

## **СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСТЕЧЕНИЯ**

Латышев Л.Н., Даев Ж. А.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет  
кафедра АПП, LNL1@yandex.ru*

*В статье предложена система измерения расхода газа, в которой исключено влияние коэффициента истечения. Система измерения использует элементы теории инвариантности измерительных устройств и элементы теории парциальных расходомеров.*

Ключевые слова: *газ, расходомер, перепад давления, измерение, система, принцип многоканальности*

Измерение расходов жидкостей и газов является одной из важнейших задач на производстве. Существует огромное количество расходомеров и принципы действия и конструкции, которых очень разнообразны. Но при проведении товаро-учетных операций в газовой промышленности особое место занимают расходомеры с переменным перепадом давления. Потому что у данных расходомеров простая конструкция, они надежны, с их помощью можно измерять практически любой расход, а самое главное достоинство – они не требуют поверочных образцовых установок.

Тем не менее, и эти расходомеры не лишены недостатков. Правильная работа расходомера зависит от так называемого коэффициента истечения, который представляет собой отношение действительного значения расхода к теоретическому значению. Он меняет свое значение во время эксплуатации и приводит к увеличению погрешности измерения расхода.

Факторами, влияющими на значение коэффициента истечения являются изменение геометрических размеров диафрагмы, которые могут быть вызваны гидроударами в трубопроводе, неизбежное притупление входной острой кромки, шероховатость измерительного трубопровода, расстояния между местными сопротивлениями в измерительном трубопроводе и т.д.

Уравнение расхода для расходомеров с сужающими устройствами [1] выг-

лядит следующим образом:

$$Q = CE \varepsilon F_0 \sqrt{2\Delta p / \rho},$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент расширения, учитывающий увеличение удельного объема для газа;

$$F_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \text{площадь отверстия сужающего отверстия};$$

$\rho$  - плотность;

$\Delta p$  - перепад, создаваемый сужающим устройством;

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} - \text{коэффициент скорости входа, учитывающий влияние на-}$$

чальной скорости потока на образование коэффициента расхода  $\alpha$ ;

$C$  - коэффициент истечения.

Произведение  $C \cdot E = \alpha$  называют коэффициентом расхода.

В данной работе предложена система измерения расхода, которая не зависит от коэффициента истечения.

Для проектирования системы такой системы используется теория инвариантности [2], которая основывается на принципе многоканальности передачи возмущения.

Для линейной системы при пренебрежении инерционностью звеньев измерительного устройства, взаимосвязь между измеряемой и выходной величинами может быть записана в виде:

$$y = F(x, f_1, f_2 \dots f_n), \quad (1)$$

где  $x$  - измеряемая (входная) величина;

$y$  - выходная величина;

$f_1, f_2 \dots f_n$  - возмущения, действующие на измерительное устройство.

Согласно принципу многоканальности, для достижения инвариантности измеряемой величины от влияния возмущающих воздействий в измерительную систему должны быть введены дополнительные каналы (датчики), на которые также воздействуют эти возмущения. Так как возмущений  $n$ , то для исключения их влияния к уравнению (1) следует дописать  $n$  уравнений, описывающих дополнительные датчики, и решить полученную систему уравнений относительно  $x$ :

$$\begin{aligned}
 y_1 &= F_1(x, f_1, f_2 \dots f) \\
 y_2 &= F_2(x, f_1, f_2 \dots f) \\
 &\dots \dots \dots \\
 y_{n+1} &= F_{n+1}(x, f_1, f_2 \dots f)
 \end{aligned}
 \quad , \quad (2)$$

откуда следует  $x = F_0(y_1, y_2 \dots y_{n+1})$ .

Основным условием возможности составления и решения системы уравнений (2) является наличие физически реализуемых датчиков, описываемых различными уравнениями. Таким образом, для достижения инвариантности какой-либо координаты  $x_i(t)$  измерительного устройства от влияющего на устройство возмущения  $f_i(t)$  необходимо наличие как минимум двух каналов передачи этого возмущения от точки его приложения до точки, в которой производится измерение данной координаты (выходной координаты) устройства [2].

Структурная схема разомкнутого инвариантного измерительного устройства представлена на рис. 1.

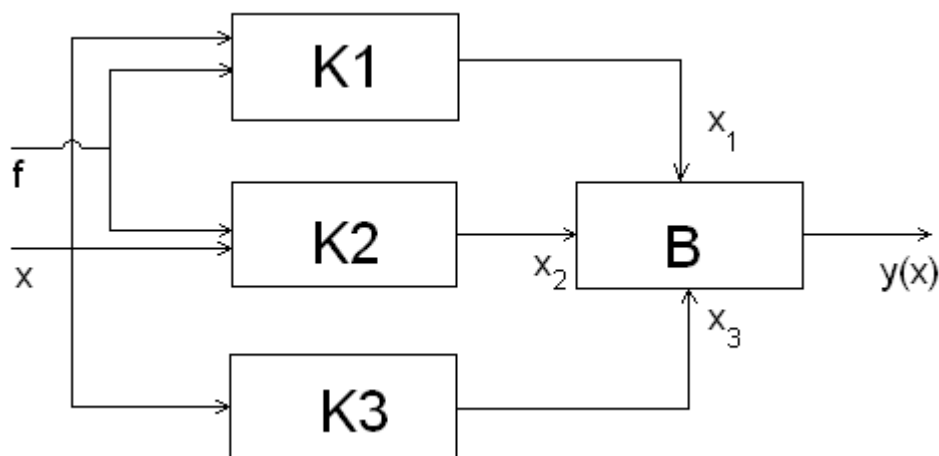


Рисунок 1. Структурная схема разомкнутого инвариантного измерительного устройства:

$K1, K2, K3$  – каналы измерения координаты  $x$ ,  $B$  – вычислительное устройство,  
 $f$  - возмущающее воздействие,  $x$  - измеряемая величина,  
 $y(x)$  - выходная величина,  $x_1, x_2, x_3$  - сигнал в каждом канале

Принцип работы системы представлен на рис. 2. В системе находятся два измерительных трубопровода равного диаметра ИТ1 и ИТ2, которые включены последовательно. Требования к измерительным трубопроводам приведены в [3]. Один из них имеет байпас малого диаметра, на котором установлен турбинный

расходомер Т. Сужающие устройства, установленные в измерительных трубопроводах должны иметь одинаковые геометрические размеры.

В качестве координаты  $x$  взят расход, в качестве возмущения взят коэффициент истечения, так как все влияющие факторы приводят к изменению его значения и вся информация о возмущениях содержится в нем.

Так же можно сказать, что конструктивно система использует элементы теории парциальных расходомеров, где расход вещества определяют по отвлеченной порции потока.

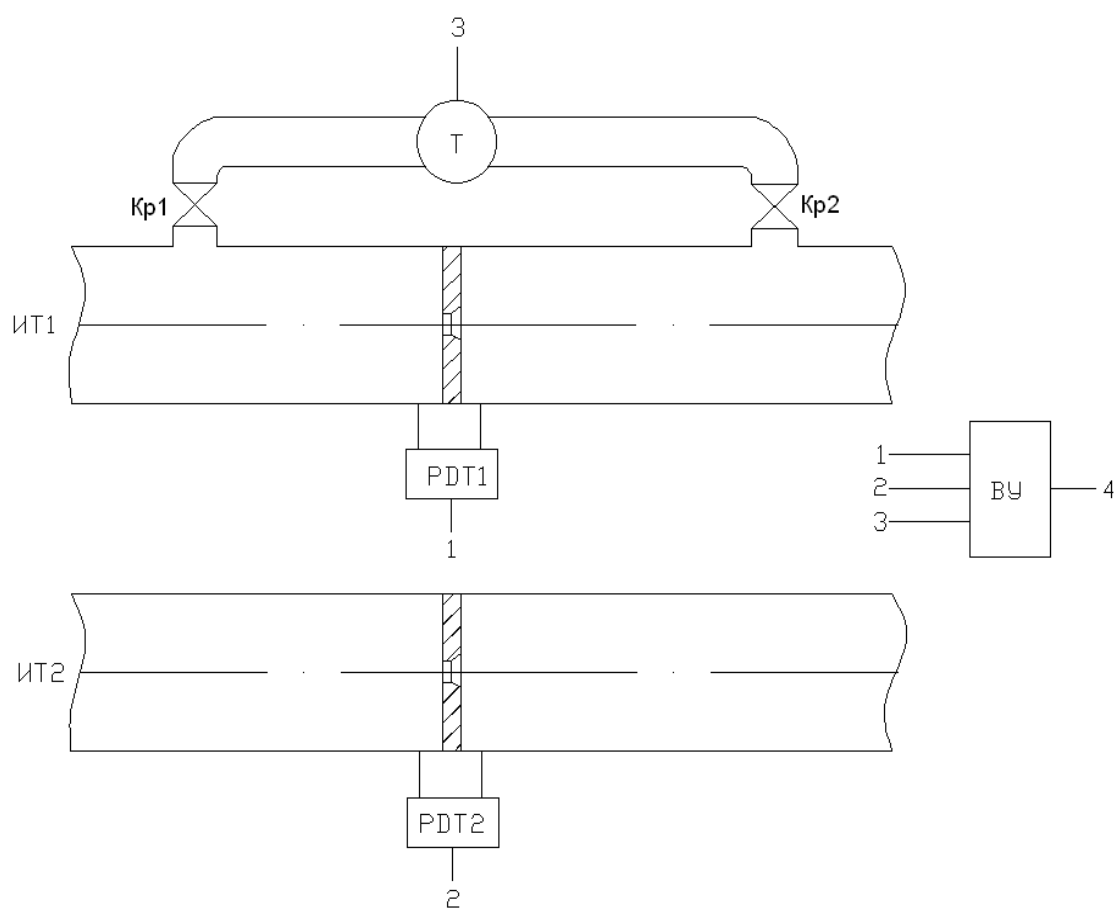


Рисунок 2. Схема системы измерения расхода

Для того, что бы систему включить в работу необходимо открыть краны Кр1 и Кр2, и измерять сигналы, поступающие с датчиков перепада давления PDT1, PDT2 и тахометрического преобразователя турбинки Т.

Составим уравнения для трех каналов согласно рис. 1 и 2.

$$\begin{aligned} x_1 &= K_1(x - \Delta x) = K_1 x - K_1 \Delta x \\ x_2 &= K_2 x \\ x_3 &= K_3 \Delta x \end{aligned} \quad (3)$$

где  $x_1, x_2$  - сигналы снимаемые с датчиков перепада давления,

$K_1, K_2, K_3$  - коэффициенты, характеризующие каналы измерения,

$x$  - измеряемый расход,

$\Delta x$  - расход в байпасе, измеряемый турбинным расходомером.

Все три сигнала  $x_1, x_2, x_3$  поступают в вычислительное устройство ВУ, которое представляет собой стандартный ПЛК. В ВУ организованы следующие операции:

— вычисление отношения  $x_1/x_2$  согласно системе (3);

— вычисление измеряемого расхода  $x$ .

$$a = \frac{x_1}{x_2} = \frac{K_1 x - K_1 \Delta x}{K_2 x} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{x_3/K_3}{x}.$$

Из последнего выражения выразим  $x$ :

$$x = \frac{(K_1/K_2)x_3}{K_3(K_1/K_2 - a)}.$$

В последнее уравнение подставим действительные величины  $x=Q$ ,  $\Delta x=q$ ,  $x_1=\sqrt{\Delta p_1}$ ,  $x_2=\sqrt{\Delta p_2}$ ,  $x_3=\omega$  - скорость вращения турбинки,

$$K_1 = \frac{1}{C_1 E F_0 \tau}, \quad K_2 = \frac{1}{C_2 E F_0 \tau}, \quad K_3 = \frac{1}{k}, \quad \text{где } \tau = \varepsilon \sqrt{\frac{2}{\rho}}:$$

$$Q = \frac{q}{\left(1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot a\right)}.$$

Течение газа является турбулентным, поэтому движению газа соответствуют большие числа Рейнольдса. Так же известно, что при больших числах Рейнольдса, как это видно из графика на рис. 3, коэффициент истечения становится постоянным (точнее асимптотически стремится к постоянному значению с ростом числа Рейнольдса) при любых значениях относительного диаметра. В нашей задаче сужающие устройства имеют одинаковые параметры и работают одновременно, поэтому отношение  $C_1/C_0=1$ .

В нашем случае коэффициент истечения является возмущением,  $k$  - коэффициент пропорциональности турбинного расходомера.

Так как отношение коэффициентов истечения равно единице, то отпадает необходимость вводить поправочные коэффициенты на притупление входной кромки и шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

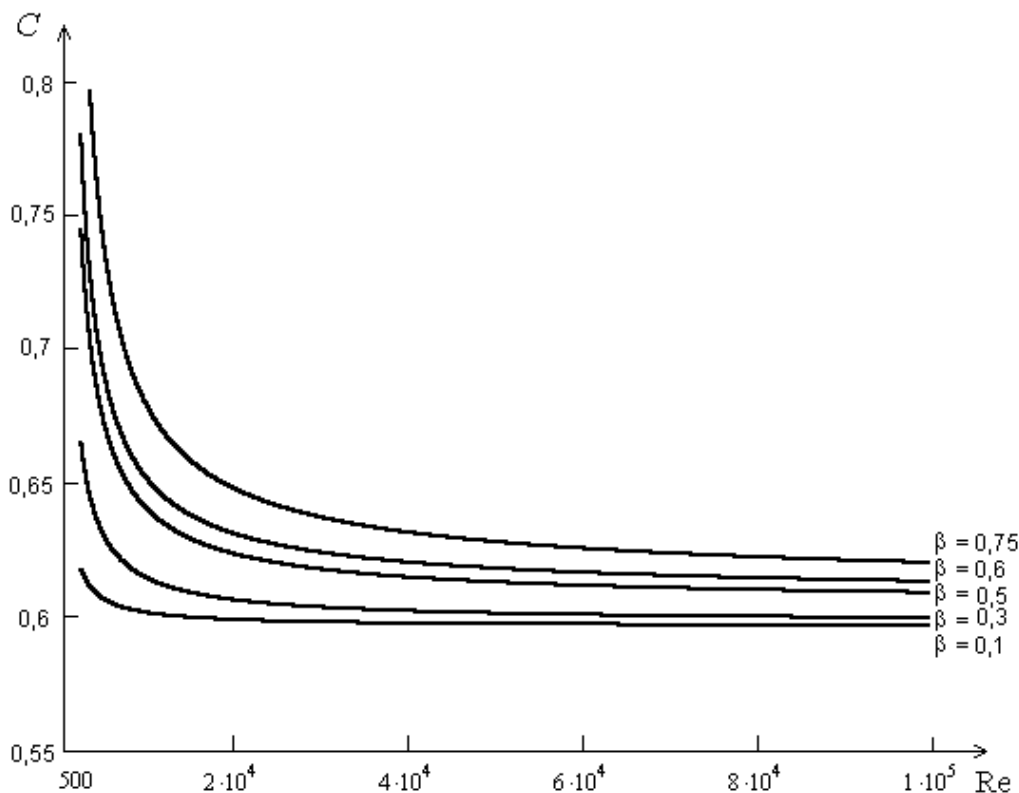


Рисунок 3. Коэффициент истечения  $C$  в зависимости от числа Рейнольдса для различных  $\beta$  (для углового способа отбора)

Учитывая все обозначения и приняв  $C_1/C_2=1$  получаем уравнение, которое абсолютно не зависит от коэффициента истечения:

$$Q = \frac{q}{\left(1 - \sqrt{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}}\right)}$$

Согласно данным работы [4] для диафрагм с диаметром отверстия от 16 до 85 мм погрешность коэффициента истечения при радиусах закругления 0,5 мм может достигать от 5 до 13 %. Используя данный метод можно достичь инвариантности по радиусу закругления острой кромки диафрагмы и по величине шероховатости.

Для решения данной задачи тахометрический турбинный расходомер следует подбирать высокой точности. На сегодняшний день их погрешность достигает  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$  %. Главными достоинствами тахометрических расходомеров является быстрое действие, высокая точность и большой диапазон измерения [1].

Вычислим погрешность разработанной системы измерения расхода.

$$Q = \frac{q}{1-a}, \text{ где } a = \sqrt{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}}$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dq}{q} - \frac{d(1-a)}{1-a} = \frac{dq}{q} + \frac{d(a)}{1-a} = \frac{dq}{q} + \frac{d(\sqrt{\Delta p_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta p_2}})}{1-a}$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dq}{q} + 0,5 \left( \frac{Q}{q} - 1 \right) \left[ \frac{d\Delta p_1}{\Delta p_1} - \frac{d\Delta p_2}{\Delta p_2} \right] \quad (4)$$

$$\gamma_Q = \sqrt{(\gamma_q)^2 + 0,25 \left( \frac{Q}{q} - 1 \right)^2 [(\gamma_{\Delta p_1})^2 + (\gamma_{\Delta p_2})^2]},$$

где  $\gamma_q$  - относительная погрешность измерения турбинного расходомера;

$\gamma_{\Delta p_1}$  - относительная погрешность измерения давления  $\Delta p_1$ ;

$\gamma_{\Delta p_2}$  - относительная погрешность измерения давления  $\Delta p_2$ ;

$\gamma_Q$  - относительная погрешность измерения расхода системы.

Учитывая, что оба датчика перепада давления имеют одинаковые характеристики, последняя формула преобразуется в

$$\gamma_Q = \sqrt{(\gamma_q)^2 + 0,5 \left( \frac{Q}{q} - 1 \right)^2 (\gamma_{\Delta p})^2}. \quad (5)$$

По формуле (5) построим зависимости  $\gamma_Q = f\left(\frac{Q}{q}\right)$ , задавшись значениями для датчиков перепада давления  $\gamma_{\Delta p} \in (0,075; 0,15; 0,2; 0,25; 0,5; 1,5; 2,5)$ .

Как видно из рис. 4 при увеличении отношения расходов растет погрешность системы. Также из рисунка видно, что лучше работать с датчиками высокого класса точности. С полной уверенностью можем сказать, что на производстве при коммерческом учете расхода газа пользуются высокоточными датчиками перепада давления с погрешностью, которая не превосходит 0,15 %, поэтому в качестве рабочих можем выбрать кривые для значений погрешности датчиков перепада давления 0,075; 0,15; 0,2.

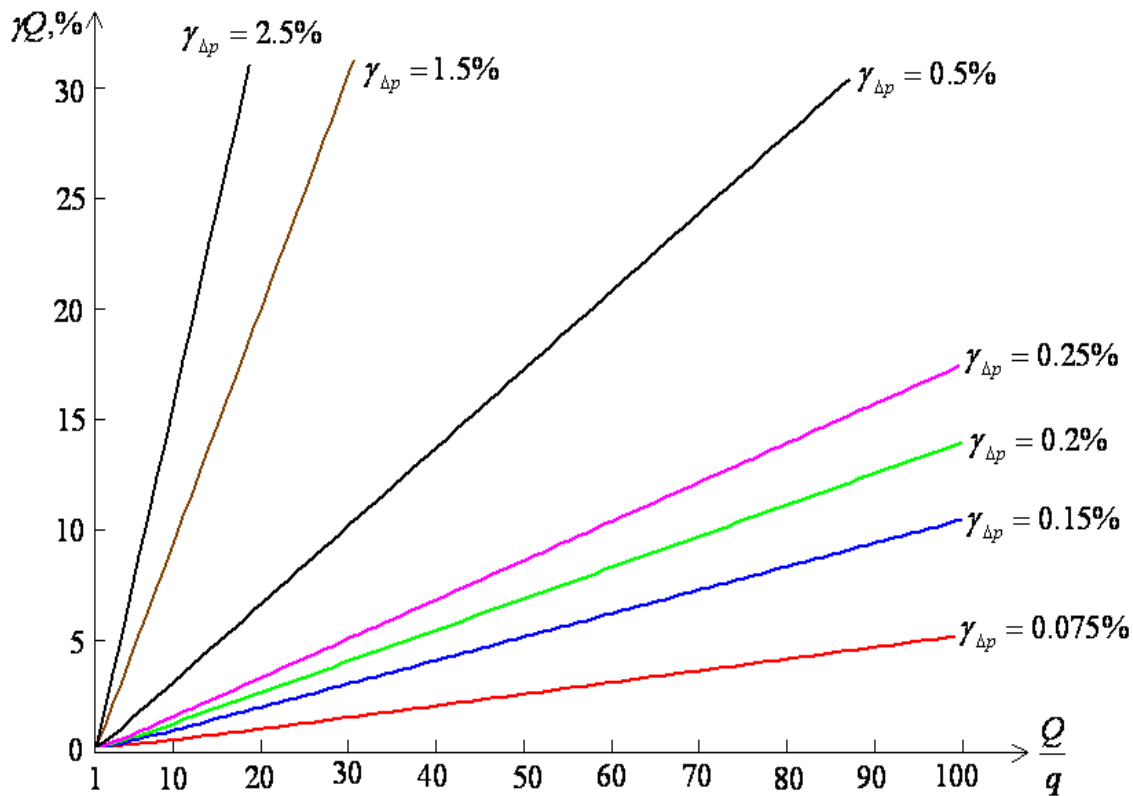


Рисунок 4. Зависимость  $\gamma_Q = f(\frac{Q}{q})$

Задавшись максимально допустимой погрешностью измерения расхода при коммерческом учете расхода газа при известном максимальном расходе турбинного расходомера, можем найти предельное значение  $Q$ .

Приведем пример работы системы измерения расхода с турбинным расходомером компании «ELSTER» серии TRZ G16000. Расходомер устанавливается на измерительный трубопровод с диаметром  $D_y = 600$  мм. Расходомер характеризуется максимальным часовым расходом  $q_{\max} = 25000$  м<sup>3</sup>/ч и погрешностью измерения  $\gamma_q = 0,25$  %.

При коммерческом учете расхода жидкостей и газов требуется достижение погрешности 0,5 – 1 % [1].

Учитывая все выше сказанное, найдем наибольшее значение расхода системы при использовании расходомера «ELSTER».



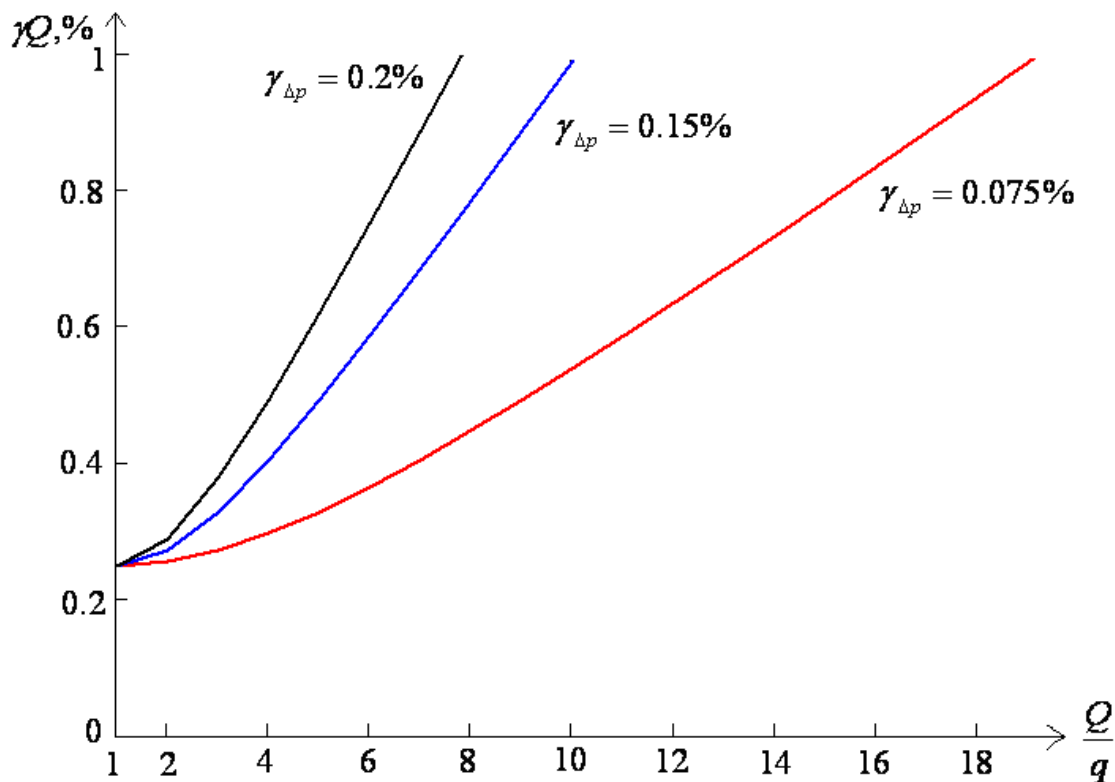


Рисунок 5. Зависимость  $\gamma_Q = f(\frac{Q}{q})$

На рис. 5 видно, что при погрешности системы  $\gamma_Q = 1\%$  для датчика перепада давления с  $\gamma_{\Delta p} = 0,15\%$  отношение расходов равно 10. Отсюда максимальное значение  $Q = 250000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для датчика с  $\gamma_{\Delta p} = 0,2\%$  отношение  $Q/q$  составляет 8, а расход –  $200000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для датчика перепада давления с погрешностью  $\gamma_{\Delta p} = 0,075\%$  при погрешности системы равной  $\gamma_Q = 1\%$  отношение расходов составляет 19. Это означает, что максимальный расход системы будет равен  $Q = 475000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Влияние погрешностей измерения перепада давлений  $\gamma_{\Delta p1}$  и  $\gamma_{\Delta p2}$  можно существенно уменьшить. Для этого следует закрыть краны Кр1 и Кр2 и провести коррекцию преобразователей так, чтобы  $\Delta p_1 = \Delta p_2$ , после этого можно утверждать, что  $\gamma_{\Delta p1} = \gamma_{\Delta p2}$ . Далее краны открываются и система переводится в режим измерения. В этом случае, как видно из выражения (4), погрешность измерения расхода  $\gamma_Q$  будет определяться только погрешностью турбинного расходомера  $\gamma_q$  независимо от отношения  $Q/q$ .

Коррекцию можно проводить автоматически, управляя кранами и внося с помощью вычислителя некоторый поправочный коэффициент. В промежутках между коррекциями относительные погрешности могут несколько измениться, однако это расхождения будут небольшими. Предположив, что  $\gamma_{\Delta p I} \cdot \gamma_{\Delta p I} = 0,1 \gamma_{\Delta p}$ , получим из выражения (4):

$$\gamma_Q = \sqrt{(\gamma_q)^2 + 0,25 \left( \frac{Q}{q} - 1 \right)^2 \left[ (0,1 \gamma_{\Delta p})^2 \right]}. \quad (6)$$

Построим зависимость  $\gamma_Q = f\left(\frac{Q}{q}\right)$  для различных значений классов точности датчика перепада давления по последнему уравнению.

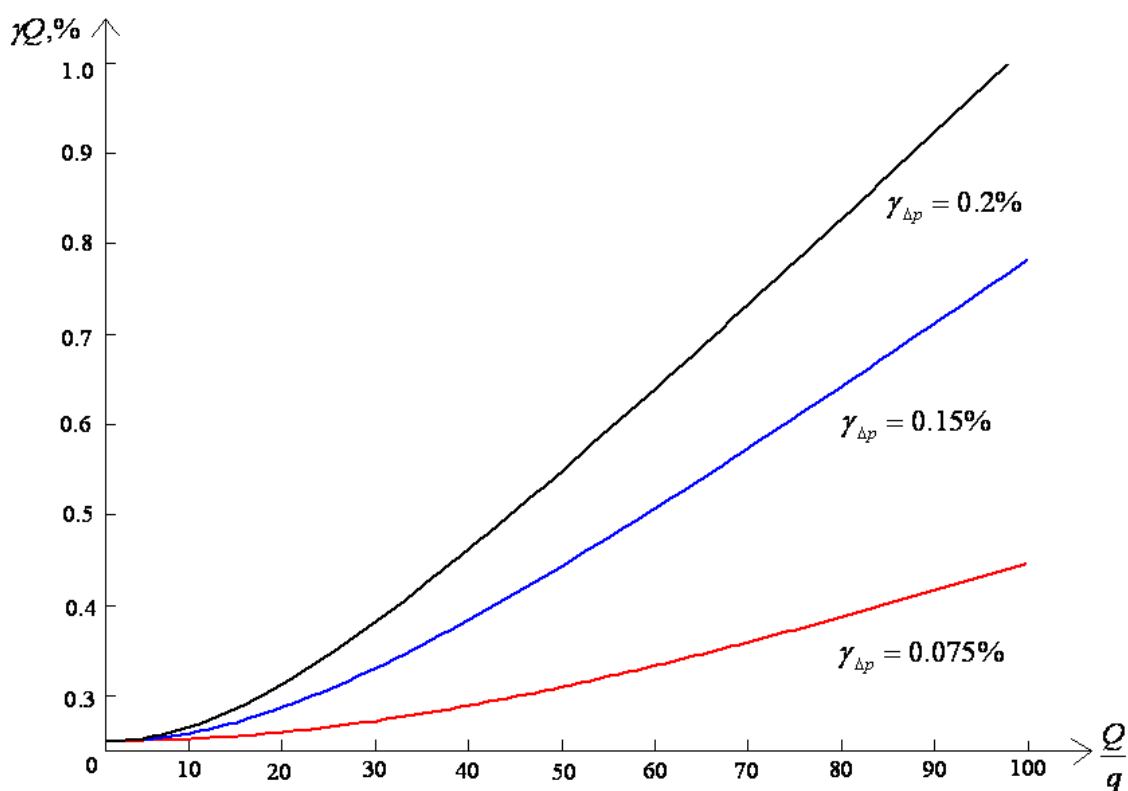


Рисунок 6. Зависимость  $\gamma_Q = f\left(\frac{Q}{q}\right)$ , построенная по (6)

Из рисунка 6 видно, что при проведении коррекции погрешности датчиков перепада погрешность всей системы измерения расхода существенно снижается. Резко увеличивается отношение расходов, что способствует применению при коммерческом учете датчиков перепада давления с низкими классами точности.

Если на рис. 3 мы видим, что датчики с погрешностями  $\gamma_{\Delta p} = 0,2\%$  дают очень малое отношение расходов  $Q/q = 8$ , то на рис. 6 мы видим, что при предельной погрешности для коммерческого учета равной  $\gamma_Q = 1\%$  отношение расходов  $Q/q$  для датчика с  $\gamma_{\Delta p} = 0,2\%$  составляет примерно 100, что позволяет значительно расширить пределы измерения до  $25 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$  с использованием турбинного расходомера, у которого предельное значение расхода равно  $q_{\max} = 25 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$  и погрешность  $\gamma_q = 0,25\%$ .

### Выводы

Система, предложенная в статье, позволяет проводить измерения расхода газа, не учитывая коэффициент истечения, т.е. метод, позволяет устранить влияние различных возмущающих воздействий, которые искажают действительное значение коэффициента истечения.

Данный метод использует элементы теории инвариантности и элементы теории парциальных расходомеров.

Показана возможность снижения погрешности измерения расхода путем коррекции погрешности датчиков перепада давления.

Приводится анализ погрешности измерения расхода системы и даны рекомендации по определению максимального измеряемого расхода.

### Литература

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн.1. Спб.: Политехника, 2002. - 409 с.
2. Петров Б.Н., Викторов В.А., Лункин Б.В. и др. – Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976. 246 с.
3. ГОСТ 8.586.1,2 – 2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007.
4. Алланиязов Х. Исследование изменения остроты входной кромки диафрагмы в процессе эксплуатации // Измерительная техника, 1972. №2.