



Решения, обеспечивающие метрологическую и эксплуатационную надежность ультразвуковых расходомеров Turbo Flow UFG

Р. И. СОЛОМИЧЕВ – к.т.н., ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb_solomichev@turbo-don.ru

А. Н. СЛОНЬКО – ООО НПО «Турбулентность-ДОН», sktb_std2@turbo-don.ru

Рост темпов добычи и удорожание энергоресурсов обуславливает потребность в приборах учета, при этом ставятся высокие требования к их надежности, точности и воспроизводимости результатов измерения. Среди большого разнообразия методов и средств измерения расхода газа ультразвуковые расходомеры занимают ведущую позицию благодаря характерным особенностям и высокой точности. В данной работе кратко изложен принцип ультразвукового измерения расхода газа, описаны основные дестабилизирующие факторы, оказывающие непосредственное влияние на результаты измерений, рассмотрены методы повышения метрологической надежности приборов учета, которые легли в их основу. В частности, благодаря аппаратному способу фильтрации измеренного сигнала удалось подавить акустические помехи до ультразвукового спектра частот. Основная часть работы посвящена описанию реализованного уникального алгоритма идентификации информационного сигнала при значительной устойчивой помехе, вызванной как случайным процессом появления в газовом потоке трубопровода механических примесей и жидких включений различной дисперсности, так и прогрессирующим загрязнением поверхности чувствительных элементов прибора. Произведена оценка метрологических характеристик расходомеров, удовлетворительные значения которых подтверждают эффективность применяемых методов снижения влияния дестабилизирующих воздействий.

Ключевые слова: расходомер газа, измерительный канал, акустическая помеха, электрический фильтр, загрязнение, пьезодатчик, алгоритм, цифровая обработка.

Общая постановка проблемы

Интенсификация производственных процессов и создание передовых технологий на современном этапе развития общества привели к ежегодному наращиванию добычи энергоресурсов, в частности природного газа. Российская Федерация по-прежнему возглавляет рейтинг стран по запасам природного газа, доказанный объем которого по предварительным подсчетам на 2017 год составляет 35 трлн м³, (24,6% от общемировых запасов). Разработка новых месторождений напрямую связана с поддержанием работоспособности и созданием новой газовой транспортной инфраструктуры в виде развитой системы трубопроводов и мест хранения внутри государства и за ее пределами при экспортных поставках. Логичным следствием развития газовой промышленности при ежегодном удорожании энергоресурсов является рост потребности в точном измерении объема природного газа между предприятиями добычи, транспортными компаниями и конечными потребителями.



Основными серийно выпускаемыми средствами измерения для обеспечения коммерческого учета расхода и объема газа, обеспечивающие высокую точность (до 0,3...0,5%) являются ультразвуковые (УЗ) расходомеры выпускаемые научно-производственным объединением «Турбулентность-ДОН» Turbo Flow UFG.

Характерными особенностями применяемой ультразвуковой технологии являются: широкий динамический диапазон (1:200), возможность установки на трубопроводы номинальным диаметром от 50 до 1400 мм, способность работать с реверсивными потоками, устойчивость к загрязнению чувствительных элементов, отсутствие движущихся элементов и деталей, незначительное падение давления на узлах измерений, широкий температурный диапазон (-60...+70°C) среды измерения, способность производить измерения при избыточном давлении от 0 до 25 МПа. В виду общемировой тенденции к эффективному использованию энергоресурсов ультразвуковой метод все чаще находит применение в косвенных измерениях состава газа при определении его энергетической ценности, благодаря способности определять скорость звука в среде [1]. При этом в эксплуатации, существует ряд факторов, ограничивающих использование УЗ расходомеров: размеры прямых участков до и после прибора, влияние акустической помехи на информационный сигнал, зависимость чувствительности УЗ преобразователей от изменения давления и температуры, высокие требования к точности измерения временных интервалов (не хуже 0,4 нс).

Зачастую, углеводородные газы, а особенно попутный нефтяной газ, содержат в своем составе значительное количество кислых и жирных газов, механических примесей, водяных паров и газового конденсата, малые количества нефти [2], что является основным дестабилизирующим фактором измерения расхода, понижающим метрологическую надежность прибора. Механические примеси (частицы породы из скважины, строительный шлак после строительства газопровода, продукты коррозии и эрозии внутренних его поверхностей) и жидкие включения конденсата оказывают, как ударные, так и акустически преграждающее воздействие на чувствительные элементы приборов, и выступают в качестве преграды на пути акустической волны УЗ расходомера, искажая и препятствуя прохождению информационной составляющей сигнала.

Постановка цели и задач исследования

Целью исследования являлось выявление природы возникновения и численная оценка паразитных шумовых составляющих информационного сигнала, а также выбор оптимальных методов повышения метрологической надежности ультразвуковых расходомеров за счет снижения воздействия дестабилизирующих факторов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выявлены основные дестабилизирующие факторы с различной природой возникновения;
- рассмотрены основные аппаратные и аппаратно-программные методы повышения метрологической надежности ультразвуковых расходомеров;
- разработана система автоматической регулировки усиления, позволившая снизить влияние изменения температуры и избыточного давления в рабочих диапазонах;
- произведена оценка метрологических характеристик ультразвуковых расходомеров.

Исследования и решение задачи обеспечения метрологической и эксплуатационной надежности

Прежде чем перейти к рассмотрению методов повышения метрологической надежности УЗ расходомеров необходимо конкретизировать принцип их действия. Принцип действия основанный на времяимпульсном методе измерения, при котором замеряются интервалы времени прохождения звуковой волны от пьезоизлучателя к приемнику по потоку и против него. После подачи на передающий УЗ датчик короткого импульса напряжения (так называемый FIRE-сигнал) длительностью порядка 4 мкс, формируется пространственная звуковая волна с частотой колебаний 125 кГц в направлении приемного датчика. Принятый датчиком-приемником измерительный сигнал в виде волновых цугов имеет сложную форму, образованную сложением двух гармонических колебаний с близкими частотами и разными амплитудами. Типовой вид осциллограммы измерительного сигнала, полученной на выходе предварительного усилителя, приведен на рис. 1а (1). На рис. 1а обозначен сигнал (2) разрешения работы компаратора, так называемый DELVAL-сигнал, который ограничивает зону поиска информационного сигнала.

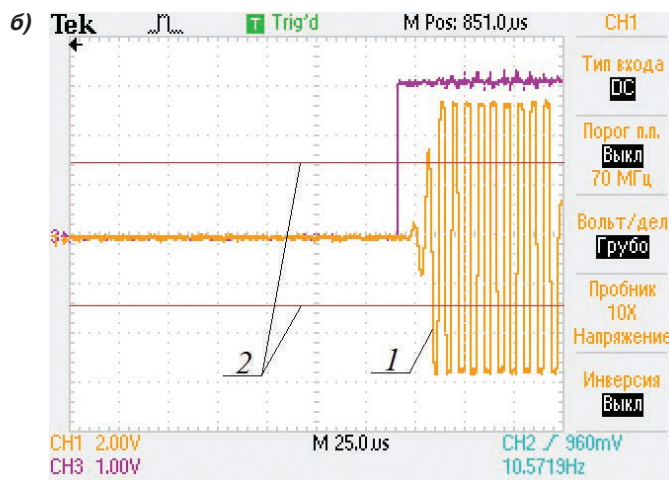
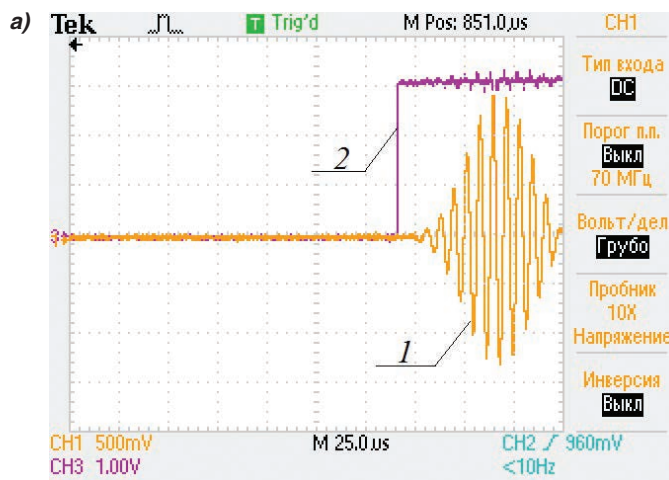


Рис. 1.
Осциллограмма информационного сигнала:
а) на выходе предварительного усилителя;
б) на выходе оконечного усилителя





Для измерения времени прохождения УЗ колебаний выполняется дальнейшее усиление сигнала и выделяется первая информационная полуволна (1, рис. 16) с амплитудой большей уровня компарирования (2, рис. 16) для гарантированного срабатывания компаратора и фиксации временного интервала. За время пролета импульса принимается интервал времени между выстрелом и моментом срабатывания компаратора. При фиксированном расстоянии между УЗ преобразователями и измеренном времени пролета звуковой волны вычисляется скорость потока газа в трубопроводе.

В реальности могут быть случаи, когда амплитуды информационной полуволны сигнала недостаточно (например, скорость потока превышает максимальный предел или чувствительная поверхность датчиков загрязнена) и тогда произойдет срабатывание по следующей полуволне, что в конечном итоге приведет к искажению результатов измерений и вычислению неверной скорости потока. В другом случае, ввиду наложенных акустических паразитных шумов на осциллограмме перед информационной полуволной могут возникнуть несколько иных полуволн, после усиления которых, будет происходить ложное срабатывание компаратора и вычисляться не корректное значение скорости потока и расхода соответственно.

На основании проведенных исследований удалось установить природу паразитных акустических шумов, частотный спектр которых составляет от единиц Гц до десятков кГц [4, 5], – это электромагнитная вибрация насосных компрессорных узлов трубопровода, виброакустические свойства подшипников качения, механическая несбалансированность роторов, аэродинамические силы электрических машин и самого трубопровода.

Аппаратные методы решения задачи

Инвариантность системы измерения расхода к рассмотренным дестабилизирующим факторам реализуется следующими аппаратными методами.

Для подавления сигнала акустической помехи (рис. 2) в усилительный тракт преобразователя введен каскад активного фильтра верхних частот с частотой среза порядка 120 кГц.

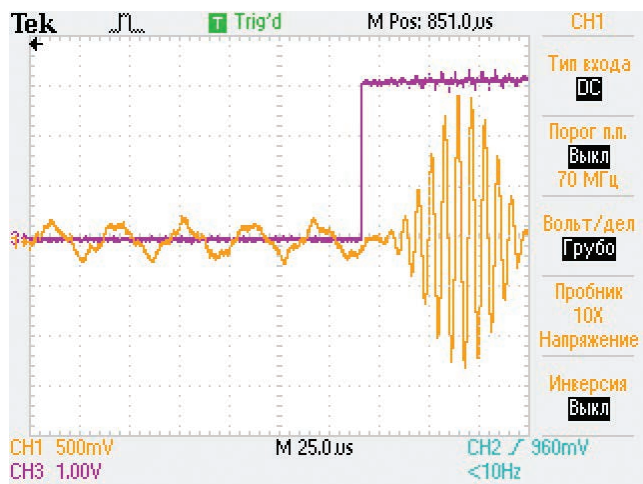


Рис. 2. Осциллограмма информационного сигнала до введения фильтра ВЧ

Фильтр практически не ослабляет полезный измерительный сигнал с частотой 125 кГц, но эффективно подавляет сигнал помехи с частотой порядка 30 кГц и ниже.

Также известно, что уровень сигнала пропорционален давлению газа и обратно пропорционален расстоянию между УЗ датчиками. При изменении температуры в рабочем диапазоне удельная чувствительность датчиков изменяется в пределах от минус 50 до 20%.

Для стабилизации требуемого уровня сигнала на выходе измерительного усилителя в широком диапазоне давлений (от 0 до 25 МПа) и температуры газа в расходомерах Turbo Flow UFG разработана система автоматической регулировки усиления (APU), способная регулировать коэффициент усиления измерительного усилителя не менее чем в 1000 раз. Система APU выполнена по принципу следящей системы с пропорциональным законом регулирования коэффициента усиления в реальном времени.

Если уровень измерительного сигнала по отдельному лучу оказывается меньше номинального (идеальной амплитуды), то система APU будет увеличивать коэффициент усиления до заданной амплитуды, если больше – уменьшать.

Программные методы решения задачи

Измерительная задача усложняется, а метрологическая надежность прибора снижается при процессах возникновения в газовом потоке трубопровода механических примесей и жидких включений различной дисперсности, вносящих значительную составляющую помехи в измеряемый сигнал. При этом с течением времени в реальных условиях эксплуатации расходомеров чувствительная поверхность УЗ преобразователей постепенно покрывается смолистыми и парафиновыми отложениями, дополнительно снижая значение соотношения сигнал-шум. В этом случае невозможно обойтись без применения методов цифровой фильтрации и идентификации информационной составляющей сигнала.

В результате проведения научно-исследовательской работы конструкторским бюро ООО НПО «Турбулентность-Дон» был разработан и реализован алгоритм цифровой фильтрации и поиска информационного сигнала в УЗ преобразователях расхода серии Turbo Flow UFG-F.

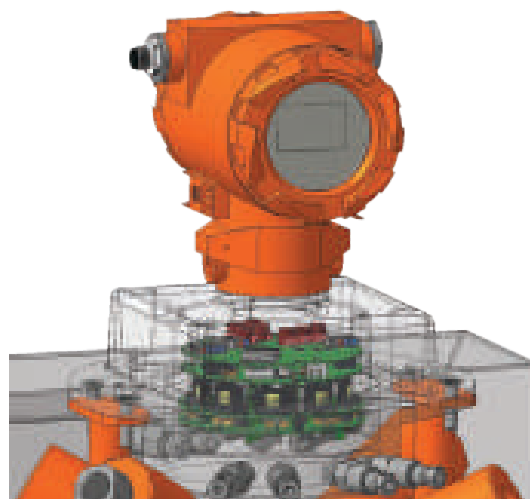


Рис. 3. Модель расположения плат в ультразвуковом расходомере Turbo Flow UFG

Идея поиска информационного сигнала основана на анализе экстремумов корреляционной функции (1), которая характеризует связь между эталонным и измеренным сигналом с помощью математического аппарата [6].

$$\rho_i(t) = \frac{\overline{x_i(t)} \overline{y(t)}}{\sqrt{|\overline{x_i(t)}|^2 |\overline{y(t)}|^2}} \quad (1)$$

где: $\overline{x_i(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x_i(t) dt$ – средние временные значения измеренного сигнала i -го луча прибора,

$\overline{y(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y(t) dt$ – средние временные значения эталонного сигнала.

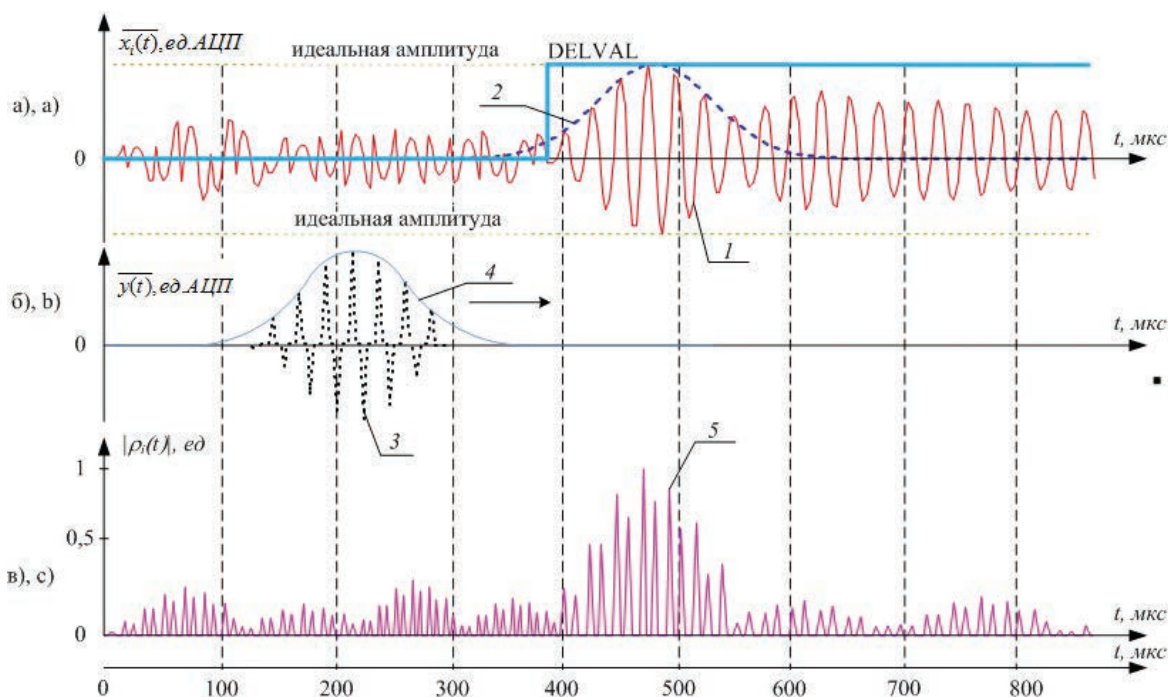


Рис. 4.
Цифровая обработка сигналов:
а) измеренный сигнал с помехами;
б) эталонный сигнал;
в) корреляционная функция двух сигналов

Эталонные значения принятого акустического сигнала (3, рис. 4) хранятся в памяти прибора, а измеренные и далее оцифрованные осциллограммы (1, рис. 4) подвергаются обработке. Матрица эталонного сигнала состоит из значений экстремумов первого информационного цуга (волнового пакета), разделенных нулевыми значениями, которыми заполняются промежуточные отсчеты между экстремумами для сохранения периода колебаний.

Обработка сигнала с УЗ датчика-приемника заключается в сканировании всего массива отчетов по каждому из лучей прибора в заданный период времени – от момента выстрела зондирующего излучения передающего преобразователя до момента следующего измерения и определения максимального коэффициента корреляции (5, рис. 4) сигналов ($|\rho_i(t)| = 0..1$) в момент времени t . По вычисленным временам t можно точно определить место текущей установки DELVAL для каждого i -го луча прибора.

Волновой цуг принятой звуковой волны характеризуется определенной формой, заданной некоторым количеством положительных и отрицательных полуволн с различными амплитудами, описываемыми функцией-огibaющей (4, рис. 4).

В процессе измерения на расходе с присутствующими дестабилизирующими воздействиями, форма огибающей может значительно изменяться (2, рис. 4), что угрожает изменению амплитуды информационной волны и ложному срабатыванию компаратора по соседней полуволне. Таким образом, после определения положения информационного сигнала по лучам происходит коррекция форм огибающих с помощью реализованной аппаратной функции АРУ сигнала, что гарантирует точность срабатывания компаратора. Данный алгоритм используется во всей линейке ультразвуковых расходомеров газа серии Turbo Flow UFG и расходомеров жидких углеводородов Turbo Flow UFL с условными диаметрами от 50 до 1400 мм.





Экспериментальные исследования разработанного алгоритма

Экспериментальные исследования и проверка устойчивости реализованного алгоритма к различным дестабилизирующим факторам были выполнены на испытательных стендах заводских лабораторий и в рабочих условиях на объектах с подконтрольной эксплуатацией оборудования.

В лабораторных условиях имитировались самые жесткие режимы работы УЗ расходомеров в отношении загрязнения среды измерения: искусственно была создана акустическая связь чувствительных преобразователей с корпусом расходомера за счет акустопроводящего геля (рис. 5а), снижение чувствительности датчиков и соотношения сигнал-шум за счет обильного нанесения на них имитаций смолистых и парафиновых отложений, конденсата (рис. 5б). С помощью генератора механических включений различной величины вносились переменные механические помехи (рис. 5в).

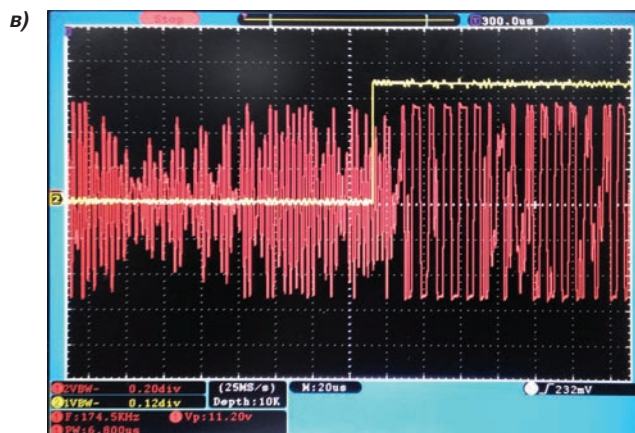
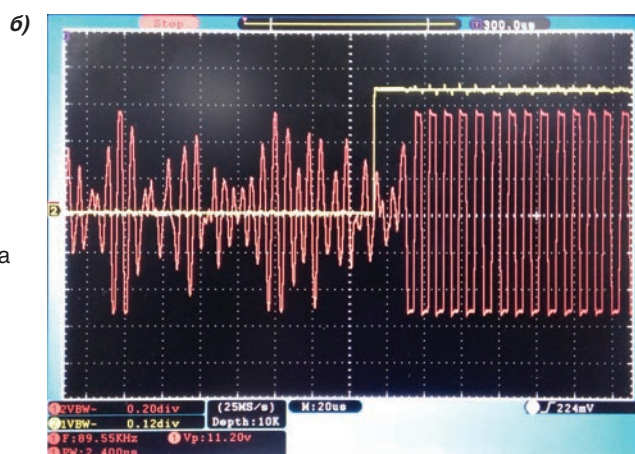
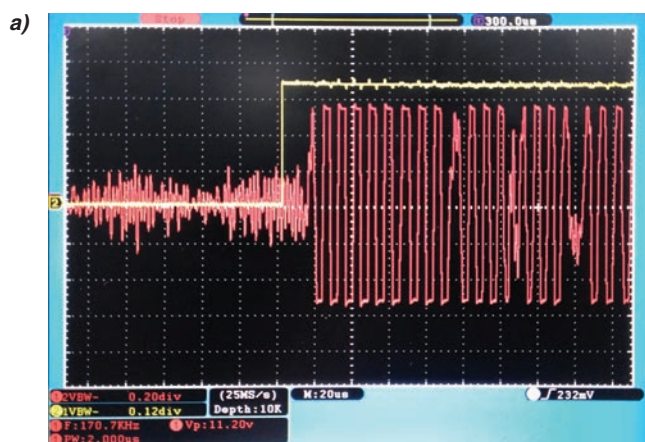


Рис. 5.
Осциллограммы приемного сигнала с имитацией помех:
а) акустический проводящий гель между УЗ датчиками и корпусом;
б) смолистые отложения;
в) случайная механическая помеха

Получена оценка метрологических характеристик УЗ расходомеров газа Turbo Flow UFG-F-V методом проливки на испытательной установке СПУ-6 при непрерывном воздействии указанных дестабилизирующих факторов (рис. 6): максимальное значение относительной погрешности измерения расхода составило не более $\pm 0,26\%$ при расходах от $Q_{\min} - 0,01Q_{\max}$, а в диапазоне $0,01Q_{\max} - Q_{\max}$ значение относительной погрешности не превышает $\pm 0,17\%$.

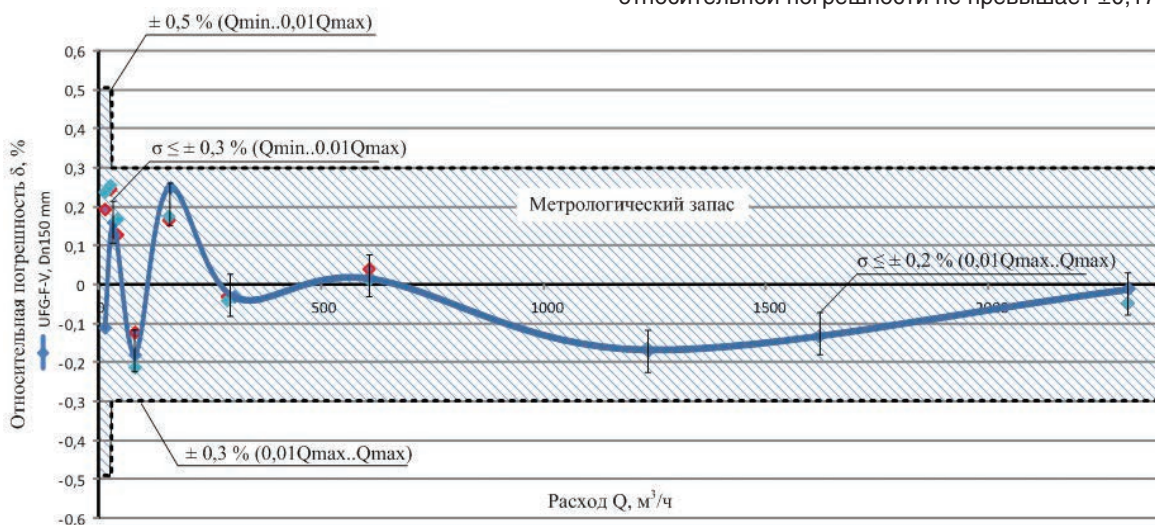


Рис. 6.
Предельно допустимая и фактическая относительная погрешность УЗ расходомера серии UFG-F-V

Проведенные последующие испытания на объектах в условиях подконтрольной эксплуатации доказали устойчивость измерительной системы к различным дестабилизирующим факторам.

Выводы

1. В работе кратко изложен принцип ультразвукового измерения расхода, описаны основные дестабилизирующие факторы (акустические помехи, твердые и жидкие дисперсные частицы), оказывающие непосредственное влияние на результаты измерений.
2. Рассмотрены основные методы повышения метрологической надежности ультразвуковых расходомеров. В частности, благодаря аппаратному способу фильтрации информационного сигнала удалось подавить акустические помехи до ультразвукового спектра частот.
3. В результате проведения научно-исследовательской работы конструкторским бюро ООО НПО «Турбулентность-Дон» реализован уникальный алгоритм идентификации информационного сигнала при наличии значительной устойчивой помехе, вызванной как случайным процессом появления в газовом потоке трубопровода механических примесей и жидких включений различной дисперсности, так и прогрессирующим загрязнением поверхности чувствительных элементов прибора.
4. Разработанная система автоматической регулировки усиления позволила существенно снизить влияние изменения температуры в диапазоне от минус 60 до 70°C и избыточного давления от 0 до 25 МПа.
5. Адекватность математической модели цифровой фильтрации подтверждается устойчивостью измерительной системы к различным дестабилизирующим воздействиям окружающей и измерительной среды при многочисленных лабораторных и ресурсных испытаниях ультразвуковых расходомеров семейства Turbo Flow UFG, установленных непосредственно на узлах учета промышленных трубопроводов, в том числе содержащих попутный нефтяной газ.

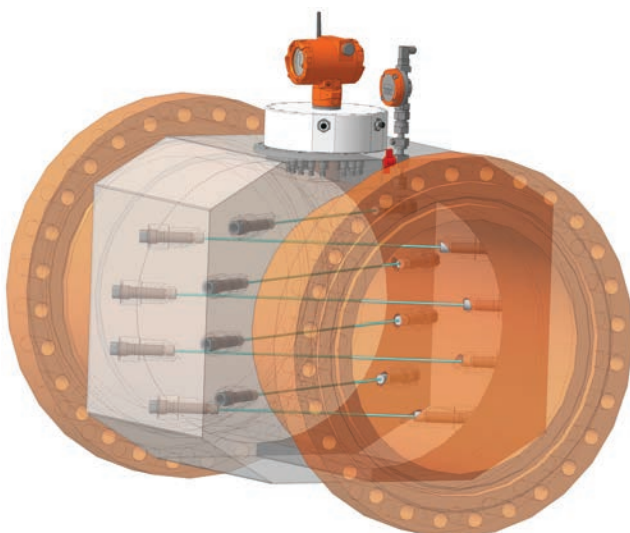


Рис. 7.
Модель ультразвукового расходомера Turbo Flow UFG



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. Муллахметова Л. И., Черкасова Е. И. Попутный нефтяной газ: подготовка, транспортировка и переработка // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №19. С. 83–90.
3. Разетдинов Р. М., Курамшин Ю. Р., Тахауов А. М., Волков С. В. Попутный нефтяной газ для выработки электроэнергии на месторождении // Турбины и дизели. 2009, №9. С. 16–17.
4. СТО Газпром 2-3.5-043-2005. Защита от шума технологического оборудования ОАО «Газпром». Челябинск: ВНИИГаз, 2005. 37 с.
5. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергия, 1973. 200 с.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. 312 с.
7. Герасимова Е. Б., Герасимов Б. И. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Форум, 2014. 224 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