

УДК 681.2.082

## ВЫБОР СРЕДСТВА ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАСХОДОВ ГАЗА

<sup>1</sup>Высочкин А.В., <sup>2</sup>Портнов Е.М., <sup>3</sup>Теплова Я.О., <sup>2</sup>Николаев А.В., <sup>2</sup>Слюсарь В.В.<sup>1</sup>ООО «Импортмеханика», Москва, e-mail: av@importmekhanika.ru;<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, e-mail: evgen\_uis@mail.ru;<sup>3</sup>ООО «Аспромт», Москва, e-mail: yana.teplova@gmail.com

Современный этап развития высокотехнологических отраслей промышленности, прежде всего микро- и нанозлектроники, энергетики и других характеризуется устойчивой тенденцией, связанной с повышенными требованиями к параметрам процесса учета расхода газов и газообразных смесей для трубопроводных систем. Указанные проблемы особенно актуальны как для предприятий, обеспечивающих транспортировку газа, так и для газовых операторов, занимающихся распределением и реализацией газа. Необходимо подчеркнуть, что необходимость повышения точности измерений расхода газа во многом обусловлена и низкими метрологическими свойствами соответствующего оборудования, особенно отечественного, которое не обеспечивает с требуемой точностью возможность контроля и передачи единиц измерения расхода, не гарантируя стабильные основные нормируемые точностные характеристики, а также динамический диапазон измерения расхода газа в области микрорасходов. В ходе проведенного анализа были выделены основные требования, предъявляемые к устройствам измерения и дозирования малых и сверхмалых расходов газа и газообразных веществ, к которым можно отнести высокую прецизионность измерений; возможность измерения расхода в широком динамическом диапазоне; стойкость к агрессивным средам; надежность, низкие массогабаритные размеры. Сравнительный анализ технических характеристик, достоинств и недостатков различных методов позволил установить, что наиболее эффективным будет являться устройство, основанное на меточном методе измерения с использованием тепловых и жидкостных меток.

**Ключевые слова:** расходомер, точность измерений, перепад давления, метка, поверхностно-активное вещество

## THE CHOICE OF PRECISION MEASUREMENT SMALL GAS CONSUMPTION

<sup>1</sup>Vysochkin A.V., <sup>2</sup>Portnov E.M., <sup>3</sup>Teplova Ya.O., <sup>2</sup>Nikolaev A.V., <sup>2</sup>Slyusar V.V.<sup>1</sup>Importmekhanika LLC, Moscow, e-mail: av@importmekhanika.ru;<sup>2</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow, e-mail: evgen\_uis@mail.ru;<sup>3</sup>Aspromt LLC, Moscow, e-mail: yana.teplova@gmail.com

Nowadays the high-tech industries (specifically micro- and nanoelectronics, as well as energetic) stage of development is characterized by a steady trend of increasing the requirements for pipeline systems gases and gaseous mixtures flow register and control parameters. These tasks are especially topical for the facilities, providing gas transportation, as well as gas distributing and selling companies. It is essential that the necessity of the gas flow measurement accuracy improvement is largely conditioned by poor metrological properties of the equipment (especially of domestic production), that does not provide the required accuracy of controlling and transferring the flow measurement and does not guarantee the stability of the critical accuracy characteristics as well as the dynamic range of gas flow micro expenses measurement. In the course of the analysis the main requirements for small and ultra-small gas and gaseous substances expenses measurement devices were specified. These include high precision level of measurements; possibility of flow measurement in a wide dynamic range; resistance to aggressive environments; reliability and low weight and size. It was found by using a comparative analysis of the technical characteristics, advantages and disadvantages of different methods, that a device using a labeling measuring method based on thermal and liquid labels, will be the most efficient one.

**Keywords:** flowmeter, the measurement accuracy, differential pressure, label, surfactant

Современный уровень развития науки и технологий во многих отраслях промышленности выдвигает на первый план проблемы, связанные с контролем и измерением расхода различных веществ, которые находятся в газообразном состоянии. Результаты аналитических исследований, которые были проведены специалистами стран Западной Европы и Соединенных Штатов Америки, показали, что измерение расхода входит в пятерку наиболее измеряемых физических величин [1–3]. В настоящее время известны и широко используются значительное количество методов и средств измерения малых расходов газообразных

веществ, к которым можно отнести технологии, основанные на методе переменного перепада давления, широко используемые в системах коммерческого учета газа, и заканчивая устройствами на основе эффекта Физо-Френеля. Последние устройства функционируют на основе измерения сдвига интерференционных полос, связанного с зависимостью скорости света и скорости движущегося прозрачного вещества.

Вместе с тем в настоящее время наиболее распространены следующие методы измерения малых и сверхмалых расходов газообразных веществ: метод, основанный на переменном перепаде давления (ППД);

тахометрический метод; метод обтекания; метод с использованием жидкостных и тепловых меток; оптический метод и ряд других.

Цель исследования: выбор по результатам анализа наиболее эффективного метода и структуры устройства для прецизионного измерения малых и сверхмалых расходов газа на основе выявленных технико-экономических требований, включая высокую прецизионность измерений; возможность измерения расхода в широком динамическом диапазоне; стойкость к агрессивным средам; надежность, низкие массогабаритные размеры.

### Материалы и методы исследования

Далее были проанализированы основные методы измерения малых и сверхмалых расходов газообразных веществ, которые представлены ниже.

Для метода измерения расхода газообразных веществ на основе переменного перепада давления с учетом законов сохранения массы энергии и уравнений неразрывности можно получить следующую формульную зависимость для определения расхода [3–5]:

$$Q_{\text{пнд}} = \beta \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta p}, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр устройства сужения;  $\Delta p$  – величина перепада давления на устройстве сужения,  $\beta$  – коэффициент измерения расхода;  $\rho$  – плотность среды измерения;  $\varepsilon$  – поправка, связанная с изменением плотности среды.

В соответствии с формульной зависимостью (1) можно сделать вывод о зависимости массового расхода газа от его свойств, параметров потока и геометрических размеров устройства сужения. Необходимо подчеркнуть степенную зависимость между величинами массового расхода и перепадом давления.

Кроме того, к недостаткам расходомеров, основанных на методе переменного перепада давления, можно отнести загрязнение и эрозию, которые приводят к снижению точности измерений вследствие возникающих погрешностей, обусловленных изменениями геометрических параметров устройства сужения прибора [6]. В соответствии с постулатами газовой динамики, если перепад давления на устройстве сужения превышает некоторое критическое значение, то скорость потока газа достигает значения скорости звука, после чего остается неизменной и не зависит от увеличения давления [2, 4, 7]. При этих условиях значение массового расхода газа можно определить по следующей формуле:

$$Q^*_{\text{пнд}} = \frac{S_{\text{кр}} k_{\text{кр}} P}{\sqrt{T}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{кр}}$  – площадь потока газа для критического сечения,  $P$  – давление газа,  $T$  – температура торможения,  $k_{\text{кр}}$  – коэффициент градуировки для устройства сужения.

Минимальное значение погрешности измерения, которая обеспечивается расходомерами на основе переменного перепада давления, может составлять от 1% до 3%.

Для ротаметров формульная зависимость для вычисления массового расхода газа может быть получена при совместном решении уравнения Бернулли с уравнением неразрывности [4]:

$$Q_{\text{ртим}} = \alpha_0 \cdot f_k \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} - 2gl}, \quad (3)$$

где  $l$  и  $\alpha_0$  являются коэффициентами расхода ротаметра;  $g$  – значение ускорения свободного падения;  $f_k$  – величина площади кольцевого отверстия,  $p_1$  и  $p_2$  – величины давления в начале и конце трубопровода.

Представленная формульная зависимость является идентичной и для расходомера с устройством сужения, устанавливаемым на вертикальном трубопроводе.

С учетом величины перепада давления, равной  $p_1 - p_2$ , а также принимая коэффициент расхода постоянным и опуская величину силы трения газа о боковую поверхность, имеем

$$Q_{\text{ртим}} = \alpha_0 \cdot f_k \sqrt{\frac{2gV(\rho_n - \rho)}{\rho f}}, \quad (4)$$

где  $f$  – величина наибольшего поперечного сечения;  $V$  – объем поплавка,  $\rho_n$  – плотность материала поплавка.

Полученная формульная зависимость (4) не может быть использована для расчетов массового расхода газа, вследствие неизвестности коэффициента  $\alpha_0$  и зависимости его от многих факторов. Достоинствами ротаметров являются: несложная конструкция устройства, достаточно широкий динамический диапазон измерений, равномерность шкалы и возможность использования в агрессивных средах. Значение приведенной погрешности ротаметра, как правило, не превышает 2%.

Для тахометрического метода измерения расхода газа существует прямая пропорциональность между объемным расходом и скоростью вращения турбины, которая определяется исходя из количества оборотов в единицу времени [4, 6, 8]:

$$n = f(Q_{\text{мх}}, \nu, \rho, M_c, l, D, d_H, d_B, z, T), \quad (5)$$

где  $Q_{\text{мх}}$  – величина объемного расхода газа,  $\rho$  – плотность среды измерения;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды,  $D$  – диаметр трубопровода расходомера;  $M_c$  – момент трения в подшипниках тахометра;  $d_H$  и  $d_B$  – величины наружного и внутреннего диаметров лопастей турбины,  $T$  – шаг винтовой линии,  $z$  – количество лопастей,  $l$  – осевая длина лопастей.

В соответствии с формульной зависимостью (5), скорость вращения турбины определяется многими геометрическими, конструктивными и физическими параметрами, что приводит к усложнению процесса и снижению точности метода измерения. Турбинный метод измерения расхода газа недостаточно широко применяется на практике, поскольку малая плотность газа приводит к незначительному движущему моменту. Величина погрешности измерения расхода газа для турбинного метода составляет от 0,1 до 2%.

Для калориметрического метода измерений массовый расход газа зависит от распределения температур вдоль нагревательного элемента, потери тепла во внешнюю среду, а также свойств среды измерения и скорости потока газа. Для данного метода измере-

ния формульная зависимость между массовым расходом газа и разностью температур выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{ккм}} = \frac{1}{\beta_{\text{лч}} \beta_{\text{окр}} \beta_{\text{тем}}} \frac{W}{\Delta T}, \quad (6)$$

где  $W$  является мощностью нагревателя,  $\Delta T$  – разность температур,  $\beta_{\text{тем}}$ ,  $\beta_{\text{окр}}$ ,  $\beta_{\text{лч}}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения температуры для сечения, тепловые потери в окружающей среде, а также нагрев от лучеиспускания соответственно.

Поскольку величина массового расхода газа через трубопровод во многом определяется поправочными коэффициентами, то ее величину удобно находить с помощью эмпирических градуировочных кривых [5, 7]. В соответствии с теоретическими расчетами, общая относительная погрешность измерения для данного типа расходомеров будет составлять порядка 0,3–1 %.

Измерения расхода газа и газообразных смесей с помощью тепловых или жидкостных меток основано на инжектировании метки, движущейся по калиброванному сечению трубопровода потока газа [1, 4]. Далее под действием потока газа метка сносится вниз по течению, где на контрольном участке длиной  $L$  посредством измерения времени – времени прохождения контрольного (базового) участка между двумя реперными точками определяется ее скорость  $v$ :

$$v = L/t.$$

Исходя из того, что объемный расход газа  $Q$  связан со скоростью потока  $v$  через поперечное сечение трубопровода  $S$ , можно в первом приближении определить искомую величину:

$$Q_{\text{мет}} = vS.$$

С учетом постоянности геометрических размеров  $S$  и  $L$  для трубопроводов меточных расходомеров, которые определяют контрольный объем в соответствии с выражением

$$V = SL = \text{const},$$

получим формульную зависимость для определения объемного расхода, которую можно свести к расчету времени  $t$ .

$$Q = \frac{SL}{t} = \frac{V}{t} = \frac{\pi d^2 L}{4t}. \quad (7)$$

Анализируя формульную зависимость (7), можно заключить следующее:

– существует обратная пропорциональная зависимость между определяемой величиной расхода газа и временем прохождения контрольного участка через две реперные точки, таким образом для нахождения зависимости  $Q = f(v)$  требуется определить значение  $1/t$ , что делается с достаточно высокой точностью;

– величина рассчитываемого объемного расхода газа зависит от времени прохождения контрольного участка –  $t$ , а также геометрических размеров трубопровода  $S$  и  $L$ . Принимая во внимание, что единицы измерения времени и длины входят в перечень основных единиц Международной системы СИ, следовательно, построение градуировочных характеристик измерительных средств, основанных на меточном методе, может осуществляться прямым методом измерения [7–9].

Минимальная относительная погрешность измерения расхода газа, обеспечиваемая меточными расходомерами, составляет 0,1 % [1, 4, 9].

К основным достоинствам оптического метода измерения расхода газа можно отнести высокую точность и скорость измерения, отсутствие необходимости в непосредственном контакте с измеряемой средой, возможность построения шкалы прибора расчетным путем [4, 7, 10].

Как правило, для измерения расхода применяются измерительные устройства, с принципом действия, основанным на эффект Физо-Френеля, в соответствии с которым можно определить скорость света в среде, движущейся со скоростью  $V$ :

$$v_c = \frac{v_c}{2} \pm V \left( \frac{\theta^2 - 1}{\theta^2} \right), \quad (8)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\theta$  – коэффициент преломления среды,  $v_c$  – скорость света в среде.

### Сравнительные характеристики эффективности основных способов измерения расходов газов и газообразных смесей

	Тахометрический метод	Оптический метод	Метод переменного перепада давления	Метод обтекания	Тепловой метод	Меточный метод
Точность измерения	± 0,5 – 1 %	± 0,5 %	± 1,5 – 2,5 %	± 2 %	± 2 %	± 0,01 %
Динамический диапазон измерения расхода	1 : 20	1 : 20	1 : 3	1 : 10	1 : 15	1 : 10
Величина перепада давления	~ 0,3 КПа	< 0,1 КПа	~ 5 КПа	~ 1,5 КПа	< 0,1 КПа	< 0,1 КПа
Наличие электрического выходного сигнала	+	+	+	–	+	+
Химическая устойчивость к агрессивным средам	–	+	–	+	+	+
Стабильность выходных характеристик	Низкая (трение, износ)	Низкая	Низкая (эрозия, коррозия)	Низкая (зависит от вязкости газа)	Низкая	Высокая
Массогабаритные параметры	+	–	+	+	+	+

Исходя из выражения (8), изменение скорости света для прозрачной движущейся среды составляет  $V \left( \frac{\theta^2 - 1}{\theta^2} \right)$ .

В оптическом расходомере свет от источника распространяется в противоположных направлениях по замкнутому контуру длиной  $L$ , на участке которого длины  $l$  осуществляется измерение скорости движущейся среды.

Пройдя контур  $L$ , указанные выше световые потоки подаются на светоприемное устройство, которое осуществляет измерение сдвига интерференционных полос  $\Delta x$ , или сдвиг частоты  $\Delta f$  световых колебаний между обоими потоками.

В частности, величину сдвига частот можно определить исходя из уравнения

$$\Delta f = \frac{2Vl(\Theta^2 - 1)}{L\lambda} \cos \Theta. \quad (9)$$

Следовательно, значение сдвига интерференционных полос  $\Delta x$ , и сдвига частот световых колебаний  $\Delta f$  прямо пропорциональны скорости движения среды  $V$  и длине измеряемого участка  $l$ . К недостаткам оптического метода измерения расхода и используемых для этого устройств можно отнести сложность и хрупкость оптических приборов, их значительные габариты и высокую стоимость.

### Результаты исследования и их обсуждение

Учитывая вышеизложенное, были выделены основные требования, предъявляемые к средствам измерения малых расходов газа, и сведены в таблицу.

Анализируя результаты, представленные в таблице, можно констатировать высокую эффективность меточного способа измерения расхода газа.

Для количественной оценки эффективности и высоких метрологических характеристик меточного способа измерения используем выражение полного дифференциала, представленного в соотношении (7)

$$\delta Q = \frac{\delta Q}{\delta D} \Delta D + \frac{\delta Q}{\delta L} \Delta L + \frac{\delta Q}{\delta T} \Delta T. \quad (10)$$

Для выражения (10) определим по формуле (7) частные производные:

По диаметру:

$$\frac{\delta Q}{\delta \alpha} = \frac{\pi D L}{2T}. \quad (11)$$

По длине:

$$\frac{\delta Q}{\delta L} = \frac{\pi D^2}{4T}. \quad (12)$$

По времени:

$$\frac{\delta Q}{\delta T} = \frac{\pi D^2 L}{4T^2}. \quad (13)$$

После подстановки в выражение полного дифференциала и необходимых преобразований получим

$$\delta Q = \frac{\pi D^2 L}{4T} \left( 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta T}{T} \right). \quad (14)$$

С учетом выражений (12) и (14) имеем

$$\delta Q = Q \left( 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta T}{T} \right). \quad (15)$$

Для получения соотношений относительных погрешностей разделим левую и правую части на  $Q$

$$\frac{\delta Q}{Q} = 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta T}{T}. \quad (16)$$

Принимая во внимание, что погрешность современных средств измерения линейного размера составляет 0,01%, а измерение временных параметров может проводиться с погрешностью 0,005%, можем заключить, что методическая погрешность меточного способа измерения расходов газа и газообразных смесей составит около 0,03%.

### Выводы

В данной статье проведен анализ основных методов измерения расходов газа и газообразных смесей, особое внимание было уделено области малых и сверхмалых расходов. Проведено исследование метрологических особенностей каждого метода, выявлены их основные достоинства и недостатки.

Определена совокупность требований, которые необходимы для обоснованного выбора способа измерений малых расходов газа и газообразных смесей, на основе которого возможно создание высокоточного малогабаритного автоматического измерителя количества вещества.

Проведенный сравнительный анализ технических характеристик наиболее популярных способов измерения расхода газа позволил установить, что оптимальным является вариант меточного расходомера с тепловой или жидкостной (пленкой ПАВ) меткой [1, 7, 9].

### Список литературы

1. Юшко С.В. Метрологическое обеспечение измерения расхода стационарных потоков // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 7. С. 108–110.
2. Пелевин В.Ф. Применение расходомеров переменного перепада давления в технологических измерениях // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 60–64.
3. Абзалилова Ю.Р., Выдрин Д.Ф., Галимуллина Э.Э., Вдовин А.К. Методы измерения расхода // Научные исследования. 2017. № 2 (13). С. 20–21.

4. Попов А.И., Беляев М.М. Широкодиапазонное измерение объемного расхода газа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 3. С. 44–49.
5. Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е. Определение коэффициента расхода при истечении газа из отверстий малого диаметра // Инженерная физика. 2014. № 1. С. 13–18.
6. Вин Мьинт Зо, Портнов Е.М. Устройство формирования жидкостных меток в автоматических измерителях расхода и скорости газовых потоков // Актуальные проблемы современной науки. 2008. № 5. С. 105–207.
7. Вин Мьинт Зо, Портнов Е.М. Статическая модель автоматизированного расходомера с жидкостными метками // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2010. № 1 (81). С. 88–90.
8. Портнов Е.М., Вин Мьинт Зо Формирование жидкостных меток в автоматических измерителях расходов и скоростей газовых потоков на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ) // Актуальные проблемы современной науки. 2008. № 5. С. 208–209.
9. Фарзани Э.Н. Метод измерения массового расхода газа // Датчики и системы. 2003. № 12. С. 25–27.
10. Белик А.Г., Цыганенко В.Н. Дискретные измерения расхода жидкости и газа при переменных перепадах давления // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6. № 2. С. 358–361.