

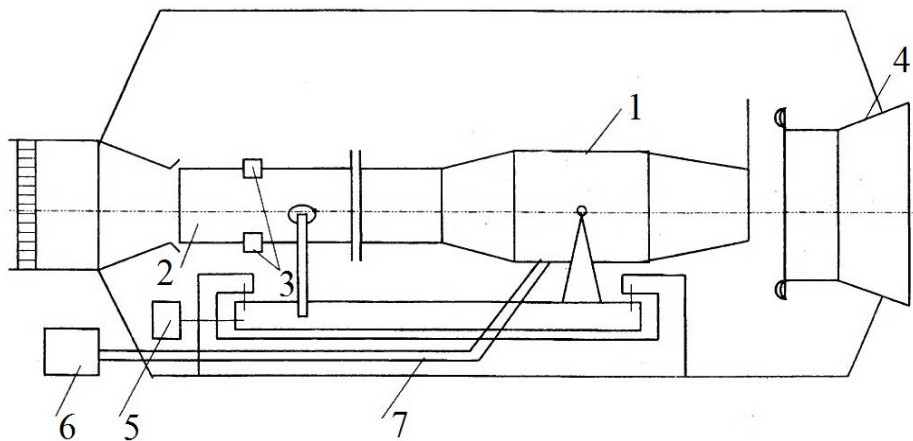
Лекция 9. Средства тепловой диагностики, обработка и представление результатов измерений.

Понятие об измерении

Основные задачи измерения: 1) определение численного значения измеряемой величины; 2) оценка допущенной при измерении погрешности.

Требования к точности измерения основных параметров двигателя

	Научно-исследовательский центр им. Арнольда (США)		
	Погрешность считывания, %	Число измеряемых величин	Ширина полосы частот, Гц
Температура газа (установившиеся режимы)	0,37	330	2
Температура газа (установившиеся режимы)	5	10	100
Температура конструкции	0,37	150	2
Расход топлива	0,5	20	10
Тяга	0,5	8	10
Давление заторможенного потока	5	140	1000



1 - двигатель; 2 - мерный участок; 3 - датчик измерения; 4 - выходной диффузор; 5 - тягоизмерительная система; 6 - тахометрическая система измерения расхода топлива; 7 - топливопровод

Стенд для снятия высотно-скоростных характеристик

Статические характеристики преобразователя

$$X=f(\alpha)$$

$$\delta_{\max} \% = \frac{\alpha_{\max}}{X_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad \text{нелинейность}$$

$$S = \frac{\Delta X}{\Delta \alpha} \quad \text{чувствительность}$$

$$X = \alpha_0 + S \cdot \alpha \quad \text{функция преобразования при } S = \text{Const}$$

Динамические характеристики преобразователя

$$a_0 \cdot \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \cdot \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \cdot \frac{d^m \alpha}{dt^m} + b_1 \cdot \frac{d^{m-1} \alpha}{dt^{m-1}} + \dots + b_m \alpha$$

$$p = \frac{d}{dt}, p^2 = \frac{d^2}{dt^2}, \dots, p^n = \frac{d^n}{dt^n} \rightarrow x(p) = \frac{(b_0 \cdot p^m + b_1 \cdot p^{m+1} + \dots + b_m)}{(a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n+1} + \dots + a_n)} \alpha(p). \quad x(p) = W(p) \cdot \alpha(p).$$

Параметр	Прогнозируемая погрешность измерения	Применяемые средства измерений
Усилие тяги	±0,5 %	Гидрокомпенсационные, вибрационные, тензорезисторные
Расход топлива	±0,5 %	Весовые, объемные
Расход воздуха	±1 %	Коллекторы расходомерные
Частота вращения ротора	±0,2 %	Электрические тахометры
Температура газа	±1 %	Термометры сопротивления, термопары
Давление атмосферное	±0,5 мм рт. ст.	Барометры ртутные
Давление газа	±0,5 %	Электрические преобразователи давления
Перепады давления	±0,5 мм вод. ст.	Жидкостные манометры
Давление топлива	±1 %	Пружинные манометры

В правой части – входные воздействия, в левой – выходные. Коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ являются константами для данного преобразователя или системы.

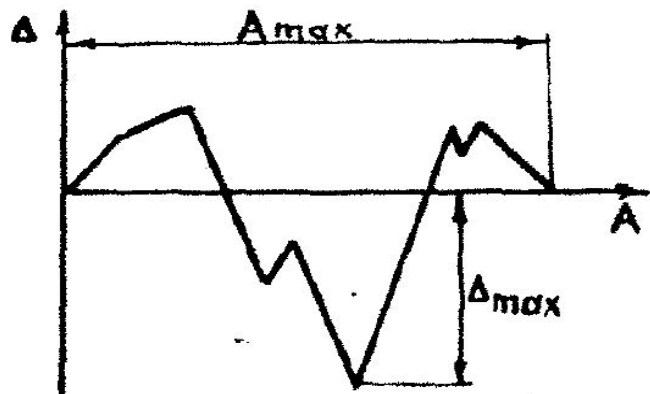
$W(p)$ – передаточная функция преобразователя

Погрешности измерений

По форме представления

$\Delta = x - x_d$ - абсолютная

$\delta = \Delta / A_d$ - относительная погрешность



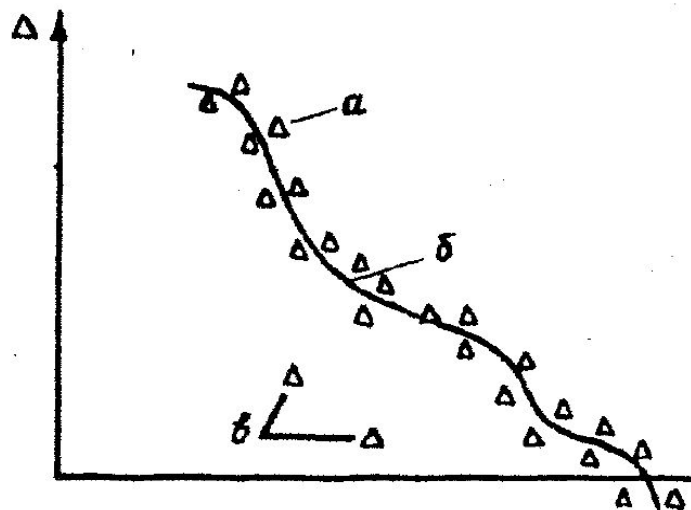
$A_d = A_i + C_i$, где A_i — показание прибора; C_i — поправка.

$\delta_{II} = \pm \frac{\Delta_{max}}{A_{max}}$ - приведенная погрешность

Рассмотренная выше предельная погрешность является погрешностью прибора и называется условной.

Пример зависимости абсолютной погрешности от показаний прибора

По характеру проявления



а) Систематические: инструментальные, установочные, измерительные, теоретические.

б) Случайные: происходят по ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено заранее.

в) Грубые ошибки называют промахами.

Распределение погрешностей: а – случайные;

б – систематические; в – промахи

N измерений одной и той же величины. Решение 1 задачи измерений:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i.$$

Для решения второй задачи, то есть оценки допущенной погрешности, нанесем полученные нами результаты на числовую ось и разобьем ее на равные участки $\Delta x = x_{i+1} - x_i$. Для каждого участка:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad n_i/N - \text{частота события} \quad (\text{б})$$

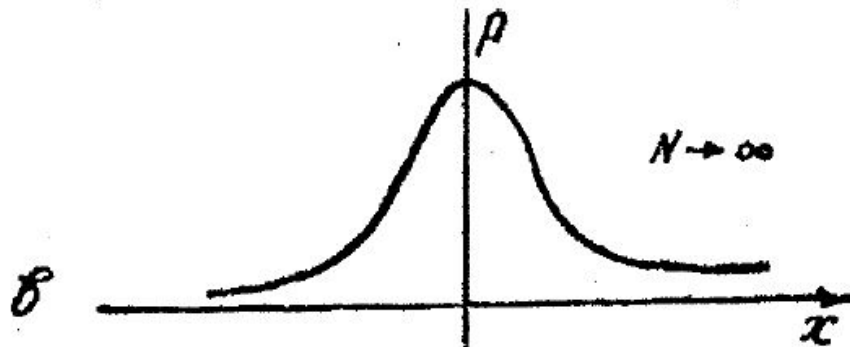
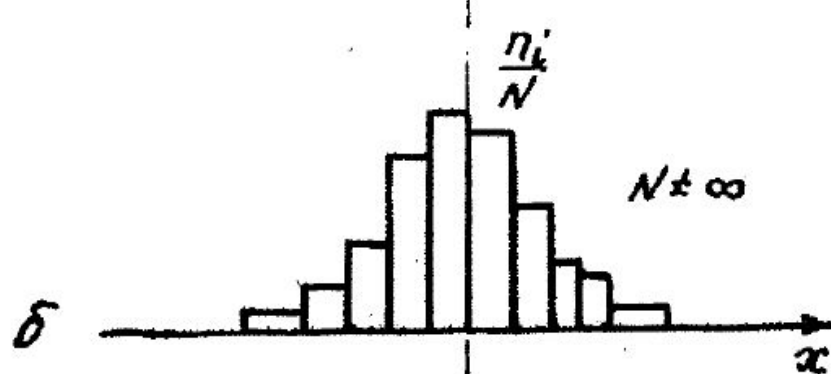
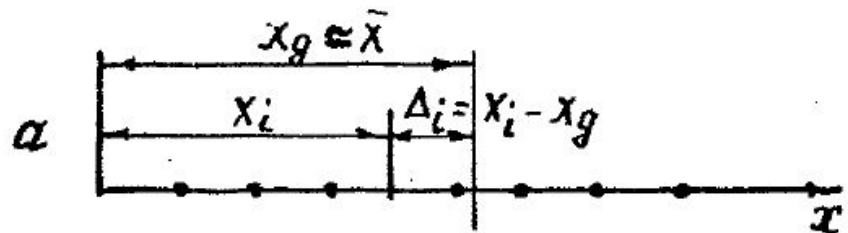
$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i}{N} = P_i \quad - \text{вероятность события} \quad (\text{в})$$

Неудобство в том, что частота события, а следовательно и вероятность, зависят от произвольно выбранного интервала Δx . Для этого вероятность появления погрешности относят к единичному интервалу:

$$\varphi(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P_i}{\Delta x} = \frac{dP}{dx} \quad - \text{плотность вероятности}$$

Вид этой зависимости, которая называется законом распределения случайных погрешностей, может быть найден из следующих предположений:

- погрешности измерений могут принимать непрерывный ряд значений;
- при большом числе измерений погрешности одинаковой величины, но разного знака, встречаются одинаково часто;
- чем больше погрешность, тем меньше частота ее появления



Это приводит к так называемому закону нормального распределения погрешностей или закону Гаусса:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_d)^2}{2 \cdot \sigma^2}},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X)^2}{N - 1}}.$$

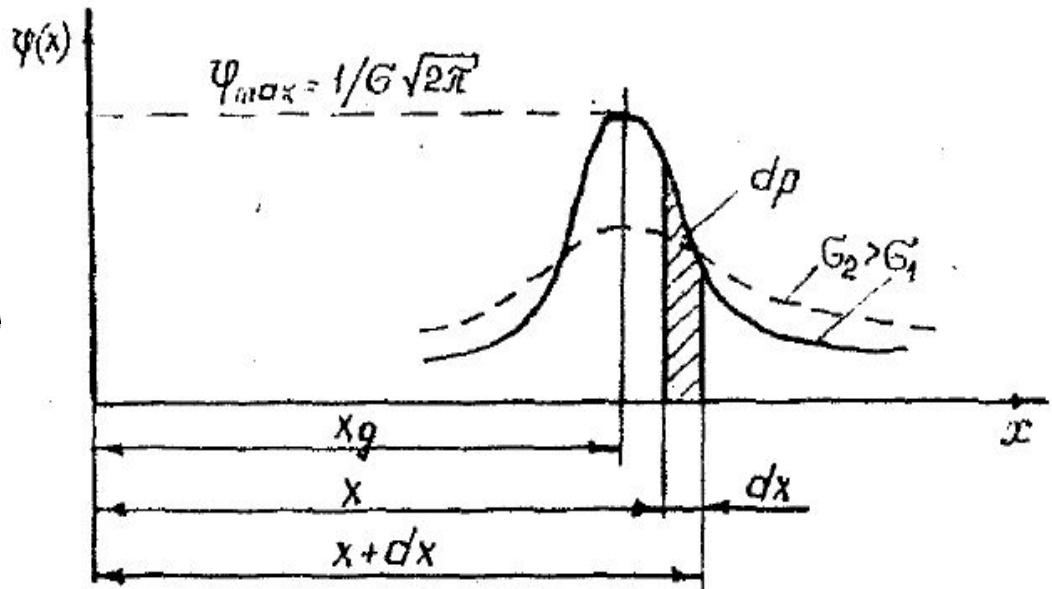
плотность вероятности для данного измерения на любом расстоянии от x

$$dP = \varphi(x) dx$$

СВОЙСТВО

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 1$$

где σ – среднеквадратичное отклонение, а σ^2 – дисперсия измерения; x_d – математическое



Таким образом, для того чтобы указать величину случайной погрешности измерения, необходимо найти вероятность нахождения результата эксперимента в диапазоне $[x_d - \Delta x, x_d + \Delta x]$. Эта вероятность называется доверительной, а интервал значений измеряемой величины носит название доверительного интервала. Доверительная вероятность определяется:

$$P(x - \Delta x, x + \Delta x) = \int_{x_d - \Delta x}^{x_d + \Delta x} \varphi(x) dx = \int_{x_d - \Delta x}^{x_d + \Delta x} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-x_d)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$$

$$U_p = \frac{x - x_d}{\sigma} \quad \text{- квантиль нормального распределения}$$

Пример

$$P(x - \Delta x, x + \Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\Delta x/\sigma}^{+\Delta x/\sigma} e^{-U_p^2/2} dU_p$$

- интеграл вероятности или функция Лапласа,

он протабулирован

$x = \sigma$	$U_p = 1$	$\Phi(1) = 0,68$
$x = 2\sigma$	$U_p = 2$	$\Phi(2) = 0,95$
$x = 3\sigma$	$U_p = 3$	$\Phi(3) = 0,997$

Обработка и представление результатов измерений

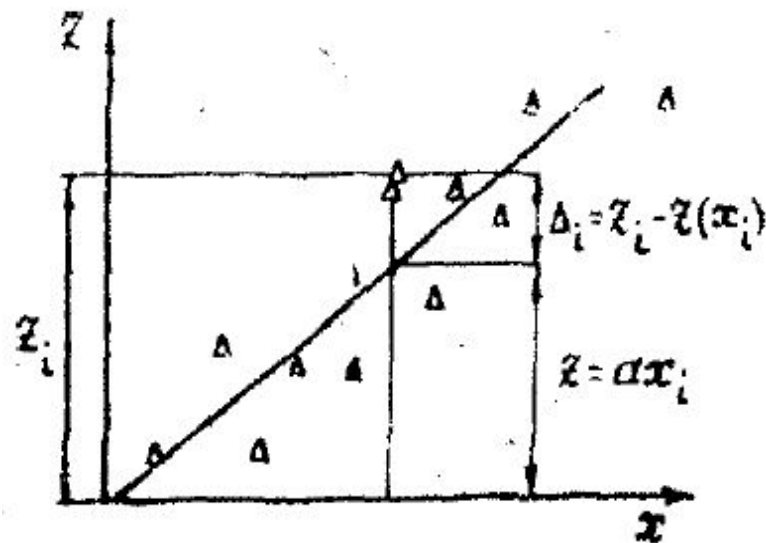
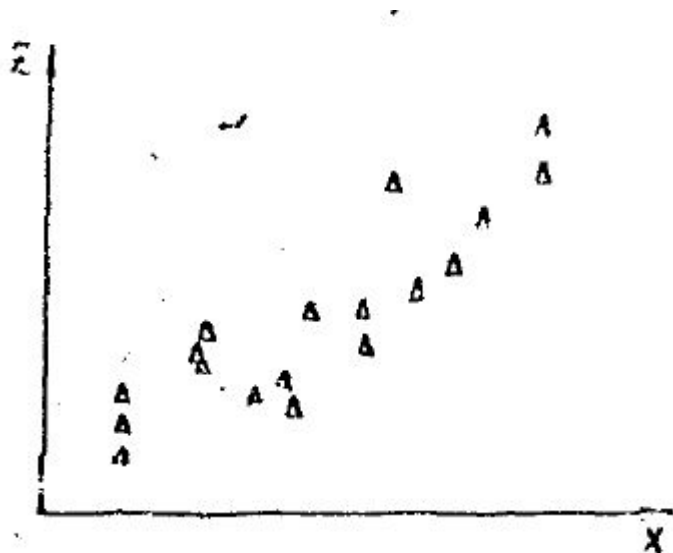
Метод наименьших

квадратов

Задачу обработки можно сформулировать так: отыскать такую кривую $z=f(x)$, чтобы все экспериментальные точки оказались к этой кривой как можно ближе.

$$\Delta_i = z_i - z(x_i) \rightarrow \min$$

здесь z_i, x_i – значения, полученные в результате эксперимента;
 $z(x_i)$ – величина, полученная подстановкой x_i в зависимость $z=f(x)$



Графическое изображение экспериментальных точек и аппроксимация

для нахождения соответствующих коэффициентов искомой зависимости $z=f(x)$ нужно потребовать, чтобы сумма квадратов отклонений Δ_i была минимальной, то есть:

$$\Sigma [z_i - z(x_i)]^2 = \min \quad \text{- суть метода наименьших квадратов}$$

Пусть $z=ax$,
тогда

$$\frac{\partial}{\partial a} \Sigma [z_i - a \cdot x_i]^2 = 0 \quad \Sigma 2[z_i - a \cdot x_i] \cdot x_i = 0 \quad \longrightarrow \quad a = \frac{\Sigma z_i \cdot x_i}{\Sigma x_i^2}$$

На практике обычно ограничиваются
многочленом четвертой степени:

$$z = A + B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3 + E \cdot x^4 \quad \longrightarrow \quad \Sigma [z_i - A - B \cdot x_i - C \cdot x_i^2 + D \cdot x_i^3 + E \cdot x_i^4]^2 = \min$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial A} \Sigma []^2 = 2\Sigma [] = 0; \\ \frac{\partial}{\partial B} \Sigma []^2 = 2\Sigma []x_i = 0; \\ \frac{\partial}{\partial C} \Sigma []^2 = 2\Sigma []x_i^2 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial D} \Sigma []^2 = 2\Sigma []x_i^3 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial E} \Sigma []^2 = 2\Sigma []x_i^4 = 0; \end{array} \right.$$

$$A = \frac{\begin{vmatrix} \Sigma z_i & \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 \\ \Sigma z_i x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 \\ \Sigma z_i x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 \\ \Sigma z_i x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 & \Sigma x_i^7 \\ \Sigma z_i x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 & \Sigma x_i^7 & \Sigma x_i^8 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 \\ \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 \\ \Sigma x_i^3 & \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 & \Sigma x_i^7 \\ \Sigma x_i^4 & \Sigma x_i^5 & \Sigma x_i^6 & \Sigma x_i^7 & \Sigma x_i^8 \end{vmatrix}}$$

Пример

В
случае

$$y = ax + b \rightarrow F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 = \min$$

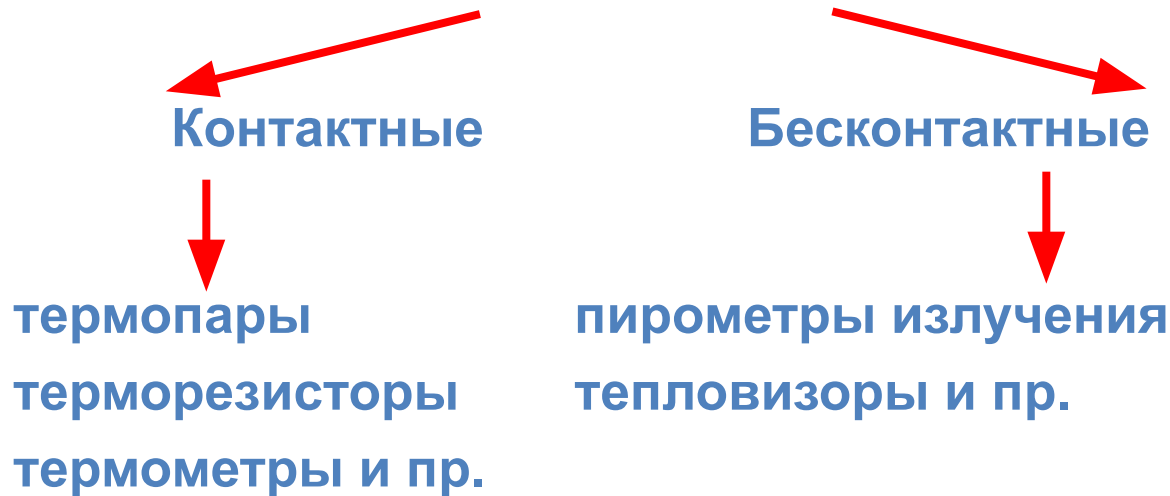
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} = 0; \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}; \end{array} \right.$$

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	сумм a
x_i	0	1	2	4	5	12
y_i	2,1	2,4	2,6	2,8	3	12,9
$x_i y_i$	0	2,4	5,2	11,2	15	33,8
x_i^2	0	1	4	16	25	46

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{5 \cdot 33,8 - 12 \cdot 12,9}{5 \cdot 46 - 12^2}; \\ b = \frac{12,9 - a \cdot 12}{5}; \end{array} \right. \rightarrow a = 0,165; b = 2,184; y = 0,165x + 2,184$$

Методы и средства измерения температуры

Средства измерения температуры



Выбор метода

- форма и геометрические размеры изделий;
- условия нагревания;
- ожидаемый уровень температуры;
- пространственная и временная неоднородность темп. полей;
- продолжительность измерений;
- необходимая точность и др.

Методическая погрешность измерения

Методическая погрешность измерения температуры (МПИТ) вызвана различием физических свойств материалов датчика и объекта испытаний, отводом теплоты или теплопритоками по термоэлектродам, контактными сопротивлениями в месте установки..

$$\Delta T = T_t - T,$$

где T_t – температура спая термопары; T – истинная температура образца.

Квадратичная погрешность измерения температуры:

$$\delta_t = \int^{\tau_e} \Delta T_t^2(\tau) d\tau.$$

Методы контроля и уменьшения МПИТ

$$\Delta T_t = T_t - T_m = \frac{\phi_t - \phi_m}{1 + \phi_t} \cdot (T_w - T_f)$$

где $\phi_t = \Lambda_t / \Lambda_m = 8 \sqrt{2 \alpha_{f,t} \lambda_t R_t} / 3 \pi \lambda_m$ $\phi_m = \Lambda_\omega / \Lambda_m = 8 \alpha_{f,\omega} \lambda_t R_t / 3 \pi \lambda_m$

$\Lambda_t, \Lambda_m, \Lambda_\omega$ – тепловые проводимости соответственно между площадью контакта и окружающей средой, между глубинными областями образца и площадкой контакта датчика температуры, между свободной поверхностью тела и средой в расчете на площадь контакта.

$\alpha_{f,t}, \alpha_{f,\omega}$ – коэффициенты теплоотдачи между боковой поверхностью датчика и окружающей средой и между свободной поверхностью образца и окружающей средой.

λ_t, λ_m – коэффициенты теплопроводности материала датчика и образца.

R_t – радиус поперечного сечения датчика.

Методы контроля и уменьшения МПИТ (продолжение)

а) Для достижения малых погрешностей:

$$\phi_t < \phi_m \quad \longrightarrow \quad \alpha_{f,t} \lambda_t R_t / \lambda_m^2 \ll 1$$

б) Увеличение поверхности соприкосновения датчика с образцом.

Заключается в соединении спая с хорошо проводящим тепло металлическим диском.

Для термопар с термоэлектродами диаметром 0,1-0,3 мм используют диски из серебра или меди с $d = 0,2-1,5$ мм и диаметром 1-6 мм

в) Размещение термопар в изотермических плоскостях.

Схемы датчиков тепловых потоков

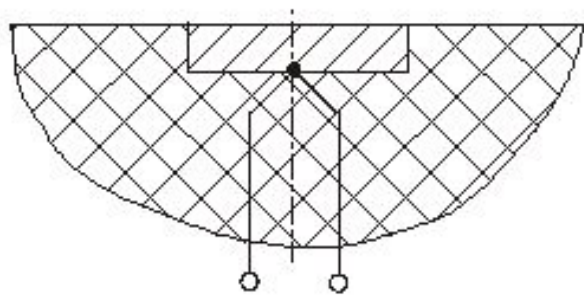
а) Простейший датчик. Математическая модель термически тонкого тела:

$$C \cdot \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = A \cdot q_w - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

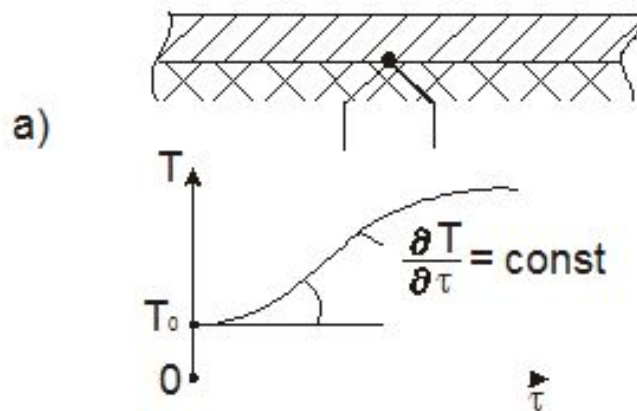
где C , A , ε – соответственно объемная теплоемкость, поглощательная и излучательная способность материала чувствительного элемента; δ – толщина элемента.

$$q_w = C \cdot \delta \cdot b / A, \quad b = \partial T / \partial \tau$$

Схема конструкции датчика



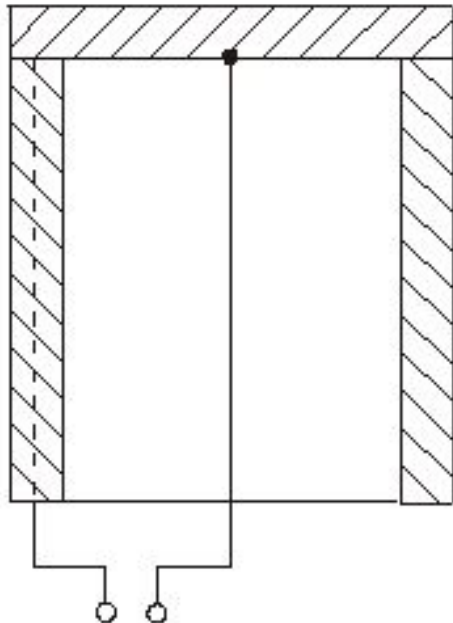
Геометрическая тепловая модель



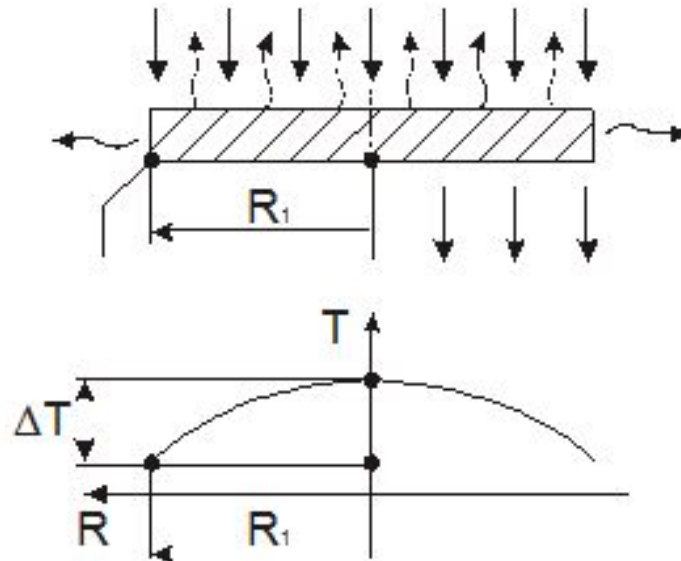
б) Датчик типа Гордона.

Принцип действия – плотность теплового потока пропорциональна перепаду температуры между центром и боковой поверхностью чувствительного элемента. Применяется дифференциальная термопара, образованная электродом, расположенным на продольной оси, чувствительным элементом и скрепленным с ним корпусом металлической трубки

$$q_w = 4\Delta T\lambda\delta / R^2.$$



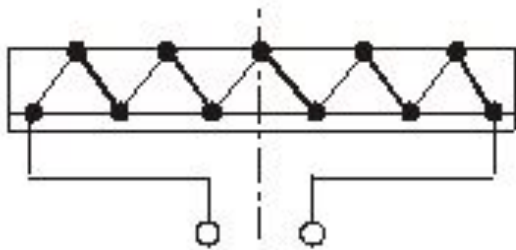
б)



в) Теплометрический датчик.

Принцип действия – плотность теплового потока прямо связана с перепадом температуры между поверхностями чувствительного элемента, в который встроена многоспайная дифференциальная термопара

$$q_w = \Delta T \lambda / \delta.$$



в)

