

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗОВ

**Василенко В.О., студент; Новиков Е.Н., доц., к.т.н.**

*(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)*

Совершенствование методов термоанемометрических измерений при организации нестационарного энергетического режима в измерительной системе решает [1] проблемы расширения диапазона изменений контролируемых расходов газа или жидкости, снижения динамических погрешностей при измерениях, компенсации температурных погрешностей.

Физические основы метода нагретой нити заключаются в определении коэффициента теплопроводности газа для чего требуется измерить радиальный поток тепла через исследуемый газ от нагретой нити, выполняющей роль внутреннего цилиндра, к внешней поверхности.

В методе нагретой нити проволока выполняет одновременно роль нагревателя и термометра сопротивления. С этой целью проволока берется из материала с большим температурным коэффициентом электрического сопротивления (например из платины).

Существует два метода измерения: метод постоянного тока и метод постоянной температуры. В первом ток, нагревающий нить, поддерживается постоянным, что приводит к пульсациям температуры нити, обусловленным влиянием потока. В другом — ток нагрева нити регулируется таким образом, чтобы выделяющееся количество тепла обеспечивало постоянную температуру нити.

Практически нить находится в промежуточном состоянии, когда ее температура и ток нагрева слегка изменяются. Однако изменение одного из этих параметров стремятся свести к минимуму, а влияние его учитывают только в виде поправки.

Сущность метода заключается в следующем: нагретая нить включена в мост сопротивлений, который питается постоянным током.

Другой разновидностью метода постоянного тока является система, работающая на несущей частоте. Измерительный мост питается переменным током повышенной частоты, которая выбирается в пределах 50—200 кГц. Измеряемый сигнал усиливается полосовым усилителем, детектируется и среднее его значение регистрируется измерителем выхода.

Пульсационная составляющая сигнала поступает в усилитель с частотной компенсацией, на выходе которого она регистрируется при помощи вольтметра среднеквадратичных значений. Эта схема имеет повышенную стабильность при измерении средних скоростей, однако достаточно сложна и требует компенсации емкости измерительного кабеля.

Простота построения электронных схем, работающих по методу постоянного тока, определила значительное его распространение. Рассмотрим влияние тепловой инерции на результаты измерения.

Уравнение теплового баланса получено в предположении об идеальном равновесии между теплом, выделяющимся при прохождении электрического тока, и теплом, переносимым охлаждающему потоку, т.е. при отсутствии тепловой инерции нити. Однако в действительности теплоемкость нити имеет конечную величину и поэтому между быстрыми пульсациями скорости потока и соответствующими пульсациями температуры нити имеется некоторый период запаздывания.

В этом случае тепловое равновесие нити в произвольный момент времени описывается следующим уравнением:

$$\frac{I^2 R}{R - R_0} = 1 + \sqrt{V} + C_H \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Здесь  $T$  — температура нити,  $C_H$  — теплоемкость нити,  $t$  — время,  $\theta$  — температура внешней среды,  $\lambda$  — теплопроводность газовой смеси,  $R$  — сопротивление нити.

Чтобы проанализировать влияние изменения скорости, предположим, что

$$V = \bar{V} + \nu, R = \bar{R} + r, T = \bar{T} + \Delta t$$

Полагая, что интенсивность турбулентности малая, т. е.  $\nu/\bar{V} \ll 1$ , и, следовательно,  $r/R_0 \ll 1$ , получаем соотношение между  $r$  и  $\Delta t$ :

$$I^2 r = (A + B\sqrt{\bar{V}})r + (\bar{R} - R_0)B\sqrt{\bar{V}} \frac{\nu}{2V} + C_H \frac{d\Delta t}{dt} \quad (2)$$

Так как сопротивление нагретой проволоки равно:

$$R \approx R_0 (1 + \beta_0 \Delta T) \quad (3)$$

где  $R_0$  — сопротивление нити при температуре  $T_0$ ,  $\beta_0$  — температурный коэффициент сопротивления нити при температуре  $T_0$ ,  $T_0$  — температура нити в равновесном состоянии, когда она окружена однокомпонентным газом

то, очевидно, что  $\Delta t = \frac{r}{R_0 \beta}$ .

Подставив значение  $\Delta t$  в уравнение (2), получим:

$$\frac{C_H}{2R} \frac{dr}{dt} + \left[ (A + B\sqrt{\bar{V}}) - I^2 \right] r = -(\bar{R} - R_0)B\sqrt{\bar{V}} \frac{\nu}{2V} \quad (4)$$

Разделив почленно правую и левую части уравнения (4) на  $\left[ (A + B\sqrt{\bar{V}}) - I^2 \right]$ , получим:

$$N \frac{dr}{dt} + r = \nu K \quad (5)$$

где

$$N = \frac{C_H}{(A + B\sqrt{\bar{V}}) - I^2} \quad K = - \frac{(\bar{R} - R_0)B\sqrt{\bar{V}} \frac{1}{2\bar{V}}}{\left[ (A + B\sqrt{\bar{V}}) - I^2 \right]}$$

Применив преобразование Лапласа получим:

$$r(Np + 1) = \nu K \quad (6)$$

Откуда получим передаточную функцию термоанемометра:

$$W(p) = \frac{r}{\nu} = \frac{K}{1 + Np} \quad (7)$$

Для построения амплитудных и фазовых характеристик звена положим  $p = j\omega$  и подставим в уравнение (7), в результате получим выражение для амплитудно-частотную характеристику звена:

$$W(\omega) = \frac{K}{\sqrt{N^2 \omega^2 + 1}} \quad (8)$$

Преимущества метода постоянной температуры: простота линеаризации выходного сигнала термоанемометра, более высокая точность, возможность измерения больших интенсивностей турбулентности, большое отношение сигнал—шум, а также простота регулировки частотной характеристики, привлекали к этому методу пристальное внимание исследователей. В

настоящее время проблема неустойчивости системы обратной связи решена и практически все пользуются методом постоянной температуры.

Схема метода постоянной температуры приведена на рис. 1.

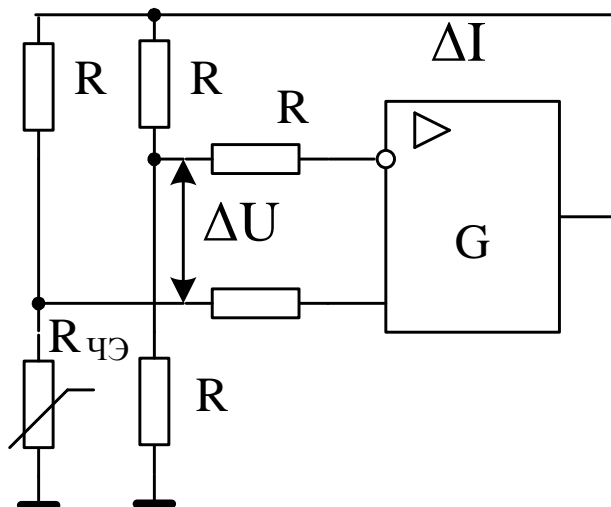


Рисунок 1 - Схема мостового измерения с обратной связью

Если вручную или автоматически изменять ток  $I$  таким образом, чтобы  $\Delta T = 0$ , то в равновесном состоянии будет справедливо уравнение:

$$(I^2 - I_0^2)R_0 = \frac{2\pi l}{\ln r_2 / r_1} (T_0 - \Theta) \Delta \lambda \quad (9)$$

позволяющее определить по измеренным величинам изменение теплопроводности смеси газов. Формула (9) является расчетной формулой стационарного метода нагретой нити.

Если  $\Delta \lambda$  изменяется во времени, то для автоматической компенсации колебаний температуры (поддержания ее постоянной) может быть применена схема, показанная на рис. 1. Согласно этой схеме  $\Delta U_M = G \Delta U$ . Поэтому, выразив  $\Delta T$  через  $\Delta I = I - I_0$ , получим:

$$\Delta T = \Delta I \left[ \beta_0 \frac{U_0}{R_0 + R} \left( G \frac{R}{R_0 + R} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

Здесь  $U_0$  — падение напряжения на нити, когда в измерительной трубе находится однокомпонентный газ.

Мгновенная величина расходуемой электрической энергии равна мгновенной тепловой потере на нагревание окружающей среды. Тепловые потери зависят от температуры, давления и скорости измеряемой среды, а также от применяемого преобразователя. Если температура и давление среды при измерении не изменяются, то ток зонда будет зависеть от скорости потока.

Используемый принцип делает анемометр особенно удобным для измерения высокочастотных пульсаций потока. Без обратной связи верхний предел частоты сужается приблизительно до 100 Гц в результате влияния теплоемкости зонда, однако при обратной связи частотный диапазон расширяется с увеличением коэффициента петли обратной связи.

Если в результате увеличения скорости потока термопреобразователь начинает охлаждаться, сопротивление его при этом начинает изменяться согласно соотношению:

$$R - R_0 = \alpha (T - T_0)$$

Изменение сопротивления приводит к изменению падения напряжения в диагонали моста, которое подается на вход усилителя. Это напряжение усиливается и подается на мост так,

что ток усилителя, который идет на нагрев нити, увеличивается и компенсирует охлаждение. Напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , характеризующее нагрев датчика, является, таким образом, и мерой скорости потока.

Уравнения (4, 5) и (9) определяют связь между отклонениями переменных величин от их средних значений. Эти уравнения полностью определяют динамические характеристики термоанемометра постоянной температуры. Преобразовав уравнение (4) можно получить динамическое уравнение обратной связи:

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{2F(u)} \frac{dF(u)}{du} u = e_{\text{ВЫХ}} + \frac{M}{R} \frac{de_{\text{ВЫХ}}}{dt} \quad (11)$$

$$\text{где: } M = \frac{2CR}{F(u)(R - R_0)}$$

Уравнение (11) является линейным дифференциальным уравнением. С увеличением коэффициента усиления коэффициент  $M/K$  в этом уравнении уменьшается.

Система обратной связи должна быть отрегулирована так, чтобы реализовался оптимальный случай апериодического решения дифференциального уравнения (11). Все другие варианты решения этого уравнения приводят к неустойчивой работе системы обратной связи.

Как видно из уравнения (11), постоянная времени термоанемометра  $M$  при работе по методу постоянной температуры значительно меньше, чем для метода постоянного тока. При значениях коэффициента усиления  $K$  петли обратной связи порядка 10—15 тысяч частотный диапазон термоанемометра постоянной температуры расширяется до 30—50 кГц.

Относительно низкое значение постоянной времени делает метод постоянной температуры пригодным для измерения турбулентных потоков, без использования компенсации термического запаздывания. Это обеспечивает методу постоянной температуры значительное преимущество, когда приходится производить измерения в турбулентных потоках с большой относительной интенсивностью турбулентности.

#### **Выводы.**

1. Постоянная времени термоанемометра при работе по методу постоянной температуры значительно меньше, чем для метода постоянного тока.
2. Относительно низкое значение постоянной времени делает метод постоянной температуры пригодным для измерения турбулентных потоков, без использования компенсации термического запаздывания. Это обеспечивает методу постоянной температуры значительное преимущество, когда приходится производить измерения в турбулентных потоках с большой относительной интенсивностью турбулентности.

#### **Перечень ссылок**

1. Повх И.Л., . Аэродинамический эксперимент в машиностроении. — Ленинград "Машиностроение", 1974.
2. Шашкова А.Г., Абраменко Т.Н. Теплопроводность газовых смесей. — М Энергия 1970.
3. Коротков П.А. Беляев Д.В. Тепловые расходомеры. — Ленинград "Машиностроение", 1979.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. — СПб.: Политехника, 2004. — 412 с.
5. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. — М.: Издательство стандартов, 1990 г. , 287 стр.
6. Андронов И.В. Измерение расхода жидкостей и газов. Энергоиздат, 1981. — 88 с.