

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА

Даев Ж.А.

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

*В статье рассмотрены основные методы измерения расхода газа. Сделан сравнительный анализ методов измерения расхода газа. Рассматриваются технические характеристики средств измерения расхода ведущих производителей.*

*Ключевые слова: газ, расход газа, сужающие устройства, турбинные расходомеры, ультразвуковые расходомеры*

Одной из важнейших задач в газовой промышленности является измерение расхода газа. Система учета количества веществ невозможна без средств измерения расхода, которые основаны на различных методах измерения расхода.

В настоящее время техника измерения расхода газа неплохо развита, но тем не менее применяемые методы не без изъянов, а к предлагаемым альтернативным методам специалисты на производстве относятся с осторожностью. Поэтому ставится цель сравнить и проанализировать работу приборов, применяемых для задач измерения расхода (количества) газа на производстве.

### 1. Методы измерения расхода газа и его количества

На объектах газовой промышленности расход газа и его количество измеряют в основном методом переменного перепада давления на сужающем устройстве, при помощи тахометрических расходомеров и счетчиков, а так же в последнее время активно внедряются ультразвуковые расходомеры.

Рассмотрим достоинства и недостатки каждого из перечисленных методов.

Одним из самых распространенных методов измерения расхода является метод переменного перепада давления. Суть метода состоит в измерении перепада давления, до и после сужающего устройства, установленного в потоке газа. Процесс измерения расхода описывается следующим уравнением:

$$Q = CE\varepsilon F_0 \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (1)$$

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

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

$$\rho = \frac{293,15 p p_c}{10^5 (T + 273,15) K} \text{ – плотность;}$$

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

$E$  – коэффициент скорости входа, учитывающий влияние начальной скорости потока на образование коэффициента расхода  $\alpha$  ;

$\rho_c$  – плотность при стандартных условиях;

$p$  – абсолютное давление;

$T$  – температура;

$K$  – коэффициент сжимаемости;  $C$  – коэффициент истечения, представляющий собой отношение действительного расхода к теоретическому.

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

Согласно [1], [2] погрешность измерения расхода зависит от погрешностей определения коэффициента истечения, коэффициента расширения, измерения перепада давлений, плотности, средств измерения температуры и абсолютного давления. Согласно [1] погрешность коэффициента истечения при нулевых значениях погрешности определения абсолютного давления, диаметра и коэффициента шероховатости составляет:

$$\delta_c = \pm 0,6 \text{ при } \beta \leq 0,6 ,$$

$$\delta_c = \pm \beta \text{ при } \beta > 0,6 .$$

где  $\beta$  – относительный диаметр сужающего устройства.

Согласно [3] при использовании уравнения Риддера-Харриса/Галлахера погрешность коэффициента истечения значительно ниже.

Погрешность определения коэффициента расширения напрямую зависит от отношения измеряемого перепада давлений к значению абсолютного давления и согласно [1] выражается как

$$\delta_\varepsilon = \pm 4 \frac{\Delta p}{p} \text{ при } \beta \leq 0,75 . \quad (2)$$

Общая же погрешность измерения расхода может быть выражена следующим уравнением:

$$\delta_Q = \left\{ \delta_{K_q}^2 + \delta_C^2 + \delta_{K_{ш}}^2 + \delta_{K_{п}}^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \delta_D^2 + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \delta_d^2 + \delta_\varepsilon^2 + 0,25 \left( \delta_{\Delta p}^2 + \delta_p^2 + \delta_T^2 + \delta_K^2 + \delta_{\rho_c}^2 \right) \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\delta_{K_q}$  – погрешность вычисления,  $\delta_C$  – погрешность коэффициента истечения,  $\delta_{K_{ш}}$  – погрешность поправочного коэффициента на шероховатость,  $\delta_{K_{п}}$  – погрешность поправочного коэффициента на притупление входной кромки,  $\delta_D$  – погрешность измерения внутреннего диаметра измерительного трубопровода,  $\delta_d$  – погрешность измерения диаметра диафрагмы,  $\delta_\varepsilon$  – погрешность коэффициента расширения,  $\delta_{\Delta p}$  – погрешность измерения перепада давлений,  $\delta_p$  – погрешность измерения абсолютного давления,  $\delta_T$  – погрешность измерения температуры,  $\delta_K$  – погрешность определения коэффициента сжимаемости газа,  $\delta_{\rho_c}$  – погрешность определения плотности газа.

В [2] формула (3) выражается в неопределенностях.

Как видно из (1), (2) и (3), погрешность измерения расхода сильно зависит от погрешностей применяемых средств измерения перепада давлений, абсолютного давления и температуры.

Другим классом широко применяемых на производстве средств измерения расхода являются тахометрические расходомеры, принцип действия которых основан на зависимости скорости вращения преобразователя, установленного в трубопроводе от расхода вещества. Раньше расходомеров появились счетчики, у счетчиков вал преобразователя расхода через редуктор связан со счетным механизмом, что позволяло измерять количество прошедшего вещества. Достоинствами таких приборов являются быстрое действие, высокая точность, большой диапазон измерений.

Погрешность счетчиков составляет  $\pm 0,5 - 1,5 \%$ , использование тахометрических преобразователей позволяет снизить погрешность преобразования расхода в частоту вращения преобразователя до  $\pm 0,3 \%$ .

Основной недостаток тахометрических расходомеров – износ опор, наличие подвижных элементов и основной недостаток, по отношению к расходомерам

с сужающими устройствами, - необходимость в поверочных установках.

Помимо описанных выше расходомеров, на производстве начали интенсивно внедряться ультразвуковые расходомеры.

Ультразвуковой метод измерения расхода основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой [4].

Метод характеризуется следующими негативными факторами [5]:

— зависимость собственной скорости ультразвуковых колебаний от физико-химических свойств измеряемой среды;

— скорость потока осредняется вдоль ультразвукового пучка, а не по сечению трубы.

Последний фактор заставляет разработчиков снабжать конструкцию дополнительными датчиками или отражателями, что делает расходомер более сложным, возрастает вероятность ошибки работы при выходе из строя датчиков системы. Тем не менее, у данного метода есть ряд достоинств:

1. отсутствие перепада давлений,
2. высокое быстродействие;
3. отсутствие подвижных элементов.

Перечислим основные погрешности, которые возникают при использовании данного метода [6]:

- погрешности, вызванные отклонением температуры и концентрации среды;
- погрешности из-за несимметричности акустического канала;
- ревербационные, обусловленные наличием отражений ультразвуковых волн от поверхностей датчиков;
- гидродинамические, обусловленные отклонением профиля скоростей потока от расчетного.

## **2. Анализ промышленных приборов измерения расхода газа и его количества**

На производстве применяется огромное количество расходомеров и счетчиков, которые реализуют перечисленные выше методы измерения. Ниже будут рассмотрены средства измерения различных производителей.

## 2.1. Средства измерения расхода на основе метода переменного перепада давления

Рассмотрим средства измерения, которые применяются для реализации метода переменного перепада давления.

На производстве при реализации метода переменного перепада давления пользуются различными средствами измерения перепада давления и абсолютного давления, парк данных приборов довольно широк. Применяемые средства измерения температуры так же разнообразны.

Попытаемся оценить влияние средств измерения перепада давления и абсолютного давления на погрешность измерения расхода на примере датчиков фирмы «Fisher-Rosemount».

Датчики давления и перепада давления, модель 3051, 1151:

1. диапазон измерений: 0 – 62,2 кПа; 0 – 248 кПа; 0 – 2070 кПа;
2. диапазон рабочих температур: -40/+150 °С;
3. основная погрешность измерений:  $\pm 0,075$  % от диапазона;
4. межповерочный интервал: 1 год.

Сделаем расчет погрешности определения расхода газа для датчиков модели 3051 по формуле (3). Погрешности  $\delta_{Kq}, \delta_C, \delta_{Kш}, \delta_{Kn}, \delta_D, \delta_d, \delta_e, \delta_{\rho_e}, \delta_K$  примем равными нулю, потому что они зависят от геометрии измерительного узла и состава газа. Погрешность измерения температуры примем равной 0,1 %. Составляющая погрешности, обусловленная измерениями основных параметров метода будет равна:

$$\left[0,25(\Delta P^2 + P^2 + T^2)\right] = \left[0,25(0,075^2 + 0,075^2 + 0,1^2)\right]^{1/2} = \sqrt{0,0053125} = 0,073\%$$

Как видно из вышенаписанного при применении высокоточных средств измерения данный метод дает неплохие результаты относительно погрешности измерения расхода.

На сегодняшний день для вычисления расхода применяются высокоточные вычислители расхода различных производителей, среди них такие как: Супер-Флоу-ПЕ, контроллеры расхода FloBoss 407, FloBoss 103, FloBoss S600, вычислители УВП-280А и т.п.

Перечисленные приборы обеспечивают точность вычисления расхода не хуже 0,25 – 0,5 %, в то время как раньше погрешность измерения в 1,5 – 2 % считалась приемлемой [4].

Также нужно отметить, что данный метод применим для очень большого диапазона диаметров измерительных трубопроводов. Согласно [2] диаметр измерительного трубопровода лежит в диапазоне  $0,05 м \leq D \leq 1,00 м$ .

Метод переменного перепада давления довольно хорошо изучен, имеется богатая экспериментальная база коэффициентов расхода для различных значений относительного диаметра и чисел Рейнольдса, неплохо развита нормативная база, продолжаются работы по устранению проблем, связанных с применением метода.

## 2.2. Средства измерения расхода тахометрическим методом

На производстве для измерения расхода и количества вещества тахометрическим методом применяются приборы различных производителей, это счетчики таких фирм как счетчики типа «ТУРГАЗ», «Schlumberger», «Smith Meter», «ELSTER» и т.д. Приборы данного класса представляют собой целые измерительные комплексы для коммерческого учета количества газа, такие как СГ-ЭК на базе турбинного счетчика СГ-ЭК-Т или на базе ротационного счетчика СГ-ЭК-Р. Данные комплексы обеспечивают хранение среднечасовых значений рабочего и стандартного объема, хранение среднечасовых значений давления и температуры, вычисление коэффициента сжимаемости газа по методам, описанным в ГОСТ 30319-96. Погрешность комплексов не превышает 1,5 %.

Рассмотрим характеристики приборов следующих фирм.

«**Schlumberger**». Счетчики и расходомеры этой компании характеризуются широким диапазоном давлений, от 0,6 до 10 МПа, динамическим диапазоном  $Q_{min} / Q_{max}$ , который достигает величины 1:50 и диаметрами условного прохода от 40 до 400 мм и выше. К примеру, погрешность ротационного счетчика Delta лежит в пределах  $\pm 2\%$  при расходе газа от  $Q_{min}$  до  $0,2Q_{max}$  и  $\pm 1\%$  от  $0,2Q_{max}$  до  $Q_{max}$ . В целом погрешность измерения для «рабочих» значений расхода не превосходит  $\pm 1\%$ .

«**Smith Meter**». Данная компания выпускает турбинные расходомеры с частотным выходным сигналом. Диаметр условного прохода лежит в пределах от

25 мм до 500 мм, динамический диапазон измерений составляет 1:30. Погрешность измерения составляет 0,5 % – 1,0 %. Для некоторых моделей достигает 0,25 %.

«**ELSTER**». Компания выпускает как турбинные счетчики газа так и ротационные. Динамический диапазон измерений турбинных счетчиков достигает отношения 1: 10, 1:20, а диапазон ротационных счетчиков серии RVG достигает 1:100. Погрешность измерений не превышает 1 % в диапазоне расходов от  $0,1Q_{\max}$  до  $Q_{\max}$  и 2 % в диапазоне расходов от  $Q_{\min}$  до  $0,1Q_{\max}$ . У компании имеются разработки для измерения больших расходов на больших диаметрах. Приборы серии TRZ рассчитаны на турбинные счетчики газа больших типоразмеров с условными диаметрами от 250 до 600 мм, которые позволяют измерять часовой расход  $25000 \text{ м}^3/\text{ч}$  при рабочем давлении до 10 МПа.

### 2.3. Ультразвуковые расходомеры

Что касается ультразвуковых расходомеров, то на данный момент существует огромное количество компаний, занимающихся разработкой ультразвуковых расходомеров, перечислим и рассмотрим их характеристики.

«**Krohne**». Данная компания выпускает несколько видов расходомеров: серия UFM, серия Altosonic, серия GFM, Optisonic 7060.

Расходомеры Altosonic III характеризуются погрешностью  $\pm 0,3 \%$  от измеряемой величины, а погрешность Altosonic V составляет  $\pm 0,15 \%$  от измеряемой величины. Динамический диапазон измерений 1:100. Диапазон диаметров составляет от 100 мм до 1000 мм. Римские цифры V и III говорят о количестве акустических каналов.

Расходомеры серии GFM обычно применимы для газов, они являются двухлучевыми, что делает их менее точными. Погрешность  $\pm 2 \%$  от измеряемой величины. Данные расходомеры могут монтироваться практически на любые диаметры измерительных трубопроводов, и рассчитаны на давления до 4,0 МПа.

Расходомер Optisonic 7060 является прибором, разработанным для измерения расхода газа. Предназначен для условных диаметров от 50 мм до 600 мм. Динамический диапазон измерений составляет 1:30. диапазон давлений до 10,3 МПа. Основная погрешность измерения в диапазоне от  $Q_{\min}$  до  $0,1Q_{\max}$

составляет менее  $\pm 1\%$  для двухканального исполнения и менее  $\pm 2\%$  для одноканального исполнения. Требуется прямой участок измерительного трубопровода до прибора равный  $10D$  и после  $5D$ .

«**Emerson Process Management**». Данная компания выпускает расходомеры серии SeniorSonic и JuniorSonic. Диапазон диаметров составляет от 100 до 1050 мм. Диапазон давлений до 40 МПа. Расходомеры выполнены в четырехканальной конструкции, погрешность  $\pm 0,35\%$  от измеряемой величины для расходомеров SeniorSonic и  $\pm 1,5\%$  для JuniorSonic, которые являются двухканальными.

«**RMG gas technologies**». Эта компания выпускает расходомеры серии RMG USZ 08. Расходомеры выпускаются в шестиканальном исполнении. Диапазон давлений до 25 МПа. Погрешность не ниже  $\pm 0,1\%$ . Динамический диапазон измерений 1:30. Требуется прямой участок измерительного трубопровода до прибора равный  $10D$  и после  $5D$ . Расходомеры могут монтироваться практически на любые диаметры измерительных трубопроводов.

«**SickMaihack**». Расходомеры данной компании выпускаются под серией FlowSic. FlowSic-100 являются, как правило, одноканальными. Предназначены для измерения расхода газа давлением до 16 бар. Диапазон диаметров измерительного трубопровода от 0,14 до 13 метров. Относительная погрешность приборов достигает  $\pm 1\%$  от измеряемой величины. Допустимая температура измеряемой среды до  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расходомеры FlowSic-600 выпускаются в одно-, двух- и четырехканальном исполнении. Соответственно погрешность измерения составляет  $\pm 2\%$ ,  $\pm 1\%$  и  $\pm 0,5\%$ . Динамический диапазон 1:50. Максимальное давление 45 МПа.

Помимо вышеописанных производителей ультразвуковых расходомеров существует огромное количество фирм, которые выпускают приборы данного класса. Характеристики многих аналогичны друг другу, и автор считает, что вышеописанный небольшой перечень отражает результаты, достигнутые в данной области.

Проанализировав вышенаписанное, можно сделать вывод, что применение тахометрических расходомеров, в отличие от расходомеров с сужающими устройствами и ультразвуковых, ограничено диапазоном диаметров, т.к. при увеличении условного прохода растет погрешность измерения расхода. Документы [1] и [2]



накладывают ограничение на применение расходомеров с сужающими устройствами для диаметров выше 1000 мм, и единственным оптимальным методом измерения расхода на больших диаметрах является ультразвуковой метод измерения расхода. Применение накладных чувствительных элементов делает данный метод очень удобным с точки зрения монтажа и эксплуатации.

С точки зрения нормативной и экспериментальной базы, расходомеры с сужающими устройствами являются наиболее развитыми. Основные принципы довольно хорошо изучены и совершенствуются. Существует огромное количество публикаций, огромное количество экспериментальных данных, различных ГОСТ и МВИ, делающих данный метод эффективным. Этого нельзя сказать о тахометрическом и ультразвуковом методах измерения расхода, хотя и имеется большое количество научных публикаций. На сегодняшний день основным официальным документом, который нормирует применение ультразвуковых расходомеров, является ISO/TR 12765:1998. Большинство нормативных документов по применению турбинных средств измерения расхода посвящены измерению расхода воды (жидкостей).

Точность измерения ультразвуковых расходомеров является пока не высокой для одно- и двухканальных исполнений. Для увеличения точности требуется увеличение количества акустических каналов. Увеличение количества акустических каналов влечет за собой увеличение стоимости и снижает надежность системы из-за большего числа электроакустических преобразователей.

Погрешность расходомеров с переменным перепадом давления сегодня может быть не хуже  $\pm 0,5\%$ , а погрешность тахометрических расходомеров и счетчиков не очень высокого класса составляет 1%, в то время как погрешность тахометрических расходомеров высокого класса не хуже 0,2%. Поэтому «доверие» к методу переменного перепада давления и тахометрическим методам измерения расхода при коммерческом учете больше, чем ультразвуковому методу.

Динамический диапазон измерений у тахометрических и ультразвуковых расходомеров шире, чем у расходомеров переменного перепада давления. Диапазон давлений у ультразвуковых расходомеров шире, чем у двух других методов.

Необходимость дорогостоящих эталонных установок для поверки тахометрических и ультразвуковых расходомеров повышает стоимость их эксплуатации по сравнению с расходомерами с сужающими устройствами.

### **Выводы**

1. Сравнительный анализ средств измерения расхода и количества газа позволяет утверждать, что пока оптимальным способом измерения расхода и количества газа в газовой промышленности является метод переменного перепада давления.

2. Из анализа приборов применяемых для реализации метода переменного перепада давлений видно, что погрешности датчиков перепада давления, абсолютного давления и температуры, а так же вычислителей находятся в пределах от 0,01 до 0,075 %, и удовлетворяют нормативным документам.

### **Литература**

1. ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. – ИПК, Изд-во стандартов, 1998.

2. ГОСТ 8.586.1-5–2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007.

3. Пистун Е.П., Лесовой Л.В. Уточнение коэффициента истечения стандартных диафрагм расходомеров переменного перепада давления // Датчики и системы. – 2005. – №5. С. 14-16.

4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. СПб.: Политехника, 2002. 410с.

5. Бобровников Г.Н., Новожилов Б.М., Сарафанов В.Г. Бесконтактные расходомеры. М.: Машиностроение, 1985. 128с.

6. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. М.: Металлургия, 1964. 382с.