

© А.А. ВАКУЛИН, Б.Г. АКСЕНОВ, А.В. ТАТОСОВ, А.А. ВАКУЛИН

avakulin@utmn.ru

УДК 532.575.2

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА ДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ

**АННОТАЦИЯ.** В работе предложена методика измерения расхода многофазного потока с помощью последовательно установленных сужающих устройств: штуцера, диафрагмы и сопла Вентури.

**АННОТАЦИЯ.** This paper proposed a method for measuring the flowrate of multiphase flow by means of constriction devices installed in series: choke, orifice and nozzle venturi.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Измерение, расходомеры, многофазные потоки, ИВК.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** The measurement, flowmeters, multiphase flow, the MCS.

Проблема создания и совершенствования методов и средств измерения расхода и количества многофазных сред остается до сих пор весьма актуальной. Этой проблеме посвящены публикации [1-4]. В нефтегазовой промышленности очень часто имеет место поток флюида через различные ограничители, в частности, погружные или поверхностные штуцеры (рисунок 1) [5].

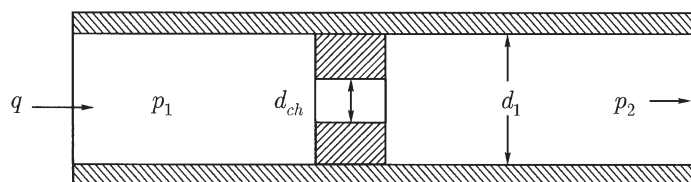


Рис. 1. Схематичное изображение штуцера

Штуцеры предназначены для контроля дебитов или давления. Обычно они имеют закругленное входное отверстие и достигают в длину нескольких сантиметров. Устанавливаются штуцеры вблизи устья для контроля дебита и/или давления и имеются почти во всех добывающих скважинах.

Известно, что если отношение давлений после и до штуцера  $y = P_2/P_1$  меньше определенной величины, то сжимаемый поток в отверстии штуцера достигает скорости, равной скорости звука. При дальнейшем уменьшении  $y$  массовый расход остается практически постоянным. Это явление характерно как для однофазного потока газа, так при определенных ограничениях и для многофазного потока при известной скорости звука (рисунок 2).

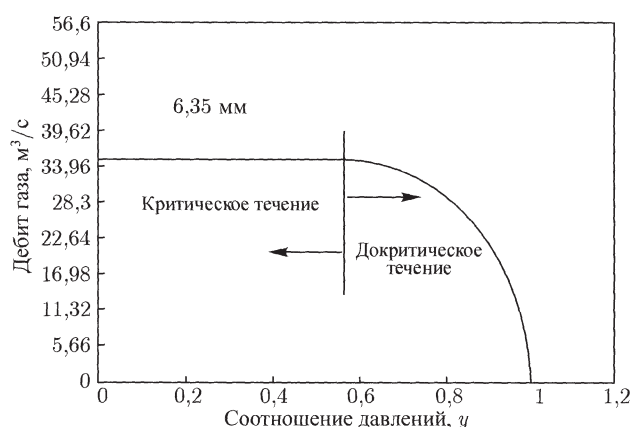


Рис. 2. Зависимость дебита потока, протекающего через штуцер, от значения  $y = P_2/P_1$  [5]

В принципе, зная геометрические параметры штуцера, можно определить характеристики многофазного потока, протекающего через эту преграду, в частности установить условия перехода из докритического течения в критическое. Полученные результаты зависят от значения отношения давлений и от значения скорости звука в многофазном потоке. Существует несколько методов, предложенных разными авторами, предназначенных для прогнозирования границ критического течения для многофазного потока, такие как методы Эшфорда и Пиерса, Сакдевы и др., Перкинса, Фортунати [5]. Можно решать и обратную задачу, например, рассчитывать диаметр отверстия штуцера, при котором дебит скважины будет поддерживаться постоянным. Соответствующие зависимости приведены в [5].

Несмотря на то, что расход (дебит), протекающий за штуцером, можно рассчитать теоретически [6], мы предлагаем использовать штуцер в качестве одного из компонентов многофазного расходомера, предназначенного для измерения расхода дисперсного или дисперсно-кольцевого многофазного потока, характерного, в частности, для газоконденсатных месторождений.

Метод измерений основан на последовательном измерении перепада давления на сужающих устройствах, установленных на прямом измерительном участке после штуцера (это может быть стандартная диафрагма и сопло (или трубка) Вентури, а также температуры и давления потока. Следует отметить, что использование штуцера позволяет избавиться от типичного недостатка измерений расхода методом переменного перепада — небольшого динамического диапазона измерений. Действительно, критическое течение после штуцера имеет практически постоянный расход, а небольшие возможные изменения расхода укладываются в небольшой динамический диапазон измерений с помощью стандартной диафрагмы (1:3 или 1:9 в зависимости от динамического диапазона датчика перепада давления). Принципиальная схема предлагаемого расходомера в минимальной комплектации приведена на рисунке 3.

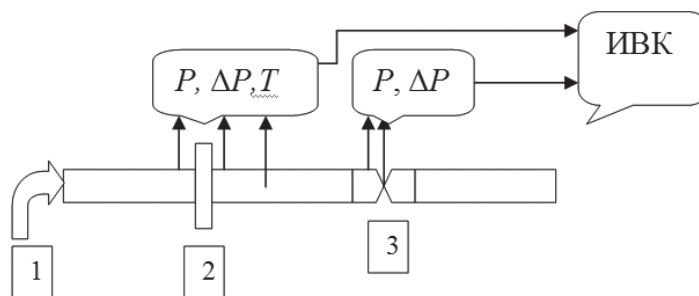


Рис. 3. Принципиальная схема многофазного расходомера.  
 1 — штуцер, 2 — стандартная диафрагма, 3 — трубка (сопло) Вентури, P — датчик давления,  $\Delta P$  — датчик перепада давления, T — датчик температуры, ИВК — измерительно-вычислительный комплекс

Из рис. 3 видно, что расходомер представляет собой следующий комплект приспособлений и средств измерений:

- штуцер — для установления практически постоянного расхода в реальном диапазоне параметров;
- стандартную диафрагму, с датчиками давления, перепада давления и температуры — для измерения расхода газа (легкой фракции);
- трубку или сопло Вентури с датчиками давления, перепада давления — для измерения общего расхода смеси (в том числе капельной жидкости — тяжелой фракции);
- ИВК — измерительно-вычислительный комплекс на базе компонентов фирмы «National Instruments» и среды графического программирования LabVIEW 8.2. — для сбора показаний первичных датчиков и обработки полученных данных [7].

Основные формулы для малых дозвуковых скоростей, лежащие в основе работы расходомера, имеют вид [1]:

$$q_m = const \cdot \sqrt{2\rho\Delta P}; \quad (1)$$

$$q_0 = const \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (2)$$

где  $q_m$  и  $q_0$  — массовый и объемный расходы соответственно,  $const$  — практически постоянная величина в некотором диапазоне чисел Рейнольдса, зависящая, в основном, от геометрических размеров и типа сужающего устройства  $\Delta P = (P_2 - P_1)$  — перепад давления при прохождении потока через стандартную диафрагму (или сопло Вентури);  $\rho$  — плотность (смеси), либо известная, либо рассчитанная по уравнению состояния, либо неизвестная.

Если приведенная плотность газообразной фазы много меньше жидкой, а масса жидкой фазы  $\eta$  в многофазной смеси не превышает 30%, то можно измерить расход без привлечения расчетных данных для плотности смеси по уравнению состояния. Действительно, скорости легкой и тяжелой фаз при те-

чении смеси через стандартную диафрагму несущественно отличаются друг от друга (у диафрагмы участок сужения очень короткий и, вследствие этого, частицы тяжелой фазы на этом участке почти не ускоряются). В этом случае, в ограниченной области значений  $\eta \leq 0,3$  плотность смеси связана с плотностью легкой фазы соотношением [8]:

$$\rho_c \approx \frac{\rho_L}{1 - \eta},$$

и зависимость массового расхода (1) преобразуется к виду:

$$q_{mL} = q_m(1 - \eta) = \text{const} \cdot \sqrt{2\rho_L \Delta P_D}.$$

Как следует из этой формулы, перепад давлений на диафрагме  $\Delta P_D$  (при сделанных допущениях и в ограниченной области значений  $\eta$ ) характеризует лишь массовый расход легкой фазы:

$$q_{mL} = q_m(1 - \eta).$$

Этот вывод, подтвержденный экспериментально, объясняется тем, что при принятом равенстве скоростей легкой и тяжелой фаз энергия на ускорение тяжелой фазы не затрачивается.

Таким образом, при использовании стандартной диафрагмы расход легкой фазы (сухой части газа) может быть определен по уравнению:

$$q_{mL} = \text{const} \cdot \sqrt{2\rho_L \Delta P_D}.$$

При известной массовой концентрации тяжелой фазы  $\eta$ , полный расход смеси вычисляются по формуле:

$$q_m = \frac{q_{mL}}{1 - \eta},$$

а расход тяжелой фазы по формуле:

$$q_{mT} = q_m \eta = q_{mL} \frac{\eta}{1 - \eta}.$$

Если величина  $\eta$  неизвестна или меняется в процессе измерений, то необходимо дополнительно измерять перепад давления на трубке или сопле Вентури  $\Delta P_B$ . Отношение  $\Delta P_B / \Delta P_D$  характеризует часть энергии потока, затрачиваемую на ускорение тяжелой фазы и соответственно пропорционально  $\eta$ .

Из опытов известно, что справедливо соотношение [8]:

$$B \frac{\eta}{1 - \eta} = \frac{\Delta P_B}{\Delta P_D} - 1.$$

Обозначим

$$\left( \frac{\Delta P_B}{\Delta P_D} - 1 \right) = A,$$

тогда

$$\eta = \frac{A}{A+B}.$$

Величина  $B$  зависит от свойств тяжелой фазы и геометрии применяемых сужающих устройств. Коэффициент  $B$  находится в процессе калибровки расходомера [7].

Сигналы с датчиков перепада давления, давления и температуры поступают в ИВК, где они обрабатываются по соответствующей программе.

Информация о расходе газа и капельной жидкости, объеме газа и капельной жидкости при стандартных условиях, наличии нештатных ситуаций при работе расходомера за любой промежуток времени выдается на дисплей компьютера, записывается в текстовый файл и регистрируется на бумажном носителе.

Выводы:

1. Предложен способ и устройство для измерения расходов фаз газоконденсатной смеси, состоящее из последовательно расположенных стандартных сужающих устройств трех разных видов.

2. При использовании уравнения состояния компонентов многофазной смеси измерительная система может включать в себя штуцер и одно из сужающих устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакулин А.А., Шабаров А.Б. Диагностика теплофизических параметров в нефтегазовых технологиях. Новосибирск: Наука: Сиб. отд. РАН, 1998.
2. Тювени Б., Тоски Э., Хопман Н., Кулятин О. Новая технология замера многофазного потока при испытаниях скважин // Нефтесервис. 2006. №3. С. 67-72.
3. Тоски Э., Ханссен Б.В., Смит Д., Теувени Б. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией // Нефтегазовое обозрение, 2003. С. 69-77.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Кн. 2. 5-е изд. перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004.
5. Брилл Дж. П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах. М.-Ижевск, 2006. 384 с.
6. Fortunati, F. Two-phase flow through wellhead chokes. Presented at the SPE European Spring Meeting held 16-18 May 1972 in Amsterdam, the Netherlands. SPE, p. 3742.
7. Вакулин А.А., Хамов Е.А. Экспериментальный стенд для изучения течения многофазных потоков при различных температурах // Вестник ТюмГУ. 2010. №6. С. 75-79.
8. Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода количества и уровня жидкости, газа и пара. М.: Издательство стандартов, 1990. 287 с.