

Тепловые расходомеры

Принцип действия

Тепловые расходомеры или термодифференциальные расходомеры или терморазностные или массовые термоанемометры – неполный перечень наименований данного класса измерительных приборов.

Расходомеры воздуха данного принципа действия установлены на многих современных автомобилях, а в промышленности их применение гораздо скромнее. Пока применение воздуха и газов в других системах стоит не так дорого, как при эксплуатации автомашины и в скафандре космонавта, внимание к измерению расходов газов в системах вентиляции, заводских компрессорных, станциях очистки и других комплексах повышается такими же темпами.

Тем не менее приборы отличаются простотой применения, сравнительно низкой ценой, особенно для газоходов больших диаметров, развитой электронной поддержкой измерений, передачи данных и богатым человеко-машинным интерфейсом.

1. Тепловые расходомеры неэлектропроводящих сред

Тепловые расходомеры относятся к классу **прямых** измерителей массовых расходов жидкостей и газов, т.е. сред с изменяющейся плотностью при изменении температуры и/или давления, в отличие от непрямых (косвенных) способов измерения, предполагающих независимое измерение объемного расхода, вязкости, температуры и давления с последующей коррекцией (вычислением) плотности и, соответственно, массы истечения жидкости или газа.

Принцип измерения массовых расходов, опирающийся на измерение конвективного теплопереноса, известен с публикации закона Л.Кинга в начале 90-х годов XX века:

$$(1) \quad h = A + B \times (\rho V_f)^C$$

Здесь

h – коэффициент теплопередачи нагреваемого тела, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой;
 A, B, C – константы, определяемые эмпирически (в процессе калибровки расходомера);
 ρV_f – «массовая» скорость потока.

Поскольку электрическая мощность, подводимая к нагреваемому телу, в равновесном состоянии равна потере тепловой энергии Q при охлаждении тела молекулами обтекающей его среды, то

$$(2) \quad I^2 R = Q = h \times A (T - T_f),$$

где

I – ток
 R – сопротивление нагреваемого тела
 A – площадь поверхности нагрева
 T – температура нагреваемого тела
 T_f – температура потока.

Из приведенных соотношений (1) и (2) видно, что скорость массового потока ρV_f и потери тепловой энергии являются функцией двух переменных - температуры среды и температуры нагреваемого тела, т.е.

$$\rho V_f = F(T, T_f).$$

Однако только в 1959 г. компанией Thermal Instrument Company были созданы первые **промышленные приборы** теплового рассеивания для измерения расходов жидкостей и газов, после чего индустрия тепловых расходомеров начала интенсивно развиваться.

2. Принцип действия

Тепловые расходомеры построены на основе измерения «принудительных» конвективных потерь теплоты телом (термометром) при его обтекании набегающим потоком (термоанемометры) и на переносе теплоты (калориметрические расходомеры) между двумя телами.

В обоих случаях измерение потерь количества тепловой энергии сопоставимо в определенных условиях с измерением истечения непосредственно массы потока с достаточно высокой точностью.

Таковыми условиями, прежде всего, являются конструктивные особенности датчиков, обеспечивающие пренебрежимо малые потери тепла, вызываемые другими видами переноса тепловой энергии, не участвующими в принудительном конвективном охлаждении термометров. Это - потери теплоты, вызванные естественной конвекцией при отсутствии движения потока (2), потери тепла из-за теплопроводности проводников, подключающих термометры к измерительному мостику, а также тепловое излучение, испускаемое нагретым телом.

Другим условием обеспечения точности преобразования массового расхода в электрический сигнал является соответствие постоянной времени термометров динамике потока.

Вышеприведенные уравнения являются крайне нелинейными. Получение линейного выходного сигнала в широком диапазоне расходов зависит также от эффективности используемого метода линеаризации уравнений и его физической реализации.

Тепловые расходомеры в качестве чувствительного элемента используют в большинстве случаев платиновые термометры сопротивления, а также термодпары, термисторы, а в микрорасходомерах широкого применения (калориметрических приборах) используются микропроцессорные датчики, использующие КМОП-технологию изготовления больших интегральных микросхем.

Один термометр является датчиком температуры потока (T_f), второй термометр (T) – «датчиком скорости», т.к. служит рабочим телом для измерения тепловых потерь при охлаждении тела набегающим потоком (рис.1).



Рис. 1. Чувствительный элемент

Существуют два способа реализации измерения потерь теплоты чувствительным элементом тепловых расходомеров при его обтекании потоком жидкости или газа.

Один способ связан с поддержанием постоянного перепада температур между двумя термометрами.

Второй способ связан с поддержанием постоянной мощности на нагреваемом термометре (тока постоянного значения) и измерении разности температур между температурой потока и температурой датчика скорости. Поскольку температура потока измеряется независимо, то у датчика, нагреваемого током постоянного значения, изменяется только сопротивление, которое и требует измерения.

2.1. Тепловые расходомеры постоянного перепада температур поддерживают постоянную разность температур между охлаждаемым потоком термометром (датчиком скорости) и вторым термометром, который измеряет текущую температуру протекающей среды.

Скорость потока является функцией переменного значения тока и температуры среды:

$$\rho V_f = F(I, T_f).$$

Электрическая мощность, необходимая для постоянного поддержания разности температур между нагреваемым термометром и «образцовым» термометром, связана нелинейной зависимостью с массовым объемом протекающей среды. Эффект колебаний плотности сжимаемых сред отражается в интенсивности потерь тепловой энергии на одном из термометров и интенсивности охлаждения другого термометра, что виртуально автоматически учитывается при измерении электронным блоком расходомера электрической мощности, необходимой для поддержания разности температур ($T - T_f$).

Расходомеры постоянного перепада температур при отсутствии расхода ($V_f = 0$) могут показывать ненулевое значение расхода, т.к. $A > 0$ (см. (2)). Это означает отсутствие «отсечки нуля», упущенной при калибровке расходомера.

Постоянная времени расходомеров постоянного перепада температур составляет порядка 1-3 сек и достаточно мала, чтобы обеспечивать измерение быстроменяющихся процессов в динамическом диапазоне прибора 1 : 1000.

2.2. Тепловые расходомеры постоянной мощности используют три элемента, устанавливаемых в корпусе датчика.

К нагреваемому термометру подключается дополнительный элемент нагрева термометра током постоянного значения. С изменением скорости обтекания датчика сопротивление термометра изменяется, а подводимый ток сохраняется постоянным. Поскольку значение подводимого тока к датчику скорости всегда постоянно, изменение сопротивления термометра при его обтекании потоком является измеряемой величиной. Температура потока измеряется вторым независимым термометром, и измерение скорости потока сводится к измерению текущего сопротивления нагреваемого термометра.

$$\rho V_f = F(R).$$

Ток постоянного значения, подводимый к нагреваемому термометру (датчику скорости), имеет большее значение, чем ток, необходимый для поддержания постоянной разности температур на термометрах. Поэтому нулевая скорость потока является, как правило, неприемлемой для калибровки расходомеров постоянной мощности рассеивания. Устойчивость «нуля» может быть нестабильной из-за постоянного подогрева термометра и конвекционных потерь, вызываемых малыми скоростями потока.

Из-за большего значения тока на термометре они обладают более высокой инерционностью, чем тепловые расходомеры постоянного перепада температур. Постоянная времени может составлять 15-30 сек, так что динамический диапазон приборов измерения расходов составляет 1 : 100.

2.3. Области применения.

Расходомеры постоянной мощности отличаются устойчивым выходным сигналом, сравнительно легко выделяемым электронным блоком на фоне действующих помех.

Они могут измерять чрезвычайно низкие расходы, расходы грязных и увлажненных газов, жидкостей и даже сухих смесей. Основной областью применения являются АСУ ТП.

Расходомеры постоянного перепада температур имеют высокое быстродействие и являются идеальными приборами для измерения чистых газов с высокими скоростями истечения, а также для мониторинга процессов транспортировки (выбросов) газов с малыми постоянными времени в широком диапазоне скоростей.

2.4. Калориметрические расходомеры используют эффект тепломассопереноса между двумя термометрами, установленными, как правило, в обводной трубке по отношению к трубопроводу основного потока. Путем организации ламинарного истечения основного потока доля потока, протекающего в обводной трубке, остается постоянной при изменении расходов.

Используются исключительно в микрорасходомерах жидкости и газов.