

## Тепловые расходомеры

Принцип действия тепловых расходомеров основан на нагреве потока вещества и измерении разности температур до и после нагревателя (калориметрические расходомеры) или на измерении температуры нагретого тела, помещённого в поток (термоанемометрические расходомеры). Последние не имеют самостоятельного применения в технологических измерениях. Поэтому ниже будем рассматривать калориметрические расходомеры.

Принцип действия таких расходомеров основан на нагреве потока жидкости или газа источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и расхода теплоты в нагревателе. Если пренебречь теплом, отдаваемым потоком через стенки трубопровода в окружающую среду, то уравнение теплового баланса между расходом тепла, потребляемым нагревателем, и теплом, сообщенным потоку, принимает вид:

$$q_t = kQ_m c_p \Delta t, \quad (1)$$

где  $k$  – поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода;  $c_p$  – теплоёмкость (для газа при постоянном давлении) при температуре  $t = (t_1 + t_2)/2$ ;  $\Delta t$  – разность температур до и после нагревателя.

Тепло к потоку в калориметрических расходомерах подводится обычно электронагревателями, для которых:

$$q_t = 0,24I^2 R, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока;  $R$  – сопротивление нагревателя.

На основании (1) и (2) получим уравнение массового расхода:

$$Q_m = \frac{0,24I^2 R}{k c_p \Delta t}. \quad (3)$$

Возможны и существуют два способа измерения массового расхода в соответствии с выражением (3):

- 1) расход определяют по значению мощности, потребляемой нагревателем, который обеспечивает постоянную разность температур  $\Delta t$ ;
- 2) расход определяют по разности температур  $\Delta t$  при постоянной мощности, подводимой к нагревателю.

В соответствии с первым способом расходомер работает как регулятор температуры нагрева потока. При изменении  $\Delta t$  автоматически изменяется мощность нагрева  $q_t$  до тех пор, пока  $\Delta t$  не достигнет заданного значения. Обычно, для уменьшения расходуемой мощности

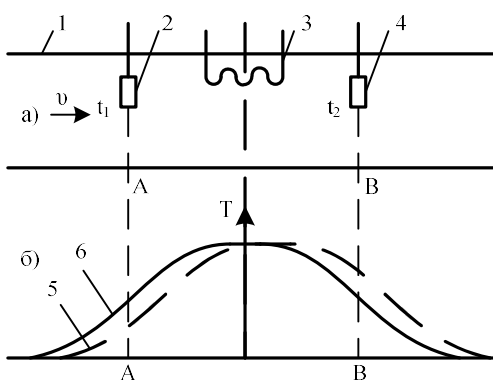
заданное значение  $\Delta t$  ограничивают в пределах 1-3°C. Массовый расход при этом определяется по шкале ваттметра в цепи нагревателя.

По второму способу, когда к нагревателю подводится постоянная мощность, расход определяют по прибору, измеряющему разность температур. Недостатком данного метода является гиперболический характер градуировочной зависимости, а значит и падение чувствительности с увеличением расхода.

На рис. 1 показана схема калориметрического расходомера и кривые распределения температур до и после нагревателя.

В трубопроводе установлен нагреватель потока, на равных расстояниях от центра нагревателя – термопреобразователи (нагрев их от лучеиспускания одинаков), измеряющие температуру  $t_1$  потока до и после нагрева  $t_2$ .

Кривые распределения температуры среды до и после нагревателя при его постоянной выделяемой мощности приведены на рис.5.9, б. Для неподвижной среды распределение температуры в ней симметрично относительно оси нагревателя – кривая 1 и поэтому разность температур  $\Delta t = t_1 - t_2 = 0$ . При некоторой малой скорости потока распределение температуры несимметрично и несколько смещается вправо – кривая 2. В сечении А-А температура  $t_1$  падает вследствие поступления холодного вещества, а в сечении В-В температура  $t_2$  или несколько возрастает, или же не меняется, вследствие чего при малых расходах  $\Delta t$  увеличивается с ростом расхода. С дальнейшим увеличением расхода при постоянной мощности нагревателя  $t_2$  станет убывать, в то время как  $t_1$  практически постоянная, т.е. будет уменьшаться  $\Delta t$ . Таким образом, при больших расходах разность температур  $\Delta t$  обратно пропорциональна расходу.



- 1 – трубопровод; 2 и 4 – термопреобразователи до и после нагревателя; 3 – нагреватель потока;  
5 – кривая распределения температуры для неподвижной среды; 6 – кривая распределения температуры для малой скорости потока

Рис. 1. Калориметрический расходомер:

*a* – схема калориметрического расходомера;

*б* – кривые распределения температур до и после нагревателя

Следовательно, зависимость  $\Delta t$  от массового расхода имеет две ветви – восходящую при малых расходах и нисходящую – при больших. Обе эти ветви в определённых пределах измерения линейны, т.е. необходимо работать на одной из ветвей. Обычно работают на нисходящей, где  $\Delta t$  обратно пропорциональна  $Q_m$ .

В качестве преобразователей температуры могут быть использованы: термоэлектрические преобразователи, термометры сопротивления. Предпочтение отдаётся термометрам сопротивления так как их можно выполнить в виде равномерной сетки, перекрывающей всё сечение, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру. Термометры сопротивления включаются в мостовую схему.

Калориметрические расходомеры обладают достаточно высокой точностью, оцениваемой (в условиях индивидуальной градуировки) приведённой погрешностью  $\pm (0,5 - 1) \%$ , большим диапазоном измерений, малой инерционностью.

Данные приборы можно применять для измерения массового расхода, как жидкостей, так и газов, но в настоящее время их применяют, для определения расхода газа в трубопроводах малого диаметра.

### Задание для расчета

Калориметрический расходомер состоит из нагревателя мощностью  $W$ , расположенный в трубопроводе диаметром  $D$ .

#### **Требуется определить:**

1. Разность температур измеряемой среды до и после нагревателя при средней скорости потока  $v_{ср}$  (две скорости, получим две разности). Для расчета можно воспользоваться упрощенной формулой:

$$W = \Delta t \cdot c_p \cdot Q_m,$$

где  $W$  – мощность нагревателя, Вт

$c_p$  – теплоемкость измеряемой среды, Дж/(кг $^{\circ}$ С) [из таблицы 2]

$Q_m$  – массовый расход, кг/с [ $Q_m = Q_v \cdot \rho = (\rho \pi d^2 v) / 4$ ]

$v$  – скорость потока, м/с

$d$  – диаметр трубопровода, м

$\rho$  – плотность среды, кг/м $^3$  [из таблицы 2]

2. Построить градуировочную характеристику (зависимость  $\Delta t$  от  $Q_m$ ). Для этого заполнить таблицу:

№	Скорость $v$ , м/с	Объемный расход $Q_v$ , м $^3$ /с	Массовый расход $Q_m$ , кг/с	Разность температур $\Delta t$ , $^{\circ}$ С
1	$v_{ср1}$			
	.....			
15	$v_{ср2}$			

$U_{cp1}$  и  $U_{cp2}$  диапазон скорости по таблице 1 (по варианту). Весь диапазон разбить на равные отрезки, чтобы получилась 15 точек

3. Подобрать термопреобразователь для измерения разности температур (выбрать тип и построить его градуировочную характеристику)

4. Рассчитать разность температур для случая, когда измеряемой средой является вода. Определить целесообразность применения калориметрического расходомера в этом случае (ответ обосновать).

Таблица 1 – Варианты для расчета

№ варианта	W, Вт	Изменяемая среда	$U_{cp}$ , км/ч	D, мм
1	260	Воздух	6,3 – 13	100
2	250	Кислород	10 – 15	100
3	240	Водород	1 – 10	100
4	230	Гелий	1 – 5	150
5	220	Азот	3 – 10	150
6	210	Воздух	8 – 15	150
7	200	Кислород	6,3 – 13	110
8	260	Водород	10 – 15	110
9	250	Гелий	1 – 10	110
10	240	Азот	1 – 5	140
11	230	Воздух	3 – 10	140
12	220	Кислород	8 – 15	140
13	210	Водород	6,3 – 13	120
14	200	Гелий	10 – 15	120
15	190	Азот	1 – 10	120
16	180	Воздух	1 – 5	150
17	170	Кислород	3 – 10	150
18	160	Водород	8 – 15	150
19	150	Гелий	6,3 – 13	160
20	140	Азот	10 – 15	130

Таблица 2 – Справочные данные

Изменяемая среда	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, 10 <sup>-3</sup> Дж/кг·К
Воздух	1,293	1,009
Кислород	1,429	0,917
Водород	0,090	14,27
Гелий	0,178	5,238
Азот	1,251	1,038
Вода	1000	4,19