

## Акустический расходомер

© В.А. Бузановский

ООО „Научтех“,  
119526 Москва, Россия  
e-mail: vab1960@rambler.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2018 г.  
В окончательной редакции 18 сентября 2018 г.  
Принято к публикации 18 марта 2019 г.

Рассмотрены конструкция и метрологические характеристики акустического расходомера потока газообразного или жидкого вещества. Показано, что устройство имеет простую конструкцию, характеризуется высокой точностью (относительная погрешность измерения объемного расхода — менее 1%) и высоким быстродействием (время определения расхода — не более нескольких миллисекунд).

**Ключевые слова:** акустический расходомер, газообразное вещество, жидкое вещество, метрологическая характеристика.

DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48071.64-18

### Введение

Измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества широко используются при автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности. Напомним, что объемный расход  $F$  — это объем вещества, проходящего через поперечное сечение трубопровода с площадью  $Q$  в единицу времени [1]

$$F = QV_a, \quad (1)$$

где  $V_a$  — средняя скорость потока вещества.

Для определения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества применяют измерительные устройства (называемые расходомерами), которые основываются на разнообразных принципах действия. В частности, при автоматизации технологических процессов широкое распространение получили расходомеры переменного перепада давления, оснащенные диафрагмой или трубой Вентури, расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры), расходомеры динамического давления (пневмометрические трубки), а также акустические расходомеры [1,2].

Целью настоящей работы является рассмотрение акустического расходомера, предназначенного для измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества и характеризующегося довольно простой конструкцией, высокой точностью и высоким быстродействием.

### Конструкция акустического расходомера

На рис. 1 изображена схема построения данного прибора. Его основными составными частями являются измерительный преобразователь (MT), электронный блок (EU) и регистрирующее устройство (RD).

MT выполнен в виде круглого цилиндра, вдоль оси которого расположены пьезоэлектрические излучатели 1, 2 и пьезоэлектрические приемники 3, 4.

Расходомер функционирует следующим образом. Блок EU вырабатывает импульсные электрические сигналы, направляемые в пьезоэлектрические излучатели 1, 2, и регистрирует время их подачи  $\tau_0$ . При воздействии этих сигналов излучатель 1 создает акустическую волну, проходящую через газообразное или жидкое вещество навстречу его потоку и поступающую к пьезоэлектрическому приемнику 3, а излучатель 2 — акустическую волну, проходящую через вещество в направлении его потока и поступающую к пьезоэлектрическому приемнику 4. Блок EU регистрирует время поступления акустических волн к приемнику 3  $\tau_3$  и к приемнику 4  $\tau_4$ . Затем на основе зарегистрированных моментов времени  $\tau_0$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  блок EU формирует выходной сигнал расходомера  $W$  и передает его в устройство RD.

### Метрологические характеристики акустического расходомера

Время прохождения акустической волны от пьезоэлектрического излучателя 1 к пьезоэлектрическому

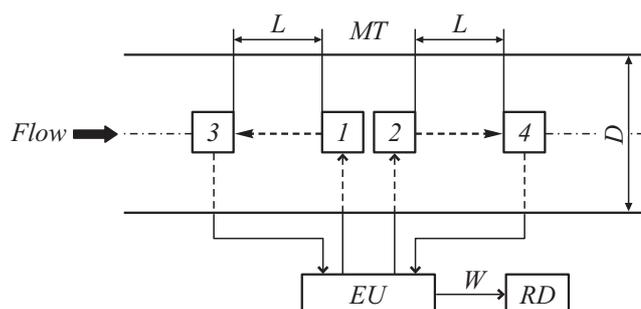


Рис. 1. Схема построения акустического расходомера.

приемнику 3  $Q_1$  соответствует выражению

$$\Theta_1 = \tau_3 - \tau_0 = \frac{L}{C - V_{\max}},$$

а время прохождения акустической волны от излучателя 2 к приемнику 4  $Q_2$  — соотношению

$$\Theta_2 = \tau_4 - \tau_0 = \frac{L}{C + V_{\max}},$$

где  $L$  — расстояние между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками;  $C$  — скорость распространения акустической волны в газообразном или жидком веществе;  $V_{\max}$  — максимальная (осевая) скорость потока вещества в измерительном преобразователе.

Обычно выходной сигнал акустического расходомера формируется на основе разности времени  $\tau_1$  и времени  $\tau_2$  [1–4]

$$W = \Theta_1 - \Theta_2 = \frac{2V_{\max}L}{C^2 - V_{\max}^2}.$$

При этом выходной сигнал прибора зависит и от расстояния между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками, и от максимальной скорости потока вещества, и от скорости распространения акустической волны в нем.

Для исключения влияния скорости распространения акустической волны в газообразном или жидком веществе на показания расходомера электронный блок рассматриваемого устройства формирует выходной сигнал

$$W = \Theta_w^{-1} - \Theta_1^{-1} = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta_1\Theta_2} = \frac{2V_{\max}}{L}, \quad (2)$$

который связан лишь с максимальной скоростью потока вещества и расстоянием между его пьезоэлектрическими излучателями и приемниками.

Используя выражения (1), (2) и экспериментально установленную И.И. Никурадзе [2,5,6] зависимость между средней и максимальной скоростями потока газообразного или жидкого вещества в цилиндрических трубах (рис. 2)

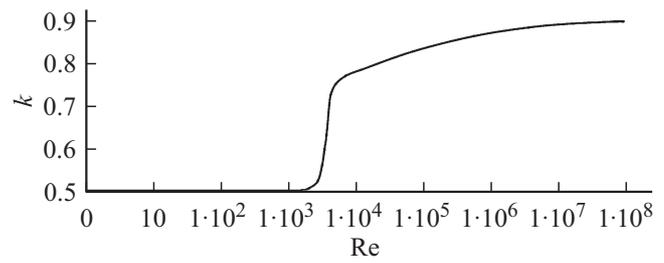
$$k = \frac{V_a}{V_{\max}} = f(Re) = f(F, D, \rho, \mu),$$

$$Re = \frac{V_a D}{\nu} = \frac{V_a D \rho}{\mu} = \frac{4F \rho}{\pi D \mu},$$

где  $Re$  — число Рейнольдса;  $D$  — внутренний диаметр трубы (измерительного преобразователя);  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  — плотность, динамическая и кинематическая вязкость вещества, получим математическую модель реальной статической функции преобразования акустического расходомера

$$W = \Theta_2^{-1} - \Theta_1^{-1} = \frac{8F}{\pi k D^2 L}, \quad (3)$$

а после проведения операции статистического усреднения — модель номинальной (соответствующей этапу



Flow regime	Laminar regime	Turbulent regime						
Re	Up to $2.2 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
k	0.50	0.54	0.76	0.78	0.84	0.87	0.89	0.90

Рис. 2. Результаты экспериментального исследования скорости потока вещества в цилиндрических трубах.

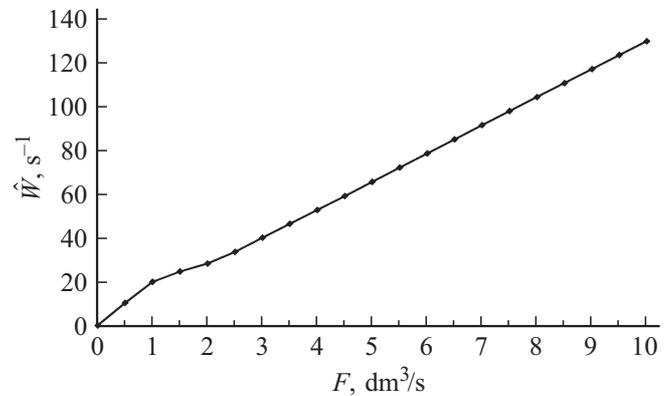


Рис. 3. Номинальная статическая функция преобразования акустического расходомера.

градуировки) статической функции преобразования прибора

$$\hat{W} = \langle W \rangle = \hat{\Theta}_2^{-1} - \hat{\Theta}_1^{-1} = \frac{8F}{\pi \hat{k} \hat{D}^2 \hat{L}},$$

$$\hat{\Theta}_1 = \langle \Theta_1 \rangle, \quad \hat{\Theta}_2 = \langle \Theta_2 \rangle, \quad \hat{k} = \langle k \rangle = f(F, \hat{D}, \hat{\rho}, \hat{\mu}), \quad (4)$$

$$\hat{D} = \langle D \rangle, \quad \hat{\rho} = \langle \rho \rangle, \quad \hat{\mu} = \langle \mu \rangle, \quad \hat{L} = \langle L \rangle.$$

Символом  $\hat{\dots}$  обозначено номинальное значение величины, а скобками  $\langle \dots \rangle$  — операция статистического усреднения (при получении математической модели (4) объемный расход потока газообразного или жидкого вещества считался детерминированной величиной).

В соответствии с соотношениями (3), (4) и данными рис. 2 при ламинарном режиме течения в измерительном преобразователе ( $0 \leq Re \leq 2200$ ) выходной сигнал рассматриваемого акустического расходомера прямо пропорционально зависит от объемного расхода потока вещества, а при турбулентном режиме течения ( $Re > 2000$ ) названная зависимость становится нелинейной.

На рис. 3 представлена номинальная статическая функция преобразования акустического расходомера, из-

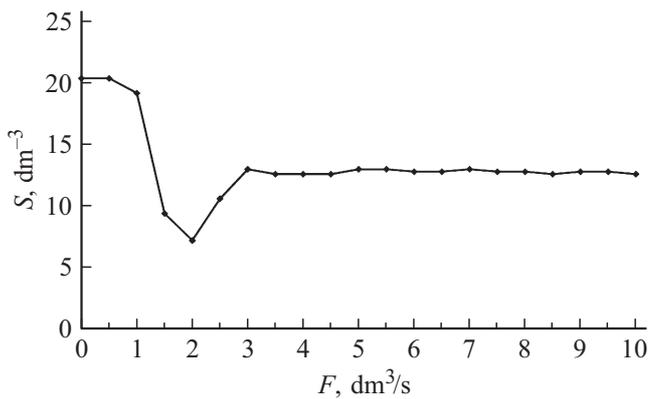


Рис. 4. Чувствительность измерения объемного расхода.

мерительный преобразователь которого имеет внутренний диаметр  $\hat{D} = 5$  см и расстояние между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками  $\hat{L} = 10$  см. Через измерительный преобразователь устройства протекает смесь углекислого газа (50%) и азота (50%) при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении 101 кПа. Объемный расход потока смеси выражен в  $\text{dm}^3/\text{s}$ . Число Рейнольдса изменяется от 0 до 23 000. При расходе менее  $1 \text{ dm}^3/\text{s}$  выходной сигнал прибора прямо пропорционально связан с объемным расходом потока смеси. При расходе более  $1 \text{ dm}^3/\text{s}$  наблюдается отклонение от прямо пропорциональной зависимости (особенно в области от 1 до  $2.5 \text{ dm}^3/\text{s}$ ). Сказанное коррелирует с выражением (4) и данными рис. 2.

Из соотношения (4) найдем выражение для оценки чувствительности измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества  $S$  посредством рассматриваемого расходомера

$$S = \frac{d\dot{W}}{dF} = \frac{8}{\pi k \hat{D}^2 \hat{L}} \left( 1 - \frac{F}{k} \frac{dk}{dF} \right). \quad (5)$$

Анализ соотношения (5) с учетом данных рис. 2 показывает, что при ламинарном режиме течения в измерительном преобразователе выполняется условие  $d\hat{k}/dF = 0$ , и чувствительность определения объемного расхода потока вещества является постоянной  $S = 16/(\pi \hat{D}^2 \hat{L})$ . При турбулентном режиме течения чувствительность измерения объемного расхода потока вещества сначала понижается, потом возрастает и после этого опять начинает медленно снижаться, доходя до значения  $S \approx 8.78/(\pi \hat{D}^2 \hat{L})$  при числе Рейнольдса  $Re = 1 \cdot 10^8$ .

Рис. 4 иллюстрирует изменение чувствительности измерения объемного расхода потока смеси углекислого газа (50%) и азота (50%) при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении 101 кПа с помощью акустического расходомера, оснащенного измерительным преобразователем с внутренним диаметром  $\hat{D} = 5$  см и расстоянием между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками

$\hat{L} = 10$  см. Представленные результаты в целом согласуются с указанными закономерностями.

Запишем выражение (3) следующим образом:

$$F = \frac{\pi k D^2 L (\Theta_2^{-1} - \Theta_1^{-1})}{8}, \quad (6)$$

и, применив математический аппарат теории ошибок, получим из него математическую модель абсолютной погрешности измерения акустического расходомера  $\Delta F$ :

$$\Delta F = \frac{\pi \hat{k} \hat{D}^2 \hat{L}}{8} \left[ (\hat{\Theta}_2^{-1} - \hat{\Theta}_1^{-1}) (2\delta D + \delta L + \Delta k) - \hat{\Theta}_2^{-1} \delta \Theta_2 + \hat{\Theta}_1^{-1} \delta \Theta_1 \right],$$

$$\Delta D = \frac{D - \hat{D}}{\hat{D}}, \quad \delta L = \frac{L - \hat{L}}{\hat{L}}, \quad \delta k = \frac{k - \hat{k}}{\hat{k}}$$

$$\delta \Theta_1 = \frac{\Theta_1 - \hat{\Theta}_1}{\hat{\Theta}_1}, \quad \delta \Theta_2 = \frac{\Theta_2 - \hat{\Theta}_2}{\hat{\Theta}_2},$$

где  $\delta \dots$  — относительное отклонение величины от номинального значения.

Относительные отклонения внутреннего диаметра измерительного преобразователя и расстояния между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками от номинальных значений вызваны несоответствием температуры газообразного или жидкого вещества температуре, использовавшейся при градуировке устройства. Относительное отклонение коэффициента  $k$  от номинального значения является следствием изменения внутреннего диаметра измерительного преобразователя, а также изменений плотности и динамической вязкости вещества из-за изменения его температуры, давления и химического состава. Относительные отклонения от номинальных значений при определении времени прохождения акустических волн в газообразном или жидком веществе обусловлены отличием условий эксплуатации (температуры, напряженности электромагнитного поля и т.д.) электронного блока, излучателей и приемников прибора от условий его градуировки, а также флуктуациями параметров элементов названных составных частей расходомера и процессом их „старения“.

Согласно конструкции измерительного преобразователя (рис. 1), выполняется условие  $\delta D = \delta L$ . Более того, поскольку скорость распространения акустической волны в веществе обычно превышает максимальную скорость его потока ( $C \gg V_{\max}$ ),  $\delta \Theta_2 \approx \delta \Theta_1 \approx \delta \Theta$ .

Вследствие сказанного и с учетом соотношения (6), абсолютная величина относительной погрешности измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества  $|\delta F|$  может быть оценена, как

$$|\delta F| = \left| \frac{\Delta F}{F} \right| \leq 3|\delta D| + |\delta k| + |\delta \Theta|. \quad (7)$$

В соответствии с соотношением (7), абсолютная величина относительной погрешности измерения акустического расходомера определяется абсолютными величинами относительных отклонений от номинальных

значений внутреннего диаметра измерительного преобразователя прибора и коэффициента  $k$ , а также абсолютной величиной относительной погрешности определения времени прохождения акустической волны в веществе. Абсолютная величина относительной погрешности измерения данного устройства имеет только аддитивную составляющую, т. е. не изменяется в диапазоне измерения объемного расхода потока вещества.

Предположим, что материалом измерительного преобразователя акустического расходомера является сталь марки 38ХС с коэффициентом линейного теплового расширения  $\alpha = 1.17 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  [7]. Температура газообразного или жидкого вещества при эксплуатации прибора отличается от температуры, применявшейся при его градуировке, не более чем на  $\pm 15^\circ\text{C}$  ( $|\Delta t| \leq 15^\circ\text{C}$ ). Относительное отклонение коэффициента  $k$  от номинального значения и относительная погрешность определения времени прохождения акустической волны в веществе не превосходят  $\pm 0.5\%$ .

В этом случае  $|\delta D| \leq \alpha |\Delta t| = 0.0001755$ ,  $|\delta k| \leq 0.005$ ,  $|\delta \Theta| \leq 0.005$ , и, согласно выражению (7), абсолютная величина относительной погрешности измерения объемного расхода потока вещества посредством рассматриваемого устройства не превышает 1.053%.

Отметим, что изменение геометрических размеров измерительного преобразователя прибора вносит в абсолютную величину относительной погрешности измерения лишь около 0.053%. Наибольший вклад в ее величину (1%) оказывают относительное отклонение от номинального значения коэффициента  $k$  и относительная погрешность определения времени прохождения акустической волны в газообразном или жидком веществе.

## Заключение

Рассмотренный акустический расходомер потока газообразного или жидкого вещества имеет довольно простую конструкцию (рис. 1). Прибор состоит всего из трех составных частей — измерительного преобразователя, электронного блока и регистрирующего устройства. Наряду с этим, конструкцию измерительного преобразователя можно дополнительно упростить, заменив две пары пьезоэлектрических излучателей и приемников (1–3 и 2–4) одной парой пьезоэлектрических преобразователей, попеременно функционирующих в качестве излучателей и приемников [2–4]. Указанное конструкторское решение снизит габаритные размеры и материалоемкость измерительного преобразователя расходомера, но несколько усложнит электрическую схему его электронного блока и увеличит продолжительность измерения.

Рассмотренный акустический расходомер позволяет определять объемный расход потока газообразного или жидкого вещества в широком диапазоне измерений, охватывающем области ламинарного и турбулентного

режимов течения. В названном диапазоне измерений выходной сигнал прибора нелинейно зависит от объемного расхода потока вещества (рис. 3). Однако при низких и высоких значениях объемного расхода, характерных соответственно для ламинарного ( $0 \leq Re \leq 2200$ ) и развитого турбулентного ( $Re \geq 10000$ ) режимов течения, номинальная статическая функция преобразования устройства становится прямо пропорциональной или почти линейной. Сказанное обуславливает фактически постоянные чувствительности измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества в указанных условиях (рис. 4) и упрощает проведение градуировки расходомера.

Абсолютная величина относительной погрешности измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества с помощью рассмотренного акустического расходомера имеет три составляющие (соотношение (7)), которые вызваны:

- 1) непостоянством геометрических размеров его измерительного преобразователя;
- 2) изменением температуры, давления и химического состава вещества;
- 3) неточностью определения времени прохождения акустической волны в нем.

Первая и вторая составляющие абсолютной величины относительной погрешности измерения могут быть практически полностью исключены при согласовании условий эксплуатации расходомера с условиями его градуировки. Третья составляющая абсолютной величины относительной погрешности измерения может быть существенно снижена путем использования известных конструкторских решений [8–11]. В итоге абсолютную величину относительной погрешности измерения объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества посредством рассмотренного акустического расходомера можно оценить как довольно низкую (на уровне менее одного процента).

Рассмотренный акустический расходомер также характеризуется высоким быстродействием. Так как скорость акустической волны в газообразном веществе составляет от 108 до 1463 м/с, а в жидком веществе — от 815 до 1927 м/с (при давлении 101.325 кПа) [7], расстояние между пьезоэлектрическими излучателями и приемниками измерительного преобразователя прибора  $L$  см акустическая волна проходит менее чем за 1 мс. Генерация импульсных электрических сигналов, регистрация и обработка временных сигналов в электронном блоке, передача из него обработанной информации в регистрирующее устройство являются почти мгновенными, и, следовательно, продолжительность измерения объемного расхода потока вещества с помощью данного устройства не превосходит нескольких миллисекунд.

Перечисленные обстоятельства указывают на несомненные преимущества рассмотренного акустического расходомера объемного расхода потока газообразного или жидкого вещества и свидетельствуют о целесообразности оценки этого прибора в качестве одного из

наиболее перспективных устройств, способных решать многочисленные задачи автоматизации технологических процессов.

## Список литературы

- [1] Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.
- [2] Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
- [3] Бузановский В.А. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. Вып. 6. С. 31–35. [*Buzanovskii V.A. // Chem. Petrol. Eng. 2014. Vol. 50. N 5–6. P. 390–395.*]
- [4] Бузановский В.А. // Измерительная техника. 2014. Вып. 10. С. 31–34. [*Buzanovskii V.A. // Meas. Tech. 2015. Vol. 57. N 10. P. 1149–1153.*]
- [5] Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1990. 703 с.
- [6] Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 5. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 760 с.
- [7] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [8] Измайлов А.М. // Приборы и техника эксперимента. 2003. Вып. 1. С. 105–109. [*Izmailov A.M. // Instruments and Experimental Techniques. 2003. Vol. 46. N 1. P. 95–98.*]
- [9] Богуш В.М., Кузьмичева Е.В., Пикалев Э.Ж., Богуш А.М. // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. Вып. 2. С. 21–24.
- [10] Измайлов А.М. // Приборы и техника эксперимента. 2007. Вып. 2. С. 156–157.
- [11] Измайлов А.М. // Приборы и техника эксперимента. 2004. Вып. 1. С. 158–159.