

нутыми измерительными трубками и достаточно высокой частотой возмущения является оптимальной для измерения двухфазного расхода. Действительно, в этом случае существует вероятность того, что погрешность из-за пузырькового эффекта будет в значительной степени скомпенсирована погрешностью, обусловленной эффектом резонатора. Кроме того, если такой расходомер установлен вертикально, то ввиду слабо изогнутой формы измерительных трубок пузырьки газа будут достаточно однородно распределены вдоль них, и дополнительная погрешность, связанная с эффектом затухания, будет равна нулю.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ Р 8.615—2005.** ГСИ. Измерения количества извлекаемой из недр нефти и попутного газа.

2. **Кравченко В., Риккен М.** Измерение расхода при помощи кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока // Законодательная и прикладная метрология. 2006. № 4. С. 37—44.

3. **Weinstein J.** Multiphase flow in Coriolis mass flow meters — error sources and best practices // 28th Int. North Sea Measurement Workshop St. Andrews, UK. 2010.

4. **Zhu H. e. a.** Entrained air, particles and wet gas — myths and truth in Coriolis flow measurement // TUV NEL Americas Workshop. Houston, 2011.

5. **Пушнов А.** Результаты испытаний кориолисовых расходомеров Promass компании Endress+Hauser в рамках внедрения ГОСТ 8.615 // IV Общерос. науч-практ. конф. по расходомерии: Труды конф. Тюмень: СИБНА, 2007. С. 141—149.

Дата принятия 28.01.2013 г.

681.121.85

Применение ступенчатого диффузора в качестве преобразователя расхода

Ж. А. ДАЕВ

АО «Интергаз Центральная Азия», Актобе, Казахстан, e-mail: zhand@yandex.ru

Рассмотрены особенности измерения расхода и количества вещества с применением расширяющего устройства в качестве преобразователя потока в трубе круглого сечения.

Ключевые слова: диффузор, расход, перепад давления.

The features of flow rate and quantity of substance measurement using the expanding device as a flow converter in the circular cross section tube are considered.

Key words: diffuser, flow rate, differential pressure.

Метод переменного перепада давления достаточно хорошо изучен. Много научных работ посвящено улучшению измерений расхода и количества веществ данным методом. В качестве преобразователей расхода обычно используют гидравлические сопротивления, создающие в потоке жидкости, газа или пара сужение сечения, вызывающее образование перепада давления в зависимости от расхода. Любое гидравлическое сопротивление вызовет подобный эффект, который при достаточном изучении даст количественную оценку измеряемому расходу. Ниже задачу измерений расхода предлагается решить путем установки поперек потока ступенчатого диффузора (расширяющего устройства). Данная задача является инверсной классическому методу измерения расхода.

Течение в диффузоре сопровождается уменьшением скорости и увеличением давления. Частицы движущейся жидкости преодолевают нарастающее давление за счет своей кинетической энергии, которая уменьшается вдоль диффузора в направлении от оси к стенке. Слои, прилегающие к стенкам, обладают столь малой кинетической энергией, что оказываются не в состоянии преодолеть повышенное давление, они останавливаются или начинают двигаться в обратном направлении. Противоток вызывает отрыв основно-

го потока от стенки и вихреобразование. Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла расширения диффузора, а вместе с этим увеличиваются потери вихреобразования. Изменение давления в диффузоре можно применить для измерения расхода. На рис. 1 представлены схема диффузора и график изменения давления вдоль данной конструкции.

Отличительной особенностью применения расширяющих устройств является полная инверсия классическому методу. К примеру, относительное значение диаметра $\beta = D_2/D_1$ больше единицы, существует зависимость между длиной диффузора L и β ; D_1, D_2 — диаметры на входе и выходе диффузора.

Возврат к измерительному трубопроводу обеспечивает конфузор.

Скорость течения в диффузоре представляется как

$$v_2 = \sqrt{\psi / (\beta^2 - 1 - \xi)} \sqrt{2\Delta p / \rho},$$

где ψ — коэффициент отбора давления, который выражается так же, как и в классическом методе по [2]; ξ — коэффициент гидравлических потерь; Δp — перепад давления; ρ — плотность вещества в рабочих условиях.

В рамках данной статьи будем полагать метод отбора давления теоретическим, поэтому принимаем коэффициенты Кориолиса равными единице, считая поток равномерным и стационарным.

Коэффициент скорости на входе диффузора имеет вид

$$E^2 = (\beta^4 - 1)^{-1}.$$

Уравнение для объемного расхода

$$Q = \alpha \varepsilon \sqrt{2\Delta p / \rho} \pi D_2^2 / 4,$$

где ε — коэффициент расширения газа; α — коэффициент расхода, причем $\alpha = CE$; C — коэффициент истечения расширяющего устройства, равный отношению действительного расхода к теоретическому.

Коэффициент расхода можно выразить формулой

$$\alpha = (\beta^2 - 1 - \xi)^{-1/2}.$$

Уравнение потерь для ступенчатого диффузора согласно [3]:

$$\xi = \left(\frac{\lambda}{8 \sin(\varphi/2)} \frac{\beta^4 + 1}{\beta^4 - 1} + 3,2 \operatorname{tg}^{1,25} \frac{\varphi}{2} \right) \left(1 - \frac{1}{\beta^4} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta^4} - \frac{1}{\beta^2} \right)^2,$$

где λ — коэффициент гидравлического трения; φ — угол расширения.

Используя приведенные выражения, получим важную характеристику для средств измерений расхода на основе метода переменного перепада давления — коэффициент истечения

$$C = \sqrt{\beta^4 - 1} \left[\beta^4 - \left(\frac{\lambda}{8 \sin(\frac{\varphi}{2})} \frac{\beta^4 + 1}{\beta^4 - 1} + 3,2 \operatorname{tg}^{1,25} \frac{\varphi}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{1}{\beta^4} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta^4} - \frac{1}{\beta^2} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2}.$$

Сравним графики коэффициентов истечения для различных расширяющих устройств. На рис. 2, а представлены зависимости $C(\beta)$ для ступенчатого диффузора с различными углами расширения. Как следует из графиков рис. 2, отличительной особенностью ступенчатого диффузора как преобразователя расхода является стабильность коэффициента истечения и равенство его значений единице в широком диапазоне относительных диаметров для различных значений углов расширения. Последнее означает, что действительный и теоретический расходы отличаются незначительно. Не все расширяющие устройства обладают таким свойством. Так, на рис. 2, б, в приведены зависимости $C(\beta)$ для

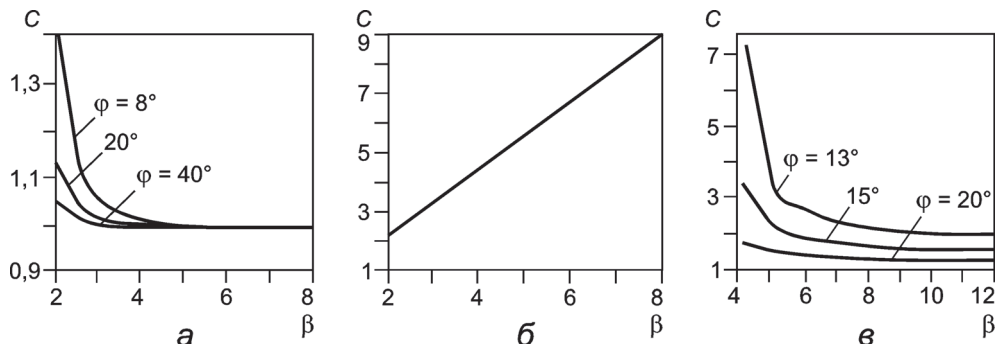


Рис. 2. Зависимости коэффициентов истечения для ступенчатого (а), резкого симметрического расширения (б) и конического (в) диффузоров

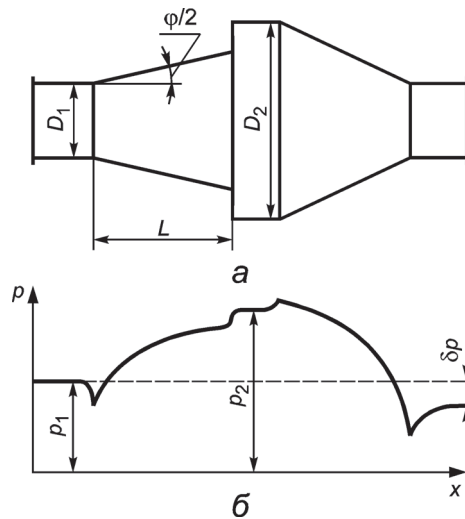


Рис. 1. Измерение расхода при помощи ступенчатого диффузора: а — схема и основные размеры устройства; б — изменение давления у стенок диффузора

диффузоров резкого расширения и конического с различными углами расширения. Расчетные зависимости на рис. 2, б, в показывают, что коэффициенты истечения данных устройств отличаются от единицы. Следовательно, они не обладают устойчивостью. Поэтому можно сделать вывод, что в качестве преобразователя расхода оптимально использовать ступенчатый диффузор.

Другими практическими достоинствами расширяющих устройств являются простота изготовления, возможность сочетать очистные устройства с расходомерными узлами, меньшие потери давления, чем в сужающих устройствах, отсутствие истирающего действия потока на конструкцию преобразователя.

Неопределенность результата измерения расхода, в целом, не отличается от полученной в случае классического метода при помощи сужающих устройств за исключением некоторых дополнительных коэффициентов чувствительности. В рассматриваемом устройстве уравнение для суммарной стандартной неопределенности измерения расхода газа имеет вид

$$u_Q = \sqrt{u_C^2 + u_\varepsilon^2 + \left(\frac{2(\beta^4 + 1)}{\beta^4 - 1} \right)^2 u_{D_2}^2 + \left(\frac{4\beta^4}{\beta^4 - 1} \right)^2 u_{D_1}^2 + 0,25(u_{\Delta p}^2 + u_p^2)}.$$

Окончательный результат в виде расширенной неопределенности получим, умножив значение u_Q на коэффициент охвата при определенном уровне доверительной вероятности.

Таким образом, исследованы возможности применения ступенчатого диффузора в качестве первичного преобразователя расходомеров переменного перепада давления. Приведены аналитические зависимости для коэффициентов истечения и расхода ступенчатого диффузора. Дан сравнительный анализ других расширяющих устройств, который показал, что предлагаемый преобразователь обладает стабильными и постоянными коэффициентами в широком диапазоне относительных диаметров для различных углов расширения. С целью уточнения коэффициента истечения пред-

полагается провести промышленные испытания преобразователя на реальных жидкостях и газах.

Л и т е р а т у р а

1. **ISO 5167—1.** Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full.

2. **Кремлевский П. П.** Расходомеры и счетчики количества веществ. СПб.: Политехника, 2002.

3. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.

Дата принятия 04.12.2012 г.

621.396.96: 621.317.757

Способ повышения эффективности использования сигнала в доплеровском измерителе

Е. С. БЕСПАЛОВ

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия, e-mail: bespalov@mirea.ru

Предложен способ повышения эффективности использования сигнала в доплеровском измерителе путевой скорости и угла сноса, основанный на извлечении информации о высоте полета. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: эффект Доплера, измеритель путевой скорости и угла сноса, высота полета.

The method of signal usage efficiency improvement in Doppler ground speed and drift angle measuring instrument, based on extraction of information about the flight height is suggested. The results of modeling are presented.

Key words: Doppler effect, ground speed and drift angle measuring instrument, height of flight.

Известно применение непрерывного сигнала с синусоидальной частотной модуляцией (СЧМ) в самолетных доплеровских измерителях путевой скорости и угла сноса (ДИСС) [1—3]. В качестве их достоинства отмечаются пониженные требования к степени развязки между передатчиком и приемником сигнала. В типовой схеме измерение доплеровского сдвига частоты (скорости) осуществляется с использованием лишь третьей гармоники частоты модуляции, что приводит к энергетическим потерям [1]. Однако можно снизить эти потери за счет более полного использования энергии, содержащейся и в других спектральных составляющих непрерывного радиосигнала с СЧМ.

Цель настоящей статьи — рассмотреть способ повышения эффективности использования сигнала в доплеровском измерителе, позволяющий с учетом спектрального состава сигнала измерять не только скорость, но и высоту полета летательного аппарата.

Обобщенная структурная схема рассматриваемого измерителя, приведенная на рис. 1, частично заимствована из [1]

и дополнена другими блоками, выделенными пунктиром.

Доплеровское смещение частоты Ω_d^* образуется на выходе фильтра нижних частот 12 при условии, что полосовой фильтр 10 настроен на третью гармонику частоты модуляции Ω_m [1]. Для реализации предлагаемого способа в схему введен делитель мощности 8, а в передатчике 4 частотно-модулированного (ЧМ) колебания кроме обычно формируемого колебания на выходе А вырабатывается опорный сигнал на выходе Б:

$$u_A(t) = U_A \cos(\omega_0 t + m \cos \Omega_m t),$$

$$u_B(t) = U_B \cos(\omega_0 t - \omega_{ПЧ} t + m \cos \Omega_m t),$$

где U_A , U_B — амплитуды сигнала; ω_0 — частота несущего колебания; m — индекс СЧМ; $\omega_{ПЧ}$ — промежуточная частота.

В традиционную схему ДИСС дополнительно введен блок измерителя высоты, содержащий смеситель 13; настроен-