



# Исследование метрологических характеристик

## системы диагностики УЗ расходомеров UFG при оценке плотности природного газа

Р. И. СОЛОМИЧЕВ – к.т.н., ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb solomichev@turbo-don.ru А. H. СЛОНЬКО – ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb std2@turbo-don.ru

В данной статье обозначена проблематика автоматизированного измерения массового расхода природного газа ультразвуковыми расходомерами за счет динамического изменения состава газа и несвоевременного его внесения в вычислитель преобразователя расхода. Описаны возможности и решаемые задачи диагностического инструментария приборов учета UFG, что позволяет производить управление и контроль над работой ультразвуковых расходомеров во время их эксплуатации. Приведено описание уникальной функции и метода оценки плотности природного газа с возможностью приближенного вычисления его компонентного состава. В данной методике расчета получена зависимость концентрации метана (от 87% до 99%) от скорости звука в газовой смеси с учетом влияния температуры и давления. Проведена оценка метрологических характеристик разработанной методики определения плотности газа в лабораторных условиях 000 «Турбулентность-Дон» и в условиях подконтрольной эксплуатации на УУГ ГРП высокого давления.

Ключевые слова: плотность, природный газ, ультразвуковой расходомер, скорость звука, концентрация компонентов, система диагностики

#### Постановка проблемы

Измерение объемного расхода газа при использовании ультразвуковых (УЗ) расходомеров происходит с высокой точностью (0,3...0,5%). Этим фактом обусловлено массовое серийное производство приборов данного типа для коммерческого учета расхода газа. Кроме того, УЗ расходомеры обеспечивают высокую воспроизводимость результатов измерения (0,15%), широкий динамический диапазон (1:200), возможность установки на трубопроводы от 25 до 3000 мм [1], способность работать с реверсивными потоками, устойчивость к загрязнению чувствительных элементов, отсутствие движущихся элементов и деталей, незначительное падение давления, широкий температурный диапазон среды измерения (-60...+70°С), измерение при избыточном давлении от 0 до 25 МПа.

В свою очередь массовый расход вычисляется косвенным методом на основе измеренного объемного: при текущих значениях температуры и давления, при известном составе газа, который вносится в память прибора [2]. В этом методе могут периодически возникать несоответствия, требующие решений:

- динамическое изменение состава газа обуславливает несвоевременное/некорректное внесение состава газа в вычислитель УЗ преобразователя расхода;
- повсеместное отсутствие хроматографа (спектрометра) на рядовых газораспределительных пунктах из-за их высокой стоимости;
- плотномеры газа наряду с высокой стоимостью, имеют также высокую погрешность измерения (5% и выше) при малых давлениях и высокой скорости потока.

#### Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение метрологических характеристик системы диагностики ультразвуковых расходомеров серии UFG при оценке плотности природного газа в автоматическом контроле массового расхода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод и реализовать в диагностическом ПО функцию расчета плотности природного газа на основе измеренной скорости звука;
- провести лабораторные испытания расходомера с использованием газовых смесей и исследовать метрологические характеристики расчетной методики.

### Решение задач и результаты исследования

Использование УЗ преобразователей расхода серии UFG дает главное преимущество - мощный диагностический инструментарий, реализованный во встроенном и внешнем программном обеспечении. Продвинутая система самодиагностики позволяет производить управление и контроль над работой ультразвуковых расходомеров во время эксплуатации узла измерения. Система самодиагностики УЗ расходомеров UFG решает следующие задачи:

• обеспечение контроля уровня усиления и качества сигнала, контроля отношения скорости газа по акустическим каналам к средней скорости газа в преобразователе расхода, скорости распространения звука [3];

- реализация функции отображения свойств потока (профиль, симметрия, оценка завихрения);
- реализация функции контроля над состоянием блока электроники с ведением архива событий, нештатных ситуаций и несанкционированного доступа;
- разграничение уровней доступа пользователей для разработчика, метролога, конечного пользователя;
- интуитивно-понятный человеко-машинный интерфейс, информативный и удобный для любого из пользователей вне зависимости от предоставленного уровня доступа.

За счет физического принципа измерения — ультразвукового [3], в расходомерах UFG производства ООО «Турбулентность-Дон» имеется уникальная функция оценки плотности природного газа с возможностью приближенного вычисления его компонентного состава. Данная функция значительно расширяет диагностические возможности УЗ преобразователя расхода [4], среди которых необходимо выделить главные преимущества:

- отслеживание качества природного газа в реальном времени;
- исключение ошибок ввода показателя плотности или состава газа;
- возможность автоматического изменения метода расчета физических параметров природного газа для повышения точности и достоверности измерения;
- возможность применения метода расчета объема природного газа, приведенного к стандартным условиям через рабочую плотность напрямую;
- возможность более точно выполнять измерения объема газа в диапазонах состава газа, давлений и температур, которые не описаны стандартизованными методиками измерений (МВИ, ГОСТ, ГСССД).

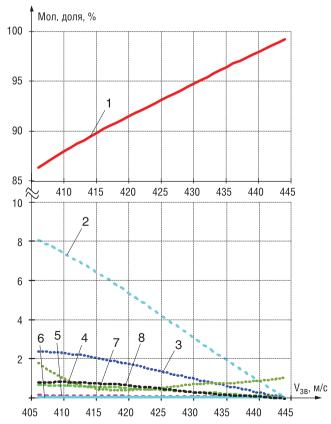


Рис. 1. Зависимость концентрации метана (1), этана (2), пропана (3), бутана (4), пентана (5), гексана (6), азота (7) и углекислого газа (8) в смеси от скорости звука при с.у.

Разработанный метод определения плотности природного газа по измеренной скорости звука позволяет оценить концентрации таких компонентов газовой смеси, как метан ( $\mathrm{CH_4}$ ), этан ( $\mathrm{C_2H_6}$ ), пропан ( $\mathrm{C_3H_8}$ ), сумма бутанов ( $\mathrm{C_4H_{10}}$ ), сумма пентанов ( $\mathrm{C_5H_{12}}$ ), гексан ( $\mathrm{C_6H_{14}}$ ), азот ( $\mathrm{N_2}$ ) и углекислый газ ( $\mathrm{CO_2}$ ). При этом сделано допущение, что инертные газы (гелий, аргон) представлены в сумме с азотом.

Согласно алгоритма расчета [2] на основе измеренной скорости звука в газе при рабочих условиях ( $T = T_{pa6}$ ,  $P = P_{pa6}$ ) вычисляется концентрация метана. Далее, вычисляется скорость звука для стандартных условий, на основе которой происходит определение остальных концентраций компонентов газовой смеси (рис. 1). Имея оценочные значения компонентного состава, легко определяются коэффициент сжимаемости, показатель адиабаты и плотность газовой смеси для рабочих и стандартных условий.

Расчетные соотношения для определения компонентного состава удовлетворительно согласуются со значительным объемом статистических экспериментальных данных, в том числе, предоставленных сотрудниками ПАО «Газпром» (паспорта качества на различные составы природного газа) для концентраций по метану от 87% до 99%. В данной методике расчета получена зависимость концентрации основного компонента — метана от скорости звука в газовой смеси с учетом влияния температуры и давления:

$$\begin{cases} C_{CH_4} = f(T_{pa6}, P_{pa6}, V_{36,pa6}); \\ V_{36,c,y,} = f(T_{c,y}, P_{c,y}, C_{CH_4}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} CH_4 \\ C_2H_6 \\ C_3H_8 \\ C_4H_{10} \\ C_5H_{12} \\ C_6H_{14} \\ N_2 \\ CO \end{cases} = f(V_{36,c,y,}),$$

$$(1)$$

при этом строго выполняется равенство:

$$\sum_{i=1}^{6} C_{C_{i}H_{2i+2}}(V_{36.c.y.}) + C_{N_{2}}(V_{36.c.y.}) + C_{CO_{2}}(V_{36.c.y.}) = 100\%$$
 (2)

Экспериментальная проверка методики по оценке плотности природного газа на основе измеренной скорости звука проведена в лабораторных условиях (при  $V_{nor.}=0$ ) и на подконтрольном газораспределительном пункте (ГРП) на переменном расходе (при  $V_{nor.}=\min$  и  $V_{nor.}=\max$  м/с). В испытаниях принимали участие два типа приборов: UFG-F-V (4 луча, диаметр условный 100 мм) — на ГРП, и UFG-F-C (2 луча, диаметр условный 80 мм) — в лабораторных условиях (рис. 2). При проведении лабораторных исследований использовалась предварительно отобранная из трубопровода ГРП газовая смесь с известным составом (паспорт качества, предоставлен Ростовским линейным производственным управлением магистральных газопроводов (ЛПУ МГ)).





Перед испытаниями фланцы прибора UFG-F-С были закрыты специальными шиберными заглушками с впускным и выпускным вентилями, а из внутреннего объема расходомера откачан воздух. После наполнения газовой смесью (молярная доля метана  $M_{CH4} = 93,3\%$ , паспортная плотность при стандартных условиях  $\rho_{\text{пасп.}} = 0,7153 \text{ кг/м}^3$ ), прибор был помещен в климатическую камеру для полной стабилизации температуры. Устранение смещение нуля и коррекция по скорости звука (так называемая «сухая калибровка») выполнена с использованием расчетной методики государственной службы стандартных справочных данных №273 от 2018г. по определению плотности, фактора сжимаемости и скорости звука (ГСССД МР 273-2018).



Рис. 2. Стенд для исследования физико-химических параметров газовых сред акустическим способом

Проведена оценка влияния изменения температуры в диапазоне от -20°С до +60°С на результат определения плотности газа при измерении скорости звука с использованием климатической камеры. Для выполнения полного термостатирования в виду массы прибора потребовалось не менее 4 часов на каждую температурную точку диапазона. Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 1.

Графически зависимость относительного отклонения оценочной плотности газа от паспортного значения для состава газа при изменении температуры приведена на рис. 3. При температуре 20.78°С погрешность определения плотности природного газа минимальна и составляет -0,058%. Данный факт можно объяснить тем, что сухая калибровка проводилась при стандартной температуре.

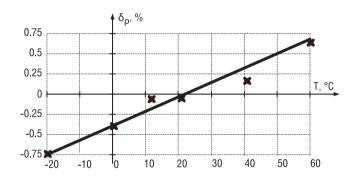


Рис. 3. Зависимость погрешности определения плотности газа от температуры

Таблица 1. Измеренные и расчетные значения контролируемых параметров при  $V_{nor.} = 0$ 

№ п/п	1	2	3	4	5	6
T, °C	-18,32	0,28	11,65	20,78	40,53	59,92
Р <sub>абс</sub> , МПа	0,531	0,599	0,685	0,713	0,764	0,813
V <sub>3B.UFG</sub> , M/C	400,9928	414,0467	421,1677	427,9559	439,8422	451,7561
V <sub>зв.пасп.раб.усл.</sub> , м/с	398,7593	412,5354	420,4938	426,8732	440,1809	452,6099
$\delta_{ extsf{V3B.\_nacn.}}, \%$	-0,557	-0,365	-0,16	-0,253	0,077	0,189
р <sub>измер.с.у.</sub> , кг/мз	0,7198	0,7143	0.7149	0.7149	0.7124	0.7099
δρ, %	-0,749	-0,402	-0,06	-0,058	0,164	0,633
$\Delta_{ ho}$ , кг/м $^3$	-0,0054	-0,0029	-0,0004	-0,0004	0,0012	0,0045

В таблице 2 приведены расчетные значения концентрации компонентов газовой смеси, которые определяются по разработанной методике в указанном диапазоне температур. Среднее значение отклонения концентрации метана от паспортного составило 0,9594%.

Выполнена оценка влияния скорости потока на результат определения плотности газа с помощью УЗ преобразователя расхода типа UFG-F-V на трубопроводе газораспределительного пункта. Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 3.

При минимальном расходе  $Q_{p,min}=6,1474$  м³/ч отклонение оценочной плотности от паспортного значения составило  $\delta_{\rho,min}=$  -0,199%. При максимальном расходе  $Q_{p,max}=1250,55$  м³/ч отклонение составило  $\delta_{\rho,max}=0,403$  %.

Рост отклонения оцениваемой плотности очевиден в виду самого принципа измерения скорости звука в измеряемом веществе в фазовых и времяимпульсных расходомерах.

Таблица 2. Влияние температуры на результат определения концентрации компонентов газовой смеси

	1	2	3	4	5	6	Ср.знач., %	CKO, %	δ <sub>пасп.</sub> , %
T, °C	-18,32	0,28	11,65	20,78	40,53	59,92			
Компоненты		Молярная доля, %							
Метан СН4	94,177	94,21	94,246	94,141	94,284	94,295	94,2255	0,0607	0,9594
Этан С2Н6	3,429	3,406	3,381	3,455	3,354	3,346	3,3951	0,0428	6,4315
Пропан С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	1,081	1,073	1,064	1,089	1,056	1,053	1,0693	0,0142	33,666
Бутан С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	0,312	0,31	0,308	0,314	0,306	0,305	0,3091	0,0035	38,020
Пентан С₅H <sub>12</sub>	0,045	0,044	0,044	0,045	0,044	0,044	0,0443	0,0005	45,833
Гексан С <sub>6</sub> Н <sub>14</sub>	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0	-
Азот N <sub>2</sub>	0,62	0,624	0,628	0,616	0,631	0,633	0,6253	0,0065	-70,173
Диоксид углерода CO₂	0,329	0,326	0,322	0,333	0,318	0,317	0,3241	0,0063	-1,469
Расчетная плотность при с.у., кг/м3	0,7198	0,7143	0,7149	0,7149	0,7124	0,7099	0,7171	0,0039	0,2446

Для устранения влияния скорости потока применяют особые схемы коррекции [5]: для этой цели устанавливается дополнительная пара УЗ пьезопреобразователей на противоположных концах диаметра трубопровода.

#### **ВЫВОДЫ**

- 1. В работе описана проблематика при автоматизированном измерении массового расхода природного газа за счет динамического изменения состава газа и несвоевременного его внесения в вычислитель УЗ преобразователя расхода.
- 2. Описаны возможности и решаемые задачи диагностического инструментария приборов учета UFG, что позволяет производить управление и контроль над работой ультразвуковых расходомеров во время их эксплуатации. Наличие уникальной функции оценки плотности природного газа с возможностью приближенного вычисления его компонентного состава расширяет диагностические возможности УЗ преобразователя расхода, в числе которых отслеживание качества природного газа в реальном времени; исключение ошибок ввода показателя плотности или состава газа; возможность автоматического изменения метода расчета физических параметров природного газа для повышения точности и достоверности измерения.
- 3. Описан разработанный метод определения плотности природного газа по измеренной скорости звука, который позволяет оценить концентрации основных компонентов смеси природного газа (метана, этана, пропана, бутана, пентана, гексана, азота и углекислого газа) с учетом влияния температуры и давления. Расчетные соотношения для определения компонентного состава удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для концентраций по метану от 87% до 99%.
- 4. Проведена оценка метрологических характеристик разработанной методики определения плотности газа в лабораторных условиях ООО «Турбулентность-Дон» и в условиях подконтрольной эксплуатации на УУГ ГРП высокого давления.
- 5. Для снижения влияния дестабилизирующих факторов при измерении скорости звука в газовой среде, таких как изменение температуры в широком диапазоне, влияние скорости потока необходимо применение аппаратных и программных средств компенсации.

Таблица 3. Измеренные и расчетные значения контролируемых параметров при  $V_{nor.} \neq 0$ 

Q <sub>р</sub> , м3/ч	6,1474	1250,55
T, °C	27,97	29,23
Р <sub>абс</sub> , МПа	0,381	0,361
V <sub>3B.UFG</sub> , M/C	432,9	432,23
V <sub>пасп.раб.усл.</sub> , м/с	432,945	433,852
δVзв., %	-0,01	-0,374
р <sub>измер.с.у.</sub> , кг/мз	0,713874	0,718185
δρ, %	-0,199	0,403
$\Delta_{ ho}$ , кг/м $^{_3}$	-0,00143	0,00288

#### Литература:

- 1. Андреева М. М., Староверова Н. А., Нурахметов М. Б. Обзор рынка расходомеров для нефтяной и газовой промышленности // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №10. С. 42-46.
- 2. Соломичев Р. И. Оценка физико-химических параметров природного газа акустическим способом / Р. И. Соломичев, А. Н. Слонько // СФЕРА. Нефть и газ. 2019. № 4/2019 (72). C. 46-51.
- 3. Бражников Н. И., Белевитин В. А., Бражникова Е. В. Акустические преобразователи свойств сред в технике: Монография. Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2011. 206 c.
- 4. Билинский И. И., Огородник К. В., Яремишена. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов. Научные труды ВНТУ. Серия: «Автоматика и информационно-измерительная техника», 2016, №2. С. 1-14.
- 5. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 1. – 5е изд., перераб. и доп. СПб: Политехника, 2004. 412 с.



Группа компаний «Турбулентность-ДОН» 346815, г. Ростов-на-Дону, 1-й км шоссе Ростов-Новошахтинск, стр. 6/7, 6/8 тел. (863) 203-77-80, 203-77-85, 203-77-86 e-mail: info@turbo-don.ru www.turbo-don.ru