

$$\hat{\delta}_\lambda = B \left[\left(\frac{\lambda_1 \Lambda_1}{\sigma^2} \hat{\delta}\lambda_1 \right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_1^2}{\sigma^2} - 1 \right) \hat{\delta}\sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{\lambda_2 \Lambda_2}{\sigma^2} \hat{\delta}\lambda_2 \right)^2 + \left(\left(\frac{\Lambda_2^2}{\sigma^2} - 1 \right) \hat{\delta}\sigma_2 \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $B = \left[\sqrt{2\pi} \sigma \left(\ln(U_1/U_2) + 2\Delta\tilde{\lambda}_\Phi/\sigma \right) \right]^{-1}$; $\Lambda_1 = \lambda_x - \lambda_1$; $\Lambda_2 = \lambda_x - \lambda_2$.

График функции $\hat{\delta}_\lambda(\lambda_x)$ при значениях $\lambda_1 = 400$ нм и $\lambda_2 = 600$ нм, $\sigma = 100$ нм и относительных погрешностях $\hat{\delta}\lambda_1 = \hat{\delta}\lambda_2 = \hat{\delta}\lambda = 0,1$ и $\hat{\delta}\sigma_1 = \hat{\delta}\sigma_2 = \hat{\delta}\sigma = 0,1$ представлен на рис. 3, откуда следует, что при одинаковых случайных погрешностях параметров фотоприемников погрешность измерения будет минимальной для длины волны излучения, равной среднему значению: $\lambda_x = \lambda_{\text{ср}} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

Структурная схема устройства (рис. 4), работающего в соответствии с выражением (7), достаточно проста и не требует пояснений.

Таким образом, показана возможность оперативного измерения длины волны излучения в максимуме спектра СИД и ширины спектра по заданному уровню с приемлемой точностью. Полученные результаты могут быть использованы в приборах для измерений параметров спектра СИД, которые будут иметь высокое быстродействие и простоту в настройке и калибровке.

Литература

1. Schanda J., Muray K., Kráncz B. LED colorimetry // Proc. AIC Conf. Rochester, 2001.
2. Schanda J. LED photometry and colorimetry [Электрон. ресурс]. <http://www.knt.vein.hu/staff/schanda/j/SJCV-Publ-2005/523.pdf> (дата обращения: 03.10.2012).
3. Рогов В. Н., Ульянов А. В. Методы измерения цвета светодиодов // Радиоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2010. С. 100—105.
4. Рогов В. Н., Ульянов А. В. Устройство измерения цветности светодиодов // Радиоэлектронная техника: Межвуз. сб. науч. трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 92—95.

Дата принятия 14.01.2013 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.12:532.57

Измерение расхода двухфазного потока кориолисовым расходомером

А. В. ПУШНОВ

ООО «Эндресс+Хаузер», Москва, Россия, e-mail: Andrei.Pushnov@ru.endress.com

Показано, что при соблюдении ряда условий кориолисовым расходомером можно достаточно надежно измерять расход двухфазного потока. Рассмотрены требования к конструкции кориолисового расходомера, выполнение которых позволяет добиться высоких результатов. Даны рекомендации по способу монтажа расходомера при измерении двухфазного потока.

Ключевые слова: кориолисовый и массовый расходомеры, двухфазный поток, свободный газ, измерительные трубки.

It is shown that at observance of certain conditions the Coriolis flow meters can reliably measure the two-phase flows. The requirements to Coriolis flow meter design allowing to make possible the reliable measurement of two-phase flows are considered. The recommendations on the Coriolis flow meter installation at the two-phase flow measurement are given.

Key words: coriolis flow meter, mass flow meter, two-phase flow, free gas, measuring tubes.

Измерение расхода двухфазного потока при помощи кориолисового (массового) расходомера — актуальная научно-прикладная задача, особенно для нефтегазовой отрасли промышленности в связи с требованиями стандарта [1]. Пользователи обсуждают влияние свободного газа на погрешность таких расходомеров, в основе которого лежит информация производителей и результаты собственных исследова-

ований. Скептики часто в качестве аргументов приводят результаты [2], интерпретируя их не в пользу применения массовых расходомеров в составе автоматических групповых измерительных (замерных) установок (АГЗУ). Оптимисты ссылаются на утверждения ряда производителей о том, что встроенное в прибор специализированное программное обеспечение позволяет компенсировать влияние свобод-

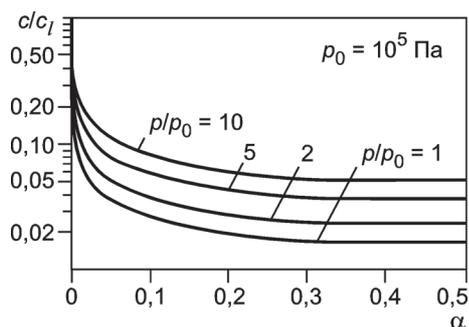


Рис. 1. Зависимость скорости звука c в двухфазной среде от содержания свободного газа α и давления процесса p (c_l — скорость звука в жидкости)

ного газа. Как бы то ни было, кориолисовые расходомеры активно применяют в составе АГЗУ, в то время как вопрос о влиянии свободного газа на точность этих приборов остается открытым.

Ниже дан краткий обзор результатов последних работ, посвященных влиянию свободного газа на погрешность кориолисовых расходомеров [3, 4]. В частности, подробно рассмотрены различные явления, возникающие в массовом расходомере при прохождении через него потока жидкости с содержанием свободного газа. Проанализировано влияние каждого явления на погрешность прибора, а также ее зависимость от конструкции расходомера. Сформулированы рекомендации по выбору массового расходомера для измерения двухфазного потока и способу его установки.

Пузырьковый эффект. Специалистам хорошо известно, что при прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей свободный газ, амплитуда колебаний пузырьков газа больше амплитуды колебаний измерительных трубок прибора. В результате этого эффекта, получившего в литературе название пузырькового, возникает дополнительная погрешность расходомера, которую можно оценить по формуле

$$E_{\text{доп}} = -2\alpha(1 - \alpha), \quad (1)$$

где α — объемное содержание свободного газа в жидкости, $0 < \alpha < 1$.

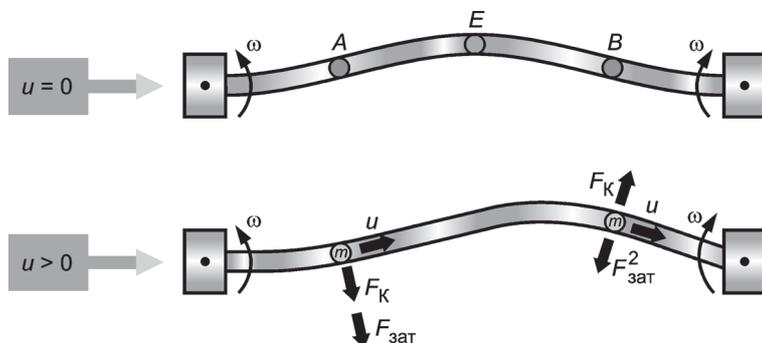


Рис. 2. Эффект затухания:

F_K — сила Кориолиса; $F_{\text{зат}}$ — сила затухания; u — скорость потока; ω — направление колебательного движения измерительной трубки; A, B — элементарные объемы среды в измерительной трубке, выбранные для анализа и имеющие массу m ; E — элементарный объем среды в средней точке измерительной трубки

Таким образом, данный эффект приводит к возникновению отрицательной систематической погрешности кориолисового расходомера. Формула (1) получена без учета размера пузырьков, вязкости жидкости и частоты колебаний измерительных трубок расходомера; учет влияния этих параметров выполнен в [4].

К сожалению, область применения теории пузырькового эффекта ограничена, поскольку существенное влияние на поведение свободного газа в жидкости оказывает режим двухфазного потока в измерительной трубке. Эта теория верна только в том случае, если пузырьки свободного газа распределены по объему жидкости в измерительной трубке. При горизонтальной установке расходомера получить такой режим потока на практике практически нереально. Это возможно только при вертикально расположенном приборе с прямыми или слабо изогнутыми измерительными трубками, о чем будет сказано ниже.

Эффект резонатора. При прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей пузырьки свободного газа, в измерительных трубках прибора наряду с пузырьковым эффектом возникает так называемый эффект резонатора. Его суть заключается в том, что пузырьки, распределенные в жидкости, как бы «захватывают» объем жидкости, действуя на него как пружина. Благодаря этому эффекту в поперечном сечении измерительных трубок массового расходомера может возникнуть стоячая волна, резонансная частота которой определяется как

$$f_0 = c\lambda_1 / (2\pi R_0), \quad (2)$$

где c — скорость звука в жидкости, по объему которой распределены пузырьки газа; $\lambda_1 = 1,842$ — числовой коэффициент; R_0 — внутренний радиус измерительной трубки.

Дополнительную погрешность, возникающую вследствие эффекта резонатора, можно оценить по формуле

$$E_{\text{рез}} = 2 \left[\left(0,163 + 0,837 \frac{1}{1 - f_d^2 / f_0^2} \right) - 1 \right], \quad (3)$$

где f_d — частота колебаний измерительной трубки расходомера.

Добавим также, что дополнительная погрешность из-за эффекта резонатора зависит не только от f_d , но и от содержания свободного газа в жидкости α , а также давления процесса. Действительно, согласно (2) резонансная частота f_0 из (3) прямо пропорциональна скорости звука c в среде, зависимость которой от содержания свободного газа и давления процесса показана на рис. 1. Формулы, описывающие эту зависимость, можно найти, например в [4].

Частота акустического резонанса, как правило, больше частоты возбуждения измерительных трубок, поэтому согласно (3) дополнительная погрешность вследствие эффекта резонатора больше нуля и при достаточно высокой частоте возбуждения измерительных трубок может частично или полностью скомпенсировать погрешность из-за пузырькового эффекта. Приведем конкретные примеры, следуя расчетам, которые были впервые представлены в [3].

Рассмотрим расходомер с измерительными трубками диаметром 10 мм ($R_0 = 0,05$ м) и низкой частотой

возбуждения $f_d = 100$ Гц, измеряющий расход жидкости с содержанием свободного газа 1 % ($\alpha = 0,01$) под невысоким давлением. Согласно (2) дополнительная погрешность из-за пузырькового эффекта равна -2 %, в то время как погрешность, обусловленная эффектом резонатора, составляет всего 0,04 %. Таким образом, в этом случае пузырьковый эффект доминирует, и общая погрешность будет $-1,96$ %.

Если у кориолисового расходомера с такими же измерительными трубками частота возбуждения $f_d = 500$ Гц (высокая), то погрешность вследствие эффекта резонатора уже составляет 1 % при неизменном значении погрешности, обусловленной пузырьковым эффектом. В результате этот эффект оказывается частично скомпенсированным эффектом резонатора, общая погрешность уменьшится в 2 раза и составит -1 %.

Подчеркнем, что приведенные выше расчеты справедливы только для идеальных условий, когда пузырьки свободного газа равномерно распределены по объему жидкости в измерительных трубках. Однако вывод о том, что при измерении двухфазного потока погрешность кориолисовых расходомеров с достаточно высокой частотой возбуждения измерительных трубок (например, со слабо изогнутыми трубками) оказывается меньше погрешности массометров с низкой частотой возбуждения, находит подтверждение в большом количестве экспериментальных работ.

Затухание. Эффект неоднородного распределения пузырьков. Специалистам хорошо известно, что трение между жидкостью и пузырьками газа приводит к возникновению так называемой силы затухания. В отличие от силы Кориолиса F_K , которая на входе в измерительную трубку и на выходе из нее направлена в разные стороны, сила затухания $F_{зат}$ направлена в одну сторону — против направления движения измерительной трубки (рис. 2). Если пузырьки вдоль измерительной трубки распределены однородно, то сила затухания на входе в трубку совпадает с силой затухания на выходе из нее. В этом случае она не приводит к возникновению дополнительной погрешности, поскольку одинаково влияет на показания чувствительных элементов расходомера, расположенных на разных концах измерительных трубок симметрично относительно их середины. Если же пузырьки вдоль измерительной трубки распределены неоднородно, то сила затухания приводит к неконтролируемой случайной погрешности, так как имеет в точках расположения чувствительных элементов непредсказуемо разные значения.

Степень однородности распределения пузырьков зависит от формы измерительных трубок. Например, при горизонтальной установке массометра с U-образными трубками добиться однородного распределения пузырьков вообще невозможно из-за силы Архимеда, которая на входе в трубку препятствует, а на выходе из нее, наоборот, способствует движению пузырьков (рис. 3). Таким образом, на входе в трубку всегда создается повышенная плотность распределения пузырьков, а на выходе из нее — пониженная. Эксперименты показали, что на самом деле, в отличие от расходомера со слабо изогнутыми трубками, добиться однородного распределения пузырьков в U-образных измерительных трубках не представляется возможным даже при вертикальной установке прибора. В связи с этим можно было бы предположить, что оптимальной является прямая измерительная трубка. Если говорить об однородности распределения пузырьков газа вдоль трубки, то это действительно так. Одна-

ко прямотрубные массовые расходомеры характеризуются слишком высокой частотой возбуждения, что может привести к доминированию эффекта резонатора над пузырьковым эффектом.

Экспериментальные результаты. Отдельный интерес, с точки зрения обсуждаемых в статье эффектов, представляет анализ результатов испытаний кориолисового расходомера Promass 83F производства компании Endress+Hauser [5]. Данный расходомер имеет слабо изогнутые измерительные трубки, частота возбуждения которых при измерении нефти составляет порядка 500 Гц. На рис. 4 показана зависимость погрешности расходомера от содержания свободного газа в потоке нефти, полученная при двух разных давлениях: $14 \cdot 10^5$ Па (14 бар) и $70 \cdot 10^5$ Па (70 бар). При давлении $14 \cdot 10^5$ Па и содержании свободного газа до 7 % погрешность расходомера является положительной величиной и не превышает 5 %. На качественном уровне это может быть интерпретировано как превышение погрешности из-за эффекта резонатора над погрешностью, обусловленной пузырьковым эффектом. При давлении $70 \cdot 10^5$ Па погрешность прибора становится отрицательной и не превышает -2 % при содержании свободного газа до 12 %. Этот факт можно объяснить уменьшением погрешности, связанной с эффектом резонатора, из-за увеличения давления процесса. Действительно, с возрастанием давления увеличивается скорость звука c в двухфазной среде (см. рис. 1). Соответственно, растет резонансная частота f_0 (см. (2)) и, как следствие, уменьшается погрешность из-за эффекта резонатора (см. (3)). Таким образом, при давлении $70 \cdot 10^5$ Па эффект резонатора практически полностью скомпенсировал пузырьковый эффект.

В заключение отметим, что построение удовлетворительной количественной модели прохождения двухфазного потока через кориолисовый расходомер — дело будущего. Вместе с тем, исходя из изложенного в настоящей статье, можно сделать вывод, что погрешность кориолисового расходомера при измерении двухфазного потока существенно зависит от конструкции его первичного преобразователя и способа установки. Конструкция преобразователя с двумя слабо изог-

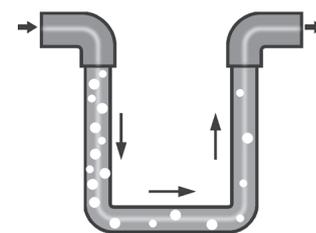


Рис. 3. Пузырьки свободного газа в горизонтально установленном расходомере с U-образной измерительной трубкой

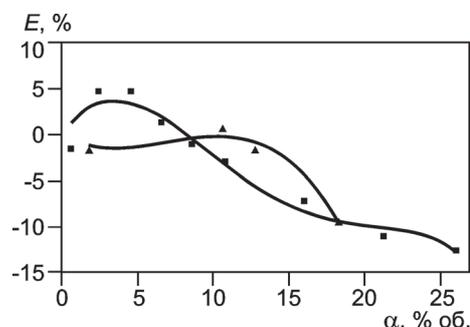


Рис. 4. Зависимость погрешности расходомера E от объемной доли α свободного газа в нефти при различных давлениях: $14 \cdot 10^5$ Па (14 бар) — ■; $70 \cdot 10^5$ Па (70 бар) — ▲

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.