

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВЫХ МИКРОРАСХОДОМЕРАХ

АННОТАЦИЯ

В докладе приводится теоретическое обоснование новых способов автономизации тепловых расходомеров газа путем термостабилизации теплоносителя или перехода в область высоких температур. Показано, что организация процесса теплообмена с переменной (уменьшающейся) мощностью тепловыделения позволяет существенно улучшить показатели термисторного расходомера. Приведены конструкции расходомеров трех типов и результаты экспериментального исследования их характеристик для различных газов.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих технологических процессах, на диагностических центрах, в активных системах обеспечения теплового режима (СТР) различного рода объектов расход рабочего тела – теплоносителя – является одним из важнейших параметров. Поэтому разработка, создание и исследование систем измерения и регулирования расхода по-прежнему остаются актуальной задачей.

1. ТЕПЛОВЫЕ ТЕРМИСТОРНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ГАЗА

В области микрорасходов (до 100 мг/с) наиболее эффективными оказались тепловые микрорасходомеры. Повсеместный переход от тепловыделяющих элементов (ТЧЭ) с металлической проводимостью к полупроводниковым сопротивлениям – терморезисторам (термисторам) – позволил существенно улучшить качественные показатели тепловых расходомеров благодаря экспоненциальной зависимости сопротивления ТЧЭ от температуры.

Особенностью тепловых микрорасходомеров газа является зависимость их показаний от температуры входящего газового потока T_2 и внешней среды T_c , т.е. их неавтономность, как следствие малой интенсивности процесса конвективной теплоотдачи в области микрорасходов (малых чисел Рейнольдса). В работах [1,2] нами предложен и реализован способ автономизации, состоящий в стабилизации теплового режима теплоносителя на температурном уровне T_n , превосходящем максимально возможные по условиям эксплуатации T_2 и T_c . Управляющим элементом в СТР теплоносителя служит термистор ТЧЭ_н, идентичный измерительному термистору ТЧЭ_г. Каждый из термисторов располагается в идентичных каналах, герметично соединенных с газораспределительной камерой (ГРК), делящей входящий в нее газовый поток расходом G на два расхода $G/2$ каждый. Двухканальная конструкция позволяет повысить чувствительность (в области

малых расходов коэффициент теплоотдачи меняется наиболее круто) и вдвое увеличить доступный измерению диапазон расхода газа. Конструкция расходомера схематично представлена на рис. 1.

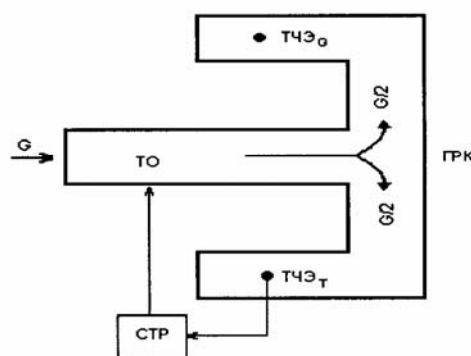


Рис.1. Конструкция расходомера (ТО – теплообменник; ГРК – газораспределительная камера; ТЧЭ_н – управляющий элемент СТР; ТЧЭ_г – измерительный термистор, идентичный ТЧЭ_н).

Новый метод измерения расхода газа позволяет параметризовать расходные характеристики – сопротивление ТЧЭ_г – по параметру T_n , от расхода не зависящему. При этом уровень T_n должен фиксироваться в диапазоне ± 0.1 К.

1.1 Расходомеры с фиксированными параметрами

В качестве измерительного термистора используется термистор с косвенным нагревом, что позволяет наиболее простым способом вводить в термистор мощность W для его перегрева на величину t относительно фиксированного уровня T_n . При взаимодействии с теплоносителем температура термистора (или t) изменяется, что приводит к изменению его сопротивления $R(T)$, величина которого регистрируется. Используя в качестве математической модели уравнение теплового баланса, найдем зависимость температуры термистора от расхода:

$$t(G) = W / \alpha(G) \cdot S \equiv q / \alpha(G); q = W / S. \quad (1)$$

Здесь $\alpha(G)$ – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности термистора; q – удельная мощность.

Из (1) следует, что возможны два способа организации теплообмена. Первый способ – фиксируется мощность косвенного нагрева $q = \alpha_0 t_0(T_n) = \text{Const}$, а переменной является температурный напор:

$$t(G, T_n) = q_0(T_n) / \alpha(G). \quad (2)$$

(индекс «0» характеризует начальное состояние системы при $G=0$).

Второй способ – фиксируется температура (или t) термистора $t(G, T_n) = t_0(T_n) = \text{Const}$, а переменной вводится мощность косвенного нагрева:

$$q(G, T_n) = t_0(T_n) \cdot \alpha(G)$$

В 1-ом способе выходной сигнал – сопротивление измерительного термистора ТЧЭ_G:

$$R(G, q_0, T_n) = A \exp[B/(T_n + q_0/\alpha(G))], \quad (3)$$

где A и B – индивидуальные постоянные термистора.

Во 2-ом способе выходной сигнал сила тока косвенного нагрева:

$$I(G, t_0(T_n)) = [t_0(T_n) \cdot (S/r) \alpha(G)]^{1/2},$$

где r – сопротивление спирали.

Можно показать, что чувствительность в обоих режимах определяется поведением функции $F(\alpha) = \alpha'(G)/\alpha(G)$, и что она в силу этого примерно одинаковая. Однако имеются и недостатки второго способа, такие, как: необходимость еще одной СТР, обеспечивающей тепловой режим термистора по соотношению $t_0(T_n) = q(G, T_n)/\alpha(G) = \text{Const}$; наличие критической величины расхода, при которой термистор, ограниченный по температурному уровню $T < T_{\max}$, выйдет из строя при резком уменьшении расхода

$$t_0 \alpha(G_{\max})/\alpha(G_{\text{крит}}) > t_{\max};$$

ограниченный ресурс термистора, ибо во время измерений его температура составляет $\sim 0.97 T_{\max}$. Достоинством 2-го способа является независимость процесса теплообмена от температур ТЧЭ_G и теплоносителя ввиду неизменности их уровня.

1.2 Расходомер без фиксированных параметров.

В рассмотренных вариантах организации процесса теплообмена вводимая мощность либо фиксируется, либо возрастает с ростом расхода, компенсируя конвективную теплоотдачу ($t_0 = \text{Const}$). Очевидно, более эффективным будет такой процесс теплообмена, когда теплоотдача сопровождается одновременным уменьшением вводимой мощности, т.е. когда оба процесса являются одно, а не разнонаправленными. Для этого достаточно включить термистор в схему резистивного деления напряжения с $U_0 = \text{Const}$. Вторым элементом схемы служит обычный резистор, сопротивление которого равно сопротивлению термистора при выбранной температуре T_0 и $G=0$. При подаче расхода температура термистора уменьшается, его сопротивление возрастает, что при $U_0 = \text{Const}$ приводит к уменьшению тока в схеме, и, как следствие, к уменьшению выделяющейся в термисторе (и в резисторе) мощности. Выделяющаяся в термисторе мощность становится функцией его температуры, которую можно представить в виде

$$W(T) = W(T_0)(a + bt), \quad (4)$$

где $W(T_0) = U_0^2/4R_0 \equiv \alpha_0 t_0 S$; $R_0 = R(T_0)$ (5)

Температурный напор определяется из уравнения теплового баланса

$$t(G, T_n) = a q_0 / [\alpha(G) - b q_0], \quad q_0 = W_0/S \quad (6)$$

Выходной сигнал расходомера переменной мощности следует формировать как разность напряжений на элементах резистивной схемы;

$$U(G) = U_r(G) - U_R(G_0) = U_0 \{ R(G)/[R(G) + R_0] - R_0/[R(G) + R_0] \} \quad (7)$$

Величина и чувствительность разностного сигнала вдвое выше, чем у выходного сигнала, снимаемого с диагонали мостовой схемы ($U=2U_0$), хотя последняя проще.

Из (7) видно, что напряжение на термисторе, возрастая от $U_0/2$, стремится к U_0 , а на резисторе падает от $U_0/2$ по закону $U_0 R(G)$. Этим объясняется резкий рост $U(G)$ с расходом и повышенная чувствительность разностного сигнала, поскольку чувствительности сигналов с элементов резистивной схемы складываются. Выделяемая в термисторе мощность определяется соотношением

$$W_r(G) = [U_0^2 - U^2(G)]/4R_0, \quad (8)$$

из которого следует, с учетом (7), что она падает с расходом.

Расходомеры постоянной и переменной мощности были реализованы на базе термистора с косвенным нагревом СТ1-27 и термистора без косвенного нагрева СТ1-18, соответственно.

Семейство расходных характеристик $R(G, T_n)$ по параметру T_n представлено на рис.2 для азота и ксенона. Видна сильная зависимость как величины сигнала, так и чувствительности по расходу от уровня T_n . Здесь же изображена расходная характеристика для ксенона при $T_n = 283K$ – стендовый вариант расходомера (он помещается в вакуумную камеру стенда). Видно, что показатели расходомера в этом случае существенно лучше, чем даже для азота, но при больших значениях T_n .

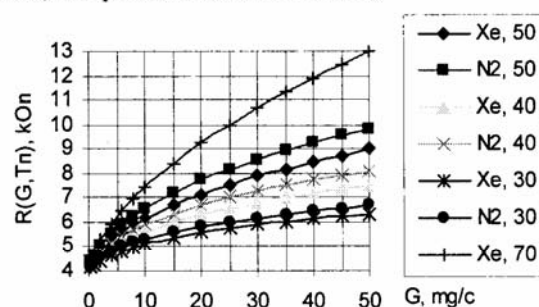


Рис.2 Расходные характеристики термистора постоянной мощности для азота и аргона ($T_0=353K$, $T_n=283, 303, 313$ и $323K$)

На рис.3 представлены падения напряжения расходомера переменной мощности для ксенона при разных значениях T_n . Видно, что при $G=0$

$U_{ir}=U_R=U_0/2$, а при $G>0$ функция $U_{ir}(G)$ растет, стремясь от $U_0/2$ к U_0 , а функция $U_R(G)$ падает, что и приводит в итоге к нарастанию с расходом выходного разностного сигнала. Стендовый вариант ($T_n=283K$) имеет существенно лучшие показатели, как и в случае расходомера постоянной мощности.

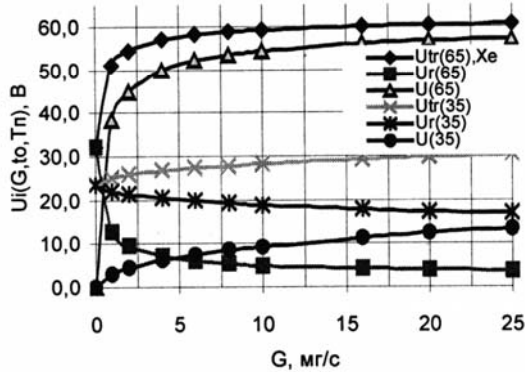


Рис.3 Падение напряжения на элементах резистивной схемы и выходной сигнал для ксенона ($T_n=283, 313K$, $t_0=65, 35K$).

На рис.4 представлена чувствительность ($B/(mg/c)$), как функция расхода расходомера переменной мощности для азота, аргона и ксенона ($T_n=313K$). Видно, что ее изменение лежит в пределах: у азота $\sim(15\pm1)$; у аргона $\sim(11\pm0,9)$; у ксенона $\sim(6\pm0,5)$ в диапазоне $\Delta G=0\div25mg/c$. Такой чувствительностью не обладает ни один из известных тепловых расходомеров газа.

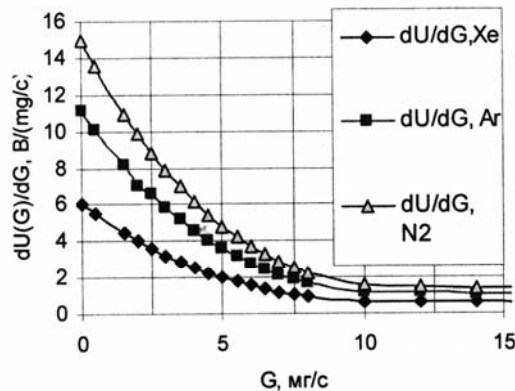


Рис.4 Чувствительность по расходу расходомера переменной мощности для азота, аргона и ксенона ($T_n=313K$, $t_0=35K$)

2. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РАСХОДОМЕР ГАЗА

Недостатки термисторных микрорасходомеров – неавтономность и ограниченность температурного напора как следствие ограниченности максимальной температуры термистора уровнем $\sim 85^\circ C$, – требуют, как было показано, принятия специальных мер (наличия СТР) для минимизации их влияния на качественные уровни T_2 и T_c : $4 \times 323K = 1292K$. В области высоких температур определяющую роль в процессах теплообмена начинает играть тепловое

излучение. Поэтому регистрируемым параметром высокотемпературного ТЧЭ должна служить величина плотности потока излучения его поверхности. Этот принципиально новый метод измерения микрорасхода газа предложен нами в работах [3-5]. Степенная зависимость от температуры излучаемого потока энергии (как T^4) обуславливает высокие значения точности и чувствительности, особенно в области сверхмалых расходов. Регистрация излучения осуществляется преобразователем оптического излучения (ПОИ) в электрический сигнал (фотодиод или фоторезистор). Бесконтактный способ регистрации и замена контроля интегрального (объемного) свойства ТЧЭ – его сопротивления, контролем дифференциального (поверхностного) свойства ТЧЭ – энергетической светимости его поверхности, позволяет существенно уменьшить тепловую инерционность высокотемпературного расходомера в сравнении с термисторным.

Устройство расходомера схематично представлено на рис.5. Реальная конструкция расходомера содержит не одну, а две камеры (верхняя и нижняя) с общим газоподводом и отводом. Газ поступает в камеры со спиралью в строго противоположных направлениях расходом $G/2$, чем обеспечивается ориентационная независимость показаний расходомера. Напротив оптических окон располагаются фотодиоды [5].

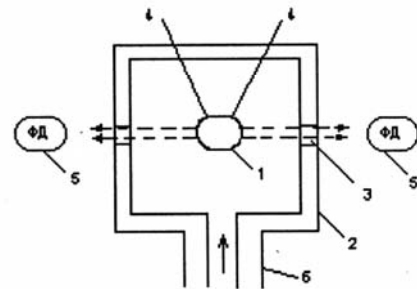


Рис.5 Схема устройства расходомера (1 – спираль; 2 – корпус; 3 – оптические окна; 5 – фотодиоды; 6 – газоподвод)

Двухкамерная конструкция позволяет: удвоить выходной сигнал (4 фотодиода вместо 2-х); повысить чувствительность, так как в каждую камеру подается газ расходом $G/2$, а именно в области малых расходов коэффициент теплоотдачи изменяется наиболее круто; удвоить доступный измерению диапазон расхода газа.

Автономность расходомера автоматически обеспечивается тем, что стенки газоподвода нагреваются радиационным потоком от спиралей, и кондуктивно – от камер, перегреваемых тем же потоком на $150\div200K$ относительно температур внешней среды и газового потока. Расчеты показывают, что вариация этих температур в диапазоне $268\div323K$ не оказывают влияния на расходные характеристики расходомера.

Таким образом, высокотемпературный расходомер: не содержит СТР; система регистрации выходного сигнала сводится к фотодиодам; величина сигнала U_n пропорциональна сопротивлению общей

нагрузки R_n фотодиодов, играющей роль усилителя напряжения с коэффициентом усиления $k = R_n$, и поэтому отпадает надобность в каких-либо усилителях вообще. Выходной (вольтовый) сигнал регистрируется либо вольтметром, либо записывающим устройством.

Спирали изготавливались из нихромовой проволоки диаметром 0.2 мм; диаметр спирали составлял ~5 мм; длина ~5 мм; сопротивление ~4÷6 Ом. В качестве ПОИ использовались фотодиоды ФД-263. Максимальная температура спиралей устанавливалась на уровне ~1270 К. При напряжении питания фотодиодов 25 В и сопротивлении их общей нагрузки $R_n = 200 \text{ К}$, максимальный выходной сигнал при $G=0$ равнялся 20 В. Фотодиоды помещались в капсулы, которые могли механически плавно перемещаться вдоль продольной оси оптических окон. Это позволяло добиваться одинаковости сигналов от пар фотодиодов (10 В), нивелируя разброс параметров как спиралей, так и фотодиодов.

Конструкция расходомера позволяет изменять диаметр D проходного сечения путем его диафрагмирования. Для этого в газоподвод ввинчивается втулка с выполненным в ней отверстием диаметром $d < D$. Подбором величины d можно «выбрать» весь выходной сигнал или большую его часть в задаваемом диапазоне расхода. Это позволяет существенно повысить точность и чувствительность при малых расходах.

На рис.6 представлены расходные характеристики для азота и аргона. У азота изменение выходного сигнала лежит в пределах (20±0) В, и $G_{\max} \sim 87 \text{ мг/с}$. У аргона выходной сигнал при $G \sim 130 \text{ мг/с}$ составляет ~1.5 В, следовательно, для него $G_{\max} \sim 150 \text{ мг/с}$.

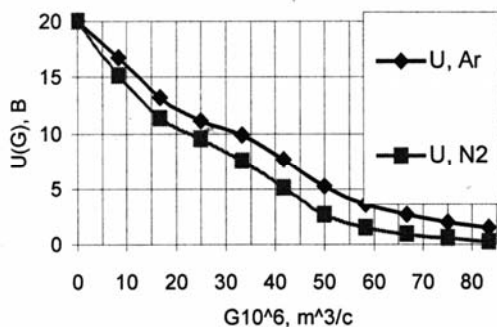


Рис.6 Расходные характеристики азота и аргона

На рис.7 представлены расходные характеристики с диафрагмой и без нее. Видно, что диафрагма существенно увеличивает чувствительность расходомера.

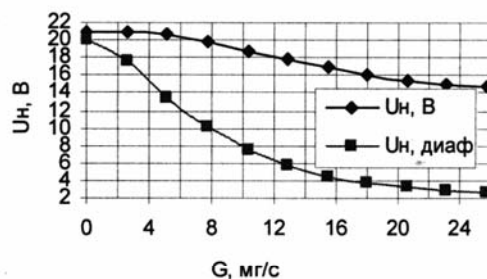


Рис.7 Расходные характеристики аргона с диафрагмой ($d=1 \text{ мм}$) и без нее ($D=11 \text{ мм}$)

Таблица 1. Выходной сигнал при различных углах отклонения от оси (воздух)

$G, \text{ мг/с}$	0	2.16	6.26	10.76	15.06	21.5	43
$U(0)$	20.33	16.15	6.99	3.47	2.46	1.94	0.54
$U(45)$	20.43	16.25	6.97	3.51	2.38	1.94	0.51
$U(90)$	20.38	16.23	6.94	3.46	2.45	1.88	0.43

В таблице 1 проиллюстрирована ориентационная независимость показаний высокотемпературного расходомера.

На основании представленного теоретического и экспериментального материала можно заключить, что термисторный переменный мощности и высокотемпературный расходомеры обладают наилучшими качественными показателями и могут быть рекомендованы к массовому производству.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T_n – температура термостабилизированного теплоносителя, К;
 T_2 – температура газового потока, К;
 T_c – температура внешней среды, К;
 t – температурный напор, К;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К;
 G – расход, мг/с, м³/с;
 W – мощность, Вт;
 q – удельная мощность, Вт/м²;
 S – площадь поверхности, м²;
 r – сопротивление спирали, Ом;
 U, U_n, U_R – разностный сигнал, падение напряжения на терморезисторе и на резисторе, соответственно, В;
 $R(G), R_0$ – сопротивление терморезистора и резистора, кОм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румянцев А.В., Васильев В.В., Мальцев И.В. Устройство для измерения микрорасхода газа. Патент RU №2201580, 2003.
2. Румянцев А.В., Шевченко П.Р. Автономный прецизионный микрорасходомер газа. Проблемы математических и физических наук. Изд-во Калининградского госуниверситета. 2001. с.115-120.
3. Румянцев А.В., Васильев В.В. Устройство для измерения расхода газа. Патент RU №2164008, 2001.
4. Румянцев А.В., Шевченко П.Р. Новый способ определения расхода газа и устройство его осуществления. Проблемы мат и физ наук. Изд-во Калининградского госуниверситета. 2002. с.3 81-85
5. Румянцев А.В., Шевченко П.Р. Тепловой микрорасходомер газа Патент RU №2246099, 2005.