

ТЕПЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ С ДЕЛЕНИЕМ ПОТОКА

В.А. КАРПОВ, О.М. РОСТОКИНА

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

К тепловым расходомерам относятся приборы, которые основаны на измерении эффекта теплового воздействия на поток или на соприкасающееся с ним тело. Их принцип действия в общем случае основан на зависимости теплового состояния измерительного преобразователя, содержащего посторонний источник энергии, от параметров измеряемого потока.

Измерение расхода потока тепловыми расходомерами с электронагревом может быть осуществлено по двум конструктивным схемам:

1) с подводом к нагревателю постоянной мощности и измерением разности температур. Обеспечение постоянной мощности нагрева достигается при помощи стабилизатора тока или напряжения;

2) с поддержанием постоянной разности температур и измерением мощности, расходуемой на нагрев.

Недостатком тепловых расходомеров, выполненных по схеме с постоянной мощностью нагрева является нелинейность их шкалы и то, что одному значению выходного сигнала соответствует два значения расхода на градуировочной кривой.

При работе расходомеров по схеме с постоянной разностью температур мощность, затрачиваемая на нагрев, прямо пропорциональна расходу и может измеряться прибором с линейной шкалой.

Тепловой баланс расходомера теплового слоя упрощенно можно представить в следующем виде:

$$Q_H = Q_{\Pi} + Q_O + Q_C,$$

где Q_H – количество тепла, выделенного нагревателем; Q_{Π} – количество тепла, введенного в поток на участке измерения; Q_O – потери тепла в окружающую среду; Q_C – количество тепла, распространившегося (растекшегося) вдоль стенки трубы за участок измерения, а также аккумулированного в нагревателе.

Для лучшей работы расходомеров принимают меры к увеличению доли тепла, вводимого в поток $\frac{Q_{\Pi}}{Q_H}$ и сокращению теплопотерь, равных $(Q_O + Q_C)$.

Для снижения теплопотерь в окружающую среду патрубков с нагревателем и термодатчиками тщательно теплоизолируют. При этом одновременно принимают меры для исключения возможности возникновения конвекционных потоков внутри кожуха и уменьшения влияний внешних тепловых воздействий от расположенных вблизи или случайных источников тепла.

Известно применение тепловых расходомеров с использованием обводного (байпасного) трубопровода малого калибра, установленного на трубопроводе большого калибра [2], [5]. Между тем, разделение участка трубопровода на две идентичные магистрали и установка чувствительных элементов в этих магистралях может дать положительный эффект.

Далее рассматриваются новые типы тепловых расходомеров, основанные на разделении потока по двум магистралям.

Функциональная схема одного из таких расходомеров представлена на рис. 1. Конструктивно датчик выполнен в виде участка трубопровода, ветвящегося на две идентичные по гидравлическим параметрам магистрали с последующим их объединением. Сумма площадей сечений этих магистралей должна быть равна площади сечения объединенной магистрали, из чего получаем, что их диаметр равен

$$\frac{d}{\sqrt{2}},$$

где d – диаметр объединенной магистрали.

На каждой из магистралей установлены термопреобразователи прямого подогрева R_{T1} и R_{T2} , температура которых поддерживается неизменной. Реализован преобразователь с использованием авторегуляторов, включающих R_{T1} , R_{11} , R_{12} , R_{13} , ДУ1 – для поддержания температуры t_1 и, соответственно R_{T2} , R_{21} , R_{22} , R_{23} , ДУ2 – для поддержания температуры t_2 .

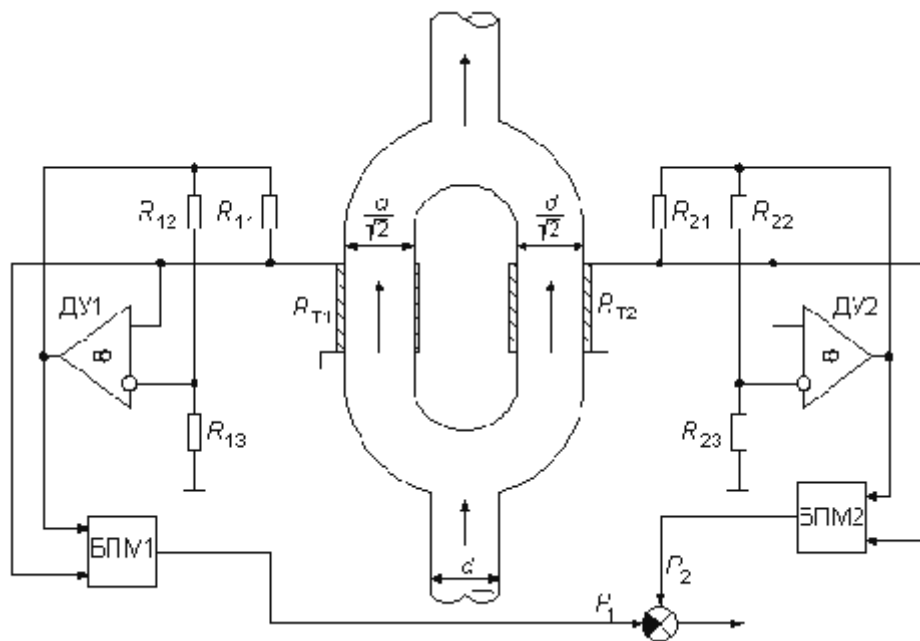


Рис. 1. Двухмагистральный измерительный преобразователь со стабилизацией температуры стенки в двух магистралях

При значительном коэффициенте усиления ДУ1, ДУ2 можно записать:

$$R_{11} \cdot R_{13} = R_{T1} \cdot R_{12}; \quad R_{21} \cdot R_{23} = R_{T2} \cdot R_{22}.$$

С учетом того, что $R_{T1} = R_0(1 + \alpha \cdot t_1)$, $R_{T2} = R_0(1 + \alpha \cdot t_2)$, где α – температурный коэффициент сопротивления терморезистора, $1/^\circ\text{C}$, температуры t_1 и t_2 можно выразить следующим образом:

$$t_1 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_{11} \cdot R_{13}}{R_{12} \cdot R_0} - 1 \right), \quad t_2 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_{21} \cdot R_{23}}{R_{22} \cdot R_0} - 1 \right).$$

Температура t_2 должна быть больше температуры t_1 . Это обеспечивается выбором соответствующих резисторов.

БПМ1 и БПМ2 преобразуют мощность, выделяемую на термопреобразователях прямого подогрева R_{T1} и R_{T2} , в напряжение. В сумматоре выделяется напряжение, пропорциональное разности мощностей $DP = P_2 - P_1$. Количество тепла, выделенного нагревателем в единицу времени, пропорционально мощности, тогда уравнение теплового баланса для R_{T1} и R_{T2} можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_1 &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} (t_1 - t_{CP}) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} (t_1 - t_0); \\ P_2 &= \bar{b}_{P2} \cdot S_{P2} (t_2 - t_{CP}) + \bar{b}_{П2} \cdot S_{П2} (t_2 - t_0), \end{aligned}$$

где \bar{b}_P, S_P – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К), [6] и эффективная площадь теплообмена между термопреобразователем и измеряемой средой; $\bar{b}_{П}, S_{П}$ – коэффициент теплообмена и эффективная площадь теплообмена между термопреобразователем и окружающей средой; $t_1, t_2, t_{CP1}, t_{CP2}, t_0$ – температуры стенок R_{T1} и R_{T2} , температуры в сечениях перед R_{T1} и R_{T2} и температура окружающего воздуха, соответственно.

При идентичности теплофизических параметров термопреобразовательных элементов, т. е. при $\bar{b}_{P1} S_{P1} = \bar{b}_{P2} \cdot S_{P2} = \bar{b}_P \cdot S_P$ и $\bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} = \bar{b}_{П2} \cdot S_{П2} = \bar{b}_{П} \cdot S_{П}$, разность мощностей можно получить в следующем виде:

$$DP = P_2 - P_1 = \bar{b}_P \cdot S_P (t_2 - t_1) + \bar{b}_{П} \cdot S_{П} (t_2 - t_1),$$

откуда видно, что разность мощностей не зависит от температуры измеряемой среды t_{CP} и окружающего воздуха t_0 и пропорциональна коэффициенту теплообмена α_P , который является мерой расхода ($\bar{b}_P \equiv G_M^{0,33}$ для ламинарного течения; G_M – массовый расход).

Недостатком данного преобразователя является сложность в обеспечении идентичности теплофизических параметров термоэлементов и идентичности гидравлических параметров магистралей. Кроме того, для лучшей согласованности параметров необходимо поддерживать разность температур $(t_2 - t_1)$ на небольшом уровне – $1 \div 3$ °С, что ведет к уменьшению полезного сигнала. В то же время температуры t_1, t_2 должны быть больше, чем максимальная температура измеряемой среды, т. е. t_1 и t_2 должны превышать минимальную температуру t_{CP} на несколько десятков градусов, что ведет к изменению теплофизических параметров (теплоемкости, теплопроводности).

Функциональная схема двухмагистрального измерительного преобразователя температур со стабилизацией температуры пограничного слоя в двух магистралах представлена на рис. 2. От предыдущего преобразователя он отличается наличием дополнительного сдвоенного термопреобразователя, измеряющего температуру измеряемой среды t_{CP} , и расположенного на участке трубопровода до ветвления. Он содержит два авторегулятора поддержания температур пограничного слоя: $(t_1 - t_{CP}) = I_1, (t_2 - t_{CP}) = I_2$.

В отличие от предыдущей схемы необходимо стабилизировать разность температур $(t_1 - t_{CP})$ и $(t_2 - t_{CP})$, для чего в измерительный резистор R_{TCP} необходимо задавать ток много меньше, чем в управляющий R_{T1}, R_{T2} . Этой цели служит модифицированный авторегулятор разности температур. Для первого сечения он

состоит из $R_{Т1}$, R , усилителя Ус1, R_1 , $R_{ТCP}$, делителя напряжения R' , R'' , дифференциального усилителя ДУ1. При значительном коэффициенте усиления ДУ1 можно считать, что напряжение между его входами равно нулю или:

$$\frac{U(R_1 + R_{ТCP})}{R + R_1 + R_{ТCP}} = \frac{U \cdot K \cdot R_{Т1}}{R + R_{Т1}} \gamma,$$

где U – выходное напряжение ДУ1; γ – коэффициент деления делителя R' , R'' , причем $R', R'' \gg R_{Т1}$; K – коэффициент усиления усилителя Ус.

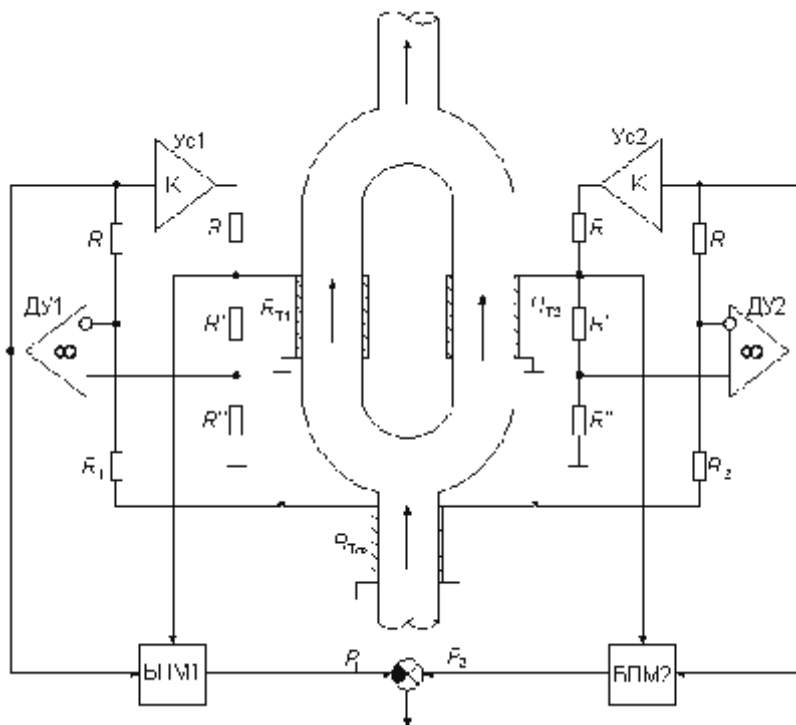


Рис. 2. Двухмагистральный измерительный преобразователь температур со стабилизацией пограничного слоя в двух магистрях

Обеспечивая $\gamma \cdot K = 1$, можно упростить: $R_1 + R_{ТCP} = R_{Т1}$.

Обеспечивая $R_{ТCP}$ и $R_{Т1}$ идентичными по электрическим параметрам, можно записать:

$$R_1 + R_0(1 + \beta \cdot t_{CP}) = R_0(1 + \beta \cdot t_1)$$

или

$$R_1 = R_0 \cdot \beta(t_1 - t_{CP}).$$

Откуда,

$$t_1 - t_{CP} = \frac{R_1}{R_0 \cdot \beta},$$

т. е. схема работает как авторегулятор разности температур. Усилитель Ус1 необходим для того, чтобы в термопреобразователе $R_{Т1}$ обеспечивался режим

прямого подогрева, а делитель R' , R'' необходим для того, чтобы в термопреобразователе R_{TCP} режим прямого подогрева был исключен.

Поскольку данная схема поддерживает разность температур $(t_1 - t_{CP})$, т. е. разность температуры среды непосредственно у стенки нагревателя и температуры вне теплового воздействия, то можно сказать, что это стабилизатор температуры пограничного слоя [3].

Авторегулятор разности температур $(t_2 - t_{CP})$ состоит из следующих элементов: R_{TCP} , R , R' , R'' , R_2 , $Ус2$, $ДУ2$, с помощью которых во втором сечении стабилизируется разность температур:

$$t_2 - t_{CP} = \frac{R_2}{R_0 \cdot \beta},$$

т. е. в авторегуляторах выполняется равенство:

$$И_1 = t_1 - t_{CP} = \frac{R_1}{\beta \cdot R_0}; И_2 = t_2 - t_{CP} = \frac{R_2}{\beta \cdot R_0}.$$

Уравнение теплового баланса для термопреобразователей прямого подогрева R_{T1} и R_{T2} будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_{ЭЛ1} &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} \cdot И_1 + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} (t_{CP} + И_1 - t_0); \\ P_{ЭЛ2} &= \bar{b}_{P2} \cdot S_{P2} \cdot И_2 + \bar{b}_{П2} \cdot S_{П2} (t_{CP} + И_2 - t_0). \end{aligned}$$

При идентичности теплофизических параметров термоэлементов можно записать:

$$\begin{aligned} P_{ЭЛ1} &= \bar{b}_P \cdot S_P \cdot И_1 + \bar{b}_П \cdot S_П (t_{CP} + И_1 - t_0); \\ P_{ЭЛ2} &= \bar{b}_P \cdot S_P \cdot И_2 + \bar{b}_П \cdot S_П (t_{CP} + И_2 - t_0), \end{aligned}$$

а разность мощностей равна:

$$\Delta P = P_{ЭЛ2} - P_{ЭЛ1} = (\bar{b}_P \cdot S_P + \bar{b}_П \cdot S_П)(И_2 - И_1),$$

откуда видно, что выходная величина пропорциональна коэффициенту теплообмена α_P , т. е. служит мерой массового расхода измеряемой среды. Следует заметить, что по сравнению с предыдущим преобразователем прогрев измеряемой среды осуществляется всегда на определенное число градусов Θ_1 и Θ_2 ($1 \div 3^\circ\text{C}$) и не зависит от температуры измеряемой среды, что ведет к меньшей зависимости теплофизических параметров (теплоемкости, теплопроводности) от температуры.

Недостатком данной схемы является необходимость строгого выполнения условий идентичности термопреобразователей.

Рассмотренные ранее измерительные преобразователи обладают, по сравнению с известными, пониженными дополнительными погрешностями от изменения температуры окружающего воздуха и измеряемой среды. Причем, чем выше идентичность электрических и тепловых параметров термоэлементов, тем ниже дополнительные погрешности. Хотя обеспечить полную идентичность термоэлементов чрезвычайно сложно, нет оснований полагать, что неидентичность изменяется во времени или с изменением температур окружающего воздуха и измеряемой среды. В измерительной технике в таких ситуациях применяют так называемые коммутационные методы [1], [4], [7], [8]. Один из вариантов коммутационного измерительного преобразователя представлен на рис. 3.

По сравнению с двухмагистральным преобразователем со стабилизацией температуры стенки (см. рис. 1) в него введен коммутатор $S1$, а выходной сигнал находится в виде $(\Delta P' - \Delta P'')$, где $\Delta P'$ – выходной сигнал при левом положении ключа, а $\Delta P''$ – при правом положении ключа. Выражая неидентичность термоэлементов следующим образом

$$\begin{aligned} \bar{b}_{P2} \cdot S_{P2} &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} + D(\bar{b} \cdot S)_P, \\ \bar{b}_{П2} \cdot S_{П2} &= \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} + D(\bar{b} \cdot S)_П, \end{aligned}$$

для левого положения ключа можно записать:

$$\begin{aligned} P'_1 &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_1 - t_{CP}) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_1 - t_0); \\ P'_2 &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_2 - t_{CP}) + D(\bar{b} \cdot S)_P(t_2 - t_{CP}) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_2 - t_0) + D(\bar{b} \cdot S)_П(t_2 - t_0). \\ \Delta P' &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_2 - t_1) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_2 - t_1) + D(\bar{b} \cdot S)_P(t_2 - t_{CP}) + D(\bar{b} \cdot S)_П(t_2 - t_0). \end{aligned}$$

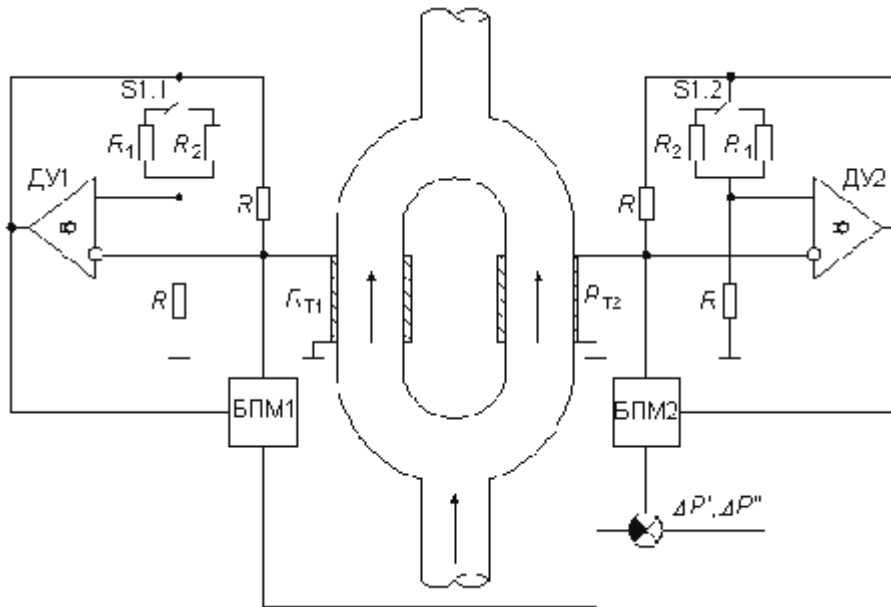


Рис. 3. Двухмагистральный коммутационный преобразователь со стабилизацией температуры стенки в двух магистралях

Для правого положения ключа можно получить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} P''_1 &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_2 - t_{CP}) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_2 - t_0); \\ P''_2 &= \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_1 - t_{CP}) + D(\bar{b} \cdot S)_P(t_1 - t_{CP}) + \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_1 - t_0) + D(\bar{b} \cdot S)_П(t_1 - t_0). \\ \Delta P'' &= -\bar{b}_{P1} \cdot S_{P1}(t_2 - t_1) - \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1}(t_2 - t_1) + D(\bar{b} \cdot S)_P(t_1 - t_{CP}) + D(\bar{b} \cdot S)_П(t_1 - t_0). \end{aligned}$$

Определив $(\Delta P' - \Delta P'')$, можно получить:

$$\Delta P' - \Delta P'' = [2 \cdot \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} + 2 \cdot \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} + D(\bar{b} \cdot S)_P + D(\bar{b} \cdot S)_П](t_2 - t_1).$$

Поскольку неидентичность термоэлементов $D(\bar{b} \cdot S)_P$ и $D(\bar{b} \cdot S)_П$ постоянна и разность температур также постоянна, то полученное выражение пропорционально коэффициенту теплообмена \bar{b}_P , т. е. является мерой массового расхода.

Основным недостатком вышеописанного измерительного преобразователя является то обстоятельство, что при минимальной температуре измеряемой среды для поддержания температуры стенки в измерительных магистралях необходимо расходовать значительную мощность, т. е. возникает значительная разность температур $(t_1 - t_{CP})$ и $(t_2 - t_{CP})$, что может привести к изменению теплофизических констант измеряемой среды и, кроме того, повышены требования к блоку преобразования мощности, который должен работать в расширенном диапазоне выходных сигналов. Для преодоления этих недостатков более целесообразным представляется реализовать коммутационный преобразователь на основе поддержания неизменными температуры пограничных слоев в измерительных магистралях. Функциональная схема такого преобразователя представлена на рис. 4. Он, по сравнению с двухмагистральным преобразователем со стабилизацией температуры пограничного слоя, представленного на рис. 2, содержит дополнительный переключатель S1.

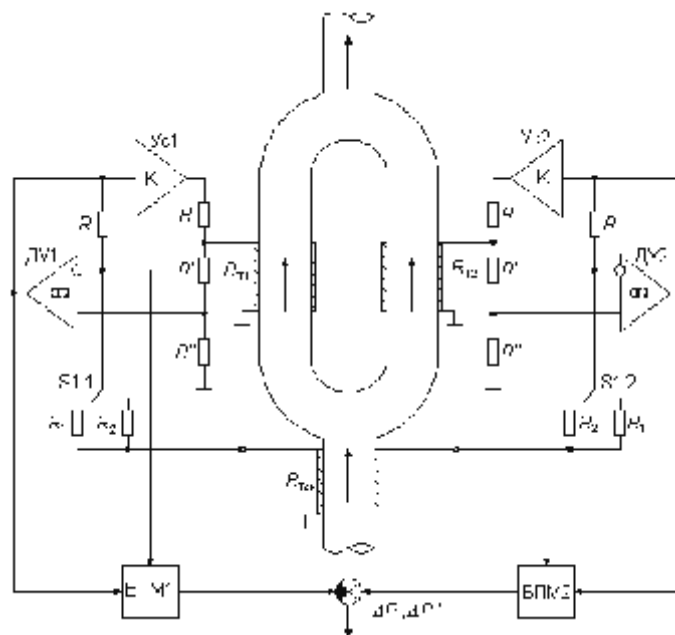


Рис. 4. Двухмагистральный коммутационный преобразователь со стабилизацией температуры пограничного слоя

Тогда, с учетом разности теплофизических параметров для левого положения переключателя S1, можно записать:

$$P'_1 = \bar{\sigma}_{P1} \cdot S_{P1} \cdot I_1 + \bar{\sigma}_{П1} \cdot S_{П1} (t_{CP} + I_1 - t_0);$$

$$P'_2 = \bar{\sigma}_{P1} \cdot S_{P1} \cdot I_2 + D(\bar{\sigma} \cdot S)_P I_2 + \bar{\sigma}_{П1} \cdot S_{П1} (t_{CP} + I_2 - t_0) + D(\bar{\sigma} \cdot S)_П (t_{CP} + I_2 - t_0).$$

$$DP' = \bar{\sigma}_{P1} \cdot S_{P1} (I_2 - I_1) + \bar{\sigma}_{П1} \cdot S_{П1} (I_2 - I_1) + D(\bar{\sigma} \cdot S)_P I_2 + D(\bar{\sigma} \cdot S)_П (t_{CP} + I_2 - t_0).$$

Для правого положения переключателя S1 соответствующие выражения имеют вид:

$$P''_1 = \bar{\sigma}_{P1} \cdot S_{P1} \cdot I_2 + \bar{\sigma}_{П1} \cdot S_{П1} (t_{CP} + I_2 - t_0);$$

$$P''_2 = \bar{\sigma}_{P1} \cdot S_{P1} \cdot I_1 + D(\bar{\sigma} \cdot S)_P \cdot I_1 + \bar{\sigma}_{П1} \cdot S_{П1} (t_{CP} + I_1 - t_0) + D(\bar{\sigma} \cdot S)_П (t_{CP} + I_1 - t_0).$$

$$\begin{aligned} DP'' = & -\bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} (I_2 - I_1) - \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} (I_2 - \Theta_1) + D(\bar{b} \cdot S)_P I_1 + \\ & + D(\bar{b} \cdot S)_П (t_{CP} + I_1 - t_0). \end{aligned}$$

Окончательный результат преобразования, найденный в виде $(\Delta P' - \Delta P'')$, имеет следующий вид:

$$\Delta P' - \Delta P'' = [2 \cdot \bar{b}_{P1} \cdot S_{P1} + 2 \cdot \bar{b}_{П1} \cdot S_{П1} + D(\bar{b} \cdot S)_P + D(\bar{b} \cdot S)_П] (I_2 - I_1).$$

Из последнего выражения видно, что результат преобразования не зависит от температуры окружающей и измеряемой сред и пропорционален \bar{b}_{P1} , т. е. является мерой массового расхода измеряемой среды.

По сравнению с известными, все рассмотренные преобразователи имеют пониженную дополнительную погрешность от влияния температуры окружающего воздуха. Это влечет за собой снижение требований к теплоизоляции и, как следствие, – к упрощению конструкции датчика, либо при равных требованиях позволяет расширить диапазон измерения в сторону малых расходов.

В расходомерах со стабилизацией температуры стенки измерительного участка трубопровода основным недостатком, по сравнению с расходомерами со стабилизацией температуры пограничного слоя, является повышенная мощность при минимальной температуре измеряемой среды. Данные типы расходомеров можно рекомендовать для использования при измерении расхода сред с невысоким рабочим температурным диапазоном. Расходомеры со стабилизацией температуры пограничного слоя пригодны для сред с высоким температурным диапазоном.

Коммутационные расходомеры, кроме отмеченных достоинств, обладают еще и сниженными требованиями к идентичности тепловых параметров термоэлементов, т. е. более простой конструкцией и повышенной точностью, хотя за это требуется платить увеличением времени преобразования и некоторым усложнением схемной реализации.

Литература

1. Агейкин Д. И. Магнитные газоанализаторы / Д. И. Агейкин. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 425 с.
2. Об измерении малых расходов газов / А. Н. Камразе [и др.] // Приборы и системы управления. – 1990. – № 2. – С. 20–21.
3. Коротков П. А. Тепловые расходомеры / П. А. Коротков, Д. В. Беляев, Р. К. Азимов. – Л. : Машиностроение, 1969.
4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 776 с.
5. Мальцев И. В. Автономный прецизионный микрорасходомер газа / И. В. Мальцев, В. В. Васильев, А. В. Румянцев // Измерительная техника. – 1998. – № 4. – С. 31–33.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
7. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. – Киев : Высш. шк., 1971. – 552 с.
8. Скрипник Ю. А. Коммутационные цифровые измерительные приборы / Ю. А. Скрипник. – М. : Энергия, 1973. – 135 с.