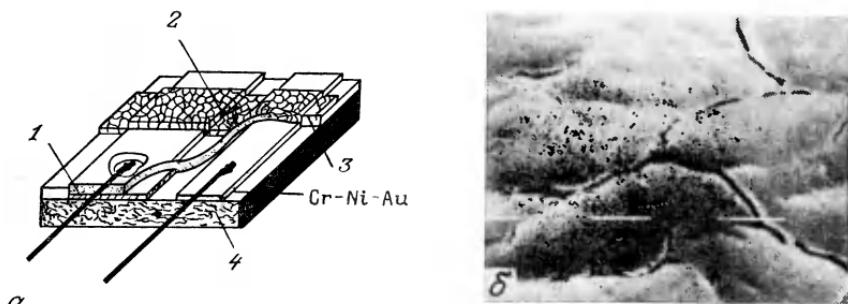


Рис. 17.7. Емкостный гигрометр на основе полимерного диэлектрика.

а — измерительная ячейка (фирма CORECI); б — пористый электрод,  $\times 10^4$  (LETI — CORECI). 1 — tantal; 2 — пористый электрод; 3 — полимер; 4 — подложка.

представляет собой датчик, разработанный Лабораторией электроники и информационной техники (LETI) и выпускаемый фирмой CORECI.

Технология изготовления включает осаждение полимера на первый tantalовый электрод, а затем нанесение на полимер тонкого (толщиной от 100 до 10 000 Å) слоя хрома путем вакуумного напыления. Этот слой вызывает появление трещин в диэлектрическом слое (рис. 17.7, б), что, в частности, устраняет зависимость постоянной времени запаздывания от толщины этого слоя. Здесь хром используется для того, чтобы сделать датчик не чувствительным к серусодержащим примесям. В некоторых емкостных гигрометрах в качестве пористого электрода используется очень тонкий ( $\sim 100$  Å) слой золота.

**Метрологические характеристики.** Диапазон измерений влажности охватывает от 0 до 100% для температур  $-40^{\circ}\text{C} \div +80^{\circ}\text{C}$  или даже до  $+100^{\circ}\text{C}$  в зависимости от типа датчика.

Точность таких гигрометров составляет от  $\pm 2$  до  $\pm 3\%$  в зависимости от рабочей области и типа прибора.

Постоянная времени для достижения 90% конечной величины влажности при изменении относительной влажности от 50 до 90% (или в обратном направлении) составляет  $\sim 1 \div 2$  с.

Влияние температуры на чувствительный элемент датчика пренебрежимо мало, что позволяет обойтись без температурной компенсации. Чувствительный элемент можно погружать в воду практически без риска его испортить.

Как и резистивные датчики, эти гигрометры можно использовать совместно с портативными калибровочными приборами, в которых используются насыщенные растворы солей.

### 17.5.3. Емкостный гигрометр на основе диэлектрического слоя оксида алюминия

**Принцип действия и конструкция.** Используемый диэлектрик представляет собой слой оксида алюминия, нанесенный посредством анодного осаждения на алюминиевую пластинку, представляющую собой первый электрод; в качестве другого электрода служит слой металла, нанесенный на диэлектрик (рис. 17.8, а). Импеданс гигрометров этого типа, как и описанных в предыдущем разделе, меняется в зависимости от относительной влажности окружающей среды (рис. 17.8, б).

Исследования показали, что при толщине оксидного покрытия менее 0,3 мкм изменение импеданса этого конденсатора зависит только от парциального давления водяного пара и не зависит от температуры. Это позволяет измерять абсолютную влажность.

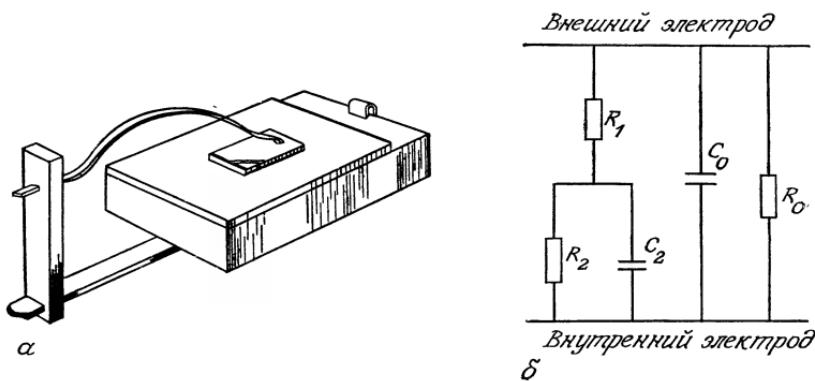


Рис. 17.8. Гигрометр на основе диэлектрика ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

*a* — ячейка производства фирмы Rapametrics; *б* — эквивалентная электрическая схема;  $R_0$ ,  $C_0$  — импеданс компактной части;  $R_1$  — сопротивление боковой поверхности пор;  $R_2$ ,  $C_2$  — импеданс участка между дном пор и внутренним электродом.

Анодное осаждение осуществляется путем электролиза водного раствора серной кислоты, причем анод изготавливается из алюминия. Выделяющийся на этом электроде кислород превращает металл в оксид, при осаждении которого возникает множество точек склонивания, что приводит к пористой структуре слоя.

Например, при использовании сернокислотной ванны (15%), температуре  $10^\circ\text{C}$  и напряжении электролиза 15 В образуется порядка  $7,7 \cdot 10^{10}$  пор на  $1 \text{ см}^2$  диаметром от 100 до  $300 \text{ \AA}$  каждая, так что реальная площадь адсорбции составляет  $\sim 0,2 \text{ м}^2$  на  $1 \text{ см}^2$  эффективной площади.

Варьируя технологические параметры, можно изменять форму, распределение пор и, следовательно, свойства осаждаемого слоя в зависимости от ожидаемой влажности. Эти параметры включают температуру и концентрацию ванны, напряжение питания, продолжительность окисления и ионные добавки к раствору. Так же можно изготавливать датчики, приспособленные к определенным условиям: низкой влажности, высокой температуре и т. п.

Гигрометры, основанные на этом принципе, наиболее удобны для измерения низких значений влажности. В этом случае необходимо, чтобы толщина пористого слоя была минимальной; после анодного осаждения слой полируют, чтобы уменьшить его толщину и сделать датчик чувствительным исключительно к температуре точки росы конкретной окружающей среды.

Второй металлический электрод наносится на поверхность оксида алюминия; для этого могут быть использованы алюминий, медь, золото, серебро, платина, палладий, никром. Указан-

ный электрод должен быть достаточно малым, чтобы не закрывать сверху пористый слой оксида алюминия более, чем это необходимо.

**Метрологические характеристики.** Наиболее важное свойство гигрометра этого типа состоит в том, что он позволяет определить температуру точки росы, причем в широком интервале температур (от  $-80$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ ).

Поскольку датчик предназначен для непосредственного использования в точке измерения, он не требует специального приспособления для отбора проб. Это значительно улучшает быстродействие прибора, поскольку при очень низких значениях точки росы для установления равновесия в самой простой системе отбора проб в виде  $1\frac{1}{2}$  м трубки из нержавеющей стали и маленькой измерительной камеры может потребоваться несколько часов при переходе от точки росы  $+10$  к  $-70^{\circ}\text{C}$ . Действительно, для таких очень низких значений точки росы время установления гигроскопического равновесия системы трубок с воздухом чрезвычайно велико, а скорость установления равновесия зависит от его расхода, температуры, используемых конструкционных материалов и давления в системе. Напротив, постоянная времени датчика на основе оксида алюминия, расположенного непосредственно в исследуемой газовой среде, очень мала и составляет всего несколько секунд.

Показания этих датчиков не зависят от потока: максимальная допустимая скорость ограничивается механической прочностью и составляет около 50 м/с. Датчики этого типа можно использовать при любых давлениях от вакуума до нескольких сотен атмосфер.

Гигрометры на оксиде алюминия позволяют измерять влажности как газов, так и жидкостей. Тем не менее не рекомендуется использовать эти датчики в средах, содержащих коррозионно-активные вещества, такие, как хлорид натрия, сера, которые взаимодействуют с алюминием и, следовательно, могут повредить чувствительный элемент.

## 17.6. Электролитический гигрометр

### 17.6.1. Принцип действия и конструкция

Электролитические гигрометры позволяют определить очень низкие содержания водяного пара в воздухе, содержащем другие газы.

Чувствительный элемент такого гигрометра (рис. 17.9) состоит из трубки длиной 10 см, в которой размещаются скрученные в спираль электроды из платины или родия, со слоем фосфорного ангидрида ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) между ними.

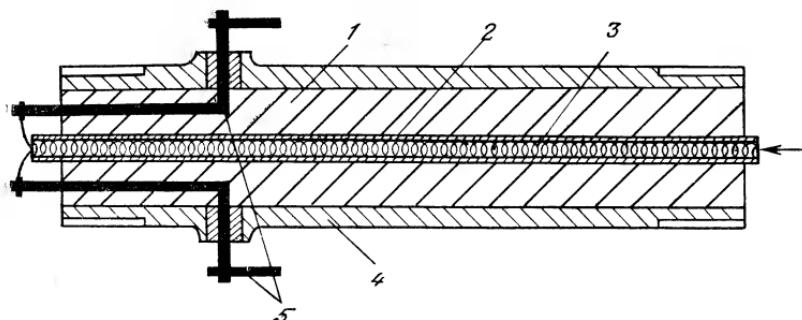


Рис. 17.9. Конструктивная схема электролитического датчика (фирма Beckman).

1 — оболочка из тефлона; 2 — трубка для пропускания воздуха; 3 — электроды; 4 — корпус из нержавеющей стали; 5 — соединительные зажимы.

Исследуемый газ циркулирует в измерительной трубке, а содержащийся в нем водяной пар поглощается фосфорным ангидридом, который превращается при этом в фосфорную кислоту. Между электродами создается постоянное напряжение около 70 В, вызывающее электролиз воды с выделением кислорода и водорода и регенерацию фосфорного ангидрида. Согласно закону Фарадея, который определяет соотношение между количеством электричества, проходящим между электродами, и количеством воды, подвергнутой электролизу, для того, чтобы произошла диссоциация 1 г-эквивалента (т. е. 9 г) воды, необходимо 96 500 Кл электричества. Один моль воды содержит 16 г кислорода и 2 г водорода и включает две связи. Если обозначить массу воды, расщепленной в ходе электролиза за единицу времени, через  $dm_e/dt$ , то сила электрического тока составит

$$I = \frac{96\,500}{9 \cdot 10^{-3}} \frac{dm_e}{dt},$$

где  $I$  выражено в амперах, а  $dm_e/dt$  в кг/с. Обозначив расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), циркулирующего в датчике, через  $Q_v$ , а концентрацию водяного пара, выраженную в кг пара на 1  $\text{м}^3$  воздуха, через  $C_v$ , значение  $dm_e/dt$  можно выразить соотношением

$$dm_e/dt = \alpha C_v Q_v,$$

где  $\alpha$  — коэффициент захвата молекул воды слоем  $\text{P}_2\text{O}_5$ . При подходящей геометрии датчика и определенной величине расхода  $\alpha$  можно довести практически до 1. Однако в любом случае при заданной геометрии этот коэффициент остается постоянным, если постоянна скорость воздуха, и благодаря градуировке можно определить его действительную величину.

**Замечание.** Поскольку электролитический гигрометр пригожден только для измерений очень малых концентраций воды, различие между расходами влажного и сухого воздуха здесь не делается.

Вышеприведенное соотношение для  $I$  можно записать как

$$I = \frac{96\,500}{9 \cdot 10^{-3}} \alpha C_v Q_v$$

либо  $I = k C_v$ , где  $k = \frac{96\,500}{9 \cdot 10^{-3}} \alpha Q_v$ .

При заданном объеме воздуха ток в электролите пропорционален концентрации водяного пара  $C_v$ , выраженной в кг пара на 1 м<sup>3</sup> воздуха.

**Замечание.** Обычно результаты измерений выдаются в виде объемной концентрации, выраженной в миллионных долях (м. д.), т. е. в умноженном на 10<sup>6</sup> отношении объема пара к объему воздуха. (Под «объемом пара» понимается объем, который занимал бы при аналогичных условиях по температуре и давлению пар заданной массы.)

### 17.6.2. Метрологические характеристики

Рассматриваемый гигрометр лучше всего подходит для измерений в газах с очень малым содержанием воды. Порог измерений определяется проблемами сорбции и десорбции воды трубопроводами, которые делают результаты промышленных измерений сомнительными при достижении температуры точки росы  $-70^{\circ}\text{C}$  (10–20 м. д.). Действительно, даже при использовании труб из нержавеющей стали вследствие этих явлений сорбции время установления равновесия составляет более 24 ч при концентрациях ниже 10 м. д. ( $T_d < -70^{\circ}\text{C}$ ).

Рабочий диапазон некоторых моделей таких гигрометров распространяется вплоть до 30 000 м. д. ( $T_d \approx +30^{\circ}\text{C}$ ), однако при переходе уровня 10 000 м. д. возникает опасность разрушения датчика теплотой, выделяемой электролитом; кроме того, коэффициент захвата молекул воды изменяется при высоких значениях влажности. Постоянная времени прибора зависит главным образом от направления, в котором происходит изменение влажности: при повышении влажности (от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>-1</sup>%) постоянная времени обычно не превышает 30 с; при снижении влажности (от 10<sup>-1</sup> до 10<sup>-2</sup>%) эта величина может достигать нескольких минут.

**Меры предосторожности.** В соответствии с принципом действия датчика происходит непрерывная регенерация фосфорного

ангирида  $P_2O_5$ . Однако срок службы этого слоя не безграничен и необходимо периодически производить регенерацию прибора. Частота регенерации зависит от условий использования и от чистоты анализируемого газа. Ее можно уменьшить путем использования фильтров из термообработанной нержавеющей стали. Не рекомендуется использовать гигроскопичные фильтры.

Электролитические гигрометры позволяют измерять влажность различных газов: азота, водорода, воздуха, метана, двуокиси углерода, хладагентов (фреонов и т. д.). Однако в некоторых газах проводить измерения не рекомендуется, поскольку они могут разрушить датчик или повлиять на его функционирование: это — аммиак, пары спиртов, амины, которые вступают в химические реакции с  $P_2O_5$ .

## 17.7. Психрометр

### 17.7.1. Принцип действия. Уравнение психрометра

Этот гигрометр состоит из двух термометров, определенным образом продуваемых воздухом, влажность которого хотят измерить. Чувствительный элемент одного из двух термометров обернут марлей, увлажненной дистиллированной водой. Испарение воды в воздухе вызывает охлаждение термометра до равновесного значения температуры, называемого «температурой влажного термометра». Другой термометр измеряет температуру воздуха, называемую, напротив, «температурой сухого термометра».

Измерение температуры влажного термометра с помощью психрометра представляет собой экспериментальный способ определения теоретической величины, называемой «термодинамической температурой увлажненного термометра».

Температуре влажного термометра можно дать следующую физическую интерпретацию: это температура равновесного испарения в воздухе массы дистиллированной воды, если теплота, необходимая для такого испарения, поступает только из воздуха.

**Уравнение идеального психрометра.** На рис. 17.10 схематически показан влажный термометр, снабженный противорадиационным экраном, предотвращающим поступление тепла извне. Предполагается также, что теплоперенос в результате теплопроводности вдоль корпуса термометра пренебрежимо мал. В пограничном слое влажного фитиля воздух насыщен при температуре  $T_h$ . Массовое отношение влаги для него составляет  $r_h$ , а удельная энталпия равна  $i_h$ .

Если  $i(r, T)$  — энталпия воздуха на входе в психрометр, то уравнение теплового баланса для влажного воздуха, содер-

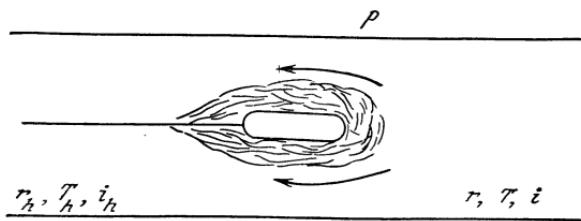


Рис. 17.10. Принципиальная схема гигрометра с влажным термометром.

жащего единицу массы сухого воздуха, можно записать в виде:

$$i_h = i + \Delta i, \quad (1)$$

где  $\Delta i$  — энталпия, отдаваемая жидкостью, т. е.

$$\Delta i = c_{p_e} (r_h - r) T_h.$$

Здесь  $r_h - r$  — разность массы испарившейся воды при температуре  $T_h$  и единицы массы сухого воздуха, а  $c_{p_e}$  — удельная теплоемкость воды при постоянном давлении. Можно записать:

$$i = (c_{p_a} + r c_{p_v}) T + L_0 r$$

$$i_h = (c_{p_a} + r_h c_{p_v}) T_h + L_0 r_h,$$

где  $c_{p_a}$  — удельная теплоемкость сухого воздуха,  $c_{p_v}$  — удельная темплоемкость водяного пара,  $L_0$  — скрытая теплота парообразования при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Уравнение (1) преобразуется следующим образом:

$$(c_{p_a} + r c_{p_v}) (T - T_h) = (r_h - r) \{L_0 + T_h (c_{p_v} - c_{p_e})\}.$$

Скрытая теплота парообразования  $L_{T_h}$  при температуре  $T_h$  равна

$$L_{T_h} = L_0 + T (c_{p_v} - c_{p_e}).$$

Наконец, получаем:

$$(c_{p_a} + r c_{p_v}) (T - T_h) = (r_h - r) L_{T_h}. \quad (2)$$

Это соотношение нельзя использовать непосредственно. Обычно предпочтение отдается уравнению, включающему давление пара  $p_v$ , которое связано с  $r$  соотношением

$$r = \delta \frac{p_v}{p - p_v}, \quad \text{или} \quad \delta = \frac{M_v}{M_a} \approx 0,622.$$

Здесь  $p$  представляет собой барометрическое давление, а  $M_v$  и  $M_a$  — соответствующие молекулярные массы. В результате пре-

образований получаем соотношение

$$p_v = p_s(T_h) - Ap(T - T_h), \quad (3)$$

где

$$A = \frac{c_{p_a}}{\delta L_{T_h}} \frac{p - p_s(T_h)}{p}.$$

Величину  $A$  часто называют психрометрической постоянной.

При  $10 \leq T_h \leq 30^\circ\text{C}$  можно принять  $A = 0,00064$ .

Последнее соотношение позволяет на основе измерений  $T$  и  $T_h$  и при известном барометрическом давлении  $p$  определить  $p_v$  и, следовательно, температуру точки росы  $T_d$  или массовое отношение влаги  $r$ .

**Практическое уравнение психрометра.** Преимущество использования соотношения (3) и психрометрической постоянной заключается в том, что они позволяют ввести поправочный коэффициент, определяемый путем градуировки конкретного прибора. Тогда соотношение (3) для данного психрометра принимает вид

$$p_v = p_s(T_h) - \alpha Ap(T - T_h),$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от  $T$  и  $T_h$  и характеризующий психрометр. В случае идеального функционирования  $\alpha = 1$ .

### 17.7.2. Психрометр с электростимулированным обдувом

Циркуляция воздуха в этом психрометре (рис. 17.11) осуществляется с помощью вентилятора, приводимого в действие либо пружинной механической системой (в простейших моделях), либо электродвигателем (в моделях с непрерывным поступлением воды).

В соответствии с принципом действия психрометра теплота, необходимая для испарения воды из фитиля, должна отбираться из воздуха, поэтому приборы снабжаются противорадиационным экраном, и в тепловом балансе должен преобладать конвектив-

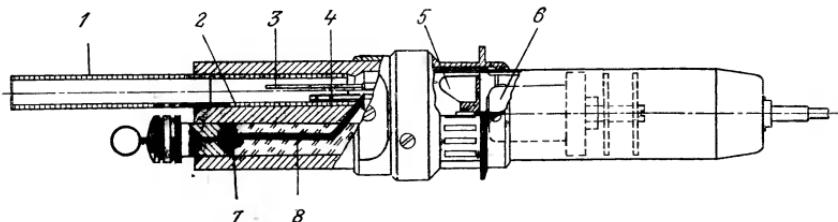


Рис. 17.11. Электрический психрометр с обдувом (конструкция фирмы Ultrakust).

1 — трубка обдува; 2 — металлическая гильза; 3 — сухой термометр; 4 — влажный термометр; 5 — двигатель вентилятора; 6 — вентилятор; 7 — резервуар с дистиллированной водой; 8 — влажный фитиль.

ный теплообмен. Для этого необходима минимальная скорость потока  $2\div4$  м/с.

Измерение температуры сухого термометра и температуры влажного термометра производится с помощью либо ртутных термометров в механических психрометрах, либо с помощью платиновых термометров сопротивления (100 Ом при  $0^{\circ}\text{C}$ ), термопар или полупроводниковых термометров. Влажный термометр обернут хлопчатобумажной тканью. Температура воды, используемой для смачивания фитиля, влияет на постоянную времени прибора. (Идеальным было бы смачивание фитиля водой, имеющей температуру влажного термометра.)

Поскольку вода поступает к влажному термометру непрерывно, необходимо, чтобы участок фитиля (примерно вдвое длиннее датчика температуры) контактировал с воздухом для сокращения поступления тепла вследствие теплопроводности со стороны резервуара с водой.

### 17.7.3. Метрологические характеристики

Основным достоинством психрометра является высокая воспроизводимость, достижимая при условии соблюдения ряда мер предосторожности.

Точность психрометра зависит от его конструкции (противорадиационная защита, достаточная скорость течения воздуха и т. д.) и от аккуратности проведения измерений. При высокотемпературных измерениях иногда необходимо проверять градуировку.

Чувствительность психрометра зависит только от чувствительности датчиков температуры. Дифференциальная схема включения датчиков температуры обеспечивает прекрасную чувствительность и очень хорошую точность даже вблизи насыщения, т. е. в той области, где применение большинства датчиков влажности ограничено.

Важным достоинством психрометров является их простота: они просты в изготовлении и сравнительно дешевы.

Обычно психрометры используются в системах кондиционирования воздуха. Эта область применения может быть несколько расширена при соблюдении ряда условий.

**Низкотемпературный предел.** Измерение  $T_h$  ниже или вблизи  $0^{\circ}\text{C}$  затруднено, так как необходимо проверять, покрыт ли термометр льдом или переохлажденной водой. В этих случаях используются различные уравнения.

**Высокотемпературный предел.** Необходимо рассмотреть два случая:

1. Психрометры, не рассчитанные на непрерывную подачу воды от фитиля, имеют высокотемпературный предел, обуслов-

ленный тем, что вода, смачивающая фитиль, может испаряться быстрее, чем устанавливается равновесие в колбе с влажным воздухом. Обычно полагают, что температура  $40^{\circ}\text{C}$  является пределом.

2. Психрометры, рассчитанные на непрерывную подачу воды с расходом, компенсирующим испарение, пригодны для использования вплоть до температур  $90\div100^{\circ}\text{C}$ , если температура резервуара равна температуре пробоотбора ( $200^{\circ}\text{C}$  и выше), а резервуар и систему подачи можно поддерживать при температурах ниже точки кипения воды.

Разработан психрометр, предназначенный специально для измерения влажности в сушильнях, которые могут функционировать вплоть до температур сухого термометра порядка  $200\div250^{\circ}\text{C}$  при температуре влажного термометра  $20\div75^{\circ}\text{C}$  (патент фирмы ITF — INOTECHNIQUE).

Прибор, схематически представленный на рис. 17.12, *a* (патент фирмы ITF Leblanc), снабжен, по сравнению с классическими психрометрами, рядом оригинальных приспособлений, позволяющих ему функционировать при высокой температуре; например, увлажнение влажного термометра обеспечивается с использованием инжекторной системы периодической пульверизации. Эта система соединена с приспособлением для измерения изменения температуры влажного термометра и определения

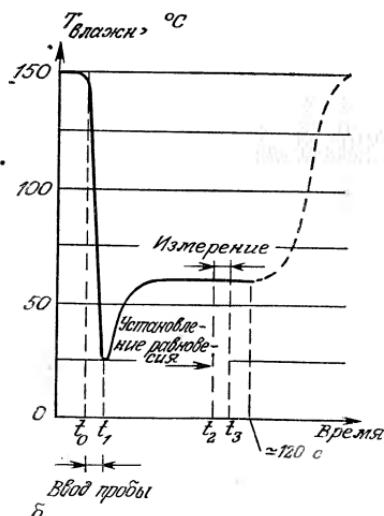
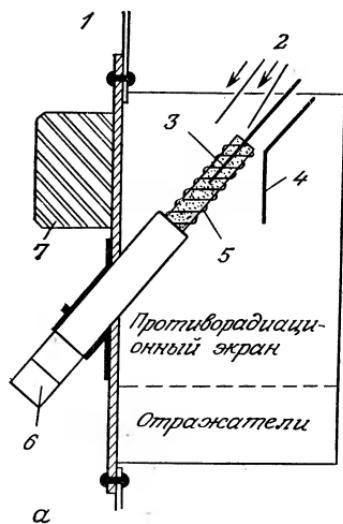


Рис. 17.12. Психрометр для измерения влажности при высокой температуре (материалы фирмы Inotechnique — Richard & Pekly).

*a* — конструкция; *b* — определение интервалов времени, необходимого для достижения теплового равновесия. 1 — стенка трубы; 2 — инжекторы; 3 — влажный датчик; 4 — сухой датчик; 5 — пористое тело; 6 — съемный чехол; 7 — соединительная муфта.

интервала времени, на котором устанавливается тепловое равновесие (рис. 17.12, б). Именно на протяжении этого интервала термометр, по определению, указывает температуру влажного воздуха.

## 17.8. Градуировка

### 17.8.1. Методы градуировки: гравиметрический банк

Метод состоит в разделении определенной массы влажного воздуха с помощью системы обезвоживания на сухой воздух и водяной пар и измерении по отдельности массы собранной воды  $m_v$  и массы сухого воздуха  $m_a$ . Таким образом непосредственно получают массовое отношение влаги  $r$  для влажного воздуха.

Этот метод считается в настоящее время наиболее точным методом измерения влажности, поскольку он позволяет непосредственно определить параметр  $r$  — основную величину при определении влажности (т. е. этот метод является первичным методом градуировки).

Принцип, на котором базируется этот метод, очень прост, однако при желании достичь очень высокой точности его реализация может оказаться очень сложной и дорогостоящей. Национальное бюро стандартов в Вашингтоне (НБС США), считающееся авторитетным в этой области, позволяет определить массовое отношение влаги с точностью 0,1% в области изменения температуры точки росы от  $-30$  до  $+30$  °C.

Гравиметрический банк НБС, довольно сложный в применении, используется только для контроля градуировочных установок, называемых вторичными эталонами. Именно с помощью этих установок, более гибких в использовании, хотя и менее точных, чем гравиметрический банк (но все же достаточно точных для градуировки датчиков), проводится поверка гигрометров.

В банк стандартов, созданный Техническим центром гидромеханики и теплотехники (СЕТИАТ), входят следующие метрологические средства:

а) генератор влажного воздуха на основе многократной циркуляции;

б) испытательная камера, в которую помещается градуируемый гигрометр;

в) образцовый гигрометр, играющий роль эталона.

Этот банк принят Национальным метрологическим бюро Франции в качестве центра поверки.

Фундаментальным элементом банка поверки является эталон переноса, поскольку именно он позволяет обеспечить соответствие эталонным средствам НБС.

Эталон переноса спроектирован и изготовлен в CETIAT в соответствии с принципом гигрометра на основе точки росы. По сравнению с приборами классической схемы в него внесен ряд модификаций с целью повышения чувствительности и воспроизведимости измерений.

С помощью этой установки можно решить проблемы градуировки в области, соответствующей примерно области кондиционирования воздуха ( $-20^{\circ}\text{C} \leq T_d \leq +25^{\circ}\text{C}$ ). Для температуры точки росы погрешность составляет  $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$  при температурах выше  $0^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  при минусовых температурах. Погрешность в определении относительной влажности составляет  $\pm 0,8\%$  от показаний (с учетом ошибки  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  в измерении температуры сухого термометра).

Для высоких температур разработан генератор влажного воздуха, позволяющий получать температуру сухого термометра  $150^{\circ}\text{C}$  и температуру точки росы  $+60^{\circ}\text{C}$ , причем точность этого эталона составляет  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  в интервале  $+40 \div +60^{\circ}\text{C}$ .

При низких значениях влажности диапазон может быть расширен вплоть до точки росы вблизи  $-50^{\circ}\text{C}$ .

### 17.8.2. Метод насыщенных растворов солей

Метод основан на том, что водный раствор соли и водяной пар могут находиться в равновесии только в соответствии с кривой зависимости давления пара от температуры.

Для чистой воды равновесная зависимость  $p_s(T)$  хорошо известна, а для насыщенных растворов солей кривые  $p_s(T)$  различны для каждой из солей. В каждом случае кривые равновесия достаточно хорошо перекрываются кривыми, соответствующими постоянной относительной влажности. Это дает относительно простой в применении метод градуировки. В табл. 17.2

Таблица 17.2. Относительная влажность воздуха, находящегося в равновесии с различными насыщенными растворами солей

Соль	Относительная влажность при различных температурах, %				
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Хлорид лития	14	12	12	11	11
Хлорид магния	34	33	33	32	31
Хлорид натрия	76	76	75	75	76
Сульфат калия	98	97	96	96	96

Приложение 1. Давление насыщенного пара воды (Па) при температурах от 0 до 100 °С через 1° [10]

Приложение II. Давление насыщенного пара над гладкой поверхностью льда при температурах

от 0 до -100 °С через 1 по данным международных метрологических таблиц (О/М/М № 188 ТР94)							
°С	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
0	6,1064	5,6219	5,1727	4,7564	4,3709	4,0141	3,6840
-10	2,5966	2,3752	2,1712	1,9833	1,8104	1,6514	1,5053
-20	1,0315	0,9368	0,8501	0,7708	0,6983	0,6322	0,5719
-30	0,3797	0,3420	0,3078	0,2768	0,2487	0,2232	0,2002
<i>Давление в мбар (100 Па)</i>							
-40	128,3	114,5	102,1	90,954	80,942	71,958	63,905
-50	39,334	34,746	30,657	27,020	23,787	20,916	18,371
-60	10,800	9,4275	8,2189	7,1560	6,2224	5,4034	4,6858
-70	2,6136	2,2506	1,9351	1,6614	1,4243	1,2191	1,0418
<i>Давление в 10<sup>-3</sup> мбар (0,1 Па)</i>							
-70	54,684	46,353	39,224	33,134	27,940	23,518	104,18
-80	8,0432	6,6804	5,5373	4,5802	3,7807	3,1140	88,894
-90	9,6646						16,572
-100	1,4029						2,5594
<i>Давление в 10<sup>-5</sup> мбар (1 мПа)</i>							
-70	54,684	46,353	39,224	33,134	27,940	23,518	75,727
-80	8,0432	6,6804	5,5373	4,5802	3,7807	3,1140	13,872
-90	9,6646						2,0989
-100	1,4029						1,7174

приведены значения относительной влажности для различных солей в интервале температур 5–40 °C.

Отметим, что значение относительной влажности для определенной соли несколько изменяется с температурой, поскольку кривые равновесия для растворов солей не точно совпадают с кривыми  $U=\text{const}$ . Поэтому для точных измерений необходимо помещать сосуд в термостат.

Этот метод особенно подходит для калибровки датчиков, не требующих циркуляции воздуха и позволяющих непосредственно измерять значения относительной влажности.

## Библиография

### Монографии

1. Acheson D. T., Vapour pressure of saturated aqueous salt solutions, Humidity and Moisture, N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1965, vol. 3, p. 521.
2. Burton J., Pratique de la mesure et du contrôle dans l'industrie, Paris, Dunod, 1958.
3. Heldin C. P., Trofimenko M., An investigation of the accuracy and response rate of a lithium chloride heated electrical hygrometer, Humidity and Moisture, N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1965, vol. 1, p. 627.
4. Nelson D., Amdur E., The mode of operation of saturation temperature hygrometers based on electrical detection of a salt solution phase transition, Humidity and Moisture, N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1965, vol. 1, p. 617.
5. Wexler A., Hyland R., The N. B. S. standard hygrometer, Humidity and Moisture, N. Y., Reinhold Publishing Corp., 1965, vol. 3, p. 389.

### Периодические и другие издания

6. Delapierre G., Hygromètre capacitif à base de polymère, *Mes. Reg. Aut.*, n° 11, 47 (1981).
7. Laneres M., Mesure de l'humidité de l'air à haute température, *Mes. Reg. Aut.*, n° 12, 35 (1981).
8. Merigoux J., La comparaison des hygromètres et l'interprétation des mesures de l'humidité dans l'air, *Informat. Aeraul. et Therm.*, n° 40, 30 (1974).
9. Merigoux J., Cretinon B., Le centre d'étalonnage des hydromètres, *Bulletin B. N. M.*, n° 42, 11 (1980).
10. Wexler A., Greenspan L., Vapor pressure equation for water in the range 0 °C ea 100 °C, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 75A, 213 (1971).
11. Wiederhold P. R., Humidity Measurements, *Instrumentation Technology* (juin, août 1975).
12. Goodman P., Device for measurement of absolute humidity, U. S. patent 352, 344, 4.8. 1970.
13. Merigoux J., Cretinon B., Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses, Norme AFNOR NFX 15014.
14. Novasina, The N. S. humidity measurement. The sensor construction principle—Application et détermination d'isothermes de sorption. Sina Bulletin 15830.
15. Organisation Météorologique Mondiale, Tables météorologiques internationales O/M/M, n° 188, T194,

## 18. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Электрохимические датчики используются для химических исследований. Еще Фарадей (1791—1861) установил соотношение, которым подчиняются электрохимические процессы, т. е. реакции с участием электрически заряженных частиц (обычно ионы и электроны) в вызывающей диссоциацию среде. Электрохимический датчик по существу представляет собой проводник электрического тока, который помещается в исследуемую среду. При этом устанавливается перенос зарядов между присутствующими в среде заряженными частицами и датчиком. Результирующая разность свободных энергий на границе раздела фиксируется датчиком и передается в измерительную цепь в виде электрического сигнала — тока или напряжения.

### 18.1. Классификация электрохимических датчиков

Селективность рассматриваемых датчиков, или электродов, зависит от их химической природы. Так, датчики электронной проводимости, изготовленные из химически стойких материалов (платины, углерода и т. п.), чувствительны к химическим процессам, протекающим с участием электронов, т. е. ко всем окислительно-восстановительным процессам. Датчики ионной проводимости проявляют чувствительность к частицам, которые присоединяют ионы или служат источником ионов, проявляющих подвижность в материале, из которого состоит чувствительный элемент датчика.

Принимая во внимание разнообразие электрохимических датчиков, используемых в настоящее время, необходимо установить их классификацию (табл. 18.1). В соответствии с принципами, на которых основано их функционирование, электрохимические датчики можно разделить на три основные группы: потенциометрические, амперометрические и кондуктометрические датчики.

**Потенциометрические датчики.** Использование этих датчиков основано на определении разности потенциалов, которая устанавливается между измерительным электродом и электродом сравнения (электродом с постоянным и воспроизводимым потен-

**Таблица 18.1.** Основные типы электрохимических датчиков

Группа электрохимических методов	Типы датчиков	Чувствительные элементы	Определяемые частицы
<b>Потенциометрия</b>	<b>Редокс-электроды</b>  <b>Электроды для измерения pH</b>	Платина, графит, стеклоуглерод, золото и др. Стекло особого состава Металлооксид (например, $\text{Sb}/(\text{Sb}_2\text{O}_3/\text{Sb}_2\text{O}_5)$ ) Катионные мембранные $\text{Si}_3\text{N}_4$	Все окислительно-восстановительные системы (например, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , $\text{I}_3^-/\text{I}^-$ и т. п.)
<b>Ион-селективные электроды</b>		Стекла особого состава Мембранный обменник на основе жидкости или заряженного полимера Монокристаллы $\text{LaF}_3$ Поликристаллические мембранны Мембранны для диффузии газов+электрод для измерения pH	$\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{ClO}_4^-$ , $\text{BF}_4^-$ $\text{F}^-$ $\text{Ag}^{+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Tl}^+$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{I}^-$ , $\text{CN}^-$ , $\text{SCN}^-$ , $\text{S}_2^{2-}$ , $\text{O}_2$ , $\text{NH}_3$ , $\text{CO}_2$ , $\text{SO}_2$ , $\text{N}_x\text{O}_y$ , $\text{H}_2\text{S}$
<b>Поляграфия</b>	<b>Редокс-электроды</b>  <b>Кислородный электрод Кларка</b>  <b>Ферментативные электроды</b>	$\text{Hg}$ , $\text{Pt}$ , $\text{C}$ , $\text{Au}$ Мембрана для диффузии газов+редокс-электрод ( $\text{Pt}$ или $\text{Au}$ ) Мембрана с привитыми ферментами+редокс-электрод ( $\text{Pt}$ ) или ион-селективный электрод	Частицы, способные окисляться или восстанавливаться в растворе $\text{O}_2$ Глюкоза, мочевина
<b>Кондуктометрия</b>	<b>Электролитические дат. Pt, платинированная Pt, неразмежерения жавоющей стали, графит и др.</b>  <b>Удельной электропроводности или удельного сопротивления</b>		Все частицы, дающие ионы в растворе

циалом, не зависящим от среды, в которую он помещается). Эта разность потенциалов определяется активностью ионов электролита, в который погружен датчик. Этот режим работы называют «потенциометрией при нулевом токе», если в измерительной цепи ток не возникает, что является наиболее распространенным случаем. В противном случае говорят о потенциометрии при наличии тока.

**Амперометрические датчики.** Функционирование этих датчиков связано с прохождением электрического тока в измерительной цепи. При этом между двумя электродами создается разность потенциалов (обычно используются металлический электрод и электрод сравнения); концентрация исследуемых частиц пропорциональна силе тока, возникающей в электродной цепи.

**Кондуктометрические датчики.** Для таких измерений используется датчик с двумя электродами из химически стойкого материала, на которые подается напряжение или переменный ток. Использование переменного тока позволяет уменьшить ошибки, обусловленные поляризацией, вызывающей электродные реакции. Измерение либо силы тока при известном приложенном напряжении, либо напряжения при известной силе приложенного тока позволяет определить сопротивление или проводимость исследуемой среды.

## 18.2. Потенциометрические датчики

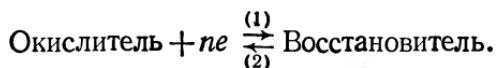
### 18.2.1. Общие принципы потенциометрии

Потенциометрия представляет собой электрохимический метод, основанный на измерении разности потенциалов между двумя погруженными в раствор электродами. Потенциал электрода зависит от концентрации ионов, присутствующих в растворе. Определение потенциалов электрода позволяет оценить концентрацию частиц (ионометрия) или проследить за изменениями этой концентрации в ходе химической реакции (потенциометрическое титрование).

Соответственно различают: а) электроды для определения окислительно-восстановительных потенциалов; б) электроды для измерения pH; в) ион-селективные электроды.

Для электродов первого типа потенциал зависит от окислительно-восстановительных реакций, протекающих в растворе, в который они погружены.

Реакции окисления или восстановления сопровождаются обменом электронов:



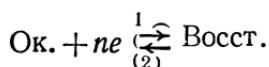
Вещество, присоединяющее электроны в направлении (1), играет роль окислителя и восстанавливается. Вещество, которое отдает электроны в направлении (2), играет роль восстановителя и окисляется.

Электроны могут поступать из проводника в раствор, являющийся окислителем, или из раствора на проводник (в этом случае раствор играет роль восстановителя). Обмен электронами между электродом и веществами в растворе означает, что идет электрохимическая реакция.

При погружении химически стойкой проводящей нити в раствор, содержащий окислительно-восстановительную систему  $\text{Ок.} + ne \rightleftharpoons \text{Восст.}$ , между проводником и веществами — окислителем и восстановителем — происходит обмен электронами. Наконец, устанавливается равновесие, при котором процесс «Окислитель +  $ne \rightarrow$  Восстановитель» происходит с такой же скоростью, что и обратный процесс «Восстановитель —  $ne \rightarrow$  Окислитель». С этого момента изменения состава раствора вблизи электрода более не происходит и проводник приобретает равновесный потенциал  $E$ .

**Закон Нернста.** В очень разбавленных растворах ионы ведут себя подобно молекулам идеального газа, а эквивалентом давления газа служит осмотическое давление ионов в растворе. Если осмотическое давление одной из форм выше, чем другой, то возникает компенсирующий разность давлений обмен электронами на электроде.

Пусть окислитель в растворе имеет концентрацию  $C_1$  и осмотическое давление  $p_1$ , а восстановитель — соответственно  $C_2$  и  $p_2$ . Например, если давление  $p_1$  выше давления  $p_2$ , то на электроде преобладает реакция (1):



Следовательно, на электроде появляется положительный заряд, достигающий некоторого предельного значения, когда работа  $w$  этой реакции в точности компенсируется работой, необходимой для отрыва электрона — носителя отрицательного заряда — от положительно заряженного электрода. Таким образом, для иона можно записать равенство  $w = Eq$ , где  $w$  — работа реакции,  $E$  — равновесный потенциал и  $q$  — заряд электрона.

Для одного моля ионов получаем

$$W = ENq,$$

$$\text{т. е. } W = EF. \quad (a)$$

Здесь  $N$  — число Авогадро ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ) и  $F$  — постоянная Фардаea (96 493 Кл). Для обеих форм при постоянной температуре

выполняется соотношение

$$dW = (RT/p) dp,$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура, а давление  $p$  связано с концентрацией соотношением вида

$$p = kC.$$

Следовательно, можно записать:

$$dW = (RT/C) dC,$$

и, поскольку

$$dW = dW_1 + dW_2,$$

получаем

$$dW = (RT/C_1) dC_1 + (RT/C_2) dC_2.$$

Общая концентрация остается постоянной:

$$dC_1 = -dC_2 = dC$$

и  $dW = (RT/C_1) dC - (RT/C_2) dC,$

откуда  $W = W_0 + RT \ln(C_1/C_2).$

Подставляя  $W_0 = FE_0$ , получаем

$$W = F(E_0 + (RT/F) \ln(C_1/C_2)). \quad (б)$$

Сопоставление уравнений (а) и (б) дает выражение для равновесного потенциала:

$$E = E_0 + (RT/F) \ln(C_1/C_2).$$

Так как в химической реакции участвуют  $n$  электронов, равновесный потенциал определяется выражением

$$E = E_0 + (RT/nF) \ln(C_1/C_2).$$

Выкладки проведены в предположении, что раствор является идеальным. Обычно систему нельзя рассматривать как идеальную, и поэтому концентрацию  $C$  следует заменить активностью  $a$ , определяемой соотношением

$$a = \gamma C,$$

где  $\gamma$  — коэффициент активности, и выражение для равновесного потенциала принимает вид

$$E = E_0 + (RT/nF) \ln(a_1/a_2).$$

В общем виде это уравнение, называемое уравнением Нернста, записывается следующим образом:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Ок.})}{(\text{Восст.})},$$

где (Ок.) и (Восст.) — активности окисленной и восстановленной форм соответственно, или с использованием десятичных логарифмов:

$$E = E_0 + \frac{2,3 RT}{nF} \lg \frac{(\text{Ок.})}{(\text{Восст.})}.$$

Член  $2,3RT/nF$  называется коэффициентом Нернста и определяет электродный потенциал. Этот коэффициент, величина которого изменяется в зависимости от температуры, составляет 59,16 мВ при 25 °C.

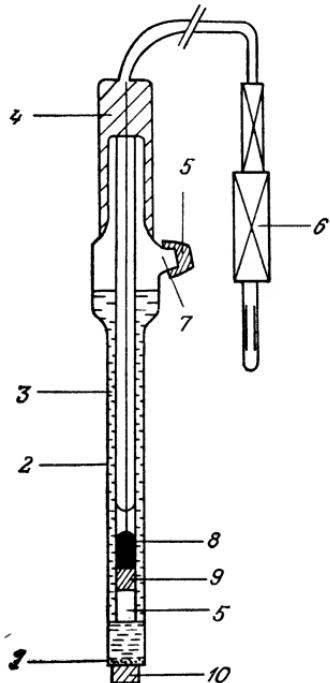


Рис. 18.1. Каломельный электрод сравнения.

1 — кристаллы KCl (в избытке); 2 — корпус; 3 — насыщенный раствор KCl; 4 — головка из изолирующего материала; 5 — заглушка; 6 — штекер; 7 — отверстие для заполнения; 8 — ртуть; 9 — каломель ( $Hg_2Cl_2$ ); 10 — пористая пластина.

**Электроды сравнения.** Потенциал электрода нельзя измерить непосредственно; можно определить только разность потенциалов между двумя электродами. Поэтому измеряют разность потенциалов между экранированным металлическим (индикаторным) электродом и электродом сравнения, потенциал которого постоянен и принимается за точку отсчета.

Нулевой потенциал принято определять по нормальному водородному электроду. Это платиновый электрод, покрытый платиновой чернью и погруженный в водный раствор с активностью ионов  $H^+ = 1$ , через который пропускают в контакте с платиной ток газообразного водорода, находящегося при атмосферном давлении. Разность потенциалов между таким электродом и его раствором принимается равной 0. Нормальный водородный электрод требует аккуратного обращения с учетом риска его загрязнения и разрушения, а также продолжительности установления равновесия.

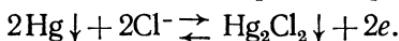
На практике в рутинных измерениях предпочтение отдается использованию более простых в обращении электродов сравнения, э.д.с. которых оп-

ределена с высокой точностью: каломельного, ртуть (1)-сульфатного, хлорсеребряного и других электродов.

Каломельный электрод (рис. 18.1) — наиболее часто используемый электрод сравнения — состоит из стеклянного корпуса, заполненного насыщенным раствором хлорида калия. Нижний конец стеклянного корпуса закрыт диафрагмой из пористого керамического материала, которая обеспечивает непосредственный контакт с исследуемым раствором, создавая таким образом электрическую цепь. В стеклянном корпусе размещается собственно элемент сравнения, который состоит из ртути, находящейся в контакте с хлоридом ртути:

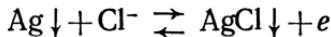


Равновесие каломельного электрода определяется реакцией



Его потенциал, составляющий  $E = E_0 - 0,058 \lg [\text{Cl}^-]$ , зависит только от активности хлорид-ионов. Если электрод заполнен насыщенным раствором хлорида калия, то потенциал электрода составляет 244,4 мВ при 25 °C по сравнению с нормальным водородным электродом.

Хлорсеребряный электрод сравнения состоит из серебряной нити, покрытой хлоридом серебра и погруженной в раствор, содержащий хлорид-ионы. Он функционирует согласно реакции



и имеет потенциал

$$E = E_0 - 0,058 \lg [\text{Cl}^-].$$

Этот потенциал также зависит только от активности хлорид-ионов.

### 18.2.2. Электроды для измерения окислительно-восстановительного потенциала

Измерение окислительно-восстановительного потенциала обычно производится с помощью электрода из химически стойкого материала, функционирующего как акцептор и донор электронов.

Этот электрод при погружении в раствор, содержащий исследуемую окислительно-восстановительную систему, приобретает потенциал

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Ок.})}{(\text{Восст.})} .$$

Измерение электродного потенциала при изменении концентрации окислителя или восстановителя позволяет проследить за протеканием реакции, сопровождающейся изменением концентрации частиц одного вида, но не дает возможности определить концентрации частиц.

Эти электроды позволяют осуществить количественный анализ некоторых веществ: титрование железа  $\text{Fe}^{2+}$  церием  $\text{Ce}^{4+}$ , восстановление  $\text{Cr}^{6+}$  в  $\text{Cr}^{3+}$  серным ангидрилом, окисление цианид-ионов  $\text{CN}^-$  в цианат-ионы  $\text{CNO}^-$  и т. д. Такой анализ возможен, если в растворе имеется только одна окислительно-восстановительная система.

Измерение потенциала индикаторного электрода относительно потенциала электрода сравнения осуществляется с помощью милливольтметра с большим входным импедансом.

Обычно электроды изготавливают из химически стойких металлов (золота, платины, ртути, серебра) или графита.

Стандартная конструкция электрода представляет собой металлический стержень, впаянный или вклеенный в нижний конец стеклянной или пластмассовой трубы (рис. 18.2).

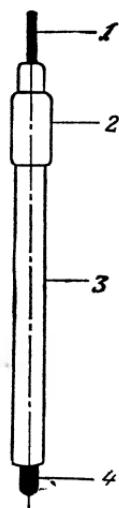


Рис. 18.2.  
Металличес-  
кий элек-  
трод.

- 1 — провод;
- 2 — головка;
- 3 — стеклян-  
ный корпус;
- 4 — чувстви-  
тельный эле-  
мент (плати-  
на, золото,  
графит и т. п.).

Платиновые электроды используются для измерения потенциалов в интервале от  $-0,1$  до  $+0,9$  В, золотые — для потенциалов от  $-1$  до  $+0,3$  В. Серебряные электроды можно использовать для проведения измерений лишь в тех растворах, где они не участвуют в электрохимической реакции, т. е. в растворах, не содержащих ионов  $\text{Ag}^+$ . Поэтому серебряные электроды используются для измерения потенциалов в интервале от  $-1$  до  $0,3$  В.

Индикаторные электроды из благородных металлов не участвуют в электрохимической реакции; они совершенно инертны и не требуют, следовательно, особого ухода за ними. Тем не менее в точности воспроизвести состояние поверхности этих электродов от измерения к измерению невозможно; поэтому измерения окислительно-восстановительного потенциала с помощью электродов из таких металлов характеризуются плохой воспроизводимостью. По этой причине потенциометрические датчики с таким индикаторным электродом требуют градуировки при каждой чистке или замене электрода перед его использованием для потенциометрического титрования или для обеспечения регулировки потенциала. Такие датчики, к сожалению, непригодны для измерения абсолютных концентраций.

### 18.2.3. Стеклянные электроды для измерения pH

Величина pH, т. е. отрицательный логарифм активности ионов  $H^+$ , характеризует кислотность растворов. Измерение pH необходимо в различных областях: химической промышленности, агрохимии и пищевой промышленности, фармацевтике, нефтехимии, клинической биологии и т. д. Согласно оценкам, в мире в настоящее время насчитывается несколько миллионов pH-метров и не менее сотни тысяч — во Франции. Таким образом, pH-метры представляют собой наиболее распространенный тип электрохимических датчиков.

Первый электрод для измерения pH, основанный на том же принципе, что и современные электроды, был описан в 1909 г. Хабером. Хабер установил, что некоторые типы стекол определенного состава являются слабыми проводниками электричества и что в этом случае потенциал, который устанавливается на границе между мембраной из такого стекла и водным раствором, зависит от кислотности этого раствора и, согласно уравнению Нернста (разд. 18.2.1), равен

$$E = E'_0 + (RT/F) \ln a_{H^+}.$$

Здесь  $E'_0$  — «стандартный», или «нормальный» потенциал используемого электрода, измеряемый относительно электрода сравнения данного типа;  $a_{H^+}$  — активность ионов  $H^+$  в исследуемом растворе. Эта активность может совпадать с концентрацией для растворов, содержащих очень мало свободных ионов, т. е. для разбавленных растворов или растворов, содержащих частицы, степень диссоциации которых в данных условиях мала.

К стеклянной мембране (обычно сферической, цилиндрической или конической формы) электрода, выполненной из стекла особого состава, припаяна на конце трубка из стекла с высоким электрическим сопротивлением. Внутри электрода находится раствор с известным pH (обычно pH=7), в который погру-

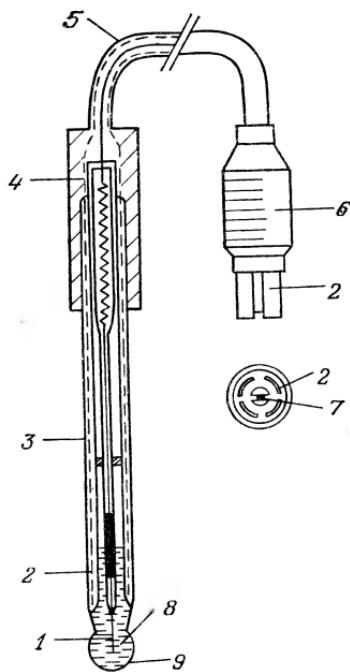


Рис. 18.3. Электрод со стеклянной мембраной.

1 — внутренний элемент сравнения; 2 — экран; 3 — корпус; 4 — головка из изолирующего материала; 5 — провод; 6 — штепсельный разъем; 7 — центральный проводник (стеклянный электрод); 8 — заполняющая жидкость (буферный раствор pH=7); 9 — рабочая часть.

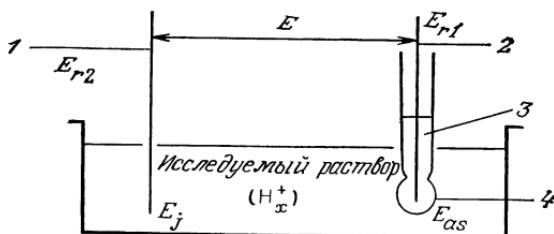


Рис. 18.4. Схема измерений с использованием стеклянного электрода.  
1 — электрод сравнения; 2 — внутренний элемент сравнения; 3 — заполняющий раствор с известным pH ( $H_x^+$ ); 4 — стеклянная мембрана.

жается внутренний электрод сравнения (рис. 18.3).

Современные электроды со стеклянной мембраной весьма похожи на электрод, описанный Хабером, за исключением того, что значительно улучшился состав чувствительных стекол, особенно после 1960 г. Это позволило снизить электрическое сопротивление мембранны, увеличить ее толщину и, следовательно, прочность, а также снизить или подавить влияние щелочных катионов при высоких значениях pH.

Для того чтобы измерить pH раствора, достаточно погрузить такой электрод в исследуемый раствор и измерить разность потенциалов, возникающую между внутренним элементом сравнения и электродом, также погруженным в этот раствор.

С этой целью стеклянный электрод и электрод сравнения присоединены к pH-метру, представляющему собой милливольтметр с высоким входным импедансом ( $Z_{вх} \geq 10^{12}$  Ом), который соединен со схемой, преобразующей измеренную разность потенциалов в единицы pH.

С учетом различных элементов, из которых состоит измерительная ячейка (рис. 18.4), разность потенциалов  $E$  между стеклянным электродом и электродом сравнения можно записать в развернутом виде:

$$E = E_{r1} + E_{as} - E_{r2} - E_j - \frac{2,3 RT}{F} \lg H_x^+ + \frac{2,3 RT}{F} \lg H_c^+,$$

где  $E_{r1}$  — потенциал внутреннего элемента сравнения стеклянного электрода;  $E_{r2}$  — потенциал внешнего электрода сравнения;  $E_j$  — потенциал жидкого мостика, существующего между раствором, заполняющим внешний электрод сравнения, и исследуемым раствором  $x$ ;  $E_{as}$  — потенциал, связанный с асимметрией стеклянной мембранны.

Потенциал мостика представляет собой разность потенциалов, возникающую на уровне жидкого мостика, при приведении растворов в контакт друг с другом. Она возникает либо

из-за тенденции к диффузии более концентрированного раствора к менее концентрированному, либо из-за того, что различные ионы, присутствующие в двух растворах, смещаются вследствие их собственной подвижности.

Потенциал, связанный с асимметрией, — это разность потенциалов, существующих по разные стороны стеклянной мембраны, если по обе стороны мембранны находятся одинаковые растворы.

Группируя вместе неизвестные, независимые от pH члены, можно окончательно записать выражение для  $E$  в виде:

$$E = E'_0 - (2,3RT/F) \text{ pH},$$

где  $E'_0$  — стандартный потенциал стеклянного электрода;  $2,3RT/F$  — теоретический коэффициент, называемый коэффициентом Нернста, для стеклянного электрода.

Электроды для измерения pH при надлежащем содержании и контроле удовлетворяют требованиям качества, предъявляемым к датчику; они обладают такими достоинствами, как: а) квазинернства зависимость сигналов; б) чрезвычайно широкий диапазон линейной зависимости — от  $10^{-14}$  до  $10^0$  моль ионов  $\text{H}^+$ ; в) малые размеры; г) очень высокая селективность (только присутствие катионов щелочных металлов может в определенных условиях вызвать небольшую ошибку, называемую «ошибкой щелочности»); д) высокое быстродействие (от  $<1$  с до нескольких десятков секунд в зависимости от конструкции датчика и условий его применения); е) хорошая стабильность в течение достаточно больших сроков.

Напротив, следующие недостатки могут затруднить применение этих датчиков: а) мембранны довольно хрупки, поскольку изготавливаются из тонкого стекла ( $<1$  мм); б) необходимо периодически уточнять положение нулевой ординаты, соответствующей измеряемому потенциалу (эта операция, называемая переградуировкой или калибровкой, производится с использованием растворов со стандартными значениями pH или буферных растворов, предварительно проверенных надлежащим образом или снажженных сертификатами); в) такие датчики довольно дороги, поскольку внутренний и внешний элементы сравнения содержат благородные металлы (платину, серебро).

Перспективы усовершенствования датчиков pH связаны с их миниатюризацией, уменьшением затрат на их изготовление (замена драгоценных металлов обычными) и возможностью их использования в более широких областях температур и давлений.

Среди конструкций датчика, основанных на традиционных методах и материалах, можно выделить два варианта исполнения, имеющих для потребителя ценные преимущества в удобстве использования по сравнению с простым стеклянным элект-

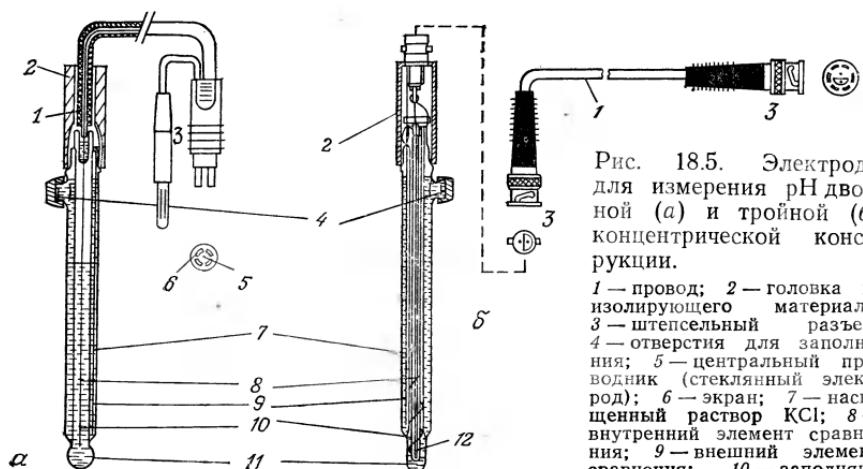


Рис. 18.5. Электроды для измерения pH двойной (а) и тройной (б) концентрической конструкции.

1 — провод; 2 — головка из изолирующего материала; 3 — штепсельный разъем; 4 — отверстие для заполнения; 5 — центральный проводник (стеклянный электрод); 6 — экран; 7 — насыщенный раствор KCl; 8 — внутренний элемент сравнения; 9 — внешний элемент сравнения; 10 — заполняющая жидкость (буферный

раствор с pH=7); 11 — активная мембрана; 12 — температурный датчик.

родом (рис. 18.3), соединенным с отдельным электродом сравнения.

Одним из них является так называемая «двойная концентрическая конструкция» (рис. 18.5, а), в которой стеклянный электрод и электрод сравнения размещены соосно один по отношению к другому (стеклянный электрод образует центральную часть, а электрод сравнения занимает кольцевое пространство вокруг него).

Сравнительно недавно, в 1984 г., было наложено производство электродов «тройной концентрической» конструкции (французский патент на изобретение № 8502782), содержащей следующие элементы:

— платиновый термометр сопротивления для измерения температуры. Информация, получаемая таким образом, обычно используется для изменения коэффициента усиления измерительного усилителя в соответствии с уравнением

$$E = E'_0 + (RT/F) \ln a_{H^+},$$

что позволяет получить значение pH, не зависимое от соотношения между коэффициентом Нернста электрода и температурой. Платиновый термометр сопротивления размещается в центральной секции электрода;

— стеклянный электрод и электрод сравнения; эти элементы электрода подобны изображенным на рис. 18.5, а и имеют такую же соосную конструкцию. Благодаря размещению измерительного датчика температуры внутри колбы для измерения pH (мембранны) система характеризуется очень высоким тепловым быстродействием (постоянная времени запаздывания менее

1 мин). На рис. 18.5, б показана конструкция тройного концентрического электрода такого типа.

Методы изготовления интегральных схем позволили создать так называемый «датчик интегрального типа». Преимущество этих датчиков заключается, в частности, в их миниатюрности, что особенно важно для медико-биологических применений.

Одним из типов интегральных электрохимических датчиков является ISFET (ионочувствительный канальный транзистор).

Датчики ISFET характеризуются полупроводниковой структурой, во многом подобной структуре полевых транзисторов, используемых для усиления. Часть поверхности такого миниатюрного интегрального элемента, соответствующая входу (или затвору) прибора, обрабатывается химическими или физическими способами или изготавливается из соответствующих материалов, так чтобы на поверхности установился потенциал, характерный для определенных ионов.

#### 18.2.4. Ион-селективные электроды

В 1934 г. Лантье и Блюм, исследуя вслед за другими учеными, и прежде всего М. Доулом, влияние состава стекла, используемого для изготовления мембран, на зависимость сигнала от активности ионов  $H^+$ , заметили, что некоторые стекла, которые оказались непригодными для измерения pH, проявляют заметную чувствительность к активности ионов щелочных металлов:  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ . Это свойство было использовано для изготовления электродов, селективных к ионам  $Na^+$  и  $K^+$ , модели которых в настоящее время производятся серийно. За последние двадцать лет были разработаны и освоены промышленностью различные конструкции ион-селективных электродов; в настоящее время выпускается более тридцати типов таких электродов с чувствительным элементом, состоящим в различных вариантах из стеклянной мембранны, жидкой мембранны, кристаллических пластин, газодиффузионных и ферментативных мембранны. Хотя механизм функционирования ион-селективных электродов не всегда хорошо изучен, их применения многочисленны. Однако эти электроды следует использовать с определенными предосторожностями, обусловленными как их собственными характеристиками, так и физико-химическими свойствами исследуемых растворов.

Активную часть селективного электрода образует граница раздела между чувствительным элементом этого электрода и исследуемым раствором. На этой границе возникает ионообмен, приводящий к установлению термодинамического равновесия, при котором электрохимические потенциалы ионов, находящихся по обе стороны границы раздела, равны. Эти потенциалы в зна-

чительной степени определяются активностями рассматриваемых ионов, причем эта активность в чувствительном элементе постоянна, а в исследуемом растворе переменна. При выводе уравнения, которое позволило бы получить значения электрохимических потенциалов и связывало бы разность потенциалов, устанавливающуюся по обе стороны границы раздела, с активностью ионов данного типа в исследуемом растворе, получена формулировка закона Нернста (разд. 18.2.1):

$$E = E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i,$$

где  $E$  — разность потенциалов между чувствительным элементом и раствором;  $E_0$  — стандартный потенциал чувствительного элемента, непосредственно связанный с постоянной активностью содержащихся в нем ионов;  $z_i$  — заряд иона вида  $i$ ;  $a_i$  — активность ионов  $i$  в исследуемом растворе.

Непосредственно измерить эту разность потенциалов между двумя средами различной физической природы на практике невозможно. Для измерения изменения  $E$  в зависимости от  $a_i$  рассматривают электрохимическую цепь типа представленной на рис. 18.6, когда в растворе  $s_i'$  присутствуют ионы вида  $i$  с активностью  $a_i'$ .

Общая разность потенциалов между двумя концами цепи определяется выражением

$$E = \{E_r + E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i\} - \{E'_r + E_0 + (RT/z_i F) \ln a'_i\}.$$

Группируя постоянные члены, получим напряжение градуировки  $E_0'$ , определяемое выбором точки отсчета:

$$E'_0 = E_r - (RT/z_i F) \ln a'_i - E'_r.$$

Строго говоря, в это выражение следует также включить потенциал электролитного мостика и потенциал асимметрии чувствительного элемента; окончательно получаем

$$E = E'_0 + (RT/z_i F) \ln a_i.$$

На рис. 18.7 представлена общая схема ион-селективного электрода, а также соединенного с ним для проведения измерений электрода сравнения.



Рис. 18.6. Электрохимическая цепь для измерения активности ионов.

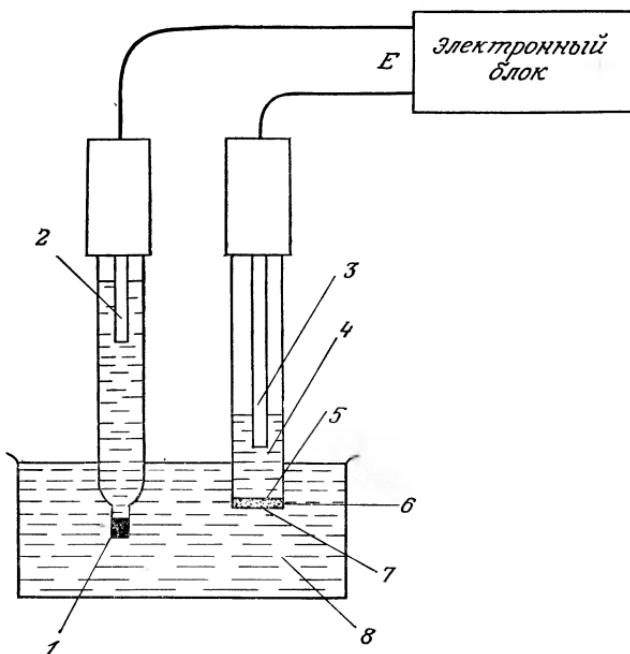


Рис. 18.7. Схема измерений с использованием ион-селективного электрода.  
 1 — жидкый мостик; 2 — внешний элемент сравнения  $E_r'$ ; 3 — внутренний элемент сравнения  $E_r$ ; 4 — внутренний раствор (с активностью  $a_i'$ ); 5 —  $E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i'$ ; 6 — чувствительный элемент; 7 —  $E_0 + (RT/z_i F) \ln a_i$ ; 8 — исследуемый раствор (с активностью  $a_i$ ).

Ион-селективные электроды генерируют сигнал, определяемый активностью ионов, которая, при постоянной температуре, зависит от концентрации определяемых ионов, их заряда (электровалентность), размера, а также от природы и концентрации посторонних ионов, присутствующих в исследуемом растворе.

Активность частиц в системе связана с концентрацией  $C$  соотношением  $a = \gamma C$ , где  $\gamma$  — коэффициент активности, существенно зависящий от ионной силы раствора, т. е. от числа и заряда всех ионов, присутствующих в растворе.

Поэтому необходимо подбирать такие условия, чтобы силы ионной связи стандартного и исследуемого растворов были примерно равны и коэффициент  $\gamma$  оставался постоянным:

$$E = E'_0 + (RT/z_i F) \ln (\gamma_i C_i).$$

(Следует отметить, что именно этот важный момент не всегда принимается во внимание при точных измерениях.)

Обычно в исследуемый раствор добавляют значительный избыток индифферентных ионов (буферного электролита) в иссле-

дуемый раствор, чтобы измеряемые изменения концентрации всегда были пренебрежимо малыми по сравнению с общим содержанием различных ионов.

Из рассмотрения уравнения Нернста следует, что температура оказывает заметное влияние на характеристику ион-селективного электрода (около  $0,34\%/\text{°C}$ ). Поэтому при точных измерениях необходимо термостатировать как измерительную ячейку, так и электрод сравнения, который также нередко оказывает значительное температурное влияние. Наконец, в некоторых случаях наряду с этим необходимо учитывать температурный коэффициент стандартных и, особенно, буферных растворов.

Основные типы ион-селективных электродов, выпускаемых в настоящее время промышленностью, указаны в табл. 18.1.

Существуют критерии, которые позволяют выбрать ион-селективный электрод, определить его возможности и ограничения, а также, если представится случай, обнаружить причины отказа в работе. Ниже характеризуются эти критерии.

**Коэффициент чувствительности.** Если, разделяя уравнение Нернста, положить

$$pX_i = -\lg a_i,$$

то получим

$$E = E'_0 - S_i pX_i,$$

где  $i$  обозначает тип рассматриваемого иона, а  $S_i$  — коэффициент чувствительности электрода по отношению к иону  $X_i$ , равный  $2,303(RT/z_iF)$ .

Для идеального электрода в случае одновалентного катиона имеем  $S = +59,16 \text{ мВ}$  при  $25^\circ\text{C}$ .

На практике ион-селективные электроды можно считать удовлетворительными, если они обеспечивают чувствительность  $90\div95\%$  (в зависимости от конкретного случая) от теоретического значения, называемого «нернстовым».

**Диапазон линейности и пороговая чувствительность.** На рис. 18.8 представлена градуировочная кривая вида  $E = f(pX_i)$ , где  $pX_i$  — отрицательный логарифм концентрации определяемых ионов. Можно заметить, что ее наклон постоянен при  $1 < pX_i < 5$ , т. е. для рассматриваемого электрода можно не вводить поправку на отклонение от линейности в интервале концентраций определяемого иона  $10^{-5}\div10^{-1} \text{ моль/л}$ . В интервале  $10^{-7}\div10^{-5} \text{ моль/л}$  линейная зависимость нарушается и коэффициент чувствительности здесь отличается от нернства. В этой области электрод еще может быть использован при введении соответствующих поправок, однако измерения усложняются, а их эффективность снижается.

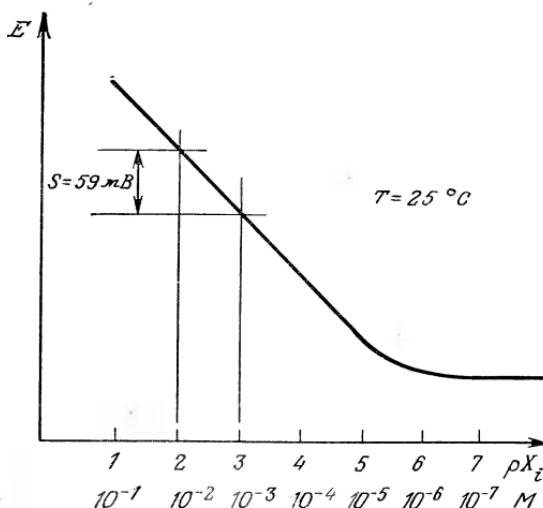


Рис. 18.8. Типичная градуировочная кривая для электрода, селективного к одновалентным катионам.

**Время установления.** Запаздывание ион-селективного электрода характеризуется временем установления равновесного потенциала при мгновенном изменении активности определяемого иона. Так как кривая  $E=f(t)$  имеет почти экспоненциальный вид, на практике принято определять эту постоянную как время, необходимое для достижения определенной стабильности, т. е. некоторой скорости изменения электродного потенциала (например, 0,1 мВ/мин, т. е. изменение потенциала на 0,1 мВ за 1 мин, соответствующее одновалентному иону, относительная концентрация которого определена с точностью около 0,4%). На время установления, которое может составлять от нескольких секунд до нескольких десятков минут, оказывают влияние различные факторы, а именно:

а) природа чувствительного элемента, определяющая кинетику установления равновесия ионного обмена на границе раздела;

б) концентрация измеряемого иона, величина и направление изменения концентрации (повышение или снижение): обычно время установления равновесия увеличивается, когда концентрация мала, когда исследуется ряд последовательно уменьшающихся концентраций или когда амплитуда изменения велика;

в) «предыстория» электрода: эффекты памяти хорошо исследованы при измерениях pH с помощью стеклянного электрода; для других ион-селективных электродов они более или менее выражены в зависимости от типа, конструкции и некоторых

технологических факторов, в особенности от качества впайки элемента в корпус и пористости чувствительного элемента;

г) присутствие мешающих ионов: процесс установления ионного равновесия на границе раздела при этом усложняется и в некоторых случаях происходит постепенное химическое изменение поверхности чувствительного элемента.

Желание точно определить время установления часто оказывается неоправданным; значения, указываемые разработчиками, обычно отвечают некоторым конкретным условиям использования, и их можно применять только в том случае, если определены условия измерений и критерии стабилизации.

**Мешающие влияния.** Избирательность ион-селективных электродов никогда не бывает идеальной, поэтому необходимо заранее убедиться, что исследуемые растворы не содержат ионов, способных оказывать мешающее влияние. Такое влияние обычно связано с присутствием посторонних ионов, которые вмешиваются в процесс ионного обмена на границе раздела фаз.

Никольский установил соотношение между потенциалом электрода для измерения pH и активностями ионов  $H^+$  и мешающих ионов. Это соотношение было впоследствии распространено на прочие ион-селективные электроды в виде уравнения

$$E = E'_0 + (RT/z_A F) \ln \{a_A + k_{A,B}^{n_A} a_B^{z_A/z_B} + k_{A,C}^{n_A} a_C^{z_A/z_C} \dots\},$$

представляющего собой модификацию уравнения Нернста, в котором ионы  $B$ ,  $C$  с зарядами  $z_B$ ,  $z_C$  и активностями  $a_B$ ,  $a_C$  мешают определению ионов  $A$  с зарядом  $z_A$  и активностью  $a_A$ . Коэффициенты  $k_{A,B}^{n_A}$ ,  $k_{A,C}^{n_A}$  называют потенциометрическими коэффициентами селективности; они зависят от природы определяемых ионов и могут быть установлены из экспериментальных данных и с помощью градуировочных кривых (рис. 18.9)  $E = f(a_A)$  при постоянном  $a_B$  или  $E = f(a_B)$  при постоянном  $a_A$ .

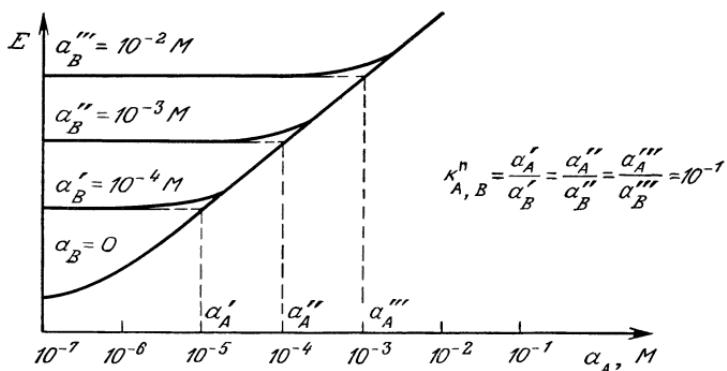


Рис. 18.9. Экспериментальное определение потенциометрических коэффициентов селективности.

В случае электродов на основе кристаллического чувствительного элемента мешающими ионами могут быть те, которые замещают определяемый ион нерастворимой соли, образующей чувствительный элемент. При этом коэффициент селективности по порядку величины равен отношению соответствующих произведений растворимости.

**Стабильность и воспроизводимость.** Как и время установления, понятие стабильности ион-селективного электрода, которое отчасти связано с ним, является весьма условным, так как стабильность зависит от различных рабочих параметров. Во всяком случае можно отметить, что электроды, избирательные по отношению к ионам  $H^+$ ,  $F^-$ ,  $I^-$ ,  $Ag^+$ ,  $Cu^{2+}$ , являются наиболее стабильными. При погружении в раствор, содержащий определяемый ион в умеренной концентрации (соответствующей, например, примерно середине рабочего диапазона характеристики, где выполняется закон Нернста), эти электроды обнаруживают дрейф потенциала  $\leq 1 \text{ мВ/сут}$  при условии соблюдения всех требований в отношении температуры, электрода сравнения, испарения исследуемых растворов и т. д.

Ион-селективные электроды, используемые для непосредственной ионометрии, следует (как и электроды для измерения pH) регулярно калибровать в стандартных растворах через промежутки времени, зависящие от требуемой точности и типа используемого электрода, — в среднем ежедневно.

Известны три основных метода потенциометрии, основанные на применении ион-селективных электродов: а) прямая (непосредственная) ионометрия; б) метод дозированных добавок; в) потенциометрическое титрование.

При выборе метода, наиболее подходящего для решения конкретной задачи, следует руководствоваться, с одной стороны, составом образца, а с другой — желаемой точностью.

**Непосредственная ионометрия.** Сначала получают градуировочную кривую  $E=f(pX_i)$  (или  $E=f(C_i)$ ) в полулогарифмических координатах; затем к этой кривой обращаются при исследовании образцов (рис. 18.8). Разумеется, и стандартные, и исследуемые растворы должны быть одинаковыми в отношении ионной силы, концентрации комплексообразующего агента (если последний используется), температуры и т. д.

Для непосредственных ионометрических измерений используются приборы, подобные pH-метрам. Сначала приступают к градуировке измерительных электродов, т. е. к компенсации члена  $E_0'$ , используя стандартный раствор с известной концентрацией  $C_s$  (принимается  $pX_s = -\lg C_s$ ). Затем электрод погружают во второй стандартный раствор с другой, также известной концентрацией ( $pX_e = -\lg C_e$ ) и производят операцию градуировки, которая заключается в расчете коэффициента чувстви-

тельности ион-селективного электрода по  $C_s$  и  $C_e$ :

$$S = (E_e - E_s) / (pX_e - pX_s).$$

Затем можно приступить к ионометрической оценке образцов; результаты, полученные в виде  $pX_i$ , при желании легко преобразовать в концентрации ( $C_i = 10^{-pX}$ ).

**Метод дозированных добавок.** Первое измерение потенциала производят на пробе  $V$  анализируемого раствора (что дает значение  $E_1$ ), затем добавляют объем  $v$  стандартного раствора, содержащего определяемый ион с концентрацией  $C_E$ , и производят новое измерение потенциала (что дает значение  $E_2$ ).

Если коэффициент чувствительности электрода равен  $S$ , то концентрацию  $C_x$  исследуемого образца легко можно вычислить, используя уравнение Нернста:

$$C_x = C_E v / (V + v) \{ 10^{(E_2 - E_1)/S} - V / (V + v) \}.$$

Этот удобный метод можно успешно использовать, если коэффициент чувствительности ион-селективного электрода в данной среде и в рабочем диапазоне концентраций известен и постоянен. В противном случае определение общей концентрации для исследуемого раствора оказывается сомнительным, в особенности если она приближается к одному из пределов области линейности характеристики электрода.

**Потенциометрическое титрование.** Ион-селективные электроды целесообразно использовать как индикаторные при потенциометрическом титровании, где они дают наиболее точные результаты, когда дозировка титрующего агента осуществляется с помощью измерения объема или кулонометрии. Эти титрования могут быть основаны на реакциях нейтрализации, комплексообразования, осаждения или окислительно-восстановительных реакциях. Ион-селективные электроды позволяют обнаружить исчезновение титруемого иона или избыток титрующего агента, а также исчезновение или появление вторичных частиц, к которым они проявляют чувствительность.

Точка эквивалентности обычно совпадает с точкой перегиба кривой титрования; желательно проверять ее, проводя сначала титрование стандартного раствора определяемого иона.

Достоинства ионных датчиков (ион-селективных электродов) те же, что и у электродов для измерения pH: малый размер, простота использования, дешевизна изготовления, легкость установки в системы оперативного анализа.

Их недостатки в зависимости от типа связаны с шириной диапазона измеряемых концентраций, стабильностью и селективностью. Кроме того, поступающий от ионного датчика элек-

рический сигнал согласно уравнению Нернста пропорционален логарифму концентрации определяемого иона. Поэтому при измерении концентрации методом непосредственной ионометрии трудно достичь уровня погрешности ниже  $1\div3\%$ .

Перспективы использования ион-селективных электродов связаны с прогрессом в следующих трех областях:

а) усовершенствование существующих датчиков в направлении их миниатюризации, а также повышения чувствительности, селективности и стабильности измерений;

б) разработка новых ион-селективных электродов, пригодных для количественного определения частиц, для которых существующие методы малоэффективны: сульфат-ионов, хромат-ионов, железа (II), биологически активных веществ и т. д.;

в) использование вычислительной техники для обработки сигналов, что позволит добиться ощутимого прогресса в оперативности, точности и надежности результатов.

Параллельная разработка ионных датчиков, основанных на эффекте поля (ионочувствительные канальные транзисторы ISFET), должна стимулировать дальнейший прогресс в этой области. Можно ожидать, что при этом, как и в случае рН-электродов, будут получены миниатюрные и недорогие датчики, которые позволят заметно упростить электронные блоки измерительных схем.

Разности измеряемых потенциалов обычно составляют от 0 до  $\pm 2000$  мВ, а при использовании стеклянных электродов — от 0 до  $\pm 400$  мВ при  $25^\circ\text{C}$ .

Измерение разности потенциалов между двумя электродами обычно осуществлялось раньше дифференциальным методом. В настоящее время разности потенциалов определяются путем непосредственных измерений при помощи аналогового или цифрового милливольтметра с высоким входным импедансом (более  $10^{12}$  Ом); такая величина необходима при измерении рН, поскольку типичное электрическое сопротивление стеклянной мембранны для стеклянных электродов составляет  $10\div1000$  Ом.

### 18.3. Амперометрические датчики

#### 18.3.1. Принцип измерений

Полярографические, вольтаметрические и амперометрические методы основаны на определении силы тока, проходящего через электрохимический элемент при известных условиях; эта сила тока зависит от концентрации носителей электрического заряда или от приложенного потенциала. В таких условиях на основе измерений силы тока можно после градуировки определить кон-

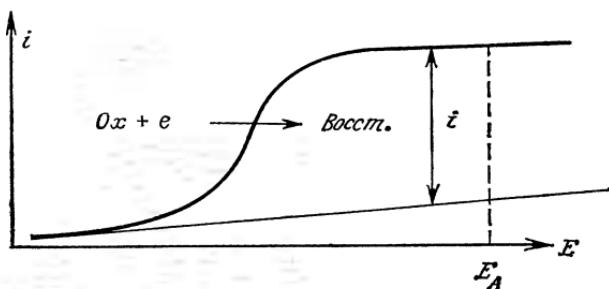


Рис. 18.10. Примерная кривая зависимости силы тока — потенциал для амперометрического датчика.

центрацию некоторых присутствующих видов частиц. В большинстве случаев происходит окисление или восстановление частиц на индикаторном электроде; при этом второй электрод является электродом сравнения.

Если к индикаторному электроду приложить потенциал  $E$ , переменный по отношению к потенциальному электроду сравнения, и построить график зависимости силы тока от потенциала  $i = -F(E)$  (рис. 18.10), то высота плоской части кривой, ограничивающей диффузию, пропорциональна концентрации частиц, окисленных или восстановленных на индикаторном электроде.

В амперометрическом датчике между индикаторным электродом и электродом сравнения происходит электролиз при фиксированном напряжении электролиза  $E_A$ , соответствующем уровню границы диффузии. Определяют высоту этого уровня диффузии, которая пропорциональна концентрации частиц, окисленных или восстановленных на индикаторном электроде. Предварительно при тех же условиях производится градуировка с использованием растворов с известной концентрацией определяемых частиц, что позволяет вычислить неизвестную концентрацию.

Значения измеряемой силы тока изменяются в широком интервале; они существенно зависят от числа заряженных частиц, вступающих в реакцию на индикаторном электроде, от характера и величины поверхности электродов и т. д. Ток обычно составляет от нескольких пикоампер до нескольких десятков миллиампер. В установке для измерения тока обычно используется преобразователь ток — напряжение (разд. 4.1).

### 18.3.2. Окислительно-восстановительные датчики

Датчики этого типа («редокс-датчики») позволяют определить концентрацию окисленных или восстановленных частиц в растворе.

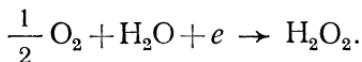
В качестве индикаторных электродов обычно используются ртутный капельный электрод, электроды из благородных металлов (платины, золота и т. д.), стеклоуглерода или графита.

Ртутный капельный электрод состоит из капилляра, соединенного с ртутным резервуаром. Электроды из платины, золота, стеклоуглерода и др. обычно подобны по конструкции электродам потенциометрических датчиков (рис. 18.2).

### 18.3.3. Газовые электроды

Среди амперометрических датчиков, предназначенных для исследования растворенных в жидкости газов, чаще других используется кислородный электрод.

Кислородный зонд состоит из двух электродов различной полярности: платинового катода и серебряного анода, покрытого хлоридом серебра, которые погружены в электролит на основе хлорида калия. Эта измерительная система отделена от исследуемой среды тонкой мембраной, проницаемой для кислорода. Электроды заряжаются до разности потенциалов 650 мВ. Кислород, диффундирующий через мембрану, восстанавливается на катоде в соответствии с реакцией

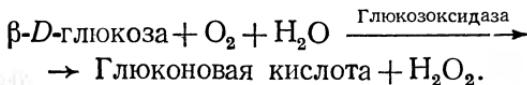


Ток, обусловленный электрохимической реакцией, пропорционален количеству восстановленного кислорода и, следовательно, содержанию кислорода в исследуемой среде. Этот ток измеряется с помощью электрометрического усилителя и может быть либо считан непосредственно, либо выражен в концентрации газообразного кислорода (в миллионных долях, процентах и т. д.), а также в его парциальном давлении.

### 18.3.4. Ферментативные электроды

В состав ферментативных электродов входит мембрана, на которой располагается фермент. Одна из сторон мембранны контактирует с исследуемой средой, а другая — с рабочей камерой детектора.

На мембрану ферментативного электрода для измерения содержания глюкозы нанесена глюкозоксидаза, в присутствии которой происходит окисление исследуемой глюкозы:



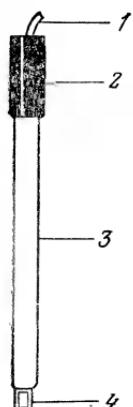


Рис. 18.11.  
Лаборатор-  
ный кон-  
дуктометри-  
ческий дат-  
чик.

1 — подводя-  
щий провод;  
2 — головка;  
3 — стеклян-  
ный корпус;  
4 — платиново-  
ые пласти-  
ны, покрытые  
стеклом.

них (путем внесения в результаты измерений по-правки, основанной на приведенном выше соотношении) значения электропроводности, отнесенные к 25 °C.

#### 18.4.2. Различные типы кондуктометрических датчиков

Лабораторный кондуктометрический датчик обычно имеет стеклянный корпус, в который помещены две пластинки или два кольца из платинированной платины (рис. 18.11).

Платинированная платина (т.е. гладкая платина, на которую в результате электролиза осаждены платиновые дендриты, образующие развитую пористую поверхность) используется с целью исключения явлений электролитической поляризации, которая происходила бы на гладкой поверхности.

Блок электродов снабжен изолирующей головкой и экранированным проводом токоподвода.

Изготавливаемые в настоящее время датчики различаются размерами электродного корпуса и платиновых пластин.

Промышленные кондуктометрические датчики (рис. 18.12) в зависимости от конструкции могут иметь кольцевые концентрические, кольцевые однолинейные или плоские параллельные электроды.

Электроды для датчиков промышленного производства обычно изготавливают из нержавеющей стали или из углерода.

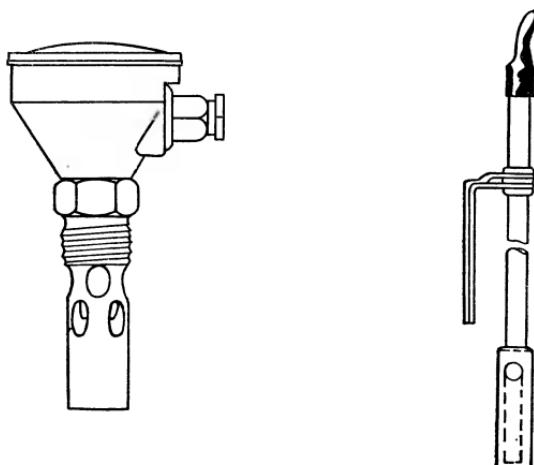


Рис. 18.12. Кондуктометрические датчики промышленного производства (фирма E.I.L.).

В очень агрессивных средах обычно используют датчики с электродами, изготовленными из золота, платины или палладия.

По типам применения различают датчики для циркуляционных систем, привинчиваемые датчики для проточных систем, погружаемые датчики для измерения в резервуарах.

Для измерения низкой электропроводности желательно использовать датчики с высокими значениями постоянной ( $k \approx 100$  см). Эти датчики обычно состоят из двух кольцевых концентрических электродов из нержавеющей стали, причем внешний электрод служит экраном.

При измерениях высокой электропроводности используют датчики с низкой постоянной, чтобы измеренное значение электропроводности было не слишком высоким. Такие датчики используются, в частности, для измерения электропроводности в концентрированных растворах кислот и оснований. Эти датчики обычно имеют параллельные электроды, изготавливаемые из химически стойких материалов (углерод, золото, платина).

## Библиография

### Монографии

- Baiulescu G. E., Cosofret V. V., Application of ion selective membrane electrodes in organic analysis, Chichester, Ellis Horwood Series, Wiley, 1977.
- Bates R. G., Determination of pH, N. Y., Wiley, 1973.
- Bergveld P., The operation of an ISFET as an electronic device, Sensors and Actuators, 1981, vol. 1, p. 17.
- Bergveld P., De Roij N. F., The history of chemically sensitive semi-conductor devices, Sensors and Actuators, 1981, vol. 1, p. 5.
- Charlot G., Les méthodes de la chimie analytique, Paris, Masson, 1961.
- Charlot G., Tremillon B., Badoz-Lambling J., Les réactions électrochimiques, Paris, Masson, 1959.
- Camman K., Das Arbeiten mit ionenselektiven Elektroden, Berlin, Springer Verlag, 1973.
- Dole M., L'électrode en verre, Paris, Dunod, 1952.
- Durst R. A., Ion-selective electrodes, Washington, N. B. S. Special publication 314, 1969.
- Eisenman G., Glass electrodes for hydrogen and other cathions, N. Y., M. Dekker Inc., 1967.
- Fraser H., Ion selective electrodes in analytical chemistry, N. Y., Plenum Press, 1978.
- Koryta J., Ion-selective electrodes, Cambridge University Press, 1975.
- Moody G., Thomas J., Selective ion sensitive electrodes, Watford, Merrow Technical Library, 1971.
- Pungor E., Ion-selective electrode, Akadémiai Kiadó-Budapest, Symposium de Matrafüred, 1973.
- Robinson R. A., Stokes R. H., Electrolyte solutions, London, Butterworths Publ. Lim., 1959.
- Vesely J., Weiss D., Sfulik K., Analysis with ion selective electrodes, Chichester, Ellis Horwood Series, Wiley, 1978.
- Yves D. J. C., Janz G. J., Reference electrodes, N. Y., Academic Press, 1961.

## 19. ДАТЧИКИ ГАЗОВОГО СОСТАВА

Датчики, предназначенные для определения химического состава газовой смеси, получили широкое распространение, связанное прежде всего с контролем за процессами горения в целях экономии энергии и сокращения загрязнения атмосферы. Многие из новых датчиков газового состава предназначены для анализа газового состава горючих смесей или продуктов сгорания;  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO_x$ ,  $CH_x$  и т. д.

Характеристики датчиков газового состава также претерпевают заметную эволюцию: появляются новые датчики с более высокой селективностью, происходит их миниатюризация, приспособление к измерению непосредственно в рабочем объеме; некоторые из них способны заменить сложные и громоздкие анализаторы.

Кислород в качестве объекта газового анализа занимает особое место: возможности точного и быстрого анализа этого газа, предоставляемые сегодня некоторыми датчиками и, прежде всего, датчиками на основе твердых электролитов, находят многочисленные применения в таких весьма различных областях человеческой деятельности, как химическая промышленность, металлургия, сельское хозяйство, пищевая промышленность, медицина, биология, системы кондиционирования и контроля атмосферы в лаборатории. Применение таких датчиков все расширяется, стимулируя разработку новых специальных зондов для таких газов, как  $Cl_2$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$  и т. п.

Эта глава ограничивается рассмотрением датчиков, предназначенных для измерения концентрации газа. Датчики, используемые для токсичных или взрывоопасных газовых смесей, которые предназначены только для указания о предельно допустимых концентрациях, здесь не рассматриваются.

Граница между «датчиками» и «анализаторами» в случае анализа газа является расплывчатой. При ее определении используются три критерия:

- возможность оперативного использования в непрерывном или квазинепрерывном режиме для контроля газовой среды либо определения ее физических параметров (температуры, давления, скорости циркуляции, содержания пыли и т. п.);

- отсутствие необходимости в использовании химических реагентов;
- невмешательство оператора в каждое измерение (для отбора проб, поверки и т. д.).

Это определение датчиков специально дается нестрого. Анализаторы, которые не рассматриваются как датчики газового состава, — это масс-спектрометры, анализаторы на основе хемолюминесценции (ионизация газа под действием высокоэнергетического ультрафиолетового излучения) и приборы ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

Возможна следующая классификация датчиков газового состава: а) электрохимические датчики на основе твердых электролитов; б) электрические датчики; в) катарометры; г) парамагнитные датчики; д) оптические датчики.

Электрохимические датчики, в которых анализируемый газ контактирует с водным раствором, рассмотрены вместе с близкими им по назначению датчиками концентрации ионов в гл. 18.

### 19.1. Датчики на основе твердых электролитов

Впервые твердые электролиты были использованы в измерительных приборах еще в начале 1900-х гг. В конце 1950-х гг. были запатентованы различные методы анализа газов. Промышленное производство этих датчиков развернулось за одно десятилетие. Помимо измерения парциального давления кислорода эти датчики, называемые потенциометрическими, используются для определения термодинамических величин и измерения активности кислорода, растворенного в металлах. Кислородный датчик является единственным измерительным устройством этого типа, который находит в настоящее время широкое промышленное применение. Кислородные датчики на основе твердых электролитов в настоящее время составляют более половины общего количества кислородных датчиков, которые поступают на западноевропейский рынок.

Датчики для анализа других газов ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{S}_x$  и т. д.) интенсивно разрабатываются в последнее время; некоторые из них находятся на ранних стадиях разработки.

#### 19.1.1. Физические принципы

**Закон Нернста.** Обычные газовые датчики на основе твердых электролитов можно схематически представить в виде концентрационного элемента (рис. 19.1):

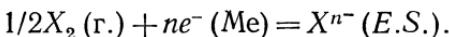
$$X_2(p_r), \quad \text{Me}'/\text{E.S.}/\text{Me}'', \quad X_2(p).$$



Рис. 19.1. Принципиальная схема датчика на основе твердого электролита.

Здесь  $Me'$  и  $Me''$  — два электронных проводника (предположительно химически инертные и одинаковой природы), контакты которых с твердым электролитом (*E. S.*) образуют электроды; электролит *E. S.* — вещество, физически непроницаемое для газов и являющееся ионным проводником, содержащим ионы  $X^{n-}$ ;  $X_2$  — анализируемый газ (который может находиться в чистом виде, растворенным в газовой смеси, либо в равновесии с химической системой, образованной газами, жидкостями или твердыми веществами);  $p$  и  $p_r$  — парциальные давления этого газа по обе стороны электролита.

На каждом электроде происходит реакция типа



В идеальном случае этот элемент создает разность потенциалов, или э. д. с.,  $E_{th}$ , между проводниками  $Me'$  и  $Me''$ , подчиняющаяся закону Нернста:

$$E_{th} = (RT/2nF) \ln(p/p_r), \quad (1)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная ( $R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ );  $F$  — постоянная Фарадея ( $96\,500 \text{ Кл}$ );  $n$  — число электронов, участвующих в реакции (1) и  $T$  — абсолютная температура элемента.

Подставляя в выражение значения постоянных, получаем

$$E_{th} (\text{V}) = 0,9926 \cdot 10^{-4} (T/n) \lg(p/p_r). \quad (2)$$

Зная температуру  $T$  и парциальное давление  $p_r$  вблизи электрода сравнения, можно найти неизвестное парциальное давление кислорода  $p$  из измерения величины  $E_{th}$ , составляющей обычно от нескольких десятков до сотен милливольт.

**Составляющие части датчика. Твердый электролит.** При выборе подходящих твердых электролитов следует руководствоваться некоторыми критериями, иногда весьма противоречивыми.

Теоретически полная электропроводность электролита не является ограничивающим фактором. Однако она должна быть достаточно высокой, чтобы полное сопротивление датчика оставалось пренебрежимо малым по сравнению с входным импедан-

сом используемых измерительных приборов; предполагается, что верхний предел сопротивления электролита составляет 1 МОм. Это сопротивление зависит от природы электролита и его состава. Оно обычно уменьшается при повышении температуры или уменьшении толщины слоя электролита (тонкопленочный вариант).

Другой важной характеристикой является величина электронной проводимости материала, которая никогда не равна нулю. Закон Нернста применим на практике только в том случае, если электронный вклад в проводимость электролита (характеризуемый обычно числом переноса) пренебрежимо мал. Влияние электронной проводимости электролита на функционирование газового датчика описано в разд. 19.1.2.

Твердый электролит должен также удовлетворять ряду требований неэлектрохимической природы, таких, как:

- физико-химическая стабильность (термическая стабильность, отсутствие фазовых превращений в твердом состоянии);
- удовлетворительные механические характеристики (в особенности, достаточная прочность);
- совместимость с другими частями датчика по коэффициенту расширения;
- химическая инертность по отношению к различным газам и другим контактирующим материалам.

*Электрод сравнения.* В качестве системы сравнения, предназначенней для того, чтобы выявить химический потенциал окисленных и восстановленных частиц, может использоваться газ (чистый, с инертным разбавителем или получаемый в результате разложения твердой фазы), смесь газов или смесь твердых веществ. Примерами могут служить:

- газовая смесь известного состава ( $O_2$ , воздух,  $H_2/H_2O$ ,  $CO/CO_2$  и т. д.);
- газ, образующийся в результате разложения твердого вещества, например,  $MgSO_4$ (тв.) =  $MgO$ (тв.) +  $SO_3$ ;
- система металл/металлическое соединение ( $Cu/Cu_2O$ ,  $Ni/NiO$ ,  $Pd/PdO$ ,  $Ag/AgCl$ );
- электрод сравнения, основанный на использовании ионов, растворенных в электролите. Наиболее известным примером может служить электрод  $Ag/Ag^+$ , в котором активность ионов серебра фиксируется путем растворения сульфата серебра в сульфате калия.

Система сравнения выбирается таким образом, чтобы поддерживать равновесные с точки зрения термодинамики условия использования; она должна быть мало чувствительной к возможным отклонениям условий. В этом отношении системы  $Fe/FeO$  или  $Cu/Cu_2O$  превосходят по своим характеристикам систему  $Ni/NiO$ .

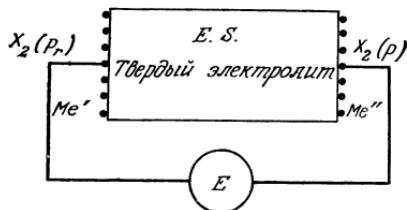
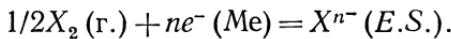


Рис. 19.1. Принципиальная схема датчика на основе твердого электролита.

Здесь  $\text{Me}'$  и  $\text{Me}''$  — два электронных проводника (предположительно химически инертные и одинаковой природы), контакты которых с твердым электролитом (*E. S.*) образуют электроды; электролит *E. S.* — вещество, физически непроницаемое для газов и являющееся ионным проводником, содержащим ионы  $X^{n-}$ ;  $X_2$  — анализируемый газ (который может находиться в чистом виде, растворенным в газовой смеси, либо в равновесии с химической системой, образованной газами, жидкостями или твердыми веществами);  $p$  и  $p_r$  — парциальные давления этого газа по обе стороны электролита.

На каждом электроде происходит реакция типа



В идеальном случае этот элемент создает разность потенциалов, или э. д. с.,  $E_{th}$ , между проводниками  $\text{Me}'$  и  $\text{Me}''$ , подчиняющаяся закону Нернста:

$$E_{th} = (RT/2nF) \ln(p/p_r), \quad (1)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная ( $R=8,31$  Дж. · моль $^{-1}$  · К $^{-1}$ );  $F$  — постоянная Фарадея (96 500 Кл);  $n$  — число электронов, участвующих в реакции (1) и  $T$  — абсолютная температура элемента.

Подставляя в выражение значения постоянных, получаем

$$E_{th}(\text{V}) = 0,9926 \cdot 10^{-4} (T/n) \lg(p/p_r). \quad (2)$$

Зная температуру  $T$  и парциальное давление  $p_r$  вблизи электрода сравнения, можно найти неизвестное парциальное давление кислорода  $p$  из измерения величины  $E_{th}$ , составляющей обычно от нескольких десятков до сотен милливольт.

**Составляющие части датчика. Твердый электролит.** При выборе подходящих твердых электролитов следует руководствоваться некоторыми критериями, иногда весьма противоречивыми.

Теоретически полная электропроводность электролита не является ограничивающим фактором. Однако она должна быть достаточно высокой, чтобы полное сопротивление датчика осталось пренебрежимо малым по сравнению с входным импедан-

сом используемых измерительных приборов; предполагается, что верхний предел сопротивления электролита составляет 1 МОм. Это сопротивление зависит от природы электролита и его состава. Оно обычно уменьшается при повышении температуры или уменьшении толщины слоя электролита (тонкопленочный вариант).

Другой важной характеристикой является величина электронной проводимости материала, которая никогда не равна нулю. Закон Нернста применим на практике только в том случае, если электронный вклад в проводимость электролита (характеризуемый обычно числом переноса) пренебрежимо мал. Влияние электронной проводимости электролита на функционирование газового датчика описано в разд. 19.1.2.

Твердый электролит должен также удовлетворять ряду требований неэлектрохимической природы, таких, как:

- физико-химическая стабильность (термическая стабильность, отсутствие фазовых превращений в твердом состоянии);
- удовлетворительные механические характеристики (в особенности, достаточная прочность);
- совместимость с другими частями датчика по коэффициенту расширения;
- химическая инертность по отношению к различным газам и другим контактирующим материалам.

*Электрод сравнения.* В качестве системы сравнения, предназначеннной для того, чтобы выявить химический потенциал окисленных и восстановленных частиц, может использоваться газ (чистый, с инертным разбавителем или получаемый в результате разложения твердой фазы), смесь газов или смесь твердых веществ. Примерами могут служить:

- газовая смесь известного состава ( $O_2$ , воздух,  $H_2/H_2O$ ,  $CO/CO_2$  и т. д.);
- газ, образующийся в результате разложения твердого вещества, например,  $MgSO_4$ (тв.) =  $MgO$ (тв.) +  $SO_3$ ;
- система металл/металлическое соединение ( $Cu/Cu_2O$ ,  $Ni/NiO$ ,  $Pd/PdO$ ,  $Ag/AgCl$ );
- электрод сравнения, основанный на использовании ионов, растворенных в электролите. Наиболее известным примером может служить электрод  $Ag/Ag^+$ , в котором активность ионов серебра фиксируется путем растворения сульфата серебра в сульфате калия.

Система сравнения выбирается таким образом, чтобы поддерживать равновесные с точки зрения термодинамики условия использования; она должна быть мало чувствительной к возможным отклонениям условий. В этом отношении системы  $Fe/FeO$  или  $Cu/Cu_2O$  превосходят по своим характеристикам систему  $Ni/NiO$ .

В случае кислородных датчиков использование воздуха в качестве системы сравнения имеет ряд преимуществ. Кислород при высоких температурах ведет себя практически как идеальный газ, и состав воздуха (20,95%  $O_2$  по объему) не зависит от температуры элемента, если в нем поддерживается хотя бы слабая циркуляция воздуха. Однако давление кислорода, содержащегося в воздухе, в некоторых случаях может оказаться слишком высоким для обеспечения нормального функционирования датчика. Кроме того, необходимость контакта с окружающим воздухом иногда делает затруднительным измерение непосредственно в рабочем объеме. В этих случаях приходится использовать соответствующую систему сравнения металл/оксид металла, как в случае датчиков с внутренним электродом сравнения.

*Измерительный электрод.* Проводник Ме, из которого изготавливается измерительный электрод, должен обладать заметной электронной проводимостью. Он должен быть химически стойким по отношению к электролиту и анализируемому газу. Кроме того, выбранный материал должен обладать хорошими катализитическими свойствами по отношению к электродной реакции (1); это важно для достижения высокой чувствительности и приемлемой постоянной времени запаздывания.

Обычно используются измерительные электроды из платины, иногда — из серебра. Их изготавливают путем осаждения пленок, вакуумного испарения или катодного распыления. Для изготовления электродов галогенных датчиков применяют графит, стеклоуглерод или диоксид рутения  $RuO_2$ .

### 19.1.2. Характеристики датчиков

**Метрологические характеристики.** Хотя рассматриваемые здесь метрологические характеристики относятся к кислородным датчикам, их можно легко перенести и на другие твердоэлектролитные датчики.

Датчики на основе твердых электролитов являются активными датчиками газового состава; необходимо только контролировать температуру датчика при его установке в ответвлении линии.

Сигнал датчика обычно сильно зависит от анализируемого газа (главным образом, в высокотемпературных условиях). Закон Нернста, на основе которого работают эти датчики, является не эмпирическим законом, а теоретическим. Если давление сравнения  $p_r$  известно точно, то какой-либо градуировка не требуется.

Выходное напряжение датчика имеет порядок нескольких сотен милливольт. Точность измерений довольно высокая

( $\pm 0,1$  мВ), и датчик можно использовать непосредственно в системах автоматического контроля.

Э.д.с. датчика изменяется пропорционально логарифму давления анализируемого газа. Погрешность в измерении этой э.д.с. приводит к ошибке в измеряемом давлении, не зависящей от этого давления.

Время установления  $t_r$  показаний (разд. 2.5) датчиков зависит от каталитических свойств вещества электрода и электролита, состава газа, температуры и иногда от геометрии элемента. Постоянная времени ( $t_r$ , 5%) кислородных датчиков имеет порядок секунд, если парциальное давление кислорода в газе превышает 1 Па; для смесей  $\text{CO}_2/\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$  составляет несколько минут, если давление кислорода ниже 0,1 Па. При вакуумировании время становления получается значительно ниже, чем когда такое же парциальное давление кислорода устанавливается путем разбавления в инертном газе.

Э.д.с. элемента изменяется линейно с температурой, поэтому последнюю необходимо поддерживать постоянной и измерять с достаточной точностью ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).

**Технологические характеристики.** Поскольку импеданс датчиков при обычных температурах использования довольно высок, часто приходится производить измерение с помощью милливольтметра с высоким входным импедансом ( $10^{10} \div 10^{12}$  Ом).

Твердые электролиты чувствительны к термическим ударам. Миниатюризация датчика позволяет смягчить этот недостаток. Используемые обычно твердые электролиты обнаруживают заметную проводимость только при высокой температуре; температура функционирования большинства датчиков превышает  $500^\circ\text{C}$ . Из-за реакций окисления, происходящих при этой температуре, количественный анализ кислорода невозможен в присутствии газов-восстановителей. Тем не менее кислородные датчики используют для контроля за работой двигателей внутреннего сгорания, хотя выхлопные газы и не являются равновесными. Этим условиям отвечает более сложное эмпирическое соотношение между э.д.с. источника и составом выхлопных газов, позволяющее произвести необходимую регулировку двигателя.

Тот же самый кислородный датчик может быть использован без внесения каких-либо модификаций для анализа кислорода, растворенного в инертном газе или находящегося в вакуумированном сосуде ( $10^{-2}$  Па  $< p(\text{O}_2) < 10^5$  Па), а также анализа газовых смесей  $\text{CO}/\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  ( $10^{-22}$  Па  $< p(\text{O}_2) < 10^{-6}$  Па). Кроме того, для анализа смесей  $\text{H}_2/\text{HX}$  можно использовать галогенный датчик. Номограмма, приведенная на рис. 19.2, позволяет графически определить равновесный состав газообразного кислорода в зависимости от э.д.с. элемента  $E$  и его темпе-

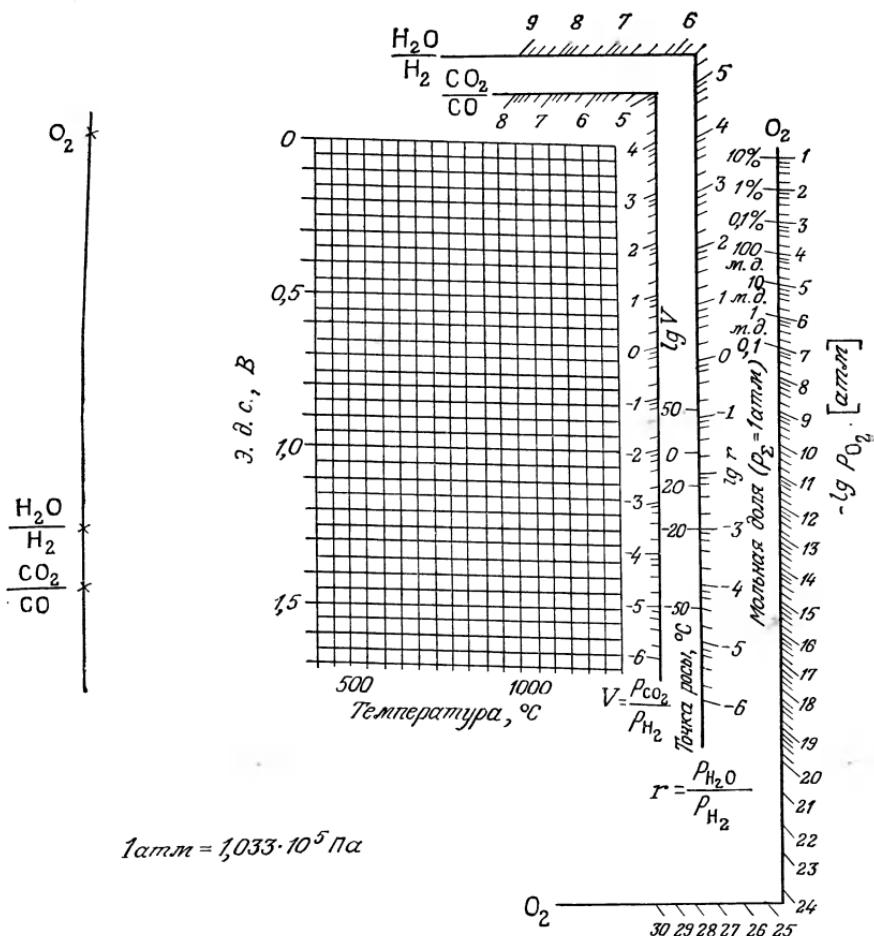


Рис. 19.2. Номограмма для определения состава газа, содержащего кислород, в зависимости от э. д. с. датчика и его температуры (газ сравнения — воздух) [7].

ратуры  $T$ . Для этого достаточно провести прямую, проходящую через данную точку ( $E, T$ ) и точки, помеченные  $O_2, CO_2/CO$  или  $H_2O/H_2$ , находящиеся на вертикальной прямой слева. Давление кислорода или соотношения  $p(H_2O)/p(H_2)$  или  $p(CO_2)/p(CO)$  считаются непосредственно с соответствующих шкал, расположенных в правой части номограммы.

В случае газовых равновесий  $CO_2/CO$  или  $H_2O/H_2$  результат измерений парциальных давлений не зависит от степени разбавления анализируемой смеси в инертном газе. Это свойство может быть использовано для анализа смесей  $H_2O/H_2$ : разбавле-

ние смеси аргоном исключает конденсацию на холодных участках установки (точки росы отмечены на рис. 19.2).

**Анализ погрешностей.** Погрешности, вызванные неточностью измерения различных экспериментальных параметров. Ошибка в 0,1 мВ при измерении э. д. с. датчика соответствует погрешности в парциальном давлении кислорода около 0,5%.

Более значительно влияние погрешности в определении температуры датчика: ошибка в измерении температуры порядка 1 °С приводит к погрешности 1,5–3% в зависимости от типа датчика.

Неточность определения  $p_r$  равна относительной погрешности в измерении этого параметра. Состав воздуха или чистого кислорода, используемого в качестве газа сравнения, известен достаточно точно и практически не зависит от температуры ( $\Delta p_r/p_r < 0,1\%$ ). Имеющиеся литературные данные по системам металл/оксид металла обычно слишком неточны (неопределенность часто превышает 10%), и для получения точных показаний необходима градуировка датчика.

**Погрешности, обусловленные электронной проводимостью электролита.** Число переноса электронов  $t_e$  в твердых электролитах никогда не равно нулю, и применение к ним соотношения Нернста (1) возможно лишь в первом приближении.

С существованием электронной проводимости связаны три эффекта:

а) эффект «закорачивания цепи»: уменьшение э. д. с. датчика в  $(1 - \bar{t}_e)$  раз, где  $\bar{t}_e$  — среднее число переноса электронов для данного электролита;

б) эффект проницаемости: существует поток анализируемого газа через электролит (называемый потоком электрохимической полупроницаемости), что может привести к изменению давления анализируемого газа;

в) эффект нарушения приэлектродного равновесия между электролитом и окружающей газовой фазой.

Для датчика на основе стабилизированного оксида циркония член  $(1 - \bar{t}_e)$  становится значительным при температуре выше 1000 °С. Поток электрохимической полупроницаемости может вызвать изменение измеряемого давления порядка 0,1 Па при температурах 900 °С. Нарушение приэлектродного равновесия является наиболее важным источником ошибок измерения. Оно может проявляться, начиная от 800 °С. Этую причину следует в особенности принимать во внимание при анализе чистого кислорода при низком давлении.

**Погрешности, вызванные нарушением равновесия между электродом и газовой фазой.** Помимо основного эффекта полу-проникающего потока, упомянутого выше, необходимо указать

другие источники ошибок, оказывающие влияние на равновесие между газом и измерительным электродом:

- использование милливольтметра для измерения незначительного сопротивления, вызывающее прохождение тока через элемент;

- присутствие загрязнений на электроде, например металлических частиц.

*Погрешности, обусловленные неоднородностью температуры датчика.* В качестве примера укажем, что при разности температур между электродами 1 °С и парциальном давлении кислорода 10<sup>2</sup> Па погрешность измерения составляет 3,5 %. Для уменьшения этой погрешности следует определять температуру  $T$  вблизи измерительного электрода.

*Остаточное напряжение.* Когда один и тот же газ контактирует с обоими электродами датчика, измеренная э. д. с. часто не равна нулю и составляет несколько милливольт, что находится в противоречии с законом Нернста. Для точных измерений необходимо скомпенсировать это остаточное напряжение.

### 19.1.3. Основные модели датчиков

В табл. 19.1 указаны основные потенциометрические датчики газового состава, а также отражено их состояние на момент написания книги.

Форма и размеры используемых элементов весьма различны и в значительной степени зависят от используемых твердых электролитов.

Оксидные твердые электролиты обычно изготавливаются в виде открытых трубок и стаканов (трубок, закрытых с одного конца). Это — твердые растворы на основе диоксида циркония (например, 9 мол. % ZrO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или 15 мол. % ZrO<sub>2</sub>/CaO). Наиболее простая модель кислородного датчика снабжена трубкой электролита, внутри которой циркулирует анализируемый газ (рис. 19.3, а). Газом сравнения служит окружающий воздух. Электроды состоят из двух металлических колец с нанесенным на них путем осаждения слоем платины или серебра. Температуру измерительного электрода определяют посредством термопары Pt — 10 % Ph/Pt с точностью до 1 °. Э. д. с. датчика измеряется с помощью платиновых нитей — термопарой и соединенной с электродом сравнения. Металлические или стеклянные переходы позволяют соединить датчик с измерительной системой; при этом герметичность обеспечивается применением инертных эластомерных материалов (типа витона) или путем заклеивания с помощью герметизирующих смол.

Использование стакана с плоским дном (рис. 19.3, б) позволяет реализовать конструкции только с одним холодным

Таблица 19.1. Потенциометрические датчики газового состава на основе твердых электролитов

Газ	Температура, °C па,	Промышленное применение	Разработка	Лабораторное применение
O <sub>2</sub>	Электрод сравнения: ZrO <sub>2</sub> —Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pt (или Ag), O <sub>2</sub>			
H <sub>2</sub> O—H <sub>2</sub>	Электрод сравнения: воздух, H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> /CO, Ni/NiO	<500	+	+
CO <sub>2</sub> —CO	Pd/PdO, Co/CoO ...			
Cl <sub>2</sub>	Ag/SrCl <sub>2</sub> —KCl—AgCl/RuO <sub>2</sub> , Pt, Cl <sub>2</sub> Электрод сравнения: Ag/Ag <sup>+</sup>	100÷450	+	+
SO <sub>2</sub>	Электрод сравнения: Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Pt, SO <sub>2</sub> +SO <sub>3</sub> +O <sub>2</sub>			
SO <sub>3</sub>	Ag/K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> —AgSO <sub>4</sub> / Pt, SO <sub>2</sub> +SO <sub>3</sub> +O <sub>2</sub> Воздух, Pt/ZrO <sub>2</sub> — CaO/K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Pt, SO <sub>3</sub> +O <sub>2</sub> (воздух)	700÷800	+	+
H <sub>2</sub> —H <sub>2</sub> S	Электрод сравнения: CaF—CaS/Pt, H <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> S Электрод сравнения: CaS—Y <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /Pt, H <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> S	800÷900		+
S <sub>x</sub>	Ag/AgI/Ag <sub>2</sub> S, S (пар) Ag/β-оксид алюминия (Ag <sup>+</sup> )/Ag <sub>2</sub> S, S (пар)	90÷400 90÷800		+
CO <sub>2</sub>	Ag/K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> —Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Pt, CO <sub>2</sub>	700÷800		+
NO <sub>2</sub>	Ag/Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , AgCl/Pt, NO <sub>2</sub>	~500		+
I	Ag/RbAg <sub>4</sub> I <sub>5</sub> /Pt, I <sub>2</sub>	~50		+

спаим. С внешним электродом обычно контактирует воздух, а анализируемый газ подается к измерительному электроду через капилляр из оксида алюминия. Эта модель является наиболее распространенной. В другой модели, которая пока находится на стадии разработки, в датчик помещена гермети-

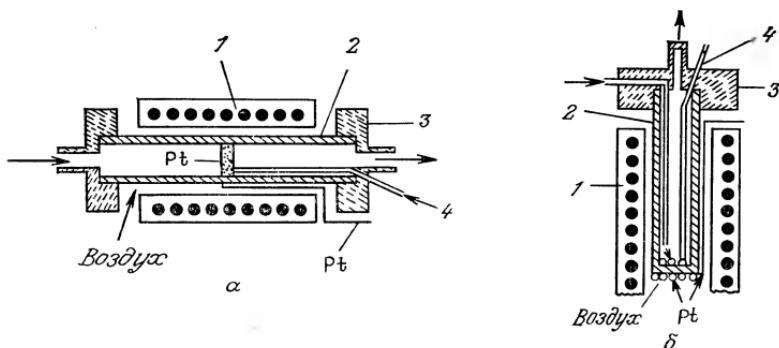


Рис. 19.3. Схемы конструкции кислородных датчиков с использованием воздуха в качестве газа сравнения.

а — трубчатый датчик; б — датчик в виде стакана. 1 — электрорезистивная печь; 2 — стабилизированный оксид циркония; 3 — изолирующая головка; 4 — термопара.

ческая секция с газом сравнения (рис. 19.4). Стандартное давление в ней фиксируется с помощью смеси металла/оксид металла ( $\text{Pd}/\text{PdO}$ ,  $\text{Co}/\text{CoO}$ ). Датчики этого типа имеют ряд достоинств:

- возможность миниатюризации (длина 6÷10 мм, диаметр 1÷2 мм);
- повышенная стойкость к тепловым ударам (датчик можно нагреть от окружающей температуры до рабочей температуры за несколько секунд);
- нагрев датчика осуществляется с помощью печи с низкими энергозатратами, например 10 Вт на воздухе;

— способность выдерживать высокие давления: измерения проводились вплоть до 400 атм;

— равномерное распределение температуры электролитного элемента;

— возможность измерения непосредственно в рабочем объеме благодаря изолированному расположению электрода сравнения и малым размерам датчика;

— система сравнения  $\text{Pd}/\text{PdO}$  является одной из лучших применительно к датчикам для измерения парциального давления кислорода в широком диапазоне ( $0,1 \div 10^6$  Па) и при температурах  $500 \div 800^\circ\text{C}$ . Для работы при более высоких температурах можно использовать систему  $\text{Co}/\text{CoO}$ .

Многие датчики газового состава требуют использования иных методик, по-

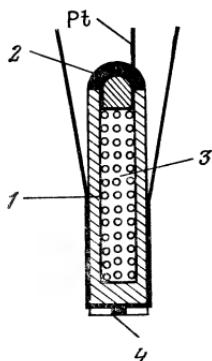


Рис. 19.4. Схема кислородного датчика с использованием внутреннего стандарта.

1 — стабилизированный оксид циркония; 2 — эмаль; 3 — электрод сравнения ( $\text{Pd}/\text{PdO}$ ); 4 — термопара.

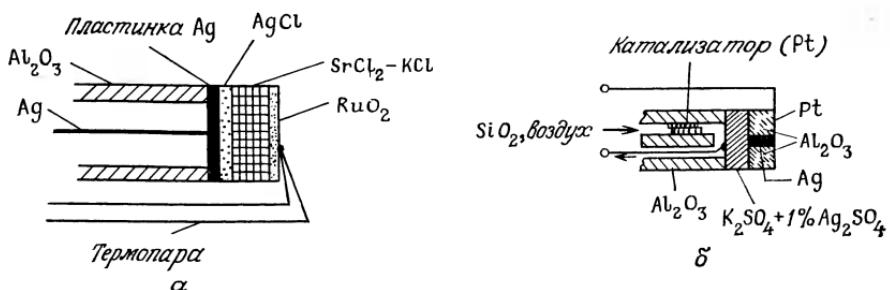


Рис. 19.5. Схема конструкции датчиков для определения хлора (а) и сернистого ангидрида (б).

скольку обычно твердые электролиты доступны только в форме порошка или таблеток. В качестве примера на рис. 19.5 показаны два датчика: один — для определения хлора, а другой — для определения сернистого ангидрида. В системе сравнения  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  хлорного датчика используется, в частности, пластичный герметик, с помощью которого к электролиту приклеена серебряная пластина. В датчике для определения сернистого ангидрида герметичность обеспечивается путем простого прессования трубчатой подложки на таблетку из сульфата калия, поскольку электролит достаточно пластичен. В других датчиках для герметизации используются металлы (Au, Pt).

#### 19.1.4. Современные применения

В настоящее время промышленностью выпускаются только кислородные датчики, предназначенные для а) контроля сгорания в промышленных и бытовых котельных с целью экономии энергозатрат; б) контроля состава смеси в двигателях внутреннего сгорания.

На рис. 19.6 представлен наиболее распространенный датчик. В качестве стандартной среды в нем используется воздух. Датчик нагревается до рабочей температуры выхлопными газами. Измерительный электрод защищен металлическим экраном. С помощью таких датчиков удается значительно снизить содержание моноксида углерода в выхлопных газах и уменьшить отклонения соотношения воздух/топливо до 1% (для нерегулируемой системы они составляют около 5%). Возможны также следующие применения этого датчика:

- контроль газового состава при термообработке в металлургии;
- определение содержания кислорода в вулканических газах с использованием в качестве внутреннего стандарта  $\text{Co}/\text{CoO}$ ;

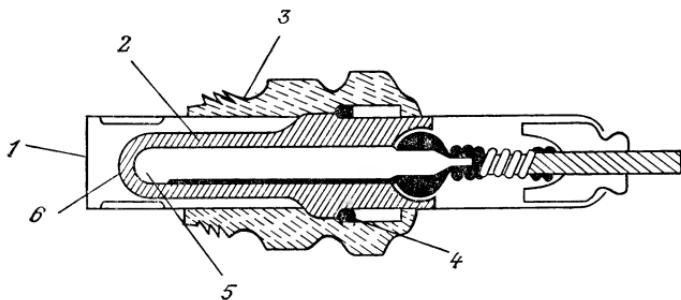


Рис. 19.6. Кислородный датчик, предназначенный для контроля работы двигателя внутреннего сгорания.

1 — защитный экран; 2 — трубка из оксида циркония; 3 — деталь свечи (18 мм); 4 — соединение; 5 — электрод сравнения (воздух); 6 — защитное покрытие+платиновый электрод.

- контроль состава газов, используемых для хранения и дозревания фруктов и овощей;
- анализ кислорода в газах, выделяемых системами, представляющими медико-биологический интерес;
- контроль загрязнения воздуха в лабораториях.

## 19.2. Датчики, основанные на изменении импеданса

### 19.2.1. Измерение объемной электропроводности

Оксиды переходных металлов (Fe, Co, Ni) при высоких температурах ( $T > 700^{\circ}\text{C}$ ) представляют собой нестехиометрические соединения, состав которых зависит от температуры и от давления кислорода, находящегося в равновесии с веществом. Их электропроводность при постоянной температуре выражается следующим образом:

$$\sigma = K p_{\text{O}_2}^{\pm 1/n}. \quad (3)$$

Здесь  $n$  — целое число, величина которого составляет от 4 до 6 в зависимости от природы оксида, от температуры и давления кислорода.

Датчик, основанный на этом принципе и содержащий нить из оксида кобальта, сопротивление которой измеряется, предложен для количественного определения кислорода в диапазоне концентраций  $10^{-4} \div 100$  об. %. Изучалось также его использование для контроля работы двигателей внутреннего сгорания.

Из-за большой постоянной времени и быстрого старения датчики этого типа в настоящее время практически не используются.

### 19.2.2. Измерения поверхностной электропроводности

Принцип действия датчика основан на изменении электропроводности полупроводниковой пленки вследствие адсорбции газа на ее поверхности.

Использование оксида титана  $TiO_2$  было предложено для контроля работы двигателей внутреннего сгорания: при стехиометрическом соотношении смеси изменение парциального давления кислорода в выхлопных газах приводит к значительному изменению сопротивления оксида. Однако пока разработка этого датчика не завершена.

Напротив, датчики, использующие  $ZnO$  или  $SnO_2$ , серийно выпускаются промышленностью. На рис. 19.7 представлен датчик, нашедший наиболее широкое применение. Тонкий слой оксида олова наносится на трубчатую подложку из оксида алюминия. Две золотые нити, связанные с двумя металлическими кольцами, прикрепленными к трубке подложки, служат для подвода тока. Одна нить, помещенная внутри трубы, обеспечивает омический нагрев датчика до его рабочей температуры  $\sim 350^{\circ}C$ .

Адсорбция газа на поверхности полупроводникового оксидного материала создает поверхностный заряд, вызывающий изменение плотности носителей заряда, соответствующее изменению поверхностной электропроводности.

Однако селективность таких датчиков низка, и поверхностная электропроводность зависит от окружающей температуры, влажности и парциального давления кислорода. Селективность можно повысить путем подбора оптимальной рабочей температуры и введения в оксидный слой вещества, обладающего катализитическими свойствами, например  $Pd$ ,  $Cu$ ,  $Ni$ ,  $Pt$ .

Основные детектируемые этим датчиком газы —  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $NO_x$ .

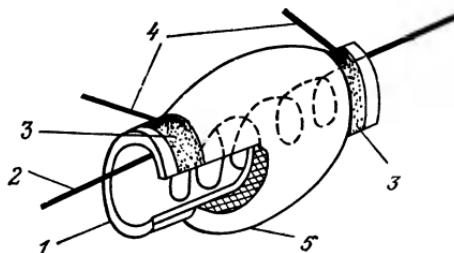


Рис. 19.7. Схема датчика на основе полупроводникового оксида (типа FIGARO).

1 — керамическая трубка держателя; 2 — резистивный нагреватель; 3 — электрод; 4 — зажимы; 5 — отожженный  $SnO_2$ .

Постоянная времени датчика составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Порог чувствительности составляет  $\sim 10^{-4}\%$ .

Основным недостатком датчика является нестабильность во времени, что требует его периодической поверки или замены. Главное достоинство датчика — низкая стоимость.

### 19.2.3. Измерение электрической емкости

Емкостные датчики используются, главным образом, для определения количества водяного пара, присутствующего в газе. Их функционирование основано на изменении емкости при адсорбции воды на диэлектрическом материале (разд. 17.5.2, 17.5.3).

## 19.3. Кварцевый пьезоэлектрический датчик

Принцип действия кварцевого пьезоэлектрического датчика очень прост (см. гл. 10): частота колебаний кварцевого кристалла уменьшается, когда какая-либо частица адсорбируется на его поверхности. Селективность датчика обеспечивается путем осаждения соответствующего покрытия на две грани кристалла (рис. 19.8). Изменение частоты колебаний  $\Delta F$  подчиняется соотношению

$$\Delta F = KC,$$

где  $C$  — концентрация анализируемого вещества, а  $K$  — постоянная, характерная для кристалла.

Устройство содержит низкочастотный генератор колебаний и частотометр.

Чаще всего кварцевые кристаллы с собственной частотой 9 МГц используются в виде дисков или таблеток диаметром 10–16 мм и около 0,19 мм толщиной. Частоту колебаний можно измерить с точностью до 1 Гц, причем порог чувствительности датчика составляет  $\sim 10^{-9} g$ .

Основная трудность состоит в выборе покрытия, которое должно селективно адсорбировать анализируемое вещество и



Рис. 19.8. Схема кварцевого пьезоэлектрического датчика.

проявлять хорошую стабильность во времени. Эти датчики выпускаются промышленностью с 1964 г. В последнее время их использование для анализа газов расширилось. Они применяются:

- для определения содержания влаги (осадок представляет собой гигроскопичный полимер); датчик демонстрирует высокую чувствительность ( $\sim 10^{-4}\%$  за 30 с), хорошую селективность и достаточно большой срок службы (более 6 месяцев);
- для анализа углеводородов;
- для определения пестицидов и газов, таких, как  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$  и  $\text{H}_2\text{S}$ .

#### 19.4. Катализитические датчики

Катализитические датчики используются в промышленности главным образом для обнаружения горючих и взрывчатых газов.

Датчик снабжен платиновой нитью в виде спирали (диаметр нити 50 мкм), залитой тугоплавким оксидом с низкой пористостью, таким, как оксид алюминия (рис. 19.9).

Слой оксида алюминия покрыт катализатором (например, Pt, Pd, Ir, смесь Pd— $\text{ThO}_2$ ). Эти катализаторы улучшают чувствительность и уменьшают риск отравления детектора. Обычно детектор включается в мост Уитстона со вторым элементом, не проявляющим активности по отношению к анализируемому газу. Оба элемента нагреваются под действием эффекта Джоуля до рабочей температуры, например 450 °C. В присутствии горючего газа происходит реакция; теплота сгорания вызывает повышение температуры чувствительного элемента и увеличение его электрического сопротивления. Возникающий в результате разбаланс моста генерирует сигнал, пропорциональный содержанию горючего газа в газовой смеси.

Эти датчики не обладают высокой селективностью и дают отклик на большое число газов:  $\text{CH}_4$ , бутан,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  и т. д. в области концентраций 0÷5%.

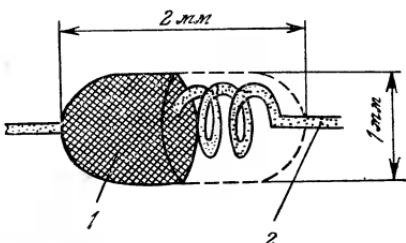


Рис. 19.9. Схема катализитического датчика.

1 — катализатор Pd на бусинке  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 2 — платиновая нить.

## 19.5. Катарометры

Эти приборы были первыми из датчиков газового состава, основанных на использовании физических свойств газов. Первое их применение (для определения содержания водорода в водяном паре) восходит к 1880 г. Они используются в настоящее время для количественного определения водорода, диоксида углерода, кислорода и азота. Они также широко применяются в газовой хроматографии: 70÷80% хроматографов в качестве детекторов используют катарометры. Существует тенденция к замене этого метода более селективными (масс-спектрометры, ИК-спектроскопия, датчики на основе твердых электролитов и т. д.). Как видно из табл. 19.2, удельные теплопроводности газов существенно различаются. С другой стороны, зависимость теплопроводности бинарных смесей от их состава часто имеет линейный характер. Таким образом, метод количественного определения состава заключается в сопоставлении теплопроводностей анализируемых смесей с соответствующими значениями для газа сравнения.

Датчик представляет собой трубку с терmostатируемыми стенками, через которую пропускается анализируемый газ. Внутри трубы помещена металлическая нить (Pt, W и т. п.). Если к концам этой нити приложить постоянное напряжение, то ее температура будет зависеть от теплоты, выделяемой в результате эффекта Джоуля, и теплоты, рассеиваемой путем излучения, конвекции и теплопроводности. Экспериментальные условия подбираются таким образом, чтобы потери, связанные с теплопроводностью газа, были наиболее значительными. Таким образом, температура нити, а значит, и ее сопротивление зависят от состава газа. Этот метод называется методом нити накала.

В мост Уитстона включаются два одинаковых датчика  $M$  и  $N$  (рис. 19.10). В начальный момент в рабочих объемах обоих датчиков циркулирует один и тот же газ ( $G$ ), и мост находится в состоянии равновесия. Если в рабочий объем датчика  $N$  ввести смесь ( $G+H$ ), то сопротивление нити уменьшается, и это

**Таблица 19.2. Теплопроводность некоторых газов** ( $k$  — удельная теплопроводность,  $10^{-5}$  Дж/см·с·К)

Газ	H <sub>2</sub>	He	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
$k$	174,1	142,3	30,1	24,7	24,3	23,4	21,8	14,2

изменение можно измерить с помощью моста. Прибор первоначально настраивается с помощью газов сравнения.

Для того чтобы уменьшить влияние изменения расхода газа, некоторые приборы снабжены диффузионными детекторами, в которых нагревательный элемент размещается вне основной газовой коммуникации. Однако постоянная времени таких приборов велика. Наиболее часто принимается компромиссное решение между диффузионными датчиками и датчиками с прямым пропусканием газа.

**Основные преимущества катарометров:**

- сравнительно невысокая стоимость прибора;
- простота использования;
- достаточно высокая точность метода ( $0,5 \div 2\%$  в зависимости от модели датчика и анализируемых газов).

**Основными недостатками катарометров являются:**

- низкая селективность (обычно можно количественно анализировать только бинарные смеси, составляющие которых известны);
- необходимость газа сравнения (воздуха для смесей с низкой теплопроводностью, гелия или водорода для систем с высокой теплопроводностью);
- возможность протекания химических реакций между газами, контактирующими с нитью накала;
- возможная коррозия нити;
- возможность существенных помех со стороны посторонних газов.

## 19.6. Парамагнитные датчики

### 19.6.1. Физические принципы

На газ, помещенный в поле с градиентом магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , действует сила, параллельная полю, направление и величина которой зависят от магнитной восприимчивости газа  $\chi$ :

$$d\mathbf{F} = \frac{\chi}{2\mu_0} dV \nabla B^2, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость в вакууме;  $dV$  — элементарный объем.

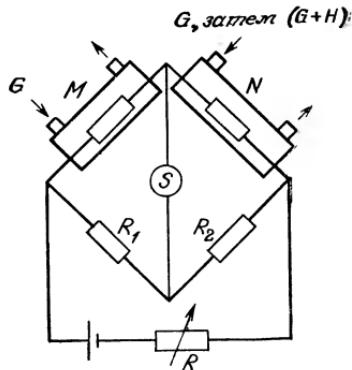


Рис. 19.10. Принципиальная электрическая схема катарометра.

Таблица 19.3. Значения относительной восприимчивости  $\chi$  некоторых газов при 20°C (восприимчивость кислорода принята равной 100)

Газ	O <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	Ar	CH <sub>4</sub>
$\chi$	100	45	4	-0,12	-0,36	-0,35	-0,63	-0,58	-0,37

Большинство газов диамагнитны (величина  $\chi$  отрицательна). В молекулах некоторых газов (O<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>) имеется хотя бы один неспаренный электрон, и они парамагнитны (величина  $\chi$  положительна). Кроме того, магнитные восприимчивости таких газов выше, чем у других газов (табл. 19.3). При помещении газовой смеси в магнитное поле оно оказывает воздействие практически только на парамагнитные газы.

Другой особенностью парамагнитных газов является изменение их магнитной восприимчивости с температурой; на этом эффекте основаны два типа промышленных датчиков, используемых исключительно для определения кислорода: а) магнитодинамические приборы и б) приборы на основе термомагнитной конвекции.

### 19.6.2. Модели

**Магнитодинамические датчики.** Промышленностью выпускаются различные модели, различающиеся способом измерения силы, создаваемой магнитным полем (основанные на измерении момента или расхода).

Первый тип приборов показан схематически на рис. 19.11, а. В стальной камере, через которую проходит анализируемый газ, полюсами треугольного сечения создается неоднородное магнитное поле. Гантель, состоящая из двух кварцевых оболочек диаметром 2 мм, заполненных азотом, подвешивается на кварцевой нити с зеркалом. Каждая сфера находится в зазоре магнита. Если газ содержит кислород, то он притягивается в направлении более сильного магнитного поля, что приводит к смещению сфер, поворачивающихся вокруг нити подвеса до тех пор, пока действующая сила не уравновесится крутящим моментом. Отраженный зеркалом луч света отмечает угловое положение врачающегося приспособления. Содержание кислорода непосредственно считывается с градуированной шкалы, на которую попадает световое пятно. Чувствительность прибора можно улучшить, используя метод компенсации: гантель возвращается в исходное положение с помощью электрического поля, созданного между двух электродов. Величина приложенной разности потенциалов прямо пропорциональна концент-

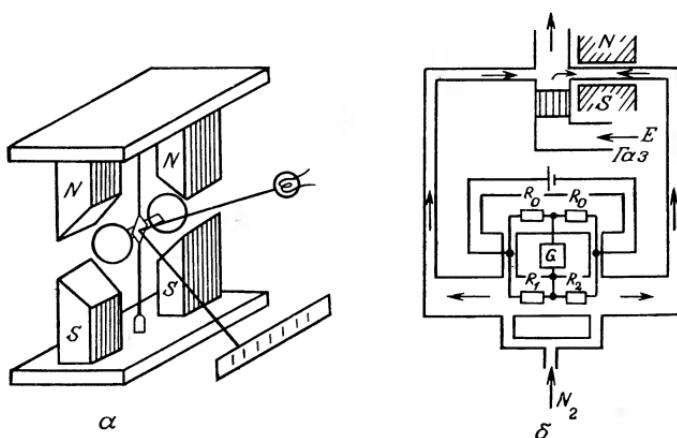


Рис. 19.11. Принципиальные схемы парамагнитных магнитодинамических датчиков.  
а — магнитодинамический прибор; б — прибор на основе эффекта Квинка.

рации кислорода в газе. Прибор градуируется с помощью азота (ноль шкалы) и газа известного состава (обычно сухого воздуха).

Из-за изменения восприимчивости парамагнитных газов с температурой прибор поддерживается при 50 °С. Этот прибор функционирует в любых положениях и может быть изготовлен в портативном варианте. Кроме того, его достоинствами являются очень высокая стабильность нуля и шкалы концентраций, а также отсутствие нити накала.

Основные недостатки прибора — довольно большая постоянная времени (10 с  $\div$  1 мин) и низкая чувствительность (концентрация должна превышать  $10^{-4}$  об. %).

Можно также использовать эффект Квинка, состоящий в том, что кислород имеет тенденцию концентрироваться в магнитном поле, тогда как диамагнитные газы не испытывают какого-либо влияния со стороны поля. Прибор, основанный на этом эффекте, схематически показан на рис. 19.11, б. В рабочем объеме прибора циркулируют два симметричных потока азота, омывающих две нити, которые образуют сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  моста Уитстона. При введении в  $E$  газа, содержащего кислород, последний будет втягиваться в ту ветвь контура, где приложено магнитное поле ( $NS$ ). Создающееся в результате «магнитное давление», пропорциональное содержанию кислорода в анализируемом газе, вызывает потерю заряда, приводящую к дисбалансу расходов инертного газа в двух ветвях и, следовательно, к разбалансу моста ( $G$ ).

Основные достоинства прибора — небольшая постоянная

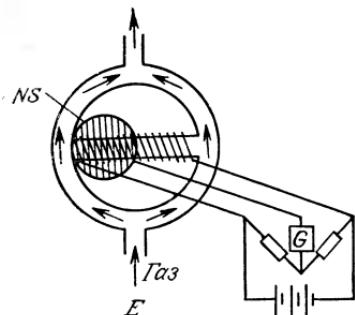


Рис. 19.12. Принципиальная схема датчика на основе термомагнитной конвекции, вызванной магнитным ветром.

принципе: при нагреве анализируемого газа, помещенного в магнитное поле, магнитная восприимчивость нагретого кислорода снижается, и он захватывается потоком холодного кислорода, который, в свою очередь, нагревается (происходит образование «магнитного ветра»).

В измерительных приборах анализируемый газ пропускается снизу вверх через расположенное вертикально кольцо (рис. 19.12). Небольшая трубка, располагаемая точно по горизонтали, соединяет два полукольца. Две платиновые нити накала, включенные в мост Уитстона, навиваются на трубку. По обе стороны одного из этих сопротивлений помещаются полюсы постоянного магнита (*NS*). Мост уравновешивается при пропускании через ячейку инертного газа. Если анализируемый газ содержит кислород, то последний притягивается магнитным полем в центральной трубке и нагревается, а его магнитная восприимчивость снижается, и он замещается более холодным газом; устанавливается «магнитный ветер». Газовый поток в разной степени охлаждает нити накала и выводит мост из равновесия. Этот разбаланс моста зависит от концентрации кислорода в газе.

Основные достоинства прибора — сравнительно невысокая стоимость и отсутствие постоянного источника помех со стороны диамагнитных газов (в результате использования комбинации магнитного поля и нагревания газа).

Основные недостатки: кольцо необходимо устанавливать по уровню, чтобы исключить влияние термической конвекции в горизонтальной трубке (это исключает возможность портативных вариантов); присутствие в анализируемом газе составляющих, сильно отличающихся по коэффициенту теплопроводности от кислорода ( $H_2$ ,  $He$ ,  $CO_2$ ), является дополнительным источни-

времени (15 с) и отсутствие нити накала, контактирующей с анализируемым газом. Его основными недостатками являются сложность операций установки и поддержания нуля, зависимость показаний от положения прибора и потребность в инертном газе.

**Приборы на основе термомагнитной конвекции.** Приборы этого типа долгое время оставались единственными, выпускавшимися промышленностью. Они основаны на следующем

ком погрешностей; положение нуля зависит от уравновешенности моста, т. е. от стабильности сопротивлений и расхода газа.

Некоторые приборы снабжены системой измерения так называемого «магнитного давления». Анализируемый газ циркулирует в двух одинаковых трубках, помещаемых в зазор электромагнита, создающего модулируемое магнитное поле (рис. 19.13). На участках  $R$  и  $T$  эти две трубки нагреваются. В результате термомагнитного эффекта между трубками устанавливается разность давлений, модулируемая частотой поля, амплитуда которой, однако, зависит от содержания кислорода в анализируемой смеси. Эта модуляция измеряется с помощью мембранны  $M$ . Существенным достоинством приборов этого типа является значительно меньшая постоянная времени, чем у приборов конвекционного типа (порядка 10 с).

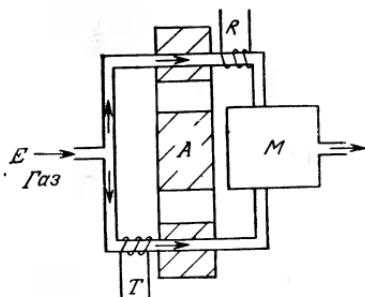


Рис. 19.13. Принципиальная схема датчика, предназначенного для измерения магнитного давления.

## 19.7. Оптические анализаторы

### 19.7.1. Физические принципы

Поглощение электромагнитного излучения молекулой газа может привести не только к возбуждению электрона, но также к изменениям колебательной энергии (колебания атомов относительно каждой химической связи) и вращательной энергии (вращение всей молекулы или ее части). Все эти изменения энергии являются квантованными. Возможны только определенные значения кинетического момента вращения или энергии колебаний, характеризующие так называемые колебательные и вращательные энергетические уровни.

Поглощение видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений вызывает изменение электронной энергии молекул. Поглощение инфракрасного излучения приводит к изменениям колебательных и вращательных состояний молекул.

Эти эффекты используются в абсорбционной спектроскопии, которая является, следовательно, методом определения химического состава газа, поскольку получаемые спектры поглощения однозначно характеризуют его. Измерение интенсивности электромагнитного излучения, поглощаемого газовой смесью, зависит от природы газа и позволяет, таким образом, опреде-

лить концентрацию данного газа в смеси. Согласно закону Бугера — Ламберта — Бера, доля  $(I/I_0)$  интенсивности излучения, поглощенного кюветой с газом, изменяется экспоненциально с длиной кюветы  $l$ , концентрацией  $c$  газа в смеси и коэффициентом поглощения  $a$ :

$$\lg(I/I_0) = alc.$$

*Применимость закона Бугера — Ламберта — Бера.* Некорректное применение этого закона может привести к существенным ошибкам. Закон справедлив только в том случае, если излучение является монохроматическим, что не выполняется в случае бездисперсионных приборов. Кроме того, коэффициент удельного поглощения  $a$  изменяется с используемой шириной полосы, а изменение температуры анализируемого газа приводит к смещению полосы поглощения. Закон также не учитывает общего давления и влияния непоглощающих газов, присутствующих в смеси.

Для того чтобы устранить или учесть эти источники ошибок, наряду с другими неконтролируемыми факторами, такими, как изменение интенсивности излучения, изменение чувствительности детектора или загрязнение окон датчика, обычно используются приборы, работающие по двухлучевой схеме.

### 19.7.2. Модели

Газы, анализ которых в промышленности осуществляется с использованием методов абсорбционной спектроскопии, перечислены в табл. 19.4.

Таблица 19.4. Основные газы, анализируемые с помощью оптических излучений

Длина волны, нм	Рентгеновское излучение $10^{-2} \div 10$	УФ $10 \div 5 \cdot 10^2$	Видимое $5 \cdot 10^2 \div 8 \cdot 10^2$	ИК $8 \cdot 10^2 \div 10^3$
Основные анализируемые газы	H <sub>2</sub> S, газообразные кислоты	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , Hg	ClO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , алканы, алкены
Область концентраций	Следовые количества	—	NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , Hg	+
	Высокие концентрации	+	SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	+

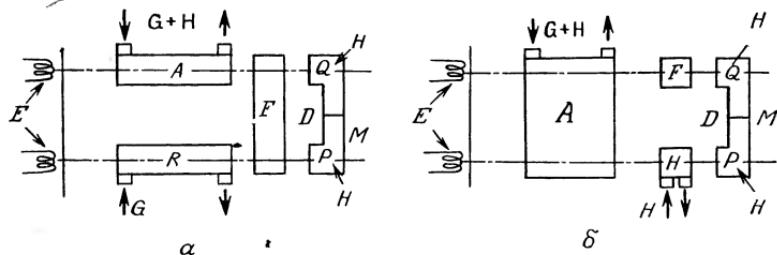


Рис. 19.14. Принципиальная схема инфракрасного бездисперсионного двухлучевого спектрометра.

*α* — положительный фильтр; *β* — отрицательный фильтр; *H* — анализируемый газ, поглощающий в ИК-области; *G* — газ, не поглощающий в ИК-области.

**Аналитаторы с использованием видимого и ультрафиолетового излучения.** Пучок света, испускаемый лампой (обычно ртутной), монохроматизируется с помощью соответствующих фильтров.

В некоторых приборах монохроматическое излучение разделяется на два пучка, направленные соответственно на кювету, через которую продувается смесь анализируемых газов, и на другую кювету, содержащую газ сравнения (двухлучевой спектрометр). Интенсивности излучения на выходе детектируются и сравниваются с помощью фотоэлементов.

В приборе другого типа (однолучевом спектрометре) пучок света направляется на кювету, через которую продувается газовая смесь. После этой кюветы пучок света разделяется на два пучка, проходящие через два фильтра, один из которых дает излучение, поглощаемое анализируемым газом, а другой — не поглощаемое. Сопоставление интенсивностей этих потоков света осуществляется с помощью фотоэлементов.

**Аналитаторы, использующие ИК-излучение.** Дисперсионные или «монохроматизирующие» приборы используются для контроля процессов в промышленности очень редко; обычно используют недисперсионные приборы, т. е. приборы без спектрального разложения. Хотя селективность этих приборов ниже, однако при промышленном использовании они имеют ряд преимуществ, таких, как лучшая чувствительность, простота, надежность и меньшие эксплуатационные расходы.

В варианте однолучевого прибора излучение от источника проходит через кювету с анализируемым газом, а затем — последовательно через два обращающих фильтра, что позволяет сопоставить с помощью детектора поглощение для двух длин волн — одной, соответствующей пику поглощения для анализируемого газа, и другой — отвечающей минимальному поглощению (последняя принята в качестве стандарта).

Анализаторы на основе двухлучевой схемы более распространены. Различают приборы двух основных типов (рис. 19.14): а) анализаторы с положительным фильтром; б) анализаторы с отрицательным фильтром.

Анализаторы с положительным фильтром (рис. 19.14, а) снабжены рабочей кюветой  $A$ , через которую пропускается анализируемая газовая смесь (газ  $H$ , поглощающий в инфракрасной области спектра, и газ  $G$ , не поглощающий в этой области), и кюветой сравнения  $R$ , содержащей непоглощающий газ  $G$ . Кюветы изготавливаются из меди или из позолоченного либо посеребренного изнутри стекла. Они закрыты окнами, прозрачными для излучения ( $\text{LiF}$ , кварц, слюда,  $\text{CaF}_2$  и др.). В состав детектора  $D$ , работающего по дифференциальной схеме, входят две камеры,  $P$  и  $Q$ , заполненные газом  $H$  и разделенные мембраной  $M$ . Газ  $H$ , содержащийся в камере  $P$ , поглощает излучение на определенных длинах волн, а газ, находящийся в камере  $Q$ , будет поглощать излучение на этих длинах волн тем меньше, чем больше доля газа  $H$  в смеси, пропускаемой через кювету  $A$ . Нагрев и, следовательно, давления газа  $H$  в секциях  $P$  и  $Q$  детектора будут тем больше различаться, чем выше содержание газа  $H$  в смеси (положительный фильтр). Если анализируемая смесь содержит газы, которые могут оказывать мешающее влияние (т. е. газы, полосы поглощения которых перекрываются с полосами анализируемого газа), то ими заполняется компенсационная кювета  $F$ , через которую проходят два луча. Таким образом обеспечивается режим, при котором изменение концентрации этих газов не влияет на процесс измерений.

В анализаторах с отрицательным фильтром (рис. 19.14, б) излучение от источника направляется на кювету  $A$ , через которую продувается анализируемая газовая смесь ( $G+H$ ), затем параллельно через кювету  $N$ , в которой циркулирует анализируемый газ  $H$ , и компенсационную кювету  $F$  с газом, который может оказывать мешающее влияние, и, наконец, на приемник (аналогичный описанному выше), включенный в дифференциальную схему. В этом приборе разность давлений между секциями  $P$  и  $Q$  детектора будет тем меньше, чем выше концентрация газа  $H$  в смеси (отрицательный фильтр).

### 19.7.3. Применение

К настоящему времени достаточно разработана только инфракрасная абсорбционная спектроскопия. Около 80% анализаторов этого типа используются в промышленности для определения  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  и для контроля загрязнения окружающей среды. Эти анализаторы менее распространены в сталелитейной

промышленности по сравнению с масс-спектрометрами, несмотря на высокую стоимость последних.

Использование лазеров в качестве источника монохроматического излучения получило широкое распространение в анализаторах, требующих очень высокой чувствительности, и в дистанционном анализе без отбора проб (определение загрязняющих примесей).

Анализаторы, использующие УФ- или видимое излучение, применяются в промышленности значительно реже — в особых случаях, для которых не существует других простых методов анализа.

## 19.8. Заключение

### 19.8.1. Обобщение

В табл. 19.5 сведены основные характеристики газоанализаторов, а также основные факторы, влияющие на их функционирование. Также указаны диапазон измеряемых концентраций (определение следовых количеств или больших концентраций), селективность датчика и возможность проведения измерений непосредственно в месте протекания процесса. Перечислены наиболее важные из газов, анализируемых с помощью различных датчиков, наряду с достоинствами и недостатками последних.

В табл. 19.6 указаны анализаторы, используемые для определения различных газов, и их характеристики: определение следов или больших концентраций; газы, мешающие определению; точность, постоянная времени  $t_r$  (5%) датчика и современное состояние разработки.

### 19.8.2. Перспективы

Важность анализа газового состава сегодня не вызывает сомнений, поскольку она напрямую связана с основными проблемами современной цивилизации: экономией энергии, сырья, контролем качества, оптимизацией промышленных процессов, охраной окружающей среды, совершенствованием медико-биологических методов и т. д.

Сегодня приборы с низкой селективностью, такие, как катарометры, уступают дорогу высокоселективным анализаторам, например, масс-спектрометрам, несмотря на то, что стоимость последних часто довольно высока. В дополнение к этому все более активизируется разработка простых в обращении и недорогих селективных датчиков, предназначенных для контроля работы котельных установок и автомобильных двигателей.

Учитывая состояние развития электрохимии твердых тел

Таблица 19.5. Основные характеристики анализаторов газового состава

Датчик	Абсорбирующая среда (+)	Диагностическая среда (a), ионная комбинация (n.)	Среда для определения концентрации газов	Определение газов в пробе на месте	Аналитируемые газы	Достоинства	Недостатки
На основе твердого электролита	+ $T, p_{\text{общ}}$	+ + + + +	+ + + + +	+ + + + +	$\text{O}_2, (\text{SO}_2), (\text{Cl}_2)$ , Миниатюрность, воспроизводимость, абсолютные измерения, измерения на месте	$T > 500^{\circ}\text{C}$	
Парамагнитный	п. — ( $T$ )	—	—	— + + — $\text{O}_2$	Хорошо изучен, недорогой	Низкая чувствительность	
ИК-спектроскопия	п. — $T$	—	+ + (+) — $\text{CO}, \text{CO}_2, \text{NO}, \text{SO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CH}_4$	— $\text{CO}_2, \text{NO}, \text{SO}_2, \text{Широкое зование, хорошая громоздки$	использование, хорошая громоздки	чувствительность, хорошая стабильность	
УФ-спектроскопия	п. — $T$	—	+ + + — $\text{Cl}_2, \text{NH}_3$	$\text{SO}_2, \text{NO}_x$	Хорошая чувствительность	Спектр должен быть известен	
Катарометр	п. — $T, p_{\text{общ}}$	—	— — $\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{Dешевизна, про-$	$\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{стота использова-}$	Не селективен		

Твердотельный электропровод- ности	п. — $T, p_{\text{обш}}$	+	+	+	+	+	+	$(O_2), H_2S$	Миниатюрность, измерения на мес- те	Старение $T > 700^{\circ}\text{C}$
Емкостный	п. — $T, p_{\text{обш}}$	+	+	+	+	+	+	$H_2O$	Миниатюрность, измерения на ме- сте	
Масс-спектромет- рия	п. —		+	+	+	+	—	Все газы	Очень высокая чувствительность, определение мик- роколичеств, от- сутствие помех	стой- мость, мость, сложность обслуживания, хрупкость
Хемолюминесцен- ция	п. — $T$			+	+	+	—	$\text{NO}$		Селективность

Таблица 19.6. Основные типы анализаторов промышленных газов

Газ	Тип датчика	Следовые количества	%	Мешающее влияние	Точность	Постоянная времени запаздывания		Про- мышл.	Лабор.
						Состояния			
$O_2$	На основе электролитов	твердых >0,1 м.д.об.	+	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> $\Delta p/p < 5\%$	от 0,1 с до нескольких секунд	+ +	+ +		
	Парамагнитный	—	1%	NO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> O	До 2%	10÷30 с	+ +	+ +	
	Катарометр	—	%	H <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , 2% N <sub>2</sub> и др.	30÷40 с		+ +	+ +	
	Твердотельный электро-проводности	электро- > 1 м.д.об.	+	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> 0,5%/°C	Неск. минут	(+)			
Mass-спектрометрия	Mass-спектрометрия	>5 м.д.об.	+	—	1%	<1 с	+ +	+ +	
	Катарометр	>10 м.д.об.	+	—	0,5%	30 с	+ +	+ +	
H <sub>2</sub>	Mass-спектрометрия	+	+	—	1%	<1 с	+ +	+ +	
	Катарометр	—	+	H <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> и др.	2% $\Delta p/p < 5\%$	<1 мин	(+) +	+ +	
Cl <sub>2</sub>	На основе твердых электролитов	—	+	—	—				
	ИК-спектрометрия	м.д.об.	+	—	—				
CO	ИК-спектрометрия	>10 м.д.об.	+	H <sub>2</sub> O, CH <sub>x</sub> и др.	0,5%	2÷3 мин	+ +	+ +	
	Катарометр	>1 м.д.об.	+	—	—	До 5%	Неск. секунд	+ +	
CO <sub>2</sub>	ИК-спектрометрия	>1 м.д.об.	+	—	—	До 5%	Неск. секунд	+ +	

Катарометр	—	+	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> и др.	2%	+	+
ИК-спектрометрия	Неск. м.д.об.	+	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	До 5%	+	+
SO <sub>2</sub>	На основе твердых электролитов	>1 м.д.	+	3%	Неск. секунд ÷ неск. минут	(+)
NO	На основе электролитов	твердых +	+	3%	Неск. секунд ÷ неск. минут	(+)
H <sub>2</sub> O	ИК-спектрометрия	>5 м.д.об.	+	H <sub>2</sub> O	5%	Неск. секунд <1 с
	Хемилюминесценция	0,001 м.д.об.	+		1%	+
	Емкостной	0,001 м.д.об.	+	H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub>	1%	Неск. секунд
	Катарометр	—	+	и др.	3%	+
	ИК-спектрометрия	м.д.	—		5%	Неск. секунд
H <sub>2</sub> S	Твердотельная проводность	электро- м.д.	—		7%	Неск. минут
	ИК-спектрометрия	+	+		~5%	Неск. секунд
NH <sub>3</sub>	Катарометр	—	+	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub> , Ar 5%	+	+
	УФ-спектрометрия	м.д.	+	и др.		
CH <sub>4</sub>	ИК-спектрометрия	+	+	До 5%	Неск. секунд	+
	Mass-спектрометрия	0,001 м.д.об.	—	1%	<1 с	+

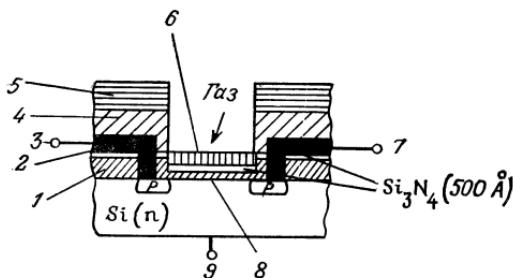


Рис. 19.15. Схема газочувствительного полевого транзистора (GASFET).

1 — термообработанный  $\text{SiO}_2$ ; 2 — алюминиевые соединения; 3 — источник; 4 — осажденный  $\text{SiO}_2$ ; 5 — полимер; 6 — мембрана; 7 — затвор; 8 — имплантированный канал р-типа; 9 — подложка.

и прогресс, достигнутый в микроэлектронике, можно утверждать, что датчикам на основе твердых электролитов принадлежит будущее. Разработка новых твердых электролитов позволила разработать датчики для определения хлора, диоксида и триоксида серы. С другой стороны, растворение соответствующих ионов в твердых электролитах кажется многообещающим для исследования других газов и для существенного снижения рабочей температуры датчиков, в частности датчиков для определения кислорода.

Бурное развитие в последнее десятилетие микроэлектронной технологии позволило разработать полностью твердотельный кислородный датчик, в котором в качестве электролита используется слой стабилизированного оксида циркония толщиной  $\sim 5000 \text{ \AA}$ . Благодаря технологии тонких пленок удалось добиться заметного снижения рабочей температуры датчиков ( $<300^\circ\text{C}$ ). Однако трудности получения бездефектных оксидных слоев пока тормозят промышленную разработку таких приборов.

Начавшиеся несколько раньше исследования датчиков типа GASFET — газочувствительных полевых транзисторов — продолжаются и сегодня; речь идет о транзисторе типа металл — оксид — полупроводник, сетка которого (или затвор) выполняется в виде мембранны, проявляющей селективность к анализируемым веществам (рис. 19.15). Эти новые датчики обладают рядом достоинств; возможна их миниатюризация, кроме того, автоматизация их производства позволит улучшить воспроизводимость характеристик и снизить себестоимость. Эти приборы обеспечили возможность анализировать водород и водородосодержащие газы  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$ . Сетка транзистора для такого применения изготавливается из палладия. Несомненно, совершенствование датчиков этого типа для анализа газов станет в ближайшие годы объектом интенсивных исследований.

## Библиография

### Монографии

1. Afnor Analyse des gas, Qualité de l'air, Recueil des normes françaises, 2nd ed., Paris, 1981.
2. Burton J., Pratique die la mesure et du contrôle dans l'industrie, Paris, Dunod, 1964, Tome 3.
3. Guerin H., Traité de manipulation et d'analyse des gaz, Paris, Masson, 1981.
4. Mullen P. W., Modern Gas Analysis, Londres, Interscience Publ Ltd., 1955.
5. Seiyama T., Fueki K., Shiokawa J., Suzuki S. (eds.), Proceeding of the Int. Meeting on chemical Sensors, Elsevier, Amsterdam, 1983.
6. Verdin A., Gas Analysis Instrumentation, Londres, MacMillan, 1973.

### Периодические издания

7. Fairbanks L. H., Recent Developments in the Design and Use of the Oxygen Probe for Furnace Atmosphere Monitoring and Control, *Heat Treatment of Metals*, 4, 95 (1977).
8. Gauthier M., Belanger A., Meas Y., Kleitz M., Solid-State Potentiometric Gauges for Gaseous Species, *Solid Electrolytes*, Londres, Academic Press, 497 (1978).
9. Guilbault G. G., Uses of Piezoelectric Crystal Detector in Analytical Chemistry, *Ion-Selective Electrode Rev.*, 2, 3 (1980).
10. Kleitz M., Pelloux A., Gauthier M., New Types of Solid-Electrolyte Gas Sensors, *Fast Ion Transport in Solids*, N. Y., North Holland, 69 (1979).
11. Sato M., Electrochemical Measurements and Control of Oxygen Fugacity and other Gaseous Fugacities with Solid Electrolyte Sensors, *Research Techniques for High Pressure and High Temperature*, Berlin, Springer, 43 (1971).

### Дополнительная литература, имеющаяся на русском языке

- Павленко В. А. Газоанализаторы. — М. — Л., 1965.  
 Бражников В. В. Дифференциальные детекторы для газовой хроматографии. — М., 1974.  
 Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. — М., 1983.  
 Коллеров Д. К. Метрологические основы газоаналитических измерений. — М., 1967.  
 Тхоржевский В. П. Автоматический анализ химического состава газов. — М., 1969.

## ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авогадро** число 221-2  
**Акселерометры** 43  
— для измерения постоянных и низкочастотных ускорений 103-2  
— — — ударных импульсов 105-2  
— индуктивные 117-2  
— области использования 91-2  
— потенциометрические 115-2  
— пьезорезистивные 100-2, 101-2  
— достоинства 111-2  
— пьезоэлектрические 92-2  
— предварительно напряженные 91-2  
— — — работающие на сжатие 93-2  
— — — — срез 93-2  
— следящие 117-2, 118-2  
— — — влияние вибраций 123-2  
— — — — попечерных ускорений 122-2  
**Альфа-частицы** 298-2  
**Анализ** погрешностей 387-2  
**Аналитаторы** газового состава, типы 406—409-2  
**Анемометры** ионные 139-2  
— крыльчатые 143-2  
— лазерные 145-2  
— ультразвуковые 147-2  
— чашечные 141-2
- Байярда — Альперта** манометры 239-2, 244—247-2  
**Баумгартина** формула 143-2  
**Баути** схема 302  
**Бета-частицы** 299-2  
**Болометр** 211  
**Борковского — Блейлока** схема 317  
**Бугера — Ламберта — Бера** закон 402-2  
**Бурдона** трубка 175-2, 203-2  
**Быстродействие** 45
- Вакуумметры** емкостные 228-2  
— на основе трубки Бурдона 225-2  
— области применения 225-2
- пьезорезистивные 227-2  
— с источником радиоактивности 249-2  
— — — катодом горячим 245-2  
— — — — холодным 241-2  
— — — нитью накала 230-2  
— термомолекулярные с диамагнитной супензией 251-2  
— термопарные 237-2  
**Вектор** интенсивности, непосредственные измерения 293-2  
**Величины** влияющие 17  
— измеряемые 8  
**Верде** постоянная 236  
**Видикон** 222  
**Видности** дневная кривая 134  
**Вина** закон смещения 328  
Включение датчиков дифференциальное 60, 76  
Влажность 325-2  
**Вольта** закон 289  
Воспроизводимость 31  
Время запаздывания 167  
— установления 47, 369-2
- Гамма-излучение** 302-2  
**Гейгера** закон 299-2  
**Гейгера — Мюллера** счетчик 313—315-2  
**Генераторы** колебаний кварцевые 209-2  
— — электромеханические 207-2  
— — приращений оптические 396, 397  
— — тахометрические 466, 467  
**Гилла** анемометр 143-2  
**Гигрометры** емкостные 338-2  
— конденсационные 327—329-2  
— резистивные 336-2  
— сорбционные 321-2  
— электролитические 341—343-2  
**Гирометры** 475  
— оптические 477  
**Гироскопы** 476

- Гистерезисный цикл 8-2, 37-2  
**Голая ячейка** 219  
**Головка импедансная** 87-2  
 — микрофона, эквивалентная электрическая схема 272-2  
**Гохрейтера** формула 151-2  
**Градуировка** 27—30  
 — акселерометра в поле тяготения 89-2  
 — достоверность 92-2  
 — измерительного канала активная 109-2  
 — — пассивная 109-2  
 — косвенная 28, 30  
 — прямая 28  
**Грасгофа** число 135-2  
**Гука** закон 224, 5-2  
**Гэя** мост 88
- Давление** динамическое, измерение 177-2  
 — насыщенного пара воды 351-2  
 — — определение 324-2  
 — — растворов солей 331-2, 332-2  
 — определение 170-2  
**Датчики** активные 10, 11  
 — амперометрические 355-2, 373—375-2  
 — близости 406  
 — — емкостные 420, 421  
 — газового состава потенциометрические, типы 289-2  
 — генераторные 10  
 — давления дифференциальные 202-2  
 — для коррозионно-активных жидкостей 181-2  
 — емкостные 197-2  
 — индуктивные 202-2  
 — охлаждаемые 182-2  
 — пленочные 200-2  
 — поверхностноволновые 214-2  
 — с полевым транзистором 194-2  
 — струнные 195-2  
 — тензометрические 190-2  
 — типы 173—176-2  
 — изображения 219—221  
 — твердотельные 224  
 — импедансные 392-2  
 — каталитические 395-2  
 — кислородные 390-2  
 — кондуктометрические 355-2 376—379-2  
 — магниторезистивные 416, 417  
 — магнитострикционные 35-2  
 — момента 60-2  
 — — магнитострикционные 64-2  
 — — пьезоэлектрические 63-2  
 — — на основе твердых электролитов 381—388-2  
 — — термомагнитной конвекции 400-2  
 — окислительно-восстановительные 374-2  
 — определение 8  
 — парамагнитные 397-2  
 — — магнитодинамические 399-2  
 — параметрические 10  
 — пассивные 10  
 — поверхностных волн 404  
 — потенциометрические 353—356-2  
 — пьезорезистивные, внедряемые диффузионно 434—437, 192-2  
 — пьезоэлектрические кварцевые 394-2  
 — радиоактивности 296-2  
 — с изменяемым зазором 360  
 — сейсмические 73-2  
 — — перемещения 75-2  
 — — скорости 76-2  
 — — ускорения 77-2  
 — сернистого ангидрида 391-2  
 — силы кварцевые 19-2  
 — — работающие на изгиб 50-2  
 — — — сдвиг 53-2  
 — — сжатия 46-2  
 — — тензометрические, характеристики 58-2  
 — сорбционные хлорид-литиевые 333-2  
 — тактильные 68-2  
 — тензометрические пленочные 187-2, 191-2  
 — угловой скорости 472  
 — хлора 391-2  
 — экстензометрические 41-2  
 — электрохимические, классификация 353-2  
 — — типы 354-2  
 — *pH* 361—365-2  
**Деградация** характеристик 98-2  
**Декарта** закон 220-2  
**Демпфер** газовый акселерометра 113-2  
**Детектирование** амплитудное 123  
 — синхронное 124  
 — частотное 126  
**Детекторы** излучения полупроводниковые 319-2  
 — ионизационные, режимы работы 311-2  
 — сцинцилляционные 316-2

- Деформация, определение 423  
 — упругая, определение 423  
*Джаколетто* схема 178  
*Джонсона* шум 143, 212  
 Диоды 201  
 Диоды германиевые 320-2  
 — с поверхностным барьером 319-2  
 Дискриминатор 126, 127  
 Дифракция 259-2  
 Доза поглощенная 308-2  
 — экспозиционная 307-2  
 Дозиметрия 307-2  
*Доплера* эффект 53
- Емкость электрическая, измерение 394-2
- Закон последовательности температур 291  
*Зеебека* эффект 289
- Излучение рентгеновское 312-2  
 Измерение интенсивности звука 288-2  
 — момента бесконтактное 63-2  
 — — по углу кручения 66-2  
 — — расхода по силе *Кориолиса* 161-2  
 — — с помощью радиоактивных добавок 159-2  
 — — ударов 81-2  
 Измерений процесс 8  
 Измерители уровня акустические 167-2  
 — — гидростатические 165-2  
 — — емкостные 165-2  
 — — по поглощению гамма-излучения 166-2  
 — — — электропроводности 165-2  
 Импеданс датчика 84  
 Индикатор усталости 441  
 Индуктосин 378  
 Интенсиметры акустические 288—292-2  
 — — диаграмма направленности 291-2  
 Ионизация газа 239-2  
 Ионометрия непосредственная 371-2
- Календара* — *ван Дюсена* формула 279  
 Камера безэховая (заглушенная) 254-2  
 — ионизационная 311-2
- Кармана* вихри 155-2  
*Карно* теорема 241  
 Катарометры 396-2  
*Квинка* эффект 399-2  
*Кельвина* шкала 242  
*Кинга* формула 134-2  
*Кирхгофа* закон 329  
*Комптона* эффект 304-2  
*Кнудсена* вакуумметр 251-2  
 — число 260-2  
*Коанда* эффект 155-2  
*Коллиса* — *Уильямса* формула 135-2  
 Компенсации метод 301  
 Компенсация воздействия влияющих величин 60  
 Конденсатор дифференциальный 388, 389  
 Кондиционирование воздуха 323-2  
*Кориолиса* сила 161-2  
 Коррекция погрешностей линейности 105, 106  
 Коэффициент активности 357-2  
 — вторичной эмиссии 198  
 — выбегания 81-2  
 — демпфирования 80-2  
 — — влияние температуры 102-2  
 — — выбор 113-2  
 — — добротности 80-2  
 — — ионизации 240-2  
 — — преобразования 428, 437  
 — — пьезоэлектрический 11-2  
 — — селективности потенциометрический 370-2  
 — — умножения 173  
 — — усиления 147  
*Крамера* формула 135-2  
*Кюри* сечение 12-2  
 — температура 15-2
- Лазеры 138  
*Линдека* схема 301  
 Линеаризация характеристики 75  
 — — мостовой схемы 106  
 — — цифровые методы 115  
 Линейность, отклонение 44  
 — характеристики 44
- Магнитострикция 37-2  
*Магнуса* закон 290  
*Мак-Леода* вакуумметр 250-2  
*Максвелла* — *Больцмана* закон 222-2  
 — мост 88  
 Манометры ионизационные 239-2

- Масса акустическая 262-2  
 Массовое отношение влаги, определение 324-2  
 Материалы пироэлектрические 215  
 — пьезоэлектрические 17-2  
 — фотопроводящие 149  
 — фотоэмиссионные 188  
 Маттисена правило 272  
 Метод дозированных добавок 372-2  
 — насыщенных растворов солей 350-2  
 Микросин 371  
 Микрофоны, классификация 261-2  
 — конденсаторные 271-2  
 — принцип действия 258-2  
 — угольные 258-2  
 — чувствительные к градиенту давления 266-2  
 — — — давлению 264-2  
 — — — и к градиенту давления 268-2  
 — эквивалентная схема 264-2  
 — электретные 275—281-2  
 — электродинамические 283—285-2  
 — — чувствительные к давлению 284-2  
 — — — — и к градиенту давления 286-2  
 Миллера эффект 181  
 Модуляция амплитудная без подавления несущей 95  
 — с подавлением несущей 99  
 Мост, балансировка 450  
 — диодный 391  
 — с коррекцией влияния температуры 79  
 Мультивибратор с самовозбуждением 93
- Н**амагничивание ферромагнитное 36-2  
 Напряжение разбаланса 77  
 Нейтроны 306-2  
*Нернста* закон 356-2, 381-2  
 — мост 85  
 Номограмма для определения состава газа 386-2  
*Нортона* схема 315  
*Нуссельта* число 134-2
- О**бласть применения измерительных датчиков 32  
 — ухудшения параметров необратимого 32  
 — — обратимого 32  
 Облученность 134
- Оптоволоконная связь 232
- П**ельтье эффект 289  
*Пеннига* манометр 241-2  
*Пирани* манометр 233-2  
 Пирометр бихроматический 333  
 — монохроматический 333  
*Пито* трубка 145-2  
*Планка* закон 328  
 — постоянная 131  
 Погрешность гистерезиса 24  
 — значения опорной величины 22  
 — измерений 21  
 — квантования 24  
 — от влияющих величин 24  
 — систематическая 22  
 — случайная 23  
 — считывания 24  
 Ползучесть 42-2  
 Полураспада период 308-2  
 Порог подвижности 116-2  
 Постоянство результатов измерений 25  
 Потенциал окислительно-восстановительный, измерение 359—361-2  
 Потенциометр индуктивный 373  
 — резисторный 343  
 Поток излучения 134  
 Правильность результатов измерений 25  
 Предел упругости определения 224  
 Пределы измерений 32  
 Преобразователь зарядовый 27—31-2  
 — шум 32-2  
 Пробег линейный 300-2  
 Проводимость термисторов, теория 281  
 Проницаемость магнитная 39-2  
*Психрометры* 344-2  
 — электрические с обдувом 346-2  
*Пуассона* коэффициент 244  
 Пьезоэлектричество 6-2  
 — прямое 7-2
- Р**авновесия моста условие 72  
 Радиоактивность 297-2  
 — источника 309-2  
 Распределения плотностей вероятности, типы 27  
 Рассеяние обратное 302-2  
*Расходомеры тепловые* 160-2  
 — турбинные (ротаметры) 150-2  
 — ультразвуковые 157-2  
 — электромагнитные 148-2  
*Рато* формула 143-2

- Резистор магнитозависимый 418, 419  
 Резольвер 376  
*Рейнольдса* число 127-2  
 — — эффективное 135-2  
 Релаксация 42-2  
*Ричардсона* закон 189  
 Розетки датчиков 442  
*Рэлея* гистерезис 365  
*Рэнкина* шкала 242
- Саньица** интерферометр 236, 237  
*Саути* мост 86, 388  
 Светодиоды 138  
 Сельсин 374, 375  
*Сен-Венана* принцип 45-2  
 Сигнал, исключение постоянной со-  
 ставляющей 62  
 — преобразование гетеродинное 127  
 — — нелинейное 108  
 Сила излучения 134  
 Симметрия кристаллическая 6-2  
 Система сбора сигналов многока-  
 нальная 120  
 Сопротивление акустическое 263-2  
 Сорбция, определение 222-2  
 Спектр сигнала частотный 94  
 Спектрометры видимого и УФ-излу-  
 чения 403-2  
 Спектрометры ИК-излучения 403-2  
 Способность обнаружительная 155,  
 156  
*Стефана — Больцмана* закон 329—  
 331, 233-2  
 Схемы включения датчика в мост  
 82, 83  
 — измерительные 18, 19  
 — — генераторные 91  
 — — релаксационные 92  
 — интерферометрические 234  
 — мостовые 14, 71  
 — потенциометрические 14  
 — преобразования сигнала 188-2  
 Сцинциллятор с фотоумножителем  
 317-2
- Тахометры оптические 474  
*Тевенина* эквивалентная схема 315,  
 24-2  
 Температура влажного термометра  
 325-2  
 — опорная 297  
 — опорного спая, корректировка 312  
 Термисторы 280, 281  
 Термоанемометры многонитевые 139-2  
 — с нагретой нитью 133-2
- Термометры кварцевые 317  
 — сопротивления 260  
 Термопары 286, 287  
 Течение ламинарное 127-2  
 — турбулентное 127-2  
 Титрование потенциометрическое  
 372-2  
 Ток темновой 139  
*Томсона* эффект 289  
 Точка инея 329-2  
 — росы 325-2  
 Точность результатов измерений 25  
 Трансформатор вращающийся 62-2  
 — дифференциальный 367, 368
- Уитстона** мост 72, 446—451  
 — — с начальным разбалансом 108-2  
 Умножитель фотоэлектронный 197  
 Упругость акустическая 263-2  
 Уравнение акустического канала 263-2  
 — психрометра идеальное 344-2  
 — — практическое 346-2  
 Уравнения механики жидкостей  
 129-2  
 Усилитель дифференциальный 118  
 — зарядовый 26-2  
 — инвертирующий 358  
 — разделительный 122  
 Уход нуля 99-2  
 — — влияние температуры 102-2
- Фарадея** закон 459  
 — эффект 256  
*Фаренгейта* шкала 243  
*Ферми* уровень 189  
 Ферроэлектрики 8-2  
 Фильтрация сигнала 120-2  
 Фотодиоды 158  
 — лавинные 173  
 — режим фотогальванический 172,  
 173  
 — — фотодиодный 171, 172  
 — спектральная чувствительность  
 167  
 Фотопроводимость 145, 146  
 Фоторезисторы 145  
 — характеристики 155, 156  
 Фототранзисторы 176  
 — полевые 184  
 Фотоэлементы вакуумные 13  
 — газонаполненные 196  
 Фотоэффект 303-2
- Характеристика градуировочная 9  
 — преобразования 8

- Холла* эффект 11—13  
 — теория 411  
*Хорнинга* термоэлемент 214
- Цельсия* шкала 242  
*Ценера* диод 201
- Чувствительность** 33  
 — акселерометра поперечная 87-2  
 — влияние температуры 102-2  
 — интегральная 141  
 — коэффициент 368-2  
 — порог 23  
 — спектральная 141
- Шварца* термоэлемент 214  
*Шкалы температур* 241  
*Шмитта* триггер 158  
*Шоттки* шум 143  
 — эффект 193  
*Шульца* — *Феллса* вакуумметр 244-2  
*Шум носителей заряда* 143
- Эврера* — *Боффиса* вакуумметр 25-2  
*Экстензометр емкостный дифференциальный* 457  
 — с вибрирующей струной 453
- Электреты** 275-2  
 — срок службы 276-2  
**Электроды газовые** 375-2  
 — измерительные 384-2  
 — ион-селективные 365—368-2  
 — — типы 354-2, 368-2  
 — металлические 360-2  
 — сравнения 383-2  
 — — каломельные 358-2  
 — стеклянные 361-2  
 — ферментативные 375-2  
**Электропроводность** металлов, теория 270  
 — объемная, измерение 392-2  
 — поверхностная, измерение 393-2  
**Электрострикция** 7-2  
**Энергия излучения** 308-2  
 — облучения 134  
**Энтальпия** удельная 325-2  
**Эффект магнитной индукции** 12  
 — пироэлектрический 11, 12, 7-2  
 — пьезосопротивления, теория 433  
 — термоэлектрический 10—12  
 — электретный 201-2
- Юнга* модуль 224
- Яркость** энергетическая 134

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>10. Датчики силы, веса, момента . . . . .</b>	<b>5</b>
10.1. Пьезоэлектрические датчики . . . . .	6
10.2. Магнитострикционные датчики . . . . .	35
10.3. Экстензометрические датчики . . . . .	41
10.4. Датчики силы по измерениям перемещения . . . . .	58
10.5. Датчики момента . . . . .	60
10.6. Тактильные датчики (искусственная кожа) . . . . .	68
Библиография . . . . .	69
<b>11. Датчики ускорения, вибрации и удара . . . . .</b>	<b>71</b>
11.1. Основные понятия . . . . .	71
11.2. Общие характеристики пьезоэлектрических и пьезорезистивных датчиков . . . . .	79
11.3. Пьезоэлектрические акселерометры . . . . .	92
11.4. Пьезорезистивные акселерометры . . . . .	101
11.5. Акселерометры, основанные на измерении перемещения . . . . .	112
11.6. Следящие акселерометры . . . . .	117
Библиография . . . . .	124
<b>12. Датчики скорости, расхода и уровня жидкости . . . . .</b>	<b>126</b>
12.1. Элементарные понятия механики жидкостей . . . . .	126
12.2. Датчики и методы измерения скорости жидкости . . . . .	132
12.3. Измерение расхода . . . . .	149
12.4. Измерение и указание уровня . . . . .	162
Библиография . . . . .	167
<b>13. Датчики давления жидкости . . . . .</b>	<b>169</b>
13.1. Общие понятия . . . . .	170
13.2. Принципы измерения . . . . .	172
13.3. Критерии применимости и метрологические характеристики . . . . .	179
13.4. Механические конструкции . . . . .	184
13.5. Способы преобразования сигнала . . . . .	187
13.6. Следящие системы с уравновешиванием силы . . . . .	214
13.7. Градуировка . . . . .	216
Библиография . . . . .	217
<b>14. Вакуумметры . . . . .</b>	<b>219</b>
14.1. Краткий обзор физических свойств газов . . . . .	219
14.2. Различные области вакуума. Типы датчиков . . . . .	223
14.3. Вакуумметры деформационного типа . . . . .	225
14.4. Датчики с нитью накала . . . . .	230
14.5. Ионизационные датчики . . . . .	238
14.6. Приборы для градуировки вакуумметров . . . . .	250
Библиография . . . . .	252

<b>15. Акустические датчики</b>	254
15.1. Выбор измеряемых величин	254
15.2. Микрофоны: общее рассмотрение	258
15.3. Основные типы микрофонов	261
15.4. Конденсаторные микрофоны	270
15.5. Электродинамические микрофоны	283
15.6. Измерение интенсивности	288
Библиография	293
<b>16. Детекторы ядерного излучения</b>	295
16.1. Радиоактивность — общие сведения	297
16.2. Детекторы на основе ионизации газов	309
16.3. Сцинтилляционные детекторы	316
16.4. Полупроводниковые детекторы	318
Библиография	321
<b>17. Датчики влажности</b>	323
17.1. Основные понятия и термины, связанные с влажностью воздуха	324
17.2. Гигрометры — общие сведения	326
17.3. Конденсационный гигрометр	327
17.4. Сорбционный гигрометр	331
17.5. Гигрометры на основе измерения импеданса	336
17.6. Электролитический гигрометр	341
17.7. Психрометр	344
17.8. Градуировка	349
Библиография	352
<b>18. Электрохимические датчики</b>	353
18.1. Классификация электрохимических датчиков	353
18.2. Потенциометрические датчики	355
18.3. Амперометрические датчики	373
18.4. Кондуктометрические датчики	376
Библиография	379
<b>19. Датчики газового состава</b>	380
19.1. Датчики на основе твердых электролитов	381
19.2. Датчики, основанные на изменении импеданса	392
19.3. Кварцевый пьезоэлектрический датчик	394
19.4. Каталитические датчики	395
19.5. Катарометры	396
19.6. Парамагнитные датчики	397
19.7. Оптические анализаторы	401
19.8. Заключение	405
Библиография	411
<b>Предметно-именной указатель</b>	412

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
ВЫПУСКАЕТ В 1993 г.**

**Харт. Х. Введение в измерительную технику.**  
Пер. с нем., 44 изд. л., ил., тв. переплет.

Книга известного немецкого специалиста, представляющая собой систематизированное изложение основ современной измерительной техники. Отличается оригинальностью методологии изложения материала — по тексту формулируются ключевые вопросы измерений, вокруг которых развернуто обсуждение. Тем самым внимание читателя сосредоточивается на принципиальных аспектах измерительной техники без потери взаимосвязей между ними. Рассмотрены погрешности средств и результатов измерений, методы измерений электрических и неэлектрических величин, принципы построения первичных измерительных преобразователей и иных средств измерений, включая информационно-измерительные системы, в том числе промышленного применения. О популярности свидетельствует факт пяти ее зарубежных изданий. Книга представляет собой подробное и доступное для восприятия учебное и справочное пособие.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
ВЫПУСКАЕТ В 1993 г.**

*Гельман М. М. Системные аналого-цифровые преобразователи. Тв. переплет, 25 изд. л., ил.*

В книге систематизированы алгоритмические и структурные принципы построения АЦП, функции которых ориентированы на обеспечение условий совместимости объектов измерений (контроля, управления) с ЭВМ в информационно-измерительных системах. Соответственно выделены и описаны перспективные системные АЦП (свыше 100 схем) трех классов: мгновенных значений сигналов, параметров физических процессов и объектов и аналого-цифровые процессоры сигналов. Рассмотрены свойства и характеристики АЦП и методы их определения.

Книга предназначается для специалистов, занятых разработкой и применением АЦП для ИИС; может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
ВЫПУСКАЕТ В 1993 г.**

**Справочник по инфракрасной технике:** Пер. с англ./Под ред. У. Волфа, Г. Цесиса. В 4-х томах.

В т. 1 (47 л.) содержатся основополагающие сведения по физике ИК-излучения — источники излучения и его прохождение в атмосфере (поглощение, рассеяние, явления турбулентности).

В т. 2 (30 л.) рассматриваются оптические материалы, элементы оптических систем, проектирование ИК-систем, оптико-механическое сканирование, анализ оптического изображения.

В т. 3 (32 л.) рассматривается приборная база ИК-систем: приемники ИК-излучения, системы охлаждения и электроника фотоприемных устройств, индикаторные устройства и дисплеи.

Т. 4 (34 л.) содержит обширную информацию по ИК-системам поиска, обнаружения и слежения, тепловидению, радиометрии, системам оптической локации, дальномерирования и связи.

Для научных работников, инженеров и исследователей, разрабатывающих, совершенствующих и применяющих приборы и системы ИК-техники, студентов и аспирантов соответствующих специальностей, а также всех специалистов, работающих в области оптоэлектроники.

**Уважаемый читатель!**

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присыпать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, изд-во «Мир».

Научное издание

Жорж Аш, Пьер Андре, Жак Бофрон и др.

ДАТЧИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В двух книгах

Книга 2

Заведующий редакцией В. И. Пропой

Ст. научный редактор Ю. Б. Воронов. Мл. научный редактор Л. Л. Савинова  
Художник А. А. Лукьяненко. Художественные редакторы Н. М. Иванов, О. Н. Адаскина  
Технические редакторы И. М. Кренделева, Т. А. Максимова

ИБ № 7319

Сдано в набор 21.01.92. Подписано к печати 23.11.92. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$ . Бумага типографская № 1. Объем 13,25 бум. л. Усл. печ. л. 26,50. Усл. кр.-отт. 26,50. Уч.-изд. л. 25,55. Изд. № 7/6915. Тираж 5000 экз. Зак. 31. С 051.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» Министерства печати и информации Российской Федерации  
129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2.

Московская типография № 11 Министерства печати и информации Российской Федерации  
113105, Москва, Нагатинская 1.