ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 17089-1 2025

Измерение расхода сред в закрытых каналах

СЧЕТЧИКИ ГАЗА УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ

Технические и метрологические требования

(ISO 17089-1:2019, Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas — Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2026

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Всероссийским научно-исследовательским институтом расходометрии — филиалом Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ВНИИР — филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Обществом с ограниченной ответственностью «Гринсистемс» (ООО «Гринсистемс») на основе официального перевода на русский язык англоязычной версии указанного в пункте 4 стандарта, который выполнен ФГБУ «Институт стандартизации».

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 024 «Метрологическое обеспечение добычи и учета энергоресурсов (жидкостей и газов)».

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 декабря 2025 г. № 1650-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 17089-1:2019 «Измерение расхода текучих сред в закрытых каналах. Ультразвуковые счетчики газа. Часть 1. Счетчики для коммерческого учета и локальных измерений» (ISO 17089-1:2019 «Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic meters for gas — Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement», IDT).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА.

Дополнительные сноски в тексте стандарта, выделенные курсивом, приведены для пояснения текста оригинала

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.rst.gov.ru).

Содержание

1 Область применения.. 1
2 Нормативные ссылки.. 1
3 Термины, определения и обозначения 1
3.1 Термины и определения... 1
3.2 Обозначения и подстрочные индексы...4
3.3 Сокращения.. 6
4 Принципы измерений 7
4.1 Базовые формулы...7
4.2 Факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики 8
4.3 Описание характерных конструкций 8
4.4 Составляющие неопределенности измерений.. 11
4.5 Число Рейнольдса..12
4.6 Классификация USM..12
5 Характеристики счетчика 12
5.1 Условия эксплуатации... 12
5.2 Корпус счетчика, материалы и конструкция 13
5.3 Ультразвуковые преобразователи 16
5.4 Электронные компоненты... 16
5.5 Программное обеспечение..18
5.6 Замена компонентов..19
5.7 Дополнительные измерения... 20
5.8 Эксплуатационные требования 21
5.9 Требования к эксплуатации и монтажу 22
5.10 Документация.. 26
6 Испытание и калибровка..27
6.1 Испытание под давлением и испытание на герметичность...27
6.2 Индивидуальные испытания. Статические испытания...27
6.3 Индивидуальные испытания. Калибровка в потоке 28
7 Испытания типа USM 32
7.1 Общие сведения 32
7.2 Точность...33
7.3 Условия монтажа...33
7.4 Моделирование отказа акустического канала и замена компонентов 33
7.5 Испытание конструкции электроники.. 34
8 Журнал контроля и диагностика для проверки счетчика.. 34
8.1 Общие сведения 34
8.2 Процесс жизненного цикла USM 35
8.3 Производство и заводские приемочные испытания.. 35
8.4 Первичная калибровка по расходу 37
8.5 Монтаж и приемочные испытания на месте эксплуатации 37
8.6 Эксплуатация...37
8.7 Предупреждающий и аварийный уровни сигналов диагностики при эксплуатации............................... 38
8.8 Обслуживание и повторная калибровка 39
8.9 Диагностические параметры 40
9 Эксплуатационная практика..43
9.1 Коррекция по температуре и давлению.. 43
Приложение А (справочное) Определение допустимых границ отклонений результатов калибровок...49
Приложение В (справочное) Установление и коррекция погрешностей USM.. 50
Приложение С (справочное) Характеристика запорного оборудования и шум на газоизмерительной и регулирующей станции..53
Приложение D (справочное) Время калибровки ультразвуковых счетчиков.. 60

Приложение E (справочное) Подробный расчет связанных с геометрией поправок по температуре и давлению 64
Приложение F (обязательное) Спецификация данных связи MODBUS 79
Приложение G (справочное) Испытания на устойчивость к внешним возмущениям........ 85
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам........ 87
Библиография........89

Введение

Ультразвуковые счетчики газа[1]) начиная с 2000 года быстро проникли на рынок средств измерений и стали одним из основных типов средств измерений расхода газа как для технологических целей, так и для коммерческого учета. Наряду с высокой воспроизводимостью и высокой точностью ультразвуковая технология обладает такими неотъемлемыми особенностями, как незначительные потери давления, широкий диапазон измерений и способность работать с пульсирующими потоками.

Ультразвуковые счетчики газа могут предоставлять расширенную диагностическую информацию, с помощью которой можно проверить их функциональные возможности. Кроме того, измеренную с помощью ультразвукового счетчика газа скорость звука можно сравнить со скоростью звука, рассчитанной по давлению, температуре и составу газа, что позволяет провести взаимную проверку правильности работы задействованных в процессе средств измерений. Благодаря расширенным диагностическим возможностям в настоящем стандарте предлагается внедрение и использование автоматизированной диагностики вместо трудоемких проверок качества измерений.

Данный стандарт посвящен счетчикам, с помощью которых осуществляют измерения для обеспечения коммерческого учета газа (счетчики класса 1 и класса 2). Счетчики для технологических целей, включая измерения расхода и объема газа во вспомогательных системах и технологических процессах, а также измерений расхода и объема факельного газа и выбросов, расхода и объема газа в коммунальном секторе рассмотрены в ISO 17089-2.

Классификационная схема счетчиков по типовым параметрам[2]);

Класс	Типовое применение	Класс точности	Ссылка
1	Коммерческий учет (передача)	класс 0,5 или класс 1,0	Настоящий стандарт
2	Коммерческий учет (распределение)	класс 1,5	Настоящий стандарт
3	Измерения в коммунальном секторе и технологических процессах		ISO 17089-2
4	Измерение расхода и объема факельных газов и выбросов		ISO 17089-2

Типовые конфигурации счетчиков класса 1 и 2 представляют собой многолучевые счетчики с хордовыми траекториями акустического сигнала в различных радиальных положениях.

Типовые конфигурации счетчиков класса 3 и 4 представляют собой однолучевые счетчики, счетчики только с диаметральными траекториями, врезные счетчики, бытовые счетчики, счетчики для установки в вытяжках и дымоходах, а также счетчики для факельного газа.

[1]) В тексте настоящего стандарта под термином «счетчик газа» понимается средство измерений расхода и объема газа (расходомер-счетчик газа).

[2]) В Российской Федерации метрологические требования к измерениям количества газа установлены в Перечне измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 г. № 1847.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Измерение расхода сред в закрытых каналах

СЧЕТЧИКИ ГАЗА УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ

Технические и метрологические требования

Measurement of flow in closed conduits. Ultrasonic meters for gas. Technical and metrological requirements

Дата введения — 2026—02—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования и рекомендации для ультразвуковых счетчиков газа, которые используют время прохождения акустических сигналов для измерения расхода однофазных однородных газов в закрытых каналах[1]).

Настоящий стандарт распространяется на ультразвуковые счетчики газа, применяемые для коммерческого учета газа при его передаче и распределении, к которым относятся как полнопроходные счетчики, счетчики с уменьшенной площадью сечения, счетчики высокого и низкого давления, так и любая их комбинация. Отсутствуют ограничения на минимальные или максимальные размеры счетчика. Этот стандарт может применяться при измерениях практически любого типа газа, например воздуха, природного газа и этана.

Настоящий стандарт включает требования к характеристикам счетчиков газа двух классов точности, предназначенных для коммерческого учета газа при его передаче и распределении.

Настоящий стандарт определяет конструкцию, рабочие характеристики, требования к калибровке, диагностику для проверки счетчика, а также выходные характеристики ультразвуковых счетчиков газа и условия их монтажа.

Примечание — Национальные или другие нормативные документы могут иметь более строгие требования, чем указанные в настоящем документе.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных ссылок применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

ISO 4006, Measurements of fluid flow in closed conduits — Vocabulary and symbols (Измерение расхода текучих сред в закрытых каналах. Словарь и условные обозначения)

ISO 5168, Measurements of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties (Измерение расхода текучих сред. Процедура оценки неопределенностей)

ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий)

3 Термины, определения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ISO 4006, а также следующие термины с соответствующими определениями.

[1]) В тексте настоящего стандарта под термином «закрытый канал» понимается трубопровод круглого сечения.

Издание официальное

ИСО и МЭК поддерживают терминологические базы данных для использования в целях стандартизации, находящиеся по следующим адресам:

- платформа онлайн-просмотра ИСО, доступна по адресу: https://www.iso.org/obp;
- Электропедия МЭК, доступна по адресу: https://www.electropedia.org/

3.1.1 Величины

3.1.1.1 **объемный расход** (volume flow rate):

где *V* — объем;

t — время.

3.1.1.2 **давление** (pressure *p)'.* Абсолютное давление газа в счетчике при условиях потока, которому соответствует измеренный объем газа.

3.1.1.3 **средняя скорость** (average velocity?): Объемный расход, деленный на площадь поперечного сечения.

3.1.2 Конструкция счетчика

3.1.2.1 **корпус счетчика** (meter body): Элемент счетчика, находящийся под давлением.

3.1.2.2 **акустическая траектория** (acoustic path): Траектория, по которой акустический сигнал проходит между двумя ультразвуковыми преобразователями.

3.1.2.3 **осевая траектория** (axial path): Траектория акустического сигнала, совпадающая с направлением оси трубопровода.

Примечание — Осевая траектория может проходить либо строго по осевой линии или продольной оси трубы, либо быть параллельной ей (см. рисунок 1).

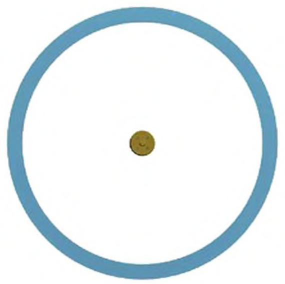


Рисунок 1 — Осевая траектория акустического сигнала

3.1.2.4 **диаметральная траектория** (diametrical path): Траектория акустического сигнала, которая проходит через осевую линию или продольную ось трубы.

Примечание —См. рисунок 2.

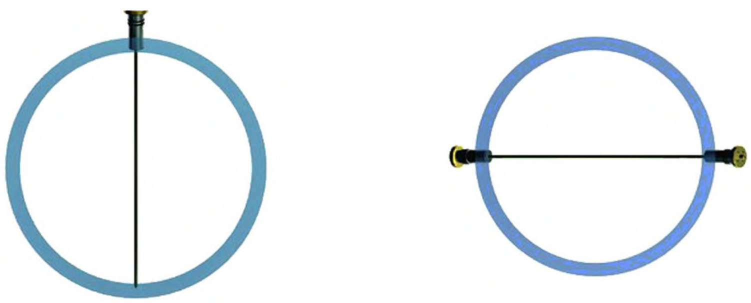


Рисунок 2 — Диаметральные траектории акустического сигнала

3.1.2.5 **хордовая траектория** (chordal path): Траектория акустического сигнала, которая проходит параллельно диаметральной траектории.

Примечание — См. рисунок3.

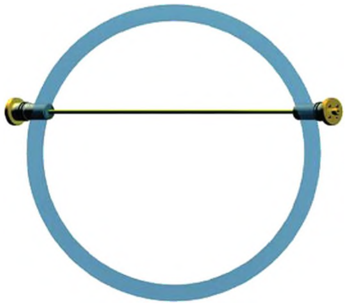


Рисунок 3 — Хордовая траектория акустического сигнала

3.1.3 Термодинамические условия

3.1.3.1 **условия измерений** (metering conditions): Условия рабочей среды, объем которой подлежит измерению.

Примечание — Условия измерений включают состав газа, его температуру и давление.

[ИСТОЧНИК: ISO 9951:1993, 3.1.6, термин изменен — вместо термина «газ» используется термин «среда».]

3.1.3.2 **стандартные условия** (base conditions): Условия, к которым приводится измеряемый объем среды.

Примечание — стандартные условия включают стандартные значения температуры и давления.

[ИСТОЧНИК: ISO 9951:1993, 3.1.7, термин изменен — вместо термина «газ» используется термин «среда».]

3.1.4 Статистические параметры

3.1.4.1 **погрешность измерений** (measurement error): Разность измеренного и эталонного значений величины.

[ИСТОЧНИК: Руководство ИСО/МЭК 99—2007, 2.16]

ПРИМЕР: Разность значений величины, измеренной испытуемым счетчиком и эталонным счетчиком.

3.1.4.2 **калибровочная[1]) кривая** (calibration curve): Набор погрешностей измерения при различных значениях расхода по отношению к известному эталонному счетчику (расходомеру).

3.1.4.3 **максимально допускаемая погрешность** (maximum permissible error MPE): Предельное значение погрешности измерений по отношению к известному эталонному значению величины, допускаемое спецификациями или нормативными документами для определенного рабочего диапазона счетчика.

[ИСТОЧНИК: Руководство ИСО/МЭК 99—2007, 4.26, изменен — вместо термина «максимально допускаемая погрешность измерения» применен термин «максимально допускаемая погрешность», обозначенный сокращением MPE.]

О В соответствии с Международным словарем JCGV200.2008 калибровка — это операция, в ходе которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями с присущими им неопределенностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получать результат измерения исходя из показания.

Калибровка может быть выражена как утверждение, функция калибровки, диаграмма калибровки, калибровочная кривая или таблица калибровки. В некоторых случаях она может включать аддитивную или мультипликативную поправку к показаниям с соответствующей неопределенностью.

Калибровку не следует путать ни с регулировкой измерительной системы, часто ошибочно называемой самокалибровкой, ни с верификацией калибровки.

Часто только первый шаг в приведенном выше определении понимается как калибровка.

3.1.4.4 **максимальная погрешность между пиковыми значениями** (maximum peak-to-peak error): Максимальная разница между любыми двумя значениями погрешности.

3.1.4.5 **сходимость или повторяемость** (repeatability): Близость совпадения результатов последовательных измерений одной и той же измеряемой величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Примечание — Сходимость (повторяемость) должна быть рассчитана в абсолютном выражении как неопределенность типа А в однократном измерении (C_{AS}) в соответствии с ИСО 5168. Коэффициент охвата $к_{95}$ должен быть получен из распределения Стьюдента для уровня доверительной вероятности 95,45 % в зависимости от количества выполненных измерений. См. ИСО 5168:2005, таблица С.1.

$${}^{f}p - {}^{U}AS - \hat{}95 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(e_i - \bar{e}\right)^2}{(n-1)}},$$

где e = -X e/- (1 п)

Коэффициент охвата $к_{95}$ имеет следующие типовые значения:

Число выполненных измерений	3	5	7	10	100	∞
коэффициент охвата $к_{95}$	4,53	2,87	2,52	2,32	2,02	2,00

3.1.4.6 **воспроизводимость** (reproducibility): Близость совпадения результатов измерений одной и той же измеряемой величины, выполненных при разных условиях.

3.1.4.7 **разрешающая способность** (resolution): Наименьшая разница между показаниями счетчика, которая может быть достоверно различима.

[ИСТОЧНИК: ИСО 11631:1998, 3.28, изменен — термин «расходомер» заменен термином «счетчик»].

3.1.4.8 **показание при нулевом расходе** (zero flow reading): Показание скорости потока, когда предполагается, что газ находится в состоянии покоя, то есть когда осевая и неосевая составляющие скорости практически равны нулю.

3.1.4.9 **линеаризация** (linearization): Способ уменьшения нелинейности и смещения показаний ультразвукового счетчика путем внесения поправок в программное обеспечение.

Примечание — Линеаризацию можно применять в электронных блоках счетчика или в вычислителе расхода, связанном с USM. Коррекция может применяться, например, в виде кусочной линеаризации (кусочно-линейной интерполяции) или полиномиальной линеаризации.

3.2 Обозначения и подстрочные индексы

Обозначения и подстрочные индексы, используемые в настоящем стандарте, приведены в таблицах 1 и 2. Примеры использования обозначений объемного расхода приведены в таблице 3.

Таблица 1—Обозначение

Величина	Обозначение	Размерность[3]	Единица величины
Площадь поперечного сечения	A	L^2	$м^2$
Скорость звука в среде	c	LT^{-1}	м/с
Наружный диаметр трубопровода	D	L	м
Внутренний диаметр корпуса счетчика	d	L	м
Модуль упругости (модуль Юнга) корпуса счетчика	E	$ML^{-1}T^{-2}$	МПа
Модуль упругости (модуль Юнга) ультразвукового преобразователя	Λ	$ML^{-1}T^{-2}$	МПа
Погрешность измерения расхода	e_i	—	1
Весовой коэффициент (текущий)		—	1
Целые числа (1, 2, 3, ...)	i, j, n	—	1

Продолжение таблицы 1

Величина	Обозначение	Размерность[3]	Единица величины
Импульс-фактор (вес импульса)	*I*	L^{-3}	м“3
Калибровочный коэффициент	*К*	—	1
Коэффициент формы корпуса	κ_8	—	1
Коэффициент торцевой нагрузки и крепления	*«Е*	—	1
Поправочный коэффициент, учитывающий распределение скоростей	^{k}h	—	1
Минимальное расстояние до определенного местного сопротивления перед счетчиком	'min	L	м
Характерная длина усреднения в ультразвуковом счетчике	^{L}AV	L	м
Амплитуда шума	^{L}P	—	ДБ
Длина траектории акустического сигнала		L	м
Коэффициент затухания	*Nd*	—	1
Весовой коэффициент клапана	N_v	—	1
Абсолютное давление	*Р*	ML ^{1}T ^{2}	Па
Разность давлений	*^Р*	ML'^{1}T ^{2}	Па
Излучаемое акустическое давление	*Pn*	ML ■'T ^{2}	Па
Уровень сигнала в USM	p_s	ML-^{1}T"^{2}	Па
Объемный расход	Qv	L^{3}T ^{1}	м^3/с
Наружный радиус трубопровода	*R*	L	м
Внутренний радиус трубопровода	*r*	L	м
Число Рейнольдса	Re	—	1
Сходимость	^{r}P	—	1
Сходимость при калибровке	^{r}cal	—	1
Абсолютная температура газа	*Т*	0	К
Разность температур	*АТ*	0	К
Время	*t*	Т	с
Стандартное отклонение мгновенных турбулентных пульсаций скорости	*u**	—	%
Требуемое стандартное отклонение турбулентных пульсаций скорости после их усреднения	^{u}d	—	%
Скорость	***v***	LT"^{1}	м/с
Средняя скорость	***v***	LT-^{1}	м/с
Скорость по /-й акустической траектории	***vi***	LT"^{1}	м/с
Объем	*V*	L^3	м^3
Весовой коэффициент (фиксированное значение)	*w.*	—	1
Сжимаемость	*Z*	—	1
Коэффициент теплового расширения	а	0“^{1}	К-^{1}
Толщина стенки трубопровода	5	L	м

Окончание таблицы 1

Величина	Обозначение	Размерность[3]	Единица величины
Динамическая вязкость	П	L-^{1}MT"^{1}	Па ■ с
Длина волны ультразвукового колебания	X	L	м
Коэффициент Пуассона	и	—	1
Плотность среды	р	ML"^{3}	кг/м^{3}
Место отбора давления	*Pm*	—	—
Угол наклона траектории	Ф	—	рад
[a] М — масса; L — длина; *T* — время; 0 — температура.			

Таблица 2 — Подстрочные индексы

Подстрочный индекс	Значение
cal	калибровочный
min	минимальный
max	максимальный
op	эксплуатационный
ref	эталонный
t	переходный

Таблица 3 — Примеры обозначений объемного расхода

Обозначение	Пояснение
^V, max,	Проектный максимальный расход
Pv, max, 20	Проектный максимальный расход, рассчитанный для максимальной скорости газа 20 м/с
Pv, max, *x*	Проектный максимальный расход, рассчитанный для максимальной скорости газа х м/с
Pv, max, op	Максимальный эксплуатационный расход, определяемый только в случае, если он меньше, чем проектный максимальный расход
^*V,* max, cal	Максимальный калибровочный расход, определяемый только в случае, если он меньше, чем эксплуатационный максимальный расход
^*V,* min	Проектный минимальный расход
Pv.t	Переходный расход для определения требований к точности

3.3 Сокращения

СМС — калибровочные и измерительные возможности (calibration and measurement capability);

ES — электронная система (electronics system);

FAT — заводское приемочное испытание (factory acceptance test);

FC — формирователь потока (flow conditioner);

FWME — средневзвешенное по расходу значение погрешности (flow-weighted mean error);

M&R — газоизмерительные и газораспределительные станции (metering and regulating stations);

МРЕ — максимальная допускаемая погрешность (maximum permissible error);

MSOS — измеренная скорость звука (measured speed of sound);

SAT — приемочные испытания на месте установки (Site Acceptance Test);

S/N — отношение сигнал-шум (signal-to-noise ratio);

SOS — скорость звука (speed of sound);

TSOS — теоретическая скорость звука (theoretical speed of sound);

USM — ультразвуковой счетчик (ultrasonic flow meter);

USMP — комплекс, состоящий из USM, прямолинейных измерительных участков трубопровода, формирователя потока и защитной гильзы термометра (USM package, including meter tubes, flow conditioner, and thermowell);

USM(P) — USM и USMP.

4 Принципы измерений

4.1 Базовые формулы

Принцип работы ультразвуковых счетчиков основан на измерении времени распространения акустического сигнала в потоке.

На рисунке 4 показана схема принципа работы счетчика. По обеим сторонам трубы в позициях А и В установлены ультразвуковые преобразователи, способные передавать и принимать ультразвуковые импульсы. Ультразвуковые преобразователи передают ультразвуковые импульсы в пределах столь короткого интервала времени, что скорость звука (SOS) может быть принята одинаковой для обоих направлений. В процессе работы счетчика измеряется время прохождения ультразвуковых импульсов. При нулевом расходе время прохождения ультразвуковых импульсов от А к В t_{AB} равно времени прохождения от В к А f_{BA}. Однако если расход не равен нулю, то время прохождения ультразвукового импульса от А до В уменьшается, а от В до А увеличивается в соответствии с формулами (без учета эффектов второго порядка, таких как кривизна траектории):

^{AB} (с + йсоэф)' (1)

^{BA} (с-йсоэф)' (2)

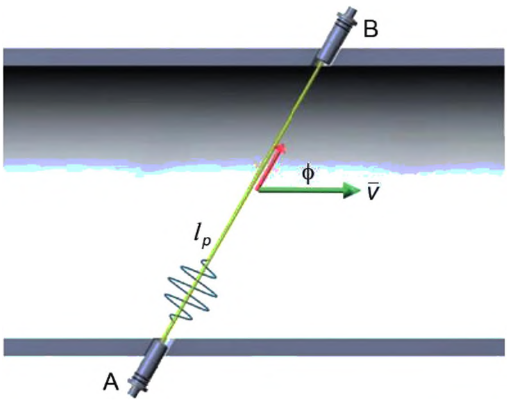
где 1_p — длина траектории акустического сигнала;

с — SOS;

у — средняя скорость;

ф — угол наклона траектории;

t_{AB}, ^BA— время прохождения акустического сигнала.



А, В — позиции ультразвуковых преобразователей; 1_p — длина траектории акустического сигнала; и— средняя скорость; ф — угол наклона траектории

Рисунок 4 — Схема принципа работы счетчика

Путем вычитания формулы (2) из формулы (1) и необходимых перестановок может быть выведена следующая формула для измерения скорости газа:

$$\frac{\hat{\ }\_\hat{\ }}{2\text{созф}}\ \hat{\ }\text{AB Ы} \qquad (3)$$

Величина SOS отсутствует в формуле (3). Это означает, что измерение скорости газа не зависит от свойств газа, например давления, температуры и состава газа.

Путем сложения формул (1) и (2) и необходимых перестановок может быть получена следующая формула для измерения SOS:

$$c = \frac{l_p}{2}\left(\frac{1}{\hat{\ }_{AB}} + \frac{1}{\hat{\ }_{BA}}\right)$$

Для оценки средней скорости в многолучевых счетчиках измеренные скорости по всем траекториям объединяются с помощью математической функции:

$$v=f\{v_p,..,v_n), \qquad (5)$$

где *п* — общее число траекторий.

Вследствие вариаций в конфигурации траекторий и различных подходов к решению формулы (5), даже для заданного числа траекторий, зависимости $f(v\hat{\ }, ..., v_n)$ могут отличаться.

Для получения объемного расхода q_v умножают оценку средней скорости ? на площадь поперечного сечения измерительной части счетчика[1] М:

$$q_v = A\cdot v. \qquad (6)$$

4.2 Факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики

Эксплуатационные характеристики USM зависят от ряда внутренних и внешних факторов. Внутренние факторы (то есть факторы, относящиеся к счетчику и его калибровке перед поставкой) включают:

- геометрию корпуса счетчика и расположение ультразвуковых преобразователей, а также неопределенность, с которой они известны (включая коэффициенты на влияние температуры и давления);
- точность и качество ультразвуковых преобразователей и электронных компонентов, используемых в схеме измерения времени прохождения (например, стабильность электронных часов);
- методы, используемые для определения времени прохождения и расчета средней скорости (последняя определяет чувствительность счетчика к изменениям в распределении скорости потока);
- корректировки (включая соответствующую компенсацию задержек сигналов в электронных компонентах и ультразвуковых преобразователях).

Внешние факторы, то есть факторы, связанные с потоком и условиями окружающей среды, включают:

а) профиль скорости потока, включая закрутку и асимметрию;

Ь) изменение шероховатости стенки в результате коррозии, твердых и жидких загрязнений в процессе эксплуатации;

с) температурное распределение;

d) пульсации потока;

е) шум — как акустический, так и электромагнитный;

f) временное или постоянное образование отложений, приводящее к уменьшению площади поперечного сечения корпуса счетчика.

4.3 Описание характерных конструкций

4.3.1 Общие сведения

Данное общее описание ультразвуковых счетчиков предполагает возможности вариаций в конкретных промышленных конструкциях, а также потенциал для новых разработок. С целью описания можно считать, что ультразвуковые счетчики состоят из нескольких компонентов, а именно:

а) ультразвуковых преобразователей;

Ь) корпуса счетчика с монтажными каналами ультразвуковых преобразователей;

с) электроники;

d) блока обработки и отображения данных.

[1]) Под измерительной частью счетчика понимается участок проточной части счетчика, в которой осуществляется распространение сигналов между ультразвуковыми преобразователями.

4.3.2 Ультразвуковые преобразователи

Ультразвуковые преобразователи могут иметь различные формы. Как правило, они содержат пьезоэлектрический элемент с электродными соединениями и механической подложкой, через которую осуществляется передача сигнала. Ультразвуковые преобразователи счетчиков, используемых для коммерческого учета газа, устанавливаются в прямом контакте с измеряемой средой. Характерные схемы расположения ультразвуковых преобразователей показаны на рисунке 5. Технологические соединения ультразвуковых преобразователей могут быть сварными, фланцевыми, резьбовыми или механически более сложными, например, для обеспечения возможности демонтажа ультразвуковых преобразователей с линии под давлением. Активный элемент обычно отделен от рабочей среды оболочкой с акустическим контактным элементом (мембраной). Ультразвуковые преобразователи должны быть ориентированы таким образом, чтобы активный элемент передавал ультразвуковые сигналы под углом к оси корпуса счетчика в направлении второго ультразвукового преобразователя или точки отражения на внутренней поверхности корпуса счетчика.

Для особых условий применения счетчиков могут потребоваться специальные ультразвуковые преобразователи. Они могут отличаться от обычных по излучаемой частоте, материалам конструкции и механическому устройству. Характеристики ультразвукового преобразователя и конструкция его монтажного канала должны быть тщательно продуманы для экстремальных или сложных условий применения, таких как:

а) высокая и низкая температура;

Ь) высокое и низкое давление;

с) высокие скорости газа;

d) значительное акустическое затухание;

е) непосредственная близость к регулирующему клапану с высоким перепадом давления (возможно наличие ультразвукового шума в трубе);

f) быстрые или циклические изменения температуры или давления;

д) коррозионно-активный или эрозионно-агрессивный газ (серосодержащий газ);

h) газ со следами влаги или загрязнений.

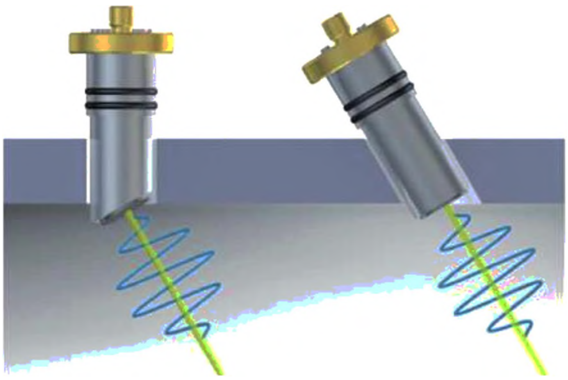


Рисунок 5 — Характерные схемы расположения ультразвуковых преобразователей

4.3.3 Корпус счетчика и конфигурации акустических траекторий

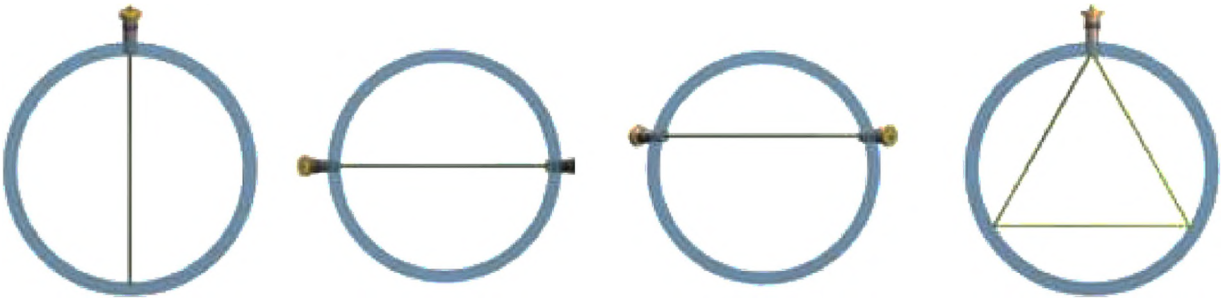
4.3.3.1 Общие сведения

Ультразвуковые счетчики выпускаются с различными конфигурациями траекторий. Число траекторий обычно выбирается на основании требований, учитывающих вариации в распределении скоростей и необходимую точность измерений.

Варьироваться может не только радиальное положение траекторий в поперечном сечении, но и конфигурация траекторий по отношению к оси трубопровода. В случае использования отражения ультразвукового сигнала от внутренней поверхности корпуса счетчика или от изготовленного отражателя траектория может пересекать поперечное сечение трубопровода несколько раз.

4.3.3.2 Основные типы акустических траекторий

Распространенные типы акустических траекторий представлены на рисунке 6.

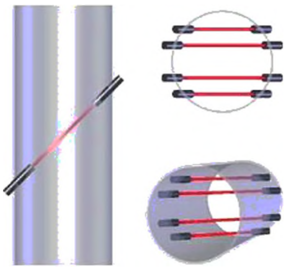


a) Ь) c) d)

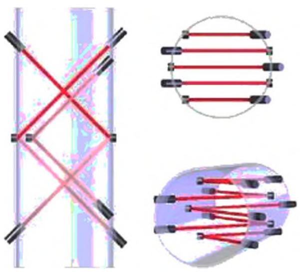
Рисунок 6 — Основные типы акустических траекторий для многолучевых счетчиков

4.3.3.3 Часто используемые многолучевые конфигурации акустических траекторий в поперечном сечении

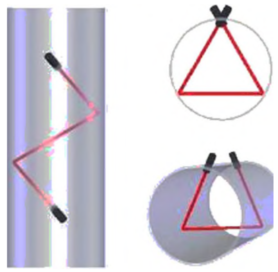
Конфигурация акустических траекторий в поперечном сечении определяет, какая информация о распределении осевой скорости доступна для вычисления средней осевой скорости. Варианты часто встречающихся конфигураций акустических траекторий показаны на рисунке 7.



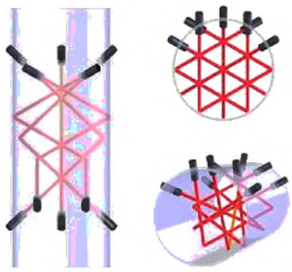
а) Многолучевая параллельная хорда



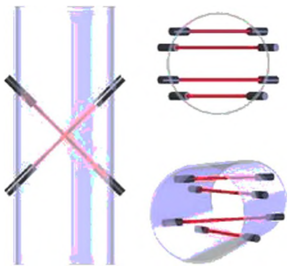
Ь) Многолучевая параллельная хорда с отражением



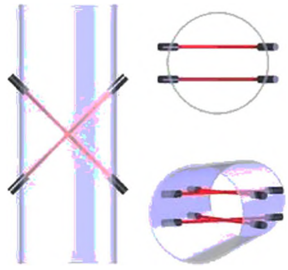
с) Однолучевая конфигурация по среднему радиусу с отражением



d) Многолучевая конфигурация по среднему радиусу и диаметру



е) Многолучевая параллельная перекрещивающаяся хорда



f) Многолучевая перекрещивающаяся в плоскости хорда

Рисунок 7 — Варианты часто встречающихся конфигураций расположения акустических траекторий

4.3.4 Расчет средней скорости

Счетчики с траекториями равного радиального смещения [например, рисунок 7, с) и f)] по существу выполняют одинаковые измерения относительно распределения скорости, если поток является осесимметричным, независимо от числа используемых траекторий. В таких случаях средняя скорость ? является простым средним арифметическим. В полностью развитом потоке может быть введен теоретический поправочный коэффициент k_h, учитывающий известное изменение профиля скорости. Однако поправочный коэффициент k_h применяется исключительно для полностью развитого потока, но не для возмущенных потоков.

п

v = kh~. (7)

где л — общее число траекторий;

V, — скорость потока, измеренная на /-й траектории.

Коэффициент k_h является функцией числа Рейнольдса, шероховатости трубы и радиального смещения. На практике его можно ввести как одиночную константу или рассчитать на основе статических параметров или измеренных переменных.

В случае счетчиков с траекториями, отличными от диаметральных [(например, рисунок 7, е) и d)], скорость измеряется в различных радиальных положениях. Для расчета средней скорости в трубопроводе по измеренным средним значениям скоростей потока на траекториях могут применяться различные методы. Их можно классифицировать следующим образом.

Суммирование с постоянным взвешенным значением:

^ = Ywivi-
/=1 <8)

Радиальные смещения траекторий и весовые коэффициенты от и^ до w_n, определяются на основе задокументированных методов численного интегрирования.

Суммирование с переменным взвешенным значением:

п
v = Yfivi-
/=1 (9)

При этом радиальные смещения траекторий фиксированы при проектировании, а переменные от ^ до f_n могут быть определены на основе входных параметров или измеренных переменных (например, скоростей).

В любой из данных конфигураций после суммирования может применяться множитель или калибровочный коэффициент *К* (постоянный или переменный) для внесения поправок на отклонения вследствие производственных допусков и принятых допущений по формуле

$$q_v = K \cdot A\, v. \qquad (10)$$

Правила и допуски для введения поправок и линеаризации с применением калибровочного коэффициента *К* приведены в 5.8 и 6.3.3.

4.4 Составляющие неопределенности измерений

Объемный расход q_v, измеренный USM, может быть вычислен по формуле

п I- (Д
qv = AK\fi—1--------------------------------------• (11)

Принимая во внимание это уравнение, суммарная неопределенность измерений объемного расхода зависит от отдельных неопределенностей всех включенных факторов. Можно выделить четыре источника:

a) неопределенность калибровочного коэффициента *К,* которая является функцией неопределенности калибровки, применяемого метода коррекции и q_v;

b) неопределенности измерений характеристик ультразвуковых преобразователей и геометрии корпуса счетчика;

c) неопределенность текущих весовых коэффициентов или поправочного коэффициента профиля потока /);

d) неопределенность измерения времени прохождения и разности времени прохождения.

Погрешности в отображаемом расходе q_v, обусловленные неопределенностями измерений /, ф, *А и f,* после проведения калибровки и регулировки компенсируются умножением правой части на калибровочный коэффициент *К.* Единственной оставшейся неопределенностью измерений на месте проведения калибровки является неопределенность калибровочного коэффициента *К.*

Примечание — При установке счетчика на месте эксплуатации возникает дополнительная неопределенность вследствие конкретных условий эксплуатации и условий монтажа, которые отличаются от условий на месте калибровки.

4.5 Число Рейнольдса

Профиль потока является функцией числа Рейнольдса. Число Рейнольдса рассчитывается по известному внутреннему диаметру корпуса *d,* измеренной средней скорости у, плотности р и динамической ВЯЗКОСТИ Г|.

Мгновенная средняя скорость и плотность, для которой давление является определяющим фактором, вносят основной вклад в изменение числа Рейнольдса для конкретного газа.

Влияние изменений числа Рейнольдса на калибровочный коэффициент одной траектории зависит от конфигурации траектории USM. Для чисел Рейнольдса, превышающих 10 000, влияние колеблется от приблизительно 1 % при изменении числа Рейнольдса в 10 раз для диаметральной траектории до менее чем 0,3 % для хордовой траектории в положении, соответствующем половине радиуса. Для высоких чисел Рейнольдса, например, при высоком давлении и/или высокой скорости потока изменение профиля потока становится незначительным и калибровочный коэффициент становится константой.

Конфигурации траектории большинства ультразвуковых многоканальных счетчиков спроектированы таким образом, чтобы уменьшить воздействие числа Рейнольдса до незначительной величины. Тем не менее калибровочный коэффициент может изменяться в зависимости от изменения числа Рейнольдса под воздействием рабочего давления, особенно для расходов ниже q_{vt}. Изготовитель должен указать допустимый диапазон давлений и должны ли при калибровке, а также в процессе эксплуатации вноситься в ES USM фактические значения плотности и вязкости. См. также 5.8.3.

4.6 Классификация USM

В целях содействия пользователю в выборе счетчика на основе требуемой точности USM классифицируют по применению. Классификация USM включает в себя разделение имеющихся счетчиков на классы точности, как указано в таблице 4. Только классы 1 и 2 подходят для коммерческого учета газа. Другие классы относятся к другим измерительным применениям и рассматриваются в ИСО 17089-2.

Таблица 4 — Классификация USM

Класс	Типичные применения	Необходимый класс точности
1	Коммерческий учет (передача)	класс 0,5 или класс 1,0
2	Коммерческий учет (распределение)	класс 1,5 или выше

Эти два класса, 1 и 2, предназначены для представления типичных измерительных характеристик, обычно применяемых в промышленности. В зависимости от важности измерения с точки зрения требований регулирующих органов или требований учетно-расчетных операций общий бюджет неопределенности для измерительных систем может различаться.

5 Характеристики счетчика

5.1 Условия эксплуатации

5.1.1 Расход и скорость газа

Максимальный и минимальный расходы газа должны быть указаны изготовителем для тех значений плотности газа, при которых счетчик работает в пределах заявленных точностных характеристик, определенных в 5.8. Максимальный расход счетчика, в кубических метрах в час, зависит от максимальной скорости газа, под которую спроектирован счетчик.

Диапазон расхода для двунаправленных применений: $-q_{v\,max} < q_v < -q_{v\,min}$ и $q_{v\,min} < q_v < q_{v\,max}$.

5.1.2 Давление

Ультразвуковые преобразователи, используемые в USM, требуют такой минимальной плотности газа, при которой обеспечивается акустическая связь звуковых импульсов, входящих и выходящих в(из) газовую(ой) среду(ы), где давление является преобладающим фактором плотности газа. Поэтому должны быть регламентированы состав газа, минимальное и максимальное рабочее давление.

5.1.3 Температура

Изготовитель или поставщик должен регламентировать допустимые диапазоны рабочих температур и температур окружающей среды для поставляемого оборудования, включая корпус счетчика, устанавливаемую в полевых условиях электронику и связанные с ней периферийные устройства и кабели, а также ультразвуковые преобразователи.

5.1.4 Качество газа

Счетчик должен работать в соответствующих пределах точности для всех газов, для которых он предназначен.

Присутствие некоторых компонентов в газе может повлиять на рабочие характеристики счетчика. В частности, высокие концентрации углекислого газа и водорода в газовой смеси могут влиять и даже препятствовать работе USM вследствие их свойства звукопоглощения.

Отложения, которые могут присутствовать в технологическом процессе (например, конденсаты, гликоли, амины, ингибиторы, вода или следы масла, смешанные с прокатной окалиной, грязью или песком), могут влиять на точность измерений счетчика, уменьшая площадь его поперечного сечения, сокращая эффективную длину акустической траектории и создавая препятствия излучаемому и принимаемому ультразвуковому сигналу.

В нижеследующих случаях необходима дополнительная консультация у производителя счетчика:

а) когда молярная доля углекислого газа, ослабляющего акустический сигнал, превышает 3 % или при наличии углекислого газа в случае применения больших счетчиков (более DN300);

Ь) когда молярная доля водорода превышает 10 %;

с) когда рабочая плотность смеси природного газа близка к критической (пересечение границы раздела фаз вызывает ретроградную конденсацию, приводящую к двухфазному потоку);

d) когда общий уровень концентрации серы из таких веществ, как сероводород, меркаптаны (тиолы) и элементарная сера, превышает 320 мкмоль/моль (что вызывает коррозию и может потребовать применения стойких материалов или дополнительного припуска на толщину стенки);

е) при отложениях.

5.2 Корпус счетчика, материалы и конструкция

5.2.1 Материалы

Корпус счетчика и его внутренние элементы должны быть изготовлены из материалов, подходящих для условий эксплуатации и устойчивых к воздействию среды, с которой должен работать счетчик. Внешние поверхности счетчика должны быть при необходимости защищены от коррозии. Внутренние поверхности счетчика должны быть спроектированы таким образом, чтобы не допускать нарушения точности показаний счетчика из-за изменений внутренней площади поперечного сечения и шероховатости стенок.

5.2.2 Корпус счетчика

Корпус счетчика и все другие части счетчика, контактирующие с измеряемой средой, должны быть изготовлены из прочных материалов и спроектированы так, чтобы выдерживать давление и температуру, на которые они рассчитаны.

5.2.3 Соединения

Входные и выходные соединения (фланцы) счетчика должны соответствовать действующим стандартам, например ANSI (класс 300, 600, 900 и т. д.), DIN и JIS.

5.2.4 Размеры

5.2.4.1 Общие сведения

Оба фланца USM должны иметь одинаковый внутренний диаметр в пределах 1 % друг от друга. USM с внутренним диаметром, равным диаметру фланца, должен обозначаться как «полнопроходной». USM с внутренним диаметром меньше диаметра фланца должен обозначаться как «с уменьшенным внутренним диаметром». Любое измеренное значение внутреннего диаметра счетчика должно быть в пределах 0,5 % от среднего значения по длине счетчика или, в случае счетчиков с уменьшенным внутренним диаметром, по длине измерительной части.

5.2.4.2 Геометрические характеристики измерительной части

Изготовитель должен измерить и задокументировать:

a) средний внутренний диаметр измерительной части счетчика;

Ь) длину каждой акустической траектории между излучающими поверхностями ультразвуковых преобразователей;

c) угол наклона каждой акустической траектории или осевое (ось корпуса счетчика) расстояние между парами ультразвуковых преобразователей;

d) неопределенность измерений вышеуказанных параметров a — c;

e) материал корпуса счетчика;

f) коэффициенты, связанные с корпусом счетчика, учитывающие воздействия давления и температуры на его расширение.

Температура корпуса счетчика должна быть измерена и задокументирована во время проведения этих измерений. Конкретные длины должны быть указаны с наименьшей возможной неопределенностью. Все средства измерений, используемые для выполнения этих измерений, должны иметь действующую калибровку[1]), прослеживаемую к национальным первичным эталонам.

5.2.5 Монтажные каналы ультразвуковых преобразователей

Поскольку измеряемый газ может содержать некоторые примеси (например, легкие фракции нефти или конденсаты), монтажные каналы ультразвуковых преобразователей должны быть спроектированы таким образом, чтобы уменьшить возможность накопления в них жидкостей или твердых частиц. Монтажные каналы ультразвуковых преобразователей USM также могут быть оснащены устройствами, обеспечивающими безопасный дренаж любых накопленных сред (например, сдвоенный запорный клапан с дренажом).

USM может быть оборудован клапанами или необходимыми дополнительными устройствами, установленными на монтажных каналах ультразвуковых преобразователей, позволяющими производить замену ультразвуковых преобразователей без сброса давления в измерительном трубопроводе. В этом случае в дополнение к запорному клапану должен быть установлен дренажный клапан, чтобы гарантировать отсутствие избыточного давления за ультразвуковым преобразователем перед его демонтажом.

Следует обратить внимание на условия замены компонентов (см. 5.6).

5.2.6 Отверстия для отбора давления

Для полнопроходного счетчика на корпусе или на трубопроводе, примыкающем к счетчику, должно быть предусмотрено, по крайней мере, одно отверстие для измерения давления, просверленное перпендикулярно к оси трубы в ее верхней части в секторе ±85° от вертикали, чтобы обеспечить возможность прямого измерения статического давления в условиях измерения[2]).

Для счетчика с уменьшенным внутренним диаметром измерительной части относительно диаметра трубопровода отверстие для отбора давления должно быть расположено в измерительной части счетчика.

Отверстие для отбора давления должно иметь маркировку «p_m» и использоваться как при эксплуатации, так и при калибровке. Если предусмотрено более одного отбора «p_m», то разница в показаниях давления не должна превышать 100 Па при максимальном расходе в условиях окружающей среды[3]).

Отбор давления может быть осуществлен из трубопровода, прилегающего к счетчику, при условии, что давление в месте отбора давления на прилегающем трубопроводе не отличается от давления в корпусе счетчика более чем на 100 Па при максимальном расходе в условиях окружающей среды.

В зависимости от стандартов применяемых трубопроводов эксплуатирующей организации соединение для измерения давления должно быть либо резьбовым, либо фланцевым.

Счетчик может иметь другие отверстия для отбора давления в дополнение к отверстию для отбора давления p_m. Они могут служить для определения перепада давления на определенной части счетчика или для других целей. Другие отверстия для отбора давления должны иметь маркировку «p».

Осевая линия отверстия для отбора давления должна пересекать осевую линию трубопровода под углом 90° к ней. В точке прохода через стенку отверстие должно иметь круглое сечение. Кромки должны быть заподлицо с внутренней поверхностью стенки трубопровода и быть максимально острыми. Для обеспечения устранения всех заусенцев или зазубрин на внутренней кромке допускается минимальное закругление. Радиус закругления должен составлять менее одной десятой диаметра отверстия для отбора

[1]) В Российской Федерации для данных измерений допустимо использовать поверенные средства измерений.

[2]) Вышеуказанное требование относится только к счетчикам, монтируемым на горизонтальных трубопроводах. Угол ±85° отмеряется от вертикальной оси поперечного сечения проточной части счетчика или трубопровода.

[3]) Отверстие для отбора давления, имеющее маркировку «p_m», также должно использоваться при поверке.

давления в случаях, когда его можно измерить. Внутри отверстия для отбора давления, на кромках просверленного отверстия на стенке трубопровода и на стенке трубопровода вблизи отверстия для отбора давления не должно быть никаких неровностей. О соответствии отверстий для отбора давления установленным требованиям можно судить путем визуального осмотра. Отверстия для отбора давления должны иметь минимальный диаметр внутреннего прохода 3 мм и максимальный диаметр внутреннего прохода 12 мм. Отверстие для отбора давления должно иметь круглое сечение и цилиндрическую форму на длине не менее 2,5 диаметров этого отверстия, измеренной от внутренней стенки трубопровода. Осевая линия отверстия для отбора давления может располагаться в любой осевой плоскости трубопровода[1]).

Следует избегать расположения отверстия для отбора давления в непосредственной близости от канала для установки ультразвукового преобразователя.

5.2.7 Обеспечение поперечной устойчивости (к перекатыванию)

Счетчик должен быть спроектирован таким образом, чтобы корпус счетчика не перекатывался при нахождении на гладкой поверхности с уклоном до 10 %. Это необходимо для предотвращения повреждения выступающих ультразвуковых преобразователей и электронной системы (ES), когда USM временно располагается на полу во время монтажа или технического обслуживания.

Счетчик должен быть спроектирован таким образом, чтобы обеспечить простоту и безопасность обращения во время транспортировки и установки. Кроме обеспечения поперечной устойчивости к перекатыванию должны быть предусмотрены подъемные проушины или зазор для подъемных ремней.

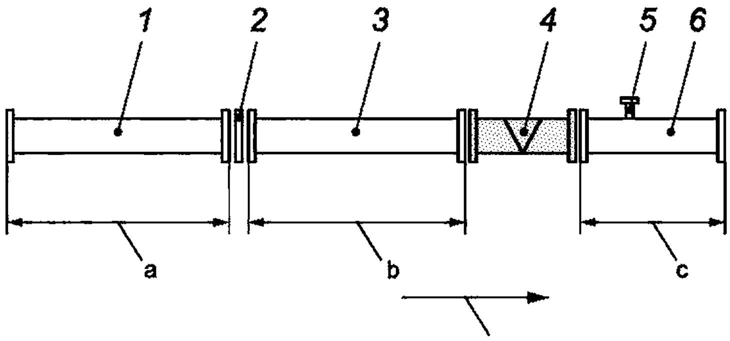
5.2.8 Формирователь потока

Формирователь потока, неразъемно прикрепленный к счетчику, считается частью счетчика.

При расположении формирователя потока на расстоянии от USM меньшем, чем L_{min}, формируется комплекс USMP. Комплекс состоит из формирователя потока, входного трубопровода счетчика и самого счетчика (рисунок 8). При двунаправленной схеме измерения защитная гильза термометра также является частью USMP. Калибровка всегда должна выполняться для всего измерительного комплекса или его макета включающей входной трубопровод счетчика и формирователь потока той же марки и модели (при одинаковых соответствующих размерах, состоянии внутренних стенок и типе)[2]).

Для USMP и имитации USMP должно быть гарантировано, что все компоненты установлены в правильном направлении и ориентации, как на месте эксплуатации. В целях выполнения данного условия на этих компонентах должны быть отмечены направление и ориентация.

Любой другой формирователь потока, установленный выше по потоку от USMP, рассматривается как часть «установки» или «калибровочного стенда» [3]\



1 — входной трубопровод формирователя потока; 2 — формирователь потока (FC); *3* — входной трубопровод счетчика; *4* — ультразвуковой счетчик (USM); 5 — выходной трубопровод; 6 — датчик температуры (TS); a — длина участка не менее 2D (предпочтительно 3D); b — длина участка не менее *XD* (указывается изготовителем); c — расположение датчика температуры TS на расстоянии от 2D до 5D от выходного торца USM (длина выходного трубопровода от 3D до не менее 6D соответственно); d — основное направление потока (прямое)

Рисунок 8 — Схема типичного USMP

[1]) Указание к расположению осевой линии отверстия для отбора давления в любой осевой плоскости трубопровода относится к вертикальным трубопроводам.

[2]) В Российской Федерации для использования в сфере государственного регулирования средство измерений должно быть поверено. При расположении формирователя потока на расстоянии от USM меньшем, чем L_{min}, методикой поверки должен быть предусмотрен способ поверки для всего измерительного комплекса USMP в указанной конфигурации.

[3]) В целях контроля технического состояния внутренней полости формирователя потока газа и исключения искажения эпюры скоростей потока газа рекомендуется предусмотреть установку средства измерений для контроля перепада давления на формирователе потока.

5.2.9 Маркировка

Заводские таблички должны содержать следующую информацию:

a) наименование изготовителя, номер модели, серийный номер, месяц и год изготовления;

b) типоразмер счетчика, тип фланцев и общая масса;

c) кодовое обозначение конструкции и материал корпуса счетчика, кодовое обозначение конструкции и материал фланцев;

d) диапазоны рабочей температуры и давления;

e) установленные значения максимального и минимального объемного расхода в рабочих условиях ($м^3$/ч) в пределах калиброванного диапазона;

f) прямое направление потока;

g) номер заказа на поставку или номер заказа на изготовление;

h) знак соответствия требованиям законодательной метрологии[1]);

i) переходный объемный расход в рабочих условиях ($м^3$/ч).

Все монтажные каналы ультразвуковых преобразователей должны иметь постоянную маркировку с уникальным обозначением для удобства поиска.

5.2.10 Защита от коррозии

Непосредственно после изготовления внутренние поверхности счетчика, участков трубопровода и формирователей потока должны быть защищены от коррозии.

5.3 Ультразвуковые преобразователи

5.3.1 Техническое описание

В техническом описании должна быть указана акустическая частота.

5.3.2 Скорость изменения давления

Быстрый сброс давления в USM может привести к повреждению ультразвуковых преобразователей или покрытия на внутренней стенке, что приведет к изменению характеристик счетчика. Поэтому необходимо обеспечить максимально медленный сброс давления в измерительном трубопроводе. При отсутствии информации от изготовителя рекомендуется обеспечить скорость сброса давления не более 0,5 МПа/мин.

5.3.3 Характеристики ультразвуковых преобразователей

Если для электронной системы (ES) счетчика требуются определенные характеристики ультразвукового преобразователя, то должна быть предоставлена документация по всем его параметрам, уникальным для каждого ультразвукового преобразователя или пары преобразователей.

5.3.4 Конфигурация акустической траектории

В счетчиках с многолучевым исполнением количество хорд, их расположение и используемый метод интегрирования влияют на неопределенность измерения, а также на их чувствительность к изменениям профиля потока. Должны быть указаны: число пар ультразвуковых преобразователей, число отражений на траекторию и способ посадки ультразвуковых преобразователей в монтажном канале (выступающий, утопленный или заподлицо).

5.3.5 Маркировка

Каждый ультразвуковой преобразователь должен иметь надежную маркировку с уникальным серийным номером.

5.3.6 Кабель

Если USM чувствителен к характеристикам кабеля ультразвукового преобразователя, то кабель следует рассматривать как неотъемлемую часть счетчика, и он должен быть маркирован предупреждением, указывающим характеристику, которая не подлежит изменению, например длина.

5.3.7 Отказоустойчивость

Соприкасающиеся со средой части ультразвуковых преобразователей должны быть изготовлены из материалов, подходящих для условий эксплуатации и устойчивых к воздействию среды, которому подвергается счетчик.

5.4 Электронные компоненты

5.4.1 Общие требования

В состав ES USM обычно входят источник электропитания, микрокомпьютер, компоненты обработки сигналов и цепи возбуждения ультразвуковых преобразователей.

[1]) В Российской Федерации в качестве знака соответствия требованиям законодательной метрологии используется знак утверждения типа средства измерений с указанием в сопроводительных документах к средству измерений номера регистрации типа средства измерений в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений.

Должно быть подтверждено, что ES функционирует в заданном диапазоне условий окружающей среды без значительного изменения рабочих характеристик счетчика. ES, управляющая ультразвуковыми преобразователями, должна выдерживать возмущения электромагнитного поля, как указано в 7.5. Искробезопасная электрическая цепь и взрывонепроницаемая оболочка конструкции должны соответствовать национальным требованиям.

ES должна содержать функцию самоконтроля для обеспечения автоматического перезапуска в случае зависания программы.

5.4.2 Отображение информации

Счетчик должен иметь возможность локального и/или удаленного отображения информации.

5.4.3 Электропитание

Изготовитель должен указать необходимый источник питания, допуск на изменение напряжения и потребляемую мощность. Должна быть охарактеризована и задокументирована реакция USM на перебои питания и падения напряжения.

5.4.4 Метод обнаружения сигнала

Метод обнаружения сигнала должен быть разработан таким образом, чтобы обеспечить достоверное измерение времени за счет точного установления триггеров начала и окончания измерения, использования прецизионного устройства измерения времени и устойчивости к систематическим ошибкам, таким как «peak-switching»[1]^ и т.д.

5.4.5 Процесс формирования акустических сигналов в пульсирующем потоке

Счетчик должен сохранять работоспособность при нестационарном режиме потока. Для этой цели акустические сигналы могут подаваться с изменяющейся периодичностью. Изготовитель должен указать максимальную допускаемую частоту пульсаций потока.

5.4.6 Отношение сигнал-шум

USM должен отображать отношение S/N по каждому ультразвуковому преобразователю или по каждой акустической траектории.

5.4.7 Аварийный сигнал

Счетчик должен подавать аварийный сигнал при ухудшении рабочих характеристик счетчика, например вследствие низкого отношения S/N или низкого отношения числа принятых ультразвуковых импульсов к числу отправленных.

5.4.8 Обработка данных

Блок обработки измерительной информации, дополнительно к определению объемного расхода по измеренному времени прохождения ультразвукового сигнала, должен иметь возможность исключения ложных результатов измерения. Отображаемый объемный расход может быть результатом одного или нескольких отдельных измерений скорости потока. USM может указывать процентное отношение достоверных измерений к общему количеству измерений для каждой акустической траектории.

5.4.9 Выходные сигналы

Счетчик должен быть оборудован как минимум одним из следующих выходных сигналов:

a) последовательный интерфейс данных, например, RS-232, RS-485 или fieldbus;

b) частотный выход, отражающий значение расхода в рабочих условиях;

c) цифровой выходной интерфейс состояния.

Интегрированные по времени значения выходных сигналов a и b должны отличаться не более чем на 0,02 % в каждом произвольном интервале в 100 с для расходов выше $q_{v\,min}$.

Счетчик может быть оборудован следующими выходными сигналами: ’

a) частотные дополнительные выходы;

Ь) дополнительные выходные интерфейсы состояния;

c) дополнительные интерфейсы данных (например, Ethernet, последовательный порт только для чтения);

d) аналоговые (4—20 мА) выходы.

Выходные сигналы по расходу должны работать до 120 % от максимального расхода <7у$_{\text{тахса}}$| счетчика. Может быть предусмотрена функция отсечки малых значений расхода, которая устанавливает нулевое значение выходного расхода, когда указанный расход ниже минимального значения.

Примечание — Установка нулевых выходных значений при малом расходе может вызвать проблемы, если выходной сигнал USM используется для управления настройками клапана.

[1]) Под ошибкой «peak-switching» понимается выбор системой ложного пика ультразвукового сигнала для начала/окончания измерения.

Два отдельных выходных сигнала расхода или последовательно передаваемые данные могут применяться для двунаправленных применений, чтобы облегчить раздельное накопление значений объема соответствующим(и) вычислителем(ями) расхода.

Все выходные сигналы должны быть изолированы от заземления и иметь необходимую защиту по напряжению, удовлетворяющую требованиям электрических испытаний.

В целях контроля выходной(ые) сигнал(ы) измеряемого расхода должен(ны) обновляться с частотой не менее 1 Гц.

5.4.10 Оболочки и изоляция кабелей

Оболочки кабелей, резина/каучук, пластик, а также другие части, подвергающиеся внешнему воздействию, должны быть устойчивы к ультрафиолетовому излучению, воде, маслам и смазочным материалам.

5.4.11 Маркировка

Каждый электронный блок должен быть маркирован уникальным номером версии для удобства поиска. Перечень электронных блоков, включая номера версий, должен актуализироваться изготовителем в рамках управления версиями.

5.5 Программное обеспечение

5.5.1 Встроенное программное обеспечение

Программные коды, отвечающие за управление и работу счетчика, должны быть сохранены в энергонезависимой памяти. Все константы вычисления расхода и вводимые пользователем параметры также должны быть сохранены в энергонезависимой памяти.

Должна быть обеспечена возможность проверки значений всех констант и параметров во время работы счетчика. Должны быть предоставлены контрольная сумма встроенного программного обеспечения и журнал регистрации событий, чтобы гарантировать, что во встроенное программное обеспечение не были внесены несанкционированные изменения.

5.5.2 Спецификация данных связи MODBUS

USM должен обеспечивать определенную структуру данных (см. приложение F) для последовательной связи, чтобы упростить передачу данных в коммуникативную систему (например, измерительный контроллер/вычислитель расхода или систему сбора данных).

Протокол передачи данных основан на общедоступных спецификациях компании «Modbus Organization, Inc.» [83].

5.5.3 Непрерывность

При непрерывном увеличении или уменьшении расхода встроенное программное обеспечение должно быть спроектировано таким образом, чтобы избежать ступенчатого изменения рассчитанного расхода на выходе.

5.5.4 Обозначение программного обеспечения и управление версиями

Изготовитель должен вести учет всех версий встроенного программного обеспечения, включая серийный номер версии, дату версии, подходящие модели счетчиков и версии монтажных плат, а также описание изменений встроенного программного обеспечения, выполненных им или его представителем.

Номер версии встроенного программного обеспечения, дата версии, серийный номер и контрольная сумма должны быть доступны для проверки встроенного программного обеспечения микроконтроллера, дисплея или цифрового коммуникационного порта.

Изготовитель может время от времени предлагать обновления встроенного программного обеспечения для улучшения рабочих характеристик счетчика или добавления дополнительных функций. Изготовитель должен уведомить пользователя, если версия встроенного программного обеспечения влияет на точность счетчика, калиброванного по расходу[1]).

5.5.5 Мониторинг и запись данных измерений и диагностики

Счетчик должен обеспечивать возможность контролировать и регистрировать, как минимум, следующие данные:

a) текущий объемный расход;

Ь) накопленный объем;

c) среднюю скорость;

d) среднюю SOS;

e) скорость по каждой траектории;

[1]) В Российской Федерации метрологически значимая часть программного обеспечения должна соответствовать приведенной в разделе «программное обеспечение» описания типа средства измерений.

f) SOS по каждой траектории;

g) процент принятых сигналов для каждой акустической траектории;

h) отношение S/N или его эквивалент (уровень усиления);

i) индикаторы состояния и качества измерений;

j) индикатор аварийного сигнала и неисправности.

5.5.6 Корректирующие функции и параметры

Как при эксплуатации, так и при калибровке следует использовать корректные настройки параметров для поправки по числу Рейнольдса на расширение корпуса и калибровочной кривой. Это справедливо либо в том случае, если эти параметры записаны в USM, либо в вычислителе расхода, подключенном к USM. При этом могут быть использованы как значения текущего давления и текущей температуры в виде фиксированных значений, так и их измеренные значения в реальном времени.

Параметрами коррекции по числу Рейнольдса являются плотность и вязкость.

Параметрами коррекции на расширение корпуса являются текущее давление, давление при калибровке, текущая температура, температура при калибровке, коэффициент теплового расширения, модуль Юнга, коэффициент Пуассона материала корпуса счетчика и размеры корпуса счетчика.

Параметры коррекции калибровочной кривой представляют собой либо набор значений расходов и отклонений, либо набор параметров, определяющих полиномиальную коррекцию в соответствии с принципом механизма коррекции калибровочной кривой.

Программное обеспечение USM и/или вычислителя расхода, подключенного к USM, должно позволять пользователю вводить корректные настройки параметров. Следует проявлять осторожность, чтобы не активировать механизм коррекции дважды, как в USM, так и в вычислителе расхода, подключенном к USM.

5.5.7 Функции проверки и контроля

Должна быть обеспечена возможность просмотра и печати параметров конфигурации, используемых в ES, например калибровочных констант, размеров счетчика, периода усреднения по времени и частоты дискретизации. Должны быть приняты меры для предотвращения случайного или неопределяемого изменения тех параметров, которые влияют на рабочие характеристики счетчика. Соответствующие меры включают в себя наличие пломбируемого переключателя или перемычки защиты от записи или постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) только для чтения с проверяемыми контрольной суммой/аварийными сигналами журнала регистрации событий.

Должны быть обеспечены следующие выходные сигналы аварийных состояний:

a) недействительный выходной сигнал: когда отображаемый выходной сигнал расхода недостоверен (обязательный сигнал);

b) частичный отказ: когда один или несколько из множества результатов измерений по ультразвуковым траекториям непригодны для использования (обязательный сигнал);

c) предупреждение: когда любой из нескольких контролируемых параметров выходит за пределы нормальных рабочих значений в течение значительного промежутка времени (необязательный сигнал).

5.6 Замена компонентов

Должна быть обеспечена возможность замены ультразвуковых преобразователей, электронных частей и программного обеспечения без существенного изменения характеристик счетчика. Вносимая погрешность из-за замены такого компонента не должна превышать одной трети MPE для соответствующего класса счетчика. В противном случае счетчик подлежит повторной калибровке.

Вышеупомянутые положения должны быть установлены при испытании типа счетчика.

Должны быть определены процедуры, используемые при необходимости замены указанных компонентов, включая возможные механические, электрические или другие измерения и регулировки.

Для каждого мероприятия с ультразвуковым счетчиком (калибровка, ремонт и т. д.) должен быть доступен полный список соответствующих параметров «до события», «при калибровке» и «после события».

Если компоненты заменяются более новыми или другими версиями, должны быть указаны преимущества и недостатки[1]).

Изготовитель должен предоставить надежный метод управления версиями.

[1]) Конструкция счетчика должна обеспечивать ограничение доступа к компонентам, при замене которых изменяются метрологические характеристики счетчика (включая программное обеспечение) в целях предотвращения несанкционированных настроек и вмешательств, которые могут привести к искажениям результатов измерений.

5.7 Дополнительные измерения

5.7.1 Общие сведения

Для перевода объемного расхода при рабочих условиях в массовый расход или объемный расход при стандартных условиях требуются дополнительные измерения.

5.7.2 Измерение давления

Отверстие для отбора давления с маркировкой «$p_т$» должно использоваться в качестве точки измерения давления (см. 5.2.6).

5.7.3 Измерение температуры

Для однонаправленного потока гильза термометра должна быть установлена на расстоянии *2D < к < 5D* после USM. Между гильзой термометра и USM должны отсутствовать ступенчатые изменения диаметра и любые местные сопротивления. Важно, чтобы гильза термометра была правильно установлена для обеспечения отсутствия влияния теплоотдачи трубопровода, крепления гильзы, а также воздействия солнечного излучения на показания температуры. Рекомендуемая глубина погружения в трубопровод для гильз должна быть такой, чтобы ее конец располагался на расстоянии между 0/10 и *D/3.* Для глубины погружения более *D/3* могут потребоваться гильзы специальной конструкции.

В случае использования плотномеров для их карманов применяются те же правила установки.

В некоторых системах требуется монтаж двух или даже трех термометров (для резервных измерений или контрольных измерений). Кроме того, в правилах техники безопасности могут быть предписаны большие размеры гильз. Гильза термометра должна быть установлена таким образом, чтобы температура окружающей среды не влияла на результаты измерений температуры газа.

Когда температура окружающей среды значительно отличается (более 5°C) от температуры газа, то должна быть установлена теплоизоляция или экранирование на входной трубопровод, USM и выходной трубопровод на длину до 1D после самой дальней гильзы термометра, кроме случая работы счетчика при расходе выше $q_{v\,t}$.

Для двунаправленного применения с двумя последовательными USM можно установить гильзу термометра между двумя счетчиками. Пример установки с двунаправленным потоком, в которой используются два USM с гильзой термометра, расположенной в центральной секции, приведен на рисунке 11. Как число, так и размеры гильз термометров или карманов плотномера усиливают возмущение потока.

Частота вихреобразования, вызванная гильзой термометра, при высоких скоростях газа не должна возбуждать собственную частоту колебаний гильзы термометра до уровня, приводящего к его неисправности. Рекомендуется использовать конические гильзы термометров. При установке гильз термометров до USM они должны располагаться так, чтобы не находиться на одной линии с любой из акустических траекторий. Также гильзы термометров не следует размещать на одной линии друг за другом во избежание усиления вихря, создаваемого ими.

На рисунке 9 показан пример использования двух гильз термометров в комбинации с ультразвуковым счетчиком с горизонтальными траекториями.

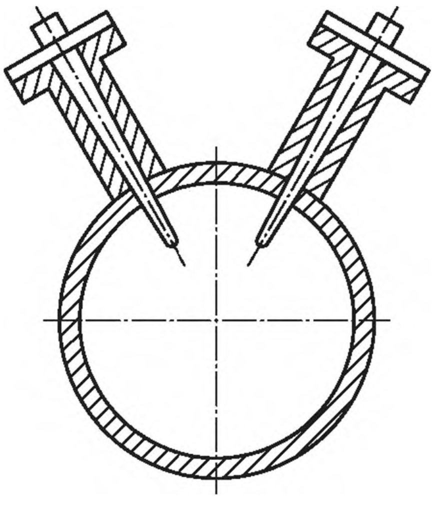


Рисунок 9 — Гильзы термометров расположены не на одной линии с акустическими траекториями

Для труб менее DN150 могут рассматриваться альтернативы интрузивным технологиям на основе гильз. Например, поверхностные (накладные) термометры могут быть применены, если может быть доказано, что точность и инерционность устройства для измерения температуры таковы, что они не приводят к увеличению суммарной неопределенности рассчитанного расхода выше установленных значений. Это может быть особенно важным при рассмотрении двунаправленных измерительных систем, где необходимо минимизировать возмущения потока.

5.8 Эксплуатационные требования

5.8.1 Общие сведения

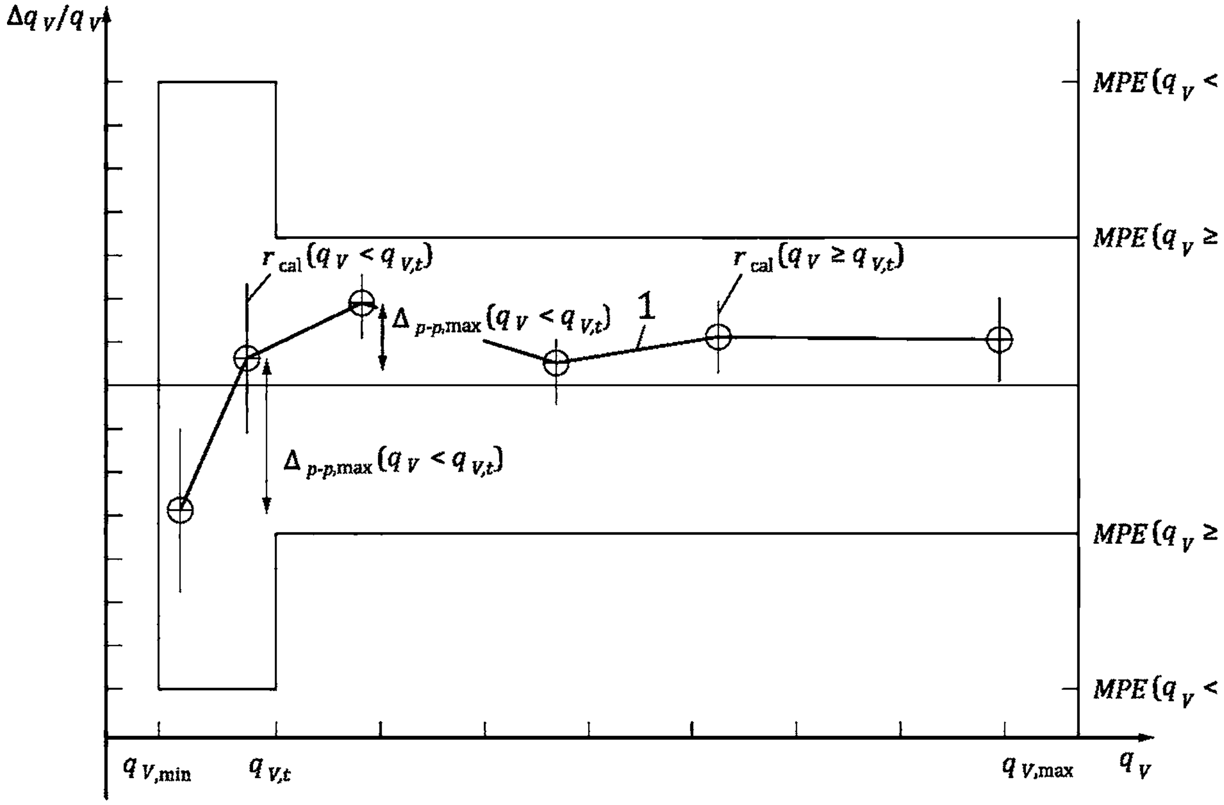
USM должен быть спроектирован и изготовлен таким образом, чтобы его погрешность не превышала требуемого MPE во всем диапазоне рабочих давлений, температур и составов газа, и, если необходимо, с вводом значений параметров среды или алгоритмом их коррекции. Необходимые алгоритмы коррекции и вводимые параметры должны быть регламентированы. Если алгоритм коррекции не требуется, должна быть указана дополнительная неопределенность вследствие изменений давления, температуры и состава газа. Если в USM требуется ручной ввод для описания состояния потока газа, например плотности и вязкости газа, чувствительность USM к этим параметрам должна быть указана таким образом, чтобы пользователь мог определить необходимость изменения этих параметров при изменении условий эксплуатации. Соответствующие настройки параметров должны быть зарегистрированы как во время калибровки, так и в процессе эксплуатации.

5.8.2 Требования к точности

Требования к точности счетчиков представлены в таблице 5. Границы допускаемых значений метрологических характеристик показаны на рисунке 10.

Таблица 5 — Требования к точности

Параметр	Класс точности		
	0,5	1,0	1,5
Максимальная допускаемая погрешность (MPE)			
Для $q_v > q_{v\,t}$	±0,5 %	±1,0 %	+1,5%
Для q_v^$_m$<qv<$q_{v<}t$	±1,0 %	±2,0 %	±3,0 %
Максимальная погрешность между пиковыми значениями			
Для $q_v > q_{v\,t}$	<0,5 %	<1,0 %	<1,0 %
Для qv^^v^vj	<1,0 %	<2,0 %	<2,0 %
Максимальная допустимая средневзвешенная погрешность измерений расхода, перед любой регулировкой (см. 6.3.3)			
FWME	±0,5 %	±1,0 %	+1,5%
Сходимость при калибровке $r_{ca)}$			
Для $q_v > q_{v\,t}$	<0,17%	<0,33 %	<0,5 %
Для $q_{Vtmin}<q_v<q$^$_t$	<0,33 %	<0,66 %	<1,0 %
Воспроизводимость			
для $q_v > q_{v\,t}$	<0,17 %	<0,33 %	<0,5 %
Переходный расход			
	^V^ - 0>1 *Qv,* max, cal		
Отклонение скорости звука			
Отклонение MSOS от TSOS	<±0,2 %		
Разброс MSOS между акустическими траекториями	<0,5 м/с		



q_v — объемный расход; *kq^q^*— погрешность измерений расхода, в %; 1 — калибровочная кривая для счетчика без внесенных коэффициентов коррекции; MPE — максимальная допускаемая погрешность; $q_{v\ t}$ — переходный расход; $q_{v\ \max}$ — проектный максимальный расход; $q_{v\ min}$ — проектный минимальный расход; r_{cal} — сходимость при калибровке, см. 6.3.2.2; *^P-P* max — максимальная разность между пиковыми значениями погрешности

Рисунок 10 — Границы допускаемых значений метрологических характеристик:

5.8.3 Влияние давления, температуры и состава газа

USM должен удовлетворять указанным выше требованиям к точности во всем диапазоне рабочего давления, температуры и состава газа и, если необходимо, с вводом значений этих параметров или алгоритма их коррекции. Необходимые алгоритмы коррекции и входные данные должны быть регламентированы. Если алгоритм коррекции не требуется, должна быть определена дополнительная неопределенность вследствие изменений давления, температуры и состава газа. Если USM требует ручного ввода для описания условий протекающего газа, например плотности и вязкости газа, то должны быть определены коэффициенты влияния USM к указанным параметрам таким образом, чтобы пользователь мог определить необходимость изменения этих параметров при изменении условий. Соответствующие настройки параметров должны быть зарегистрированы как во время калибровки, так и в процессе эксплуатации.

5.9 Требования к эксплуатации и монтажу

5.9.1 Общие сведения

Влияния от монтажа или условий эксплуатации, которые увеличивают неопределенность результатов измерений USMP, должны быть либо устранены, либо компенсированы. Должны быть нормированы минимальные расстояния до местных сопротивлений. Положения 5.9 применяются как при калибровке (см. 6), так и при эксплуатации (см. 8).

Различные комбинации фитингов, клапанов, отводов и прямолинейных участков трубопровода перед счетчиком могут привести к искажению профиля скорости потока на входе в счетчик и, следовательно, к дополнительной погрешности измерения расхода. Величина этой погрешности зависит от типа и степени искажения потока, а также от способности счетчика компенсировать его. Указанная погрешность может быть уменьшена увеличением длины прямолинейных участков трубопровода перед счетчиком или использованием FC. В качестве альтернативы наиболее эффективным методом компенсации данной погрешности является проведение калибровки в потоке в условиях, аналогичных эксплуатационным. Исследования по изучению влияния монтажа на показания USM продолжаются, поэтому проектировщик может проконсультироваться с изготовителем USM и ознакомиться с последними результатами испытаний и оценить, как на конкретную конструкцию USM может повлиять конфигурация входного трубопровода при планируемом монтаже. Для достижения необходимых характеристик счетчика может потребоваться изменение первоначальной конфигурации трубопровода или включение в состав измерительной системы формирователя потока.

5.9.2 Эксплуатационные требования

5.9.2.1 Звук, шум и клапаны регулирования давления

На работу и точность USM может негативно повлиять шум, создаваемый клапанами регулирования давления; см. также ссылку [54] и 8.1. Поскольку акустический сигнал счетчика сильнее при более высоких давлениях, а уровень шума, создаваемый одиночными регулировочными клапанами, слабее до клапана, настоятельно рекомендуется располагать регулирующий клапан после USM (см. приложение С).

В худшем случае при определенных условиях счетчик может быть неработоспособным. Для исключения влияния шума, создаваемого клапаном, на показания USM даны следующие рекомендации:

a) USM следует размещать на достаточном расстоянии от дросселирующих регулирующих клапанов, предпочтительно технологическое оборудование, такое как резервуары или теплообменники, устанавливать между USM и регулятором, перед регулятором;

Ь) повысить помехозащищенность USM путем:

1) увеличения частоты ультразвуковых преобразователей счетчика;
2) увеличения мощности ультразвуковых преобразователей счетчика;
3) использования методов обработки сигналов для их определения, например усреднение сигналов (пакетирование), цифровая корреляция или кодирование сигналов;

c) установка заглушенных тройников, теплообменников, колен в разных плоскостях и/или FC между USM и клапаном (то есть путем исключения прямой траектории помехи) является наиболее эффективным методом использования стандартной трубопроводной арматуры для ослабления ультразвукового шума.

Примечания

1 Прямолинейный участок трубопровода не является эффективным для ослабления ультразвукового шума.

2 Заглушенные тройники могут вызвать нежелательные эффекты, такие как искажение профиля потока (см. 5.9.3.2), накопление жидкости и затруднения при продувке измерительной системы;

d) снижение перепада давления на клапане уменьшает шум, создаваемый на всех частотах.

Следует принимать во внимание то, что допускаемая длина входных прямолинейных участков не должна изменяться на основе этих рекомендаций. Должна быть описана общая чувствительность USM к звуковым помехам (шуму), создаваемым клапанами регулирования давления и другими источниками.

5.9.2.2 Загрязнение

Следует избегать накопления отложений вследствие налипания смеси частиц и жидких загрязняющих веществ.

Рекомендуется фильтрация потока газа до измерительной линии, а в двунаправленных случаях применения USM — фильтрация потока газа как до, так и после измерительной линии. Однако следует учитывать возможность нарушения профиля потока, вызванного фильтрующим оборудованием.

Во избежание существенного накопления отложений рекомендуется располагать самую низкую часть трубопровода после счетчика.

5.9.2.3 Температура окружающей среды

Влияние температуры окружающей среды должно быть сведено к минимуму, как описано в 5.7.3. В случае, когда разница между температурой окружающей среды и температурой газа превышает 5°C, может произойти расслоение потока, особенно при низких скоростях [86]. Средства диагностики, применяемые в USM, могут быть использованы для определения наличия расслоения потока.

Кроме того, по всей длине измерительного трубопровода необходимо предусмотреть по меньшей мере затенение (козырек, навес, стена) для защиты измерительной линии и электроники от прямых солнечных лучей. Лучшим способом защиты от температуры окружающей среды является теплоизоляция входного участка трубопровода (на длине 10D), USM и выходного участка трубопровода, включая средство измерений температуры.

5.9.2.4 Вибрация

Ультразвуковые счетчики не должны подвергаться вибрации, уровень и частота которой могут привести к возбуждению собственных частот плат ES, компонентов или ультразвуковых преобразователей.

5.9.2.5 Электрические помехи

Несмотря на то, что конструкция USM испытывается на устойчивость к воздействию электрических помех, как описано в 7.5, USM или подключенная к нему система проводов не должны подвергаться любым излишним электрическим помехам, включая помехи от переменного тока, электромагнитных переходных процессов или радиопередачи.

5.9.2.6 Нестационарный поток

Следует избегать пульсаций и нестационарного потока, уровень которых выходит за пределы спецификаций изготовителя (см. 5.4.4).

5.9.3 Требования к монтажу

5.9.3.1 Общие сведения

Полностью развитый профиль потока является оптимальным условием для работы счетчика. На практике невозмущенный поток может быть наилучшим достижимым условием.

Вследствие большого разнообразия типов USM, конфигураций входных участков трубопроводов и формирователей потока практически невозможно нормировать длины входных прямолинейных участков. Кроме того, технология USM продолжает совершенствоваться, что еще больше затрудняет нормирование длин входных прямолинейных участков. Длины прямолинейного участка между USM и формирователем потока и перед формирователем потока должны быть установлены в технической документации счетчика.

5.9.3.2 Расстояние до возмущений, требования к длине прямолинейных участков трубопровода до и после счетчика

Типичные местные сопротивления, установленные до счетчика, например колена, коллекторы, тройники, формирователи потока, фильтрующее оборудование, изменения диаметра (уступы, расширения или сужения) и клапаны, создают завихрения, асимметричный профиль потока, плоский профиль потока, профиль потока с резким максимумом или комбинации этих возмущений. Исследования показали, что для получения полностью развитого профиля скорости потока из асимметричных профилей скорости потока может потребоваться прямолинейный участок трубопровода длиной 500 без FC, а при профилях скоростей с закруткой потока может потребоваться прямолинейный участок трубопровода длиной 2000 без FC. Установка прямолинейного участка такой длины нецелесообразна. Имеющаяся способность USMP компенсировать возмущенные профили потока позволяет сократить длину прямолинейных участков трубопровода до счетчика.

Рекомендуется использовать диагностические возможности USM для определения того, что в процессе эксплуатации условия потока возмущены незначительно. Следует определить, являются ли условия потока репрезентативными по отношению к условиям калибровки USM, путем сравнения результатов диагностики USM во время калибровки и в эксплуатации.

Минимальная длина прямолинейного участка трубопровода l_{min} должна быть такой, чтобы увеличение длины на 10D изменяло показания USM (FWME) не более результирующего значения воспроизводимости калибровочной установки и USM: l_{mjn} определяют таким образом, чтобы максимальная дополнительная погрешность вследствие возмущений потока составляла менее одной трети MPE для соответствующего класса точности счетчика. Значение l_{min} зависит от конфигурации входных участков трубопровода и может быть определено только с использованием стандартного набора конфигураций. Определение значений l_{min} для стандартного набора конфигураций входных участков трубопроводов является основной задачей при типовых испытаниях, см. 7.3.

Изготовитель должен установить значения l_{min} для различных типов возмущений потока, определенных в 7.3.

Если применяется конфигурация входных участков трубопровода, для которой значение l_{min} неизвестно, то:

- требуется наличие входного прямолинейного участка трубопровода длиной 500 для USM, или
- необходимо наличие входного прямолинейного участка трубопровода длиной 10D для USMP.

Минимальная длина выходного прямолинейного участка трубопровода составляет 30.

5.9.3.3 Выступы и ступенчатое изменение диаметра

Для исключения искажения профиля скорости потока следует избегать изменений внутренних диаметров (D) и выступающих в поток элементов на входе USM.

Фланцы и входной участок трубопровода, прилегающие к счетчику, должны быть прямыми, цилиндрическими и иметь такой же внутренний диаметр, как и внутренний диаметр входного отверстия счетчика, с отклонением не более 1 %. Эти компоненты должны быть тщательно подогнаны, чтобы свести к минимуму возмущения потока, особенно на входном фланце. Исследования счетчиков класса 1 показали, что ступенчатые изменения диаметра между входным участком трубопровода и счетчиком вызывают изменение систематической погрешности измерений порядка 0,05 % на каждый 1 % изменения диаметра. Данная погрешность может быть уменьшена путем снятия фаски с углом наклона менее 7°.

Примечание — Это значение погрешности следует рассматривать лишь как ориентировочное для оценки дополнительной неопределенности вследствие ступенчатого изменения диаметра.

На участке до счетчика длиной как минимум *2D* должны отсутствовать возмущения потока от фланцев, формирователей потока и т. п. На расстоянии не менее 10D или l_{min} (что меньше) до счетчика, секция(и) трубопровода должна(ы) удовлетворять следующим требованиям:

а) трубопровод должен быть прямым, то есть не иметь изгибов более 5°;

Ь) разница диаметров двух секций трубопровода на стыке должна составлять менее 3 %;

с) внутренний сварной шов выходного фланца входного трубопровода должен быть сточен, и ни одна часть прокладки или торцевой кромки фланца не должна выступать в поток;

d) для соблюдения условия цилиндричности секций трубопровода ни одно из значений внутренних диаметров в любом поперечном сечении не должно отличаться более чем на 3 % от среднего внутреннего диаметра *D,* полученного по результатам измерений;

е) изготовитель USM должен подтвердить, что дополнительная систематическая погрешность измерений, вызванная ступенчатым изменением внутреннего диаметра более чем на 1 % от диаметра, составляет менее 1/3 МРЕ для соответствующего класса точности счетчика при проведении типовых испытаний, см. 7.3.

5.9.3.4 Гильзы термометров и карманы плотномеров

Требования к гильзам термометров и карманам плотномеров приведены в 5.7.3.

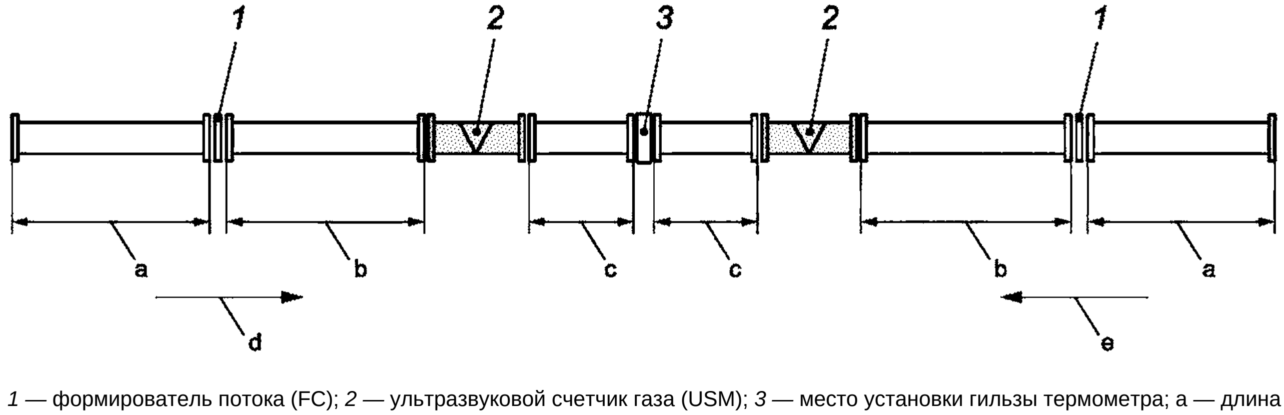
5.9.3.5 Формирователи потока

Одним из основных преимуществ ультразвуковых счетчиков является отсутствие потерь давления. Использование FC приводит к возникновению потерь давления и лишает ультразвуковые счетчики этого преимущества. Наиболее распространенными причинами использования FC являются отсутствие доступного пространства для расположения входного прямолинейного участка трубопровода необходимой длины или не поддающееся количественной оценке влияние конфигурации входного участка трубопровода.

Установка FC в любом месте измерительного трубопровода перед USM приводит к изменению показаний счетчика. Данное изменение зависит от многих факторов (например, типа FC, типа счетчика, положения FC относительно USM и возмущения потока перед FC). Чтобы не допустить наличия данной дополнительной неопределенности, USM должен быть калиброван с конкретным FC и конкретным измерительным трубопроводом как единый комплект (USMP) или с макетом FC и измерительного трубопровода (так же изготовленных и тех же моделей).

Для USM предпочтительны FC на основе перфорированных пластин. Трубчатые FC и лопастные FC только подавляют завихрения, не исправляют профиль потока и даже могут вызвать дополнительные искажения профиля.

Пример конструкции измерительного трубопровода с двунаправленным потоком, в которой используются два USM и два FC, а также гильза термометра, расположенная в центральной секции, приведен на рисунке 11.



1 — формирователь потока (FC); *2* — ультразвуковой счетчик газа (USM); *3* — место установки гильзы термометра; а — длина участка не менее *2D* (предпочтительно не менее 3D); b — длина участка 10D; с — длина участка 5D; d — основное направление потока (прямое); е — дополнительное направление потока (обратное)

Рисунок 11 — Пример конструкции измерительного трубопровода с двунаправленным потоком:

Примечание — FC может создавать значительный шум, зависящий от конструкции FC и скорости газа.

5.9.3.6 Внутренняя поверхность и шероховатость стенок

Отложения, вызванные типичными условиями транспортировки газа, например конденсаты или маслянистые включения, смешанные с окалиной, грязью или песком, могут повлиять на показатели точности счетчика. Такое же влияние может быть вызвано коррозией необработанных внутренних поверхностей или дефектным внутренним покрытием. Поэтому внутреннюю поверхность и шероховатость стенок необходимо контролировать на предмет изменений с помощью диагностических параметров счетчика, а также оптическими (визуальными) методами. Выбранный интервал контроля должен зависеть от чувствительности USM к данным изменениям, а также от ожидаемых изменений шероховатости стенки.

5.9.3.7 Двунаправленное использование

При двунаправленном использовании счетчика входные и выходные участки трубопровода должны рассматриваться как «входные». Должна быть указана чувствительность USM к влиянию гильзы термометра или кармана плотномера.

5.9.3.8 Ориентация счетчика

Требование 5.8.1 также должно выполняться при ориентации USM в положение, отличное от того, для которого он был спроектирован.

5.9.4 Ручная погрузка-разгрузка и транспортировка

Должны применяться правила, касающиеся ручной погрузки-разгрузки. Должна приниматься во внимание возможность повреждения USM во время погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки, а также должны быть приняты все соответствующие меры для сведения к минимуму ее вероятности. Например, следует рассмотреть:

а) использование индикаторного устройства во время транспортировки, такого как датчик удара;

б) использование соответствующих подъемно-транспортных контейнеров или рам;

с) использование защитных крышек для фланцев во избежание внутреннего загрязнения счетчика;

г) сведение к минимуму случаев демонтажа ультразвукового преобразователя и кабеля;

е) внедрение процедур, описанных в 8.2;

f) после выпуска из производства применение защиты счетчика и секций измерительного трубопровода от коррозии путем их продувки инертным газом перед транспортировкой.

5.10 Документация

5.10.1 Общие сведения

Вся документация должна быть датирована, и изготовитель должен предоставить перечень всех представленных документов.

5.10.2 Общая документация на счетчик

Изготовитель должен предоставить или сделать доступными как минимум следующие документы:

а) описание счетчика с указанием технических и метрологических характеристик и принципа его работы;

Ь) рисунок общего вида и/или фотографию счетчика;

с) номенклатуру деталей с описанием материалов, из которых они изготовлены;

d) сборочный чертеж с указанием составных частей, перечисленных в номенклатуре;

е) чертеж с указанием размеров;

f) чертеж с указанием расположения знаков поверки и пломб;

д) чертеж либо изображение таблички технических данных или идентификационной таблички и схемы расположения надписей;

h) чертеж вспомогательных устройств;

i) инструкции по установке, эксплуатации, периодическому техническому обслуживанию и устранению неисправностей;

j) процедуру подтверждения соответствия в условиях эксплуатации, как описано в разделе 8;

к) документацию по техническому обслуживанию, включая чертежи сторонних производителей для любых компонентов, восстанавливаемых в условиях эксплуатации;

I) перечень рекомендуемых запасных частей;

т) описание блока электронной обработки сигналов, его устройство и общее описание работы;

п) описание доступных выходных сигналов и любых механизмов корректировки;

о) перечень электронных интерфейсов и точек подключения внешних цепей с указанием их основных характеристик;

р) описание функций программного обеспечения и руководство пользователя.

5.10.3 Сопроводительная документация к счетчику

Изготовитель должен предоставить или сделать доступными как минимум следующие документы на конкретный счетчик:

a) габаритные чертежи конкретного счетчика с указанием межфланцевого расстояния счетчика, внутреннего диаметра, минимально допустимых размеров места для технического обслуживания, мест кабельного ввода и массы счетчика;

Ь) документацию о соответствии конструкции нормам и правилам безопасности;

c) документацию о соответствии рабочих характеристик счетчика требованиям 5.8 и раздела 7;

d) документацию об измерениях необходимых параметров в соответствии с требованиями 5.2.4.2;

e) копии сертификатов гидростатических испытаний, сертификатов на материалы, отчетов о рентгенографии сварных швов и другого контроля качества, определенных проектировщиком;

f) документацию о том, что конструкция счетчика успешно прошла испытания, описанные в разделе 6.

6 Испытание и калибровка

6.1 Испытание под давлением и испытание на герметичность

Корпус счетчика должен быть испытан под давлением перед FAT в соответствии с действующими нормами проектирования.

Счетчик должен быть надлежащим образом проверен на герметичность при любых проектных условиях его работы.

6.2 Индивидуальные испытания. Статические испытания

6.2.1 Общие сведения

Статические испытания включают измерение размеров корпуса счетчика (см. 5.2.4) и времени задержек в электронике и ультразвуковых преобразователях, а также проверочное испытание при нулевом расходе.

6.2.2 Измерение времени и время задержки

Время задержки сигнала в ультразвуковом преобразователе, электронике и кабеле могут вызвать систематические погрешности измерения скорости, если они неправильно заданы в списке параметров USM. Изготовитель при необходимости должен измерить и задокументировать время задержки (задержек) сигнала в электронике, кабеле и ультразвуковых преобразователях. Должна быть указана неопределенность измерений. Тестовый газ[1]) и все калибровочное оборудование для выполнения этих измерений должны иметь сертификаты калибровки, имеющие прослеживаемость к международным признанным эталонам. Любые изменения времени задержки, вызванные отличием между рабочими условиями и условиями калибровки, должны быть установлены и скомпенсированы для удовлетворения требования к необходимой неопределенности измерений.

6.2.3 Проверка нулевого расхода

Для проверки системы измерения времени распространения сигнала счетчика необходимо выполнить проверку нулевого расхода. Изготовитель должен установить процедуру проверки и допустимые отклонения.

Процедура проверки должна включать, как минимум, следующее:

a) на обоих торцах корпуса счетчика должны быть установлены заглушки;

Ь) акустические свойства тестового газа или газовой смеси, ответственность за выбор которых лежит на изготовителе, должны быть задокументированы;

c) газ должен быть гомогенным при стабильном давлении и температуре, особенно при испытаниях на высоком давлении; условия проверки считаются стабильными, если относительное стандартное отклонение средней скорости звука не превышает 0,05 %;

d) скорость газа и скорость звука для каждой акустической траектории должны регистрироваться в течение не менее 300 с, из которых затем рассчитываются средние значения и их стандартное отклонение для каждой акустической траектории;

[1]> *В Российской Федерации в качестве тестового газа должен быть использован газ с известным компонентным составом, определенным с нормированным значением неопределенности измерений, прослеживаемых к соответствующему первичному эталону.*

е) показания при нулевом расходе и абсолютное отклонение SOS для каждой акустической траектории должны удовлетворять требованиям 5.8;

f) неопределенность при измерении давления тестового газа должна быть менее 0,1 %, а неопределенность при измерении температуры тестового газа должна быть менее 0,2 *K;*

д) теоретические значения SOS должны быть рассчитаны с учетом анализа полного состава газа с использованием международно признанных алгоритмов; теоретическая скорость звука проверочного газа должна быть рассчитана с неопределенностью менее 0,05 %.

6.3 Индивидуальные испытания. Калибровка в потоке

6.3.1 Общие сведения

Все счетчики класса 1 должны быть калиброваны в потоке в соответствии с методикой, применяемой в расходоизмерительной лаборатории. Для счетчиков класса 2 калибровка в потоке настоятельно рекомендуется.

Калибровка счетчиков может также потребоваться по следующим причинам:

- требования национального законодательства;
- высокие требования к точности;
- применение для коммерческого учета.

Калибровку следует выполнять, используя репрезентативный газ. При наличии соответствующей возможности калибровка проводится в условиях, наиболее близких к рабочим. При отсутствии такой возможности в настоящем стандарте приводятся уравнения и рекомендации для ситуаций, в которых рабочее давление значительно отличается от давления при калибровке (см. раздел 9).

Результатом калибровки в потоке является набор систематических погрешностей в зависимости от расхода или числа Рейнольдса. Этот набор обычно представляется в виде «калибровочной кривой» и должен использоваться для корректировки выходного сигнала счетчика, как описано в 6.3.4. Изготовитель должен предоставить процедуру калибровки и регулировки.

Счетчик рекомендуется калибровать на расходах в диапазоне от максимального расхода применения $q_{v\,\mathrm{max\,op}}$ и до минимального проектного расхода счетчика $q_{v\,\mathrm{min}}$, см. также 5.1.1.

Поскольку USM могут быть чувствительны к возмущениям потока, вызванным сварными швами, их не должно быть во входном трубопроводе. См. также 5.9.3.3.

6.3.2 Калибровка в потоке в лаборатории

6.3.2.1 Общие сведения

Чтобы свести к минимуму неопределенность результатов калибровки, ее следует выполнять в лабораториях, в которых осуществляется контроль качества в соответствии с ISO/IEC 17025 и имеются подтверждения заявленных СМС (расширенная неопределенность калибровочной установки U_{CMC}), определенных в соответствии с ISO/IEC GUIDE. 98-3 (GUM).

Калибровка должна быть выполнена с соблюдением следующих требований:

а) в условиях невозмущенного, т. е. незакрученного, непульсирующего и осесимметрично развитого потока (см. 6.3.2.4);

Ь) в условиях стационарного потока (см. 6.3.2.4);

с) в течение статистически значимого периода времени (см. 6.3.2.2);

d) в рабочем диапазоне расходов; следует выбрать как минимум шесть, а предпочтительнее семь точек, например, для калибровки по семи точкам: 100 %, 70 %, 40 %, 25 %, 10 %, 5 % от $q_{v\ \mathrm{max\ op}}$ и ^*V,* min’

е) с использованием входных и выходных прямолинейных участков счетчика и FC либо специальных калибровочных участков трубопровода, когда это необходимо;

f) если перед счетчиком имеются препятствия в виде гильз термометров и/или пробоотборников, счетчик следует калибровать в составе с этими компонентами, расположенными на том же расстоянии и с той же ориентацией, что и при эксплуатации;

д) пользователь должен убедиться в отсутствии ухудшения состояния и/или загрязнения USMP (формирователя потока и входного участка трубопровода);

h) расчет неопределенности должен выполняться в соответствии с ISO 5168.

6.3.2.2 Продолжительность калибровки

Продолжительность измерений (одного конкретного значения расхода) должна быть достаточно большой, чтобы уменьшить влияние случайных процессов и ограниченного разрешения показаний до пренебрежимо малых величин.

Предлагается два метода.

1) Метод текущего среднеквадратического отклонения: во время измерений единичные результаты используются в расчете текущего среднеквадратического отклонения для вычисления неопределенности измерения средней погрешности счетчика. Когда текущее среднеквадратическое отклонение принимает установившееся значение, требуемая продолжительность считается достигнутой, и получают конечное значение сходимости (см. 5.8).

2) Метод фиксированного времени измерения: средний результат измерения на одном значении расхода рассчитывается на основе нескольких измерений. Следует провести как минимум три измерения для каждого значения заданного расхода. Эти три измерения не должны иметь тенденцию к отклонению в одном направлении, превышающую заявленную сходимость. Необходимо, по крайней мере, еще одно дополнительное измерение, пока три последовательных измерения не удовлетворят этому требованию. Выполняют столько измерений, сколько необходимо, пока неопределенность среднего значения погрешности счетчика на данной точке расхода не будет соответствовать требованиям к сходимости, приведенным в 5.8.

Сходимость во время калибровки должна рассчитываться как неопределенность измерений среднего отклонения счетчика исходя из формулы, приведенной в 3.1.4.5:

ʳcal = ^AM = г^- (13)

Формула (13) основывается на неопределенности одного измерения U_{AS} (см. определение сходимости) и числа выполненных измерений *n.*

Примечание — Неопределенность среднего отклонения счетчика может превышать допускаемый предел вследствие слишком малого числа наблюдений и/или нестабильных условий. Чтобы исключить данную вероятность, с целью определения соответствия калибровки счетчика требованию сходимости следует провести дополнительные измерения в установившихся условиях.

Практика показала, что общая продолжительность одного измерения должна быть не менее 300 с (например, 3 повторения по 100 с и не менее 3300 импульсов в каждом повторении). В случае, если требование по сходимости, приведенное в 5.8, не достигается в разумные сроки, необходимо использовать время усреднения в соответствии с приложением D.

6.3.2.3 Неопределенность калибровочной установки

Выбор подходящей калибровочной лаборатории важен для достижения низкой неопределенности. В зависимости от давления и расхода существуют большие различия между калибровочными измерительными возможностями (СМС) различных лабораторий. Некоторые лаборатории больше подходят для небольших типоразмеров счетчиков, другие — для больших. Неопределенность калибровочных и измерительных возможностей $L/_{CMC}$ учитывает неопределенности измерений рабочей температуры и давления во время калибровки и любые неопределенности, возникающие в результате процедуры расчета, используемой для определения погрешности калибруемого счетчика.

Неопределенность измерений, выполняемых на испытательном стенде, должна быть достаточно низкой, чтобы обеспечить удовлетворительный бюджет неопределенности общей измерительной системы. Заявленная $O_{смс}$ лаборатории должна быть меньше, чем одна треть МРЕ для соответствующего класса счетчика[1]).

6.3.2.4 Условия потока

В лаборатории трубопроводная обвязка выше по потоку должна быть выбрана таким образом, чтобы не вносилась дополнительная погрешность. Калибровочная установка должна обеспечивать полностью сформированный и невозмущенный профиль потока выше по течению от USM/USMP. Должны учитываться требования и рекомендации, приведенные в 5.9.2 и 5.9.3. Условия во время калибровки или испытаний на калибровочной установке, такие как внутренние диаметры трубопроводов, конфигурации трубопровода, располагаемого выше по течению, состояние внутренних поверхностей USM и трубопроводов, должны быть точно задокументированы.

Стабильность давления, температуры и расхода должна соответствовать максимально допустимым отклонениям, которые легли в основу $5/_{смс}$-

[1]) В случае, если U_{CMC} лаборатории хуже, чем одна треть МРЕ, оценку метрологических характеристик счетчика допускается проводить путем уменьшения применяемой максимально допустимой погрешности счетчика в соответствии с 6.3.3.

У эталонного турбинного счетчика будет происходить сдвиг в показаниях вследствие пульсаций потока, если он не может следовать за быстрыми изменениями расхода. Это происходит, когда частота пульсаций превышает 0,2- $1/T_p$ где T_m— постоянная времени турбинного счетчика. Эта постоянная времени зависит от соотношения между массой колеса турбины и массовым расходом через счетчик. Эту информацию должен предоставлять изготовитель турбинного счетчика.

Следует избегать пульсаций с амплитудой *kq/q* > 3,2 % и частотой более 0,2 • l/Vp Следует также избегать пульсаций с частотами, превышающими половину частоты дискретизации ультразвукового счетчика, чтобы свести к минимуму влияние пульсаций на ультразвуковой счетчик.

При калибровке должна применяться коррекция влияния присоединенного объема[1]), а ее неопределенность — учтена в результате калибровки.

Любое измерение должно быть отклонено при возникновении какой-либо из следующих ситуаций:

а) A_{Lp} > 0,2 % за одно измерение (влияние присоединенного объема);

Ь) ДТ > 0,25 ^ за 100 с (дрейф температуры);

с) Др > 0,002р за 100 с (дрейф давления);

d) Aq_v > 0,03q_v за 100 с (дрейф расхода);

Величины, указанные в перечислениях от а до d, должны контролироваться и документироваться во время калибровки.

6.3.2.5 Температурное расслоение в калибровочной установке

Во время калибровки, особенно на малых скоростях потока газа, может возникнуть расслоение, когда разница между температурой наружного воздуха и температурой газа превышает 5°С.

Скорость звука в самой верхней и самой нижней горизонтальной измерительной траектории счетчика с хордовыми траекториями можно использовать для обнаружения наличия температурного расслоения. При расходах выше $q_{v\ t}$ скорость звука в верхней траектории не должна отличаться более чем на 0,2 % от скорости звука в нижней траектории. В противном случае точка калибровки должна быть повторена.

Соответствующая теплоизоляция входного участка трубопровода, расположенного выше по течению, USM(P) и участка измерения температуры предотвращает расслоение.

6.3.2.6 Калибровка при двунаправленном потоке

USM и USMP класса 1, используемые для двунаправленных потоков, должны быть калиброваны в обоих направлениях совместно с установленными гильзами термометров.

6.3.3 Оценка метрологических характеристик счетчика

Оценка метрологических характеристик счетчика должна основываться на комбинации калибровочной кривой и линейного смещения, связанного только со средневзвешенным по расходу значением погрешности (FWME). Другие поправки, такие как аппроксимация кривой или линеаризация, не могут быть использованы для оценки характеристик счетчика, поскольку они могут маскировать скрытые дефекты конструкции. Они должны применяться только после утверждения кривой рабочих характеристик счетчика.

Методика расчета FWME приведена в В.2 (приложение В), результаты расчета должны быть проверены на соответствие требованиям класса точности.

USM и USMP должны соответствовать требованиям к точности, указанным в 5.8, в диапазоне расходов между $q_{v\ \min cal}$ и $q_{v\ max\ cal}$.

Примечание — Если неопределенность калибровочной установки не соответствует критериям U_{CMC}, изложенным в 6.3.2.3, то измерительные характеристики счетчика можно оценивать другим способом, путем уменьшения применяемой максимально допустимой погрешности. В этом случае погрешности USM или USMP должны соответствовать следующим критериям приемки:

ifX'^-⁰») при $и_{смс}$ < МРЕ.

6.3.4 Корректировка и записи

6.3.4.1 Общие сведения

Поправочные коэффициенты и коррекция калибровочной кривой (линеаризация) могут применяться в вычислителе расхода или в счетчике. Необходимо следить за тем, чтобы одна и та же поправка не применялась в нескольких местах.

[1]) *Под присоединенным объемом понимается внутренний объем трубопроводной обвязки между счетчиком и эталонным(и) преобразователем(ями) расхода калибровочной установки. Влияние присоединенного объема обусловлено изменением массы газа в трубопроводной обвязке в результате изменения параметров состояния газа за время измерений.*

Возможные методы применения поправочных коэффициентов:

а) FWME в требуемом диапазоне расхода счетчик; пример расчета FWME показан в В.2 (приложение В);

Ь) алгоритмы многоточечной линеаризации (например, кусочно-линейная интерполяция) по калиброванному (эксплуатационному) диапазону счетчика;

с) полиномиальные алгоритмы по калиброванному диапазону расходов счетчика; при использовании полиномиальных алгоритмов необходимо строгое соблюдение математических правил аппроксимации данных.

Если счетчик работает за пределами калиброванного диапазона, то поправка должна быть зафиксирована в соответствии с ее последним значением для калиброванного $q_{v\ min}$ или $q_{v\ max}$ соответственно. Неопределенность измерений в этой области неизвестна.

Для калибровки в режиме двунаправленного потока второй набор коэффициентов должен использоваться для обратного потока.

При применении коррекции калибровочной кривой (линеаризации) может быть использован следующий алгоритм коррекции:

100
^V, true — ^V, actual __ / \> (14)
100 + ® (factual)

где $q_{v\ actua}$| — исходный измеренный расход;

$e(q_{Vt}$ actual) — погрешность счетчика при $q_{v\ actual}$, %;

q_v true — скорректированное значение расхода.

После внесения поправок необходимо проверить результаты коррекции счетчика.

Для FWME коррекции рекомендуется одна точка проверки при значении расхода, примерно равном 40 % рабочего диапазона.

При использовании полиномиальной коррекции или многоточечной линеаризации необходимы как минимум две точки проверки, которые предпочтительно выбирать в диапазоне расходов от 10 % до 25 % $q_{v\ max}$ и от 70 % до 100 % $q_{v\ max}$ соответственно. По крайней мере, одна точка проверки должна быть выбрана между двумя соседними значениями расхода, примененными при калибровке.

6.3.4.2 Результаты

Записи включают:

а) дата(ы) испытания;

Ь) для двунаправленных счетчиков: «прямой поток» или «обратный поток»;

с) установленные погрешности без корректировки показаний счетчика и после корректировки, суммарная неопределенность U_{tot}, значения (J_{CMC} и сходимость при исследованных расходах;

d) для указания, обновлялся ли на счетчике поправочный коэффициент, в случае одноточечной коррекции должны быть приведены значения поправочных коэффициентов и FWME до и после корректировки;

е) для облегчения многоточечной корректировки калибровочной кривой в полевых условиях (линеаризации) индивидуальные настраиваемые параметры, например частота или импульс-фактор точек калибровки;

f) контрольные точки калибровки, если производилась настройка счетчика;

д) плотность и вязкость газа или/и компонентный состав газа;

h) результаты проверки MSOS на соответствие TSOS, рассчитанной по AGA-8 или GERG-2004 [61];

i) файл журнала, содержащий все диагностические данные, полученные во время калибровки, включающий как минимум:

- MSOS в зависимости от расхода;
- цифровой отпечаток MSOS;
- формы сигналов в зависимости от расхода;
- значения S/N в зависимости от расхода;
- значения автоматической регулировки усиления (AGO) в зависимости от расхода;
- значения среднеквадратического отклонения и скорости по каждой траектории USMP и их соотношение;

j) отчет о параметрах конфигурации счетчика и контрольных суммах при калибровке и после настройки.

6.3.4.3 Идентификация счетчика и описание установки

Необходимо записать:

a) данные, предоставленные изготовителем, такие как:

- размер счетчика;
- серийные номера счетчика, электроники и ультразвуковых преобразователей;
- версия программного обеспечения;

b) данные испытуемого счетчика;

c) данные калибровочной установки, метод калибровки (колокольный прувер, сопла, другие счетчики и т. д.).

6.3.4.4 Условия испытания

Необходимо записать и проверить соответствие установленным требованиям:

a) конфигурации трубопроводов выше и ниже по потоку, участвующие в формировании «профиля невозмущенного потока», включая FC, идентификационные номера трубопроводов и внутренние диаметры;

b) положение счетчика (горизонтальное, вертикальное с направлением потока вверх, вертикальное с направлением поток вниз), а также ориентацию счетчика;

c) положение, ориентацию и направление потока компонентов трубопроводной обвязки при калибровке USMP (таких, как трубы, FC, используемая точка измерения давления и гильзы термометров);

d) описание состояния внутренней поверхности счетчика и труб выше по течению (загрязнение, коррозия), при необходимости добавить фотографию;

e) вид (например, состав газа) и условия (давление и температура) тестового газа.

Должно быть дано описание любых изменений или отклонений от требуемых условий испытаний.

7 Испытания типа USM

7.1 Общие сведения

Калибровочная кривая счетчика, без гарантии, что счетчик ведет себя по месту эксплуатации так же, как и в калибровочной лаборатории, не имеет смысла. Реальные условия, как правило, более сложные, чем те, которые встречаются на калибровочной установке. Для того, чтобы убедиться, что калибровочная кривая применима в полевых условиях, проводятся испытания типа модели или серии USM (испытания типа средства измерений). При таких испытаниях реальные условия моделируются с помощью серии испытаний с возмущающим влиянием, при этом счетчик должен показать, что он может сохранять свои метрологические характеристики в таких условиях. Только в таком случае полученная в лабораторных условиях калибровочная кривая применима.

Каждая модель/серия USM требует испытаний на соответствие настоящему стандарту.

Испытания типа должны проводиться аккредитованными организациями или независимыми сертифицированными лабораториями[1]).

Счетчики, используемые для типовых испытаний, должны быть оснащены всеми необходимыми характерными элементами (электроникой, ультразвуковыми преобразователями, программным обеспечением и т. д.). Счетчики различных вариантов исполнения не должны участвовать в испытаниях типа. Срок действия сертификата утверждения типа должен быть четко определен. Рекомендуется проводить испытания типа, по крайней мере, на одном из меньших типоразмеров счетчика данного типа USM, чтобы оценить наибольшее влияние геометрических параметров и временных задержек на работу счетчика.

Эти требования к испытаниям должны применяться к конструкции всех монтажных плат, ультразвуковых преобразователей, соединительной электропроводке и монтажным зажимам. Электроника должна работать, измерять нулевой расход и сохранять 100 %-ную работоспособность во время испытаний. В случае проведения испытаний на переходные и электростатические разряды высокого напряжения счетчик может временно прекратить работу, но должен автоматически восстановиться в течение 30 с.

Все выходные сигналы, представляющие одну и ту же измеряемую величину, должны иметь одинаковую точность.

[1]) В Российской Федерации испытания средств измерений в целях утверждения типа проводятся юридическими лицами, аккредитованными в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации на выполнение испытаний в целях утверждения типа.

Во время этих испытаний ультразвуковые преобразователи могут быть установлены в меньший по размерам и более легкий испытательный корпус (или испытательные камеры) вместо полноразмерного корпуса счетчика. Однако ультразвуковые преобразователи должны фактически измерять нулевой расход и подвергаться тем же условиям испытаний, что и другие части электроники.

7.2 Точность

Пределы точности, указанные в 5.8.2, должны быть обеспечены в диапазоне расходов от $q_{v\ max}$ Д° ^*v,* min-

Испытания должны проводиться в условиях невозмущенного потока со следующими расходами: 120 %, 100 %, 70 %, 40 %, 25 %, 10 %, 5 % от $q_{v\ max}$.

Продолжительность одного измерения должна соответствовать требованиям, указанным в 6.3.2.2.

Вследствие влияния характера и уровня возмущений потока при испытании может потребоваться более длительное время измерений или большее число повторений для достижения допустимой неопределенности средневзвешенной погрешности счетчика.

Испытание на сходимость должно проводиться, по крайней мере, для одного расхода ниже $q_{v\ t}$ и, по крайней мере, для одного расхода выше $q_{v\ t}$. Для каждого из этих расходов должно быть выполнено 10 одиночных измерений с продолжительностью измерения, указанной выше.

Для испытаний на воспроизводимость один и тот же счетчик должен быть испытан в одинаковых условиях монтажа. Воспроизводимость должна быть получена на основе не менее чем трех результатов испытаний для расходов выше или равных $q_{v\ t}$.

7.3 Условия монтажа

Минимальная длина прямолинейного участка входного трубопровода $/_{min}$ должна быть такой, чтобы добавление дополнительного прямолинейного участка трубопровода, равного 10О, приводило к изменениям показаний USM (FWME) не более результирующего значения сходимости (повторяемости) калибровочной установки и USM.

Значение $/_{mjn}$ должно определяться для стандартизированного набора возмущений:

a) в условиях эталонного потока согласно 6.3.2.1;

Ь) одиночное колено 90° (радиус кривизны 1,50):

- при штатном положении USM;
- при повороте USM на 90°;

c) два колена 90° в перпендикулярных плоскостях (радиус кривизны 1,50, без вставки между коленами);

- при штатном положении USM;
- при повороте USM на 90°;

d) диффузор с увеличением диаметра как минимум на один типоразмер трубы (обычно 50 мм);

e) конфузор с уменьшением диаметра как минимум на один типоразмер трубы (обычно 50 мм);

f) два варианта ступенчатого изменения диаметра на входном фланце USM с величинами по крайней мере плюс 3 % от диаметра и минус 3 % от диаметра;

д) формирователь потока, выбранный изготовителем и установленный в сочетании с указанными выше возмущениями.

Отдельные испытания должны быть проведены, по крайней мере, для одного расхода ниже $q_{v\ f}$ и для двух различных расходов выше $q_{v\ t}$. Достаточными являются средние значения трех отдельных измерений на каждом расходе. Выше $q_{v\ t}$ все расчетные средние дополнительные погрешности должны быть в пределах одной трети MPE для соответствующего класса счетчика.

Вместо испытаний на воздействия возмущений, описанных в перечислениях а — д, допускаются аналогичные испытания с другими устройствами, создающими возмущение, такими как пластины для создания возмущений в потоке (например, вихревые генераторы). В этом случае должно быть показано, что создаваемые поля скоростей подобны возмущениям, представленным в пунктах а — д, например, путем измерения трехмерного поля скоростей.

7.4 Моделирование отказа акустического канала и замена компонентов

В случае, если для счетчика класса 1 или 2 заявляется возможность его эксплуатации при отсутствии измерений по одной или нескольким траекториям, то влияние отказа должно определяться путем моделирования отказа одной или нескольких траекторий.

Испытание следует проводить при скорости потока 15 м/с. Во время испытания скорость потока должна быть изменена до 10 м/с и 20 м/с. Для всех трех испытаний дополнительная погрешность должна составлять не более одной трети MPE для соответствующего класса счетчика.

Изготовитель должен продемонстрировать возможность замены или перестановки ультразвуковых преобразователей, электронных частей и программного обеспечения счетчика без существенного изменения его характеристик. Данная возможность должна быть продемонстрирована для:

а) электроники;

б) ультразвуковых преобразователей, для различных типов траекторий.

При замене компонентов результирующее изменение основной погрешности счетчика не должно превышать установленное в 5.6.

7.5 Испытание конструкции электроники

Конструкция электроники должна быть испытана, чтобы показать, что USM продолжает удовлетворять требованиям к рабочим характеристикам, указанным в 5.8.2, при работе в условиях воздействий и возмущений, определенных в приложении G.

В таблице G.1 представлен минимальный уровень критичности для каждого испытания, необходимый для выполнения требований к средствам измерений, которые применяют:

а) на открытой местности со средними климатическими условиями, исключая полярные условия и условия пустыни;

Ь) в местах с высоким или очень высоким уровнем вибрации и ударов, например, для средств измерений, установленных непосредственно на машинах или конвейерных лентах;

с) в местах с электромагнитными помехами, соответствующими тем, которые могут иметь место в промышленных зданиях.

Во время этих испытаний ультразвуковые преобразователи могут быть установлены в меньший по размерам и более легкий испытательный корпус (или испытательные камеры) вместо полноразмерного корпуса счетчика. Однако ультразвуковые преобразователи должны фактически измерять нулевой расход и подвергаться тем же условиям испытаний, что и другие части электроники.

Если функционирование счетчика контролируется на режиме с нулевым расходом, отсечка для малых расходов должна быть отключена, чтобы выходной сигнал по расходу соответствовал нулевому расходу.

Показания расхода должны контролироваться и оцениваться в соответствии с 5.8, а предел годности и условия испытаний должны определяться в соответствии с приложением G.

8 Журнал контроля и диагностика для проверки счетчика

8.1 Общие сведения

Этот раздел предназначен для пользователя и позволяет ему убедиться в том, что USM после ввода в эксплуатацию соответствует ожидаемым требованиям после монтажа.

USM могут предоставлять расширенную диагностическую информацию, с помощью которой можно проверить функциональность не только USM, но и других компонентов системы, таких как газовый хроматограф, датчики давления и температуры. Вследствие расширенных диагностических возможностей в настоящем стандарте предлагается использование автоматизированной диагностики вместо трудоемких процедур контроля качества.

Ультразвуковые счетчики, применяемые при коммерческом учете, создают комплексный и полезный диагностический набор данных, однако объем данных и способ их представления различаются от изготовителя к изготовителю. Во всех случаях объем данных для анализа велик, что часто приводит к игнорированию или потере информации.

Пользователи не всегда имеют доступ к системе, которая помогла бы им предоставлять данные в виде, удобном для проведения сопоставления. В настоящем стандарте рассмотрена эта проблема и предложен вариант решения, используемый двухэтапный подход для контроля исправности USM и связанных с ним средств измерений. Выбрав только небольшую группу диагностических параметров и используя их в качестве основных индикаторов, можно обеспечить проверку исправности счетчика и всей измерительной системы.

На первом обязательном этапе проводится простая проверка предельных отклонений этих основных параметров. Пока они находятся в пределах допустимых диапазонов, как указано, нет необходимости в дальнейших действиях.

Только после того, как выявляется тренд и/или отклонение превышает пороговые значения, необходимо начинать работы по обслуживанию. При обслуживании диагностические параметры можно сравнить с их значениями, ранее зафиксированными на различных этапах изготовления, калибровки и ввода в эксплуатацию ультразвукового счетчика и сохраненными в журнале контроля.

Диагностика должна использоваться в сочетании с наработанными методами анализа функционирования счетчика.

8.2 Процесс жизненного цикла USM

Для счетчиков класса 1 и класса 2 пользователь должен создать журнал контроля. Файлы журнала контроля являются ключевыми документами и характеристиками USM на протяжении всего его жизненного цикла (см. рисунок 12).

Журнал контроля отражает всю историю счетчика. Он начинается на заводе-изготовителе с настройки счетчика и содержит все события, включая диагностические испытания в процессе эксплуатации. Также, при необходимости, должны быть включены отчеты по обслуживанию и результаты повторной калибровки.

На каждом из этих этапов выполняются определенные испытания и собираются данные, которые составляют основу журнала контроля. Эти данные являются наиболее важными для оценки производительности по месту и должны быть предоставлены заказчику вместе с ультразвуковым счетчиком.

8.3 Производство и заводские приемочные испытания

При производстве создается производственная документация, содержащая необходимые сертификаты (протоколы) на изделие и сертификаты на материалы для каждого отдельного счетчика, включая протоколы испытаний на воздействие давления и других испытаний.

В ходе производства при заводских приемочных испытаниях (FAT) проверяется поведение счетчика в условиях контролируемого нулевого расхода. Во время заводских приемочных испытаний, как правило, счетчик заполняют газом и нагнетают давление примерно от 1 МПа до 2 МПа. Акустические свойства газа должны быть известны с неопределенностью расчета скорости звука в газе не более 0,05 %.

При проведении FAT измеряются с высокой точностью давление и температура, определяется теоретическая скорость звука (TSOS) и сравнивается с измеренной скоростью звука (MSOS).

На основе TSOS определяются характеристики акустических траекторий и приводятся к корректным значениям.

Устанавливаются взаимосвязь между каждой из акустических траекторий и полученный в результате электронный отпечаток счетчика, который в дальнейшем используется в качестве основы для сравнения.

Производителем предоставляются следующие материалы:

а) производственная документация;

Ь) результаты проведения FAT и диагностических испытаний, которые должны быть получены и, как минимум, включать следующие данные:

- измеренные скорости газа при нулевом расходе на акустических траекториях;
- значения MSOS для каждой траектории и соотношения MSOS между всеми траекториями (электронный отпечаток);
- качество сигнала, характеризуемое соотношением количества принятых и отправленных ультразвуковых импульсов, которое должно составлять 100 %;
- формы колебания акустических сигналов;
- значения отношений S/N;
- значения усилений;
- отчет о конфигурации, включая версии внешнего и встроенного программного обеспечения;
- записи фактических значений температуры, давления и состава газа.

После заводских приемочных испытаний счетчик отправляется на калибровочную установку, где он проходит калибровку в потоке[1]). Подробнее см. 6.3.

[1]) В соответствии со статьей 13 Федерального закона от 26 июня 2008 г. №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации, в том числе после ремонта, — периодической поверке.

я З	Изготовление Заводские приемочные испытания	**Заводские приемочные испытания (FAT)** Это первая функциональная проверка счетчика в полном объеме. Результаты диагностики получают в реальном времени и регистрируют. Диагностические тесты включают определение пропускной способности импульсов, среднего значения скорости звука по каждой траектории, среднего значения скорости звука (MSOS), отношение сигнал-шум по каждой траектории и среднее значение S/N, уровень усиления сигнала (AGC) по каждой траектории, получают цифровой отпечаток акустического сигнала. Сравнивают измеренную скорость звука с теоретической скоростью звука для проверки геометрии и времени задержек.
см я а	Первичная калибровка расхода	**Первичная калибровка** Это первые динамические испытания счетчика в полном объеме. Обычно они проводятся на калибровочной установке, имеющей прослеживаемость, и, в случае возможности, с использованием аналогичной рабочей среды сточки зрения давления, температуры и состава газа. Результаты диагностики регистрируют и записывают. Результаты диагностики включают в себя все параметры, перечисленные в Шаге 1, с добавлением скорости потока для каждой траектории, среднего значения скорости газа, коэффициента профиля потока (PF). Измеренная скорость звука (MSOS) сравнивается с теоретической (TSOS) для каждой траектории и со средней скоростью звука.
W я а	Монтаж на площадке Приемочные испытания на площадка	**Монтаж на площадке и приемочные испытания на площадке** Счетчик устанавливается в своем штатном положении. Результаты диагностики получают в реальном времени и регистрируют. Диагностические тесты включают, как минимум, определение пропускной способности импульсов на траекторию, среднюю скорость звука для каждой траектории, среднюю скорость звука (MSOS), настройки счетчика, отношение сигнал-шум для каждой траектории, среднее значение S/N, скорости потока для каждой траектории и среднее значение скорости газа. Измеренная скорость звука (MSOS) сравнивается с теоретической (TSOS) для каждой траектории и со средней скоростью звука. При необходимости могут быть включены все параметры, перечисленные в Шагах 1 и 2. Любые отличия между Шагами 2 и 3 могут быть связаны с воспроизводимостью счетчика и влиянием установки в месте эксплуатации. При необходимости используется информация производителя.
я а	Эксплуатация	**Эксплуатация** В соответствии с SAT счетчик устанавливается на свое штатное место и вводится в эксплуатацию. Результаты диагностики, полученные на регулярной основе, фиксируют и записывают. При выполнении диагностики определяют, как минимум, отношение сигнал-шум для каждой траектории и среднее значение S/N, скорости на каждой траектории, среднее значение скорости газа в USM, настройки сметчика. Измеренная скорость звука (MSOS) сравнивается с теоретической (TSOS) для каждой траектории и со средней скоростью звука. Проверяют уникальные настройки счетчика. При необходимости Вы можете включить все параметры, перечисленные выше, в Шагах 1 и 2. Любые отличия между Шагами 3 и 4 могут быть связаны с изменениями в счетчике или изменениями параметров процесса измерений.
ю я а	Обслуживание Повторная калибровка 1?Н	L **Обслуживание и повторная калибровка** Непрерывный или периодический мониторинг результатов диагностики может указывать на необходимость проведения работ по обслуживанию. В технической документации счетчика производитель указывает, какие компоненты могут быть заменены в полевых условиях, а также любое потенциальное влияние не неопределенность измерений. В качестве альтернативы в стратегии технического обслуживания оператора могут - быть указаны согласованные периоды обслуживания и какие замены компонентов могут привести к процедуре повторной калибровки. Регулирующие органы или договорные соглашения могут также устанавливать периоды между повторными калибровками в рамках эксплуатационной лицензии или соглашения. Период может устанавливаться на основе времени, объема прокачанного газа либо на основе эксплуатационного отказа.

Рисунок 12 — Журнал контроля

8.4 Первичная калибровка по расходу

Во время калибровки счетчик впервые подвергается воздействию потока. Поэтому, наряду с самим результатом калибровки важно записывать зависимые от расхода диагностические параметры. Эти записи можно позже использовать для проверки рабочих характеристик в полевых условиях. Диагностика, не зависящая от расхода, должна быть сопоставима с диагностикой, полученной во время заводских приемочных испытаний. Конфигурация трубопровода, использованная при калибровке, может повлиять на диагностику, производимую счетчиком, поэтому важно задокументировать условия и записать схему расположения счетчика в соответствии с 6.3.

Диагностические параметры, зависящие от расхода, которые регистрируются при калибровке, должны включать, как минимум:

- MSOS как функцию расхода (проверка по AGA-8/GERG-2004);
- цифровой отпечаток MSOS;
- формы акустических сигналов;
- значения S/N в зависимости от расхода;
- значения автоматической регулировки усиления (AGC) в зависимости от расхода;
- значения среднеквадратического отклонения и скорости по каждой траектории и их соотношения.

Из приведенных выше индивидуальных значений могут быть определены значения среднего, минимального, максимального и среднеквадратического отклонения.

В отчете о калибровке должны быть записаны результаты калибровки вместе с описанием условий, при которых проводилась калибровка, как указано в 6.3.4.1.

8.5 Монтаж и приемочные испытания на месте эксплуатации

После того как счетчик установлен, подключен и находится под давлением, важно провести первоначальную функциональную проверку отсутствия повреждений при транспортировке или монтаже. Электронные отпечатки счетчика должны быть зарегистрированы и сравнены с полученными при заводских приемочных испытаниях, а также в калибровочной лаборатории. Процесс ввода в эксплуатацию также должен включать приемочные испытания на площадке, неотъемлемой частью которых являются испытания в потоке во всем рабочем диапазоне. Файлы журналов диагностики должны быть зарегистрированы, так как они станут уникальными электронными отпечатками «первого газа», с которым можно будет проводить сравнение в будущем.

Результаты SAT и диагностических испытаний должны быть зафиксированы и включать, как минимум:

- журнал регистрации диагностических данных, собранных по всему достижимому диапазону расхода, включая значения MSOS на каждой траектории и соотношения MSOS (цифровой отпечаток), значения S/N и усиления;
- запись форм отдельных акустических сигналов;
- отчет о сравнении фактических параметров счетчика с теми, которые использовались при калибровке;
- запись скоростей газа на отдельных траекториях;
- сравнение TSOS на площадке со средним значением MSOS с использованием международно признанного алгоритма;
- проверка соотношений MSOS для различных траекторий;
- запись фактической температуры, давления и состава газа.

8.6 Эксплуатация

После завершения процесса ввода в эксплуатацию и последующей приемки счетчика система измерений вводится в промышленную эксплуатацию. Если процесс ввода в эксплуатацию или SAT не включали в полное функциональное тестирование, важно, чтобы файл журнала оперативной диагностики был записан как можно скорее после ввода системы в эксплуатацию. В идеальном случае счетчик должен изначально работать во всем своем диапазоне, чтобы диагностика, связанная с профилем, регистрировалась правильно. Если это невозможно вследствие эксплуатационных или сезонных ограничений, то это должно быть выполнено сразу, как только данная возможность появится. Результаты оперативной диагностики используют в качестве справочных данных, с которыми будут производиться будущие сравнения, поэтому они являются важной частью журнала контроля.

Во время эксплуатации пользователь должен периодически сравнивать фактические данные со счетчика с данными, собранными на предыдущих этапах, чтобы определить, что следующие параметры остаются в допустимых пределах:

- точность определения времени;
- стабильность профиля потока;
- качество обнаружения акустического сигнала.

На практике:

- проверка точности определения временных интервалов осуществляется путем проверки MSOS и соотношений MSOS;
- проверка стабильности профиля потока осуществляется путем проверки соотношений скоростей потока;
- проверка качества обнаружения сигнала осуществляется путем проверки отношений S/N.

Если при монтаже счетчика обеспечены условия отсутствия загрязнений, то пользователь может быть уверен с очень высокой степенью убежденности в том, что счетчик работает в соответствии со спецификацией.

Данные, которые должны периодически формироваться и передаваться:

- сравнение измеренной MSOS с рассчитанной на основе AGA-8/GERG-2004;
- соотношения MSOS (электронный отпечаток SOS);
- соотношения скоростей;
- отношения S/N.

Для каждого из этих данных должны быть указаны максимальные отклонения для уровня «предупреждения» и уровня «аварийного сигнала». Они описаны ниже. В случае предупреждения может потребоваться особое внимание к работе счетчика. В случае аварийного сигнала могут потребоваться вмешательство и корректирующие действия.

8.7 Предупреждающий и аварийный уровни сигналов диагностики при эксплуатации

8.7.1 Предупреждающий и аварийный уровни сигналов по MSOS и соотношениям MSOS

Сравнение MSOS, измеренной USM, с TSOS, рассчитанной с использованием международно признанного алгоритма, позволяет проверить временные параметры ультразвукового счетчика. Существуют два вида проверок: по средней MSOS и по соотношениям MSOS. Проверка по соотношениям MSOS используется для контроля согласованности функционирования акустических траекторий и определения наличия какого-либо расслоения.

Точность, с которой проводится сравнение средней MSOS с TSOS, зависит от качества расчета, а также от качества, пригодности и состояния оборудования, используемого для измерения состава газа, давления и температуры. Чем более репрезентативна проба для определения компонентного состава газа, тем более точно будет определена TSOS.

Для давлений выше 12 МПа уравнение GERG-2004 может обеспечить низкую неопределенность расчета TSOS, но в большинстве практических применений, в которых рабочее давление ниже 12 МПа и температура находится в пределах от минус 8 до 62 °С, может быть применен метод расчета AGA-8.

Чувствительность скорости звука к изменению давления намного ниже, чем к изменению температуры, например:

- неопределенность давления, равная 0,1 %, вносит вклад в неопределенность MSOS 0,005 %;
- неопределенность температуры, равная 0,1 %, вносит вклад в неопределенность MSOS 0,05 %.

На основании этого можно определить пределы для предупреждающего и аварийного уровней сигналов по сравнению MSOS с TSOS, допускающие неопределенность температурных измерений 0,1 %, а также низкую дополнительную неопределенность 0,1 % в случае использования воздуха при проведении FAT.

Для счетчика, работающего при давлении ниже 12 МПа и в диапазоне температур от минус 8°С до 62 °С:

- расхождение MSOS и TSOS не более 0,25 % является допустимым;
- предупреждающий уровень: если расхождение составляет от 0,25 % до 0,35 %;
- аварийный уровень: если расхождение более 0,35 %.

Поскольку на соотношения MSOS влияет только уровень турбулентности, значения для предупреждающего и аварийного уровней сигналов могут быть немного уменьшены:

- расхождения соотношений MSOS между различными акустическими траекториями не более 0,2 % являются допустимыми;

- предупреждающий уровень: если расхождения составляют от 0,2 % до 0,3 %;
- аварийный уровень: если расхождения более 0,3 %.

Средства измерений температуры следует регулярно калибровать, чтобы поддерживать узкие границы допусков. В противном случае, когда погрешность датчика температуры может превышать 0,3 К, следует применять более широкие границы для предупреждающего и аварийного уровней сигналов.

8.7.2 Уровни предупреждений и аварийных сигналов для соотношений скоростей

Установить общие уровни предупреждений и аварийных сигналов для соотношений скоростей сложнее, так как они зависят от положения акустической траектории. Счетчики с акустическими траекториями, расположенными ближе к стенке, показывают большую вариацию, чем счетчики с траекториями, расположенными ближе к центральной линии трубы. Следовательно, эти значения должны быть представлены изготовителем.

8.7.3 Предупреждающий и аварийный уровни сигналов по соотношениям S/N

Во время приемочных испытаний на месте эксплуатации (8.5) выполняются записи значений S/N и уровней усиления. Эти значения служат опорным значением для предупреждающего и аварийного уровней сигналов.

Для условий эксплуатации, при которых давление не изменяется более чем на приблизительно 15 %, для разницы между фактическими отношениями S/N и отношениями S/N, зарегистрированными при SAT, могут быть установлены следующие уровни предупреждающего и аварийного сигналов:

- разница между фактическим отношением S/N и отношением S/N при SAT не более 6 дБ считается допустимой;
- предупреждающий уровень: если разница более 6 дБ и менее 9 дБ;
- аварийный уровень: если разница не менее 9 дБ.

В случае, если рабочее давление ниже приблизительно 85 % от давления при проведении SAT, вышеуказанные допуски увеличиваются (ослабляются) в зависимости от отношения давлений в дБ (20 lg *P1P^)-* Так, например, когда рабочее давление составляет половину давления SAT, допуски увеличиваются на дополнительные 6 дБ при условии, что данные допуски по-прежнему соответствуют минимальным требованиям к S/N, установленным изготовителем.

8.8 Обслуживание и повторная калибровка

8.8.1 Общие сведения

Время между первичной калибровкой и последующими повторными калибровками может варьироваться, поскольку оно может зависеть от правовых норм, законодательства, договорных соглашений, условий измерений и финансовых последствий. Для счетчика интервал между калибровками может варьироваться от 1 до 8 лет в большинстве стран[1]).

Счетчик обычно находится в полностью рабочем состоянии, когда его необходимо вывести из эксплуатации для повторной калибровки. Блок-схема на рисунке 13 описывает рекомендуемую процедуру возврата счетчиков для повторной калибровки при различных обстоятельствах.

8.8.2 Диагностика при обслуживании

В процессе эксплуатации USM может подлежать плановому техническому или профилактическому обслуживанию либо необходимому текущему ремонту. Во время этих мероприятий рекомендуется получать файлы журнала диагностики и зарегистрированные формы акустических сигналов как в качестве базовых, так и для помощи в диагностике любых проблем, связанных со счетчиком или технологическим процессом. Кроме того, перед выводом USM из работы/эксплуатации рекомендуется получить (если это возможно) следующее:

- полную запись файла журнала диагностики перед выводом из эксплуатации в рамках подготовки к ремонту/повторной калибровке;
- полную запись формы акустического сигнала перед выводом из эксплуатации при подготовке к ремонту/повторной калибровке;
- запись файла конфигурации перед выводом из эксплуатации при подготовке к ремонту/повторной калибровке;
- фотографии для визуального осмотра счетчика после вывода из эксплуатации при подготовке к ремонту/повторной калибровке;
- сообщение о любом загрязнении, разрушении или дефектах материала.

[1]) В приложении А представлен метод оценки достоверности измерений на основе результатов последовательных калибровок с использованием допустимых границ отклонений результатов калибровок.

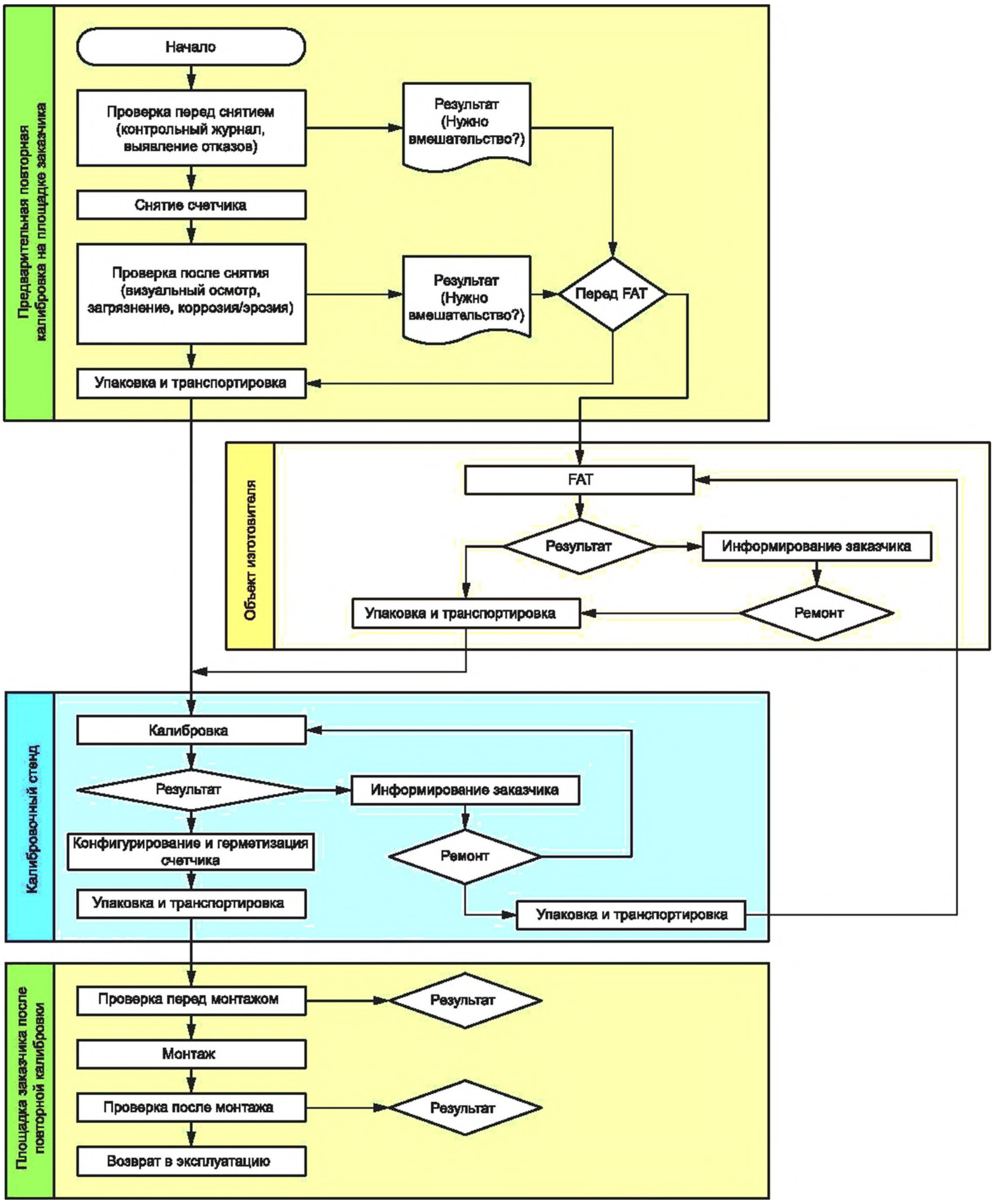


Рисунок 13 — Процесс повторной калибровки

Идентификация вышеперечисленного определяет маршрут, по которому USM должен следовать в соответствии с блок-схемой на рисунке 13.

8.9 Диагностические параметры

8.9.1 Скорость звука

8.9.1.1 Измеренная скорость звука (MSOS)

Скорость звука (SOS) является одним из наиболее важных диагностических параметров, связанных с USM. Скорость, с которой ультразвуковой сигнал проходит между парой ультразвуковых преобразователей, является измеряемой физической величиной, которая определяется как измеренная скорость звука MSOS.

На MSOS, измеренную с помощью USM, влияют:

- температура;

- состав газа;
- давление;
- геометрия измерительной части счетчика;
- измеренное счетчиком время прохождения сигнала;
- расслоение в условиях низкого расхода (неоднородное распределение температуры).

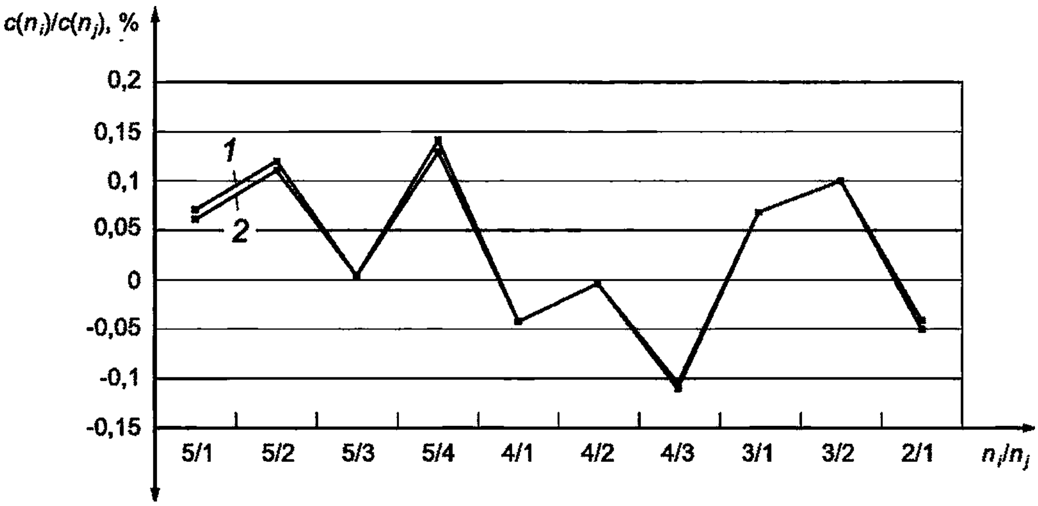
Когда USM оснащен тремя или более траекториями, можно использовать MSOS каждой отдельной траектории для выполнения относительного сравнения SOS. Данное сравнение используется для создания цифровых отпечатков USM.

Преимущества:

- не зависит от состава газа;
- измерение может быть выполнено в условиях потока;
- сравнение значений параметров может выполняться автоматически в составе диагностического пакета.

Примечание — При высоких скоростях длина акустической траектории может изменяться вследствие искривления траектории акустического сигнала (эффект Маха), что увеличивает неопределенность.

Сравнение цифровых отпечатков может быть отображено графически, как показано на рисунке 14, где представлены цифровые отпечатки для USM с пятью акустическими траекториями. По оси ординат показаны отношения SOS, измеренные во время статических испытаний и калибровки по расходу. На графиках показаны различные отношения MSOS для различных траекторий. По оси абсцисс указаны номера траекторий, из которых получена MSOS; например, 5/1 означает результат траектории 5, разделенный на результат траектории 1.



1 — статическое испытание; 2 — калибровка в потоке; *л,* — обозначение одной сравниваемой траектории, /' = 1 ... 5 (/' # *j); П]*— обозначение другой сравниваемой траектории,) =1 ... 5 (/ # i); *с(п,)* — SOS на траектории *п-, c(nj)* — SOS на траектории *п-, c(nj)lc(n)* — отношение SOS на сравниваемых траекториях, в %

Рисунок 14 — Цифровой отпечаток: образец соотношения, определенный во время статических испытаний с азотом и во время калибровки в потоке на калибровочной установке

Данные рисунка 14 являются только примером. Следует обратить внимание, что в зависимости от конфигурации счетчика и числа акустических траекторий могут быть получены разные графики. Однако такой же принцип можно применить ко всем типам USM с тремя или более траекториями.

Цифровой отпечаток относительной SOS не должен зависеть от времени, состава газа, температуры и давления. Во время эксплуатации отклонение SOS между траекториями должно быть в пределах 0,2 % при расходах газа выше q_{vt}. Ниже q_{vt} при очень малых расходах и/или при недостаточной теплоизоляции градиенты температуры в протекающем газе могут вызвать дополнительное отклонение SOS на траекториях.

Изменение формы цифрового отпечатка с течением времени может указывать на неисправность траектории USM, что может привести к неправильному измерению. Цифровые отпечатки, полученные при заводских приемочных испытаниях, приемочных испытаниях на площадке, калибровке по потоку и полевых испытаниях можно сравнивать, чтобы отслеживать изменения в поведении USM.

8.9.1.2 Теоретическая скорость звука (TSOS)

Дополнительно кроме MSOS можно также рассчитать теоретическую скорость звука (TSOS), если известны состав газа, температура и давление. Это требует дополнительных входных данных от поточного газового хроматографа, датчиков температуры и давления рабочей среды. Используя эти входные данные и применяя уравнение состояния, по уравнению GERG-2004 или уравнению AGA-8 определяется значение TSOS.

Когда известны значения MSOS и TSOS, можно проводить непрерывное сравнение между ними. Отклонение MSOS от TSOS считается приемлемым, если оно не более 0,25 %.

Расхождения между MSOS и TSOS могут указывать на асинхронное определение MSOS и TSOS вследствие изменений состава газа и временной задержки анализа состава газа или неисправности/сбоя:

- измерения состава газа;
- измерения температуры;
- измерения давления;
- USM, включая настройку параметров, длину траектории, временную задержку, обнаружение и обработку сигнала, отложения на ультразвуковом(ых) преобразователе(ях) или корпусе счетчика, которые изменяют длину траектории;
- используемого метода расчета и его значений неопределенности, зависящих от эксплуатации.

Статистические методы могут быть полезны для мониторинга MSOS и TSOS стечением времени.

8.9.2 Автоматическая регулировка усиления

Автоматическая регулировка усиления (AGO) используется для обеспечения одинаковой амплитуды принимаемого сигнала независимо от условий работы. Основная цель AGC — поддерживать достаточную амплитуду и отношение S/N для точной синхронизации принимаемого сигнала. Фактическое значение усиления также является полезным диагностическим параметром, указывающим на уровень затухания акустического импульса вдоль траектории. Усиление зависит от состава газа, давления, скорости, длины траектории и степени загрязнения. Уровень усиления следует сравнить с пределом усиления. По мере того как способность ультразвукового преобразователя генерировать ультразвуковой сигнал ухудшается, уровень AGO будет увеличиваться. В сложившейся ситуации для траектории счетчика больше не будет определяться действительное значение MSOS или точная скорость, а счетчик перейдет в неисправное состояние.

8.9.3 Отношение сигнала к шуму (S/N)

Отношение сигнала к шуму (S/N) является параметром, интерпретация которого для диагностики во многих случаях затруднена вследствие различных факторов, которые могут влиять на него. Однако, как правило, S/N можно использовать как индикатор качества принимаемых ультразвуковых сигналов. Распределение S/N между ультразвуковыми преобразователями может указывать на источник некоторых проблем при выполнении измерений по мере их возникновения. Например, наличие расхождения между S/N выше и ниже по потоку означает, что возможно присутствие источника ультразвукового шума, часто это регулирующий клапан или FC с большим перепадом давления. Приемные ультразвуковые преобразователи, обращенные к источнику шума, будут иметь более низкое соотношение S/N, чем обращенные от него. Наличие шума от регулирующего клапана или другого источника ультразвукового шума обычно можно подтвердить, изучив физическую компоновку измерительной станции. Если все ультразвуковые преобразователи показывают низкое соотношение S/N, проблема может быть связана с электрическими помехами, загрязнением преобразователей или чрезмерной скоростью газа. Шум, который наблюдается только в некоторых парах преобразователей и проявляется как в сигналах по потоку, так и в сигналах против потока, может свидетельствовать о наличии жидкости в монтажных каналах ультразвуковых преобразователей, создающей акустическое соединение между ультразвуковыми преобразователями и корпусом счетчика.

8.9.4 Уровень приема (производительность) акустического сигнала

Уровень приема сигнала определяется как простое арифметическое отношение переданных сигналов к принятым сигналам. Уровень приема сигнала, как правило, снижается по мере увеличения расхода сверх номинальной производительности, а также может снижаться при снижении давления в линии или при наличии грязи и влаги.

8.9.5 Профиль потока

Скорости в отдельных траекториях счетчика имеют уникальные соотношения, отражающие профиль потока, который находится под влиянием конфигурации трубопровода выше по потоку. При скоростях, соответствующих значениям расхода выше, чем q_t, эти соотношения не должны существенно меняться с течением времени. В зависимости от конфигурации траектории счетчика существует несколько методов, с помощью которых можно определить профиль потока в счетчике. Измерения профиля потока могут включать определение его формы и симметрии, степени неосевых компонентов потока, таких как «поперечный поток» и/или завихрение, а также статистическую оценку степени турбулентности потока. Изменение профиля потока может указывать на изменение вязкости среды и/или изменение шероховатости стенок трубопровода. Перекрестная проверка с другими средствами диагностики может позволить пользователю определить источник изменения и оценить его значимость. Изменение профиля потока в случае применения формирователя потока может указывать на засорение или загрязнение устройства, формирующего поток.

8.9.6 Среднеквадратическое отклонение/турбулентность

В различных случаях, особенно при наличии загрязнения, увеличение среднеквадратического отклонения основных диагностических параметров, таких как скорость звука, AGC, скорости потока на акустических траекториях, и уровень приема акустических сигналов являются хорошими индикаторами для обнаружения проблем на ранней стадии при эксплуатации. В таблице 6 показан пример такой диаграммы взаимосвязей диагностических параметров.

Таблица 6 — Диаграмма взаимосвязей диагностических параметров

Взаимосвязь диагностических параметров	Для акустической траектории					
	Уровень приема сигналов	AGC	S/N	MSOS	Скорость потока	Среднеквадратическое отклонение
Отказ ультразвукового преобразователя	x	x	—	x	x	x
Проблемы обнаружения	x	x	x	x	x	x
Ультразвуковой шум	x	x	x	—	—	—
Рабочее давление	—	x	x	—	—	—
Температура	—	—	—	x	—	—
Загрязнение	x	x	x	x	x	x
Изменения профиля потока	—	—	—	—	x	x
Высокая скорость	x	x	x	—	—	x

x наличие связи
— отсутствие связи

9 Эксплуатационная практика

9.1 Коррекция по температуре и давлению

Выходной сигнал USM должен быть скорректирован с учетом эффекта теплового расширения. Необходимость коррекции по давлению существенно зависит от разности давлений и конструкции корпуса счетчика. Изготовитель должен информировать пользователя о влиянии температуры и давления на показания USM.

В результате калибровки по расходу систематические погрешности уменьшаются за счет определения и последующего применения коэффициента калибровки, улучшается линеаризация, а значение FWME максимально приближается к нулю, что приводит к максимально близкой к нулю кривой погрешности. Начиная с этого момента, счетчик использует те же параметры давления и температуры, что и при динамической калибровке. Любое последующее изменение температуры или давления изменяет физические размеры счетчика и, если их не скорректировать, вносит систематическую погрешность измерения расхода. Как правило, давление и температура во время калибровки отличаются от давления и температуры в рабочих условиях.

В 9.1.2 представлен простой подход, позволяющий сделать начальную оценку погрешности расхода, вызванной влиянием температуры и давления, которые отличаются от исходных условий калибровки. Если эта погрешность значительна по сравнению с неопределенностью, требуемой для целей учета газа при его передаче и распределении, необходимо выполнить более детальную оценку погрешности измерения расхода, как описано в 9.1.2.7. В приложении Е представлено обширное и подробное объяснение процесса, с которым рекомендуется ознакомиться для получения основных необходимых сведений по положениям, приведенным в 9.1.2.

Метод расчета и правильная конфигурация параметров должны быть описаны в технической документации счетчика, в особенности применительно к калибровке и последующей эксплуатации на измерительной станции.

9.1.1 Коррекция по температуре

Для всех типов счетчиков коррекция по температуре, связанная с геометрией, может быть представлена в виде простого аналитического решения (см. Е.2). Коррекция имеет очень высокую точность, и единственными неопределенностями, связанными с этой коррекцией, являются неопределенности, обусловленные определением механических свойств материалов.

Поправочный коэффициент по расходу вследствие изменения температуры корпуса *Т* определяется как

^ = (1 + аДТ)^3 = р + ЗаДГ + 3(аАТ)^2 +(аАТ)^3| (15)

где q_{v1} — объемный расход в рабочих условиях;

q_{vo} — объемный расход в условиях калибровки;

АТ — разница температур в рабочих условиях и в условиях калибровки.

За исключением экстремальных ситуаций, значение аАТобычно очень мало, и формулу (15) можно упростить до

= 1 + ЗаАТ. (16)

Погрешность расхода, обусловленная влиянием изменения температуры на корпус счетчика, в этом случае может быть рассчитана по формуле

= ЗаАТ. (17)

В таблице 7 приведены типичные коэффициенты теплового расширения для распространенных материалов корпуса.

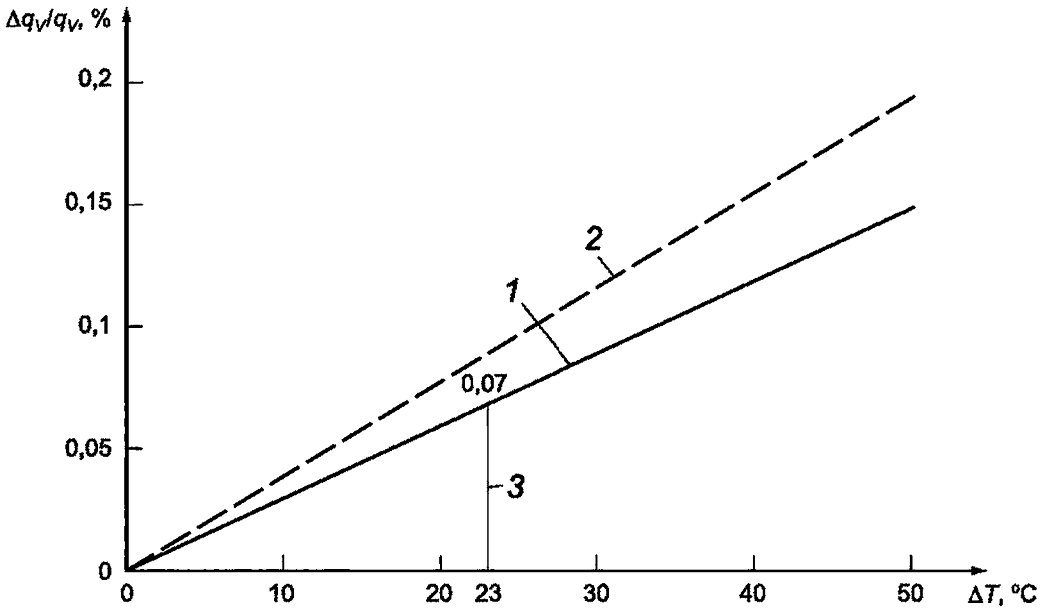
Таблица 7 — Средние коэффициенты теплового расширения в диапазоне от 0°С до 100°С

Материал	Коэффициент теплового расширения а, *К* ^{1}
Углеродистая сталь	12 • IO"^{6}
Нержавеющая сталь AISI 304	17 • IO"^{6}
Нержавеющая сталь AISI 316	16 ■ 10“^{6}
Нержавеющая сталь с высоким пределом упругости AISI 420	10 ■ 10~^{6}

Коэффициенты теплового расширения для конкретного материала меняются в зависимости от температуры и процесса обработки стали. Значения, приведенные в таблице 7 и использованные в примере на рисунке 15, предназначены только для иллюстративных целей. Для более точных расчетов рекомендуется получить данные о коэффициенте теплового расширения у изготовителя материала.

Результаты расчета по формуле (17) в графическом виде приведены на рисунке 15 для двух материалов из таблицы 7.

Данные, приведенные на рисунке 15, могут использоваться для быстрой оценки погрешности расхода, обусловленной влиянием изменения температуры на корпус счетчика. Например, изменение температуры на +23°С при использовании корпуса из аустенитной нержавеющей стали дает поправку +0,07 % (то есть счетчик занижает расход на 0,07 % без коррекции). Если АГ — отрицательная величина, то $i\backslash q_{\surd}/q_v$— отрицательная величина (то есть счетчик будет завышать расход).



1 — аустенитная нержавеющая сталь; 2 — ферритная нержавеющая сталь; *3* — пример определения величины Aq_V/q_v

Рисунок 15 — Погрешность измерения расхода $\&q_V/q_v$, связанная с разницей температур ДТ, для двух видов материала

9.1.2 Коррекция подавлению

9.1.2.1 Общие сведения

Коррекция по давлению, связанная с геометрией, сложна и зависит от конструкции корпуса счетчика, типа его торцевых соединений и способа торцевого крепления счетчика при эксплуатации.

Предлагаемые на рынке конструкции счетчиков можно разделить на три основные категории:

a) счетчики с корпусом цилиндрической формы, вваренным непосредственно в трубопровод;

Ь) счетчики с корпусом, конструкция которого состоит из трубы с приваренными фланцами;

c) счетчики с нецилиндрическими конструкциями корпуса счетчика, например изготовленные литьем.

В пунктах с 9.1.2.2 по 9.1.2.4 приведены средства первоначальной оценки погрешности измерения расхода для любого типа корпуса.

9.1.2.2 Общее упрощенное выражение для любого типа корпуса

В качестве первого этапа оценки влияния давления можно вывести общее основное выражение, предполагая, что корпус счетчика состоит просто из цилиндрической трубы. Оценка максимальной ожидаемой погрешности измерения расхода вследствие изменения давления в корпусе на величину Др определяется (см. также Е.5) по формуле

(18)

(^ 'b,p,так

где *R* — внешний радиус;

г— внутренний радиус;

ц — коэффициент Пуассона;

Е — модуль Юнга, МПа;

Др — разность рабочего давления и давления при калибровке, МПа.

Если корпус счетчика имеет нестандартную или нецилиндрическую форму (например, как в случае с литым корпусом), то в этом случае для первоначальной оценки следует значение внешнего радиуса *R* принять равным в точке, в которой стенка является самой тонкой, так как это дает наибольшую оценку погрешности измерения расхода.

Результаты расчетов по формуле (18) приведены в графическом виде на рисунке 16, в зависимости от значений 5/г, то есть отношения толщины стенки к внутреннему радиусу.

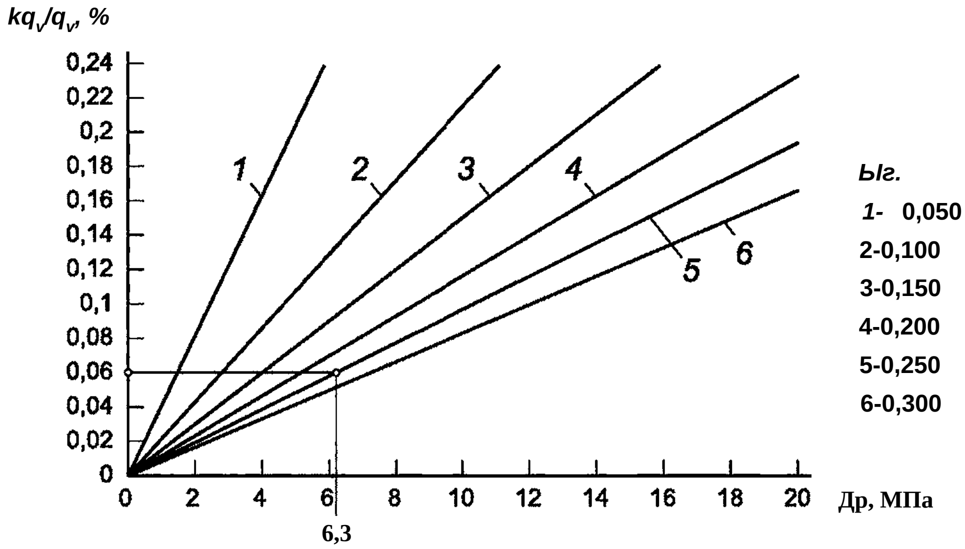


Рисунок 16 — Максимальная ожидаемая погрешность измерения расхода kq_v/q_v, связанная с разностью давления *кр,* для различных отношений *Ыг*

Данные, приведенные на рисунке 16, представлены для быстрого способа оценки максимальной ожидаемой погрешности измерения расхода вследствие изменений давления внутри корпуса. Рисунок 16 приводится для материала корпуса с модулем Юнга 2 ■ 10~^{11} Па и коэффициентом Пуассона 0,3. Например, при Др = 6,3 МПа максимальная ожидаемая погрешность, обусловленная изменением давления, составляет 0,06 % для 5/г = 0,25. Если *кр* отрицательное, то kq_v/q_v отрицательное (то есть счетчик будет завышать расход).

Поскольку формула (18) и рисунок 16 представляют максимальную ожидаемую погрешность, можно перейти прямо к 9.1.2.6 (приняв K_E = K_s = 1), чтобы оценить значимость погрешности без необходимости уточнения первоначальной оценки, приведенной в 9.1.2.3 и 9.1.2.4, т.к. они приводят к более низкому значению погрешности измерения расхода.

9.1.2.3 Уточнение первоначальной оценки для учета различных конструкций корпуса счетчика

Наличие фланцев или нестандартная форма корпуса делают корпус жестче по сравнению с простой цилиндрической трубой, рассмотренной в 9.1.2.1; следовательно, расширение корпуса и результирующая погрешность измерения расхода будет меньше, чем полученные по формуле (18) и на рисунке 16. Чтобы ввести компенсацию от данного влияния местного усиления, для получения скорректированной оценки погрешности измерения расхода используется поправочный коэффициент формы корпуса K_s:

&q$_v$

' ' *b,p,revl* ^ *'Ь,p,max* (19)

Коэффициент K_s всегда меньше или равен 1. Значение K_s, используемое для определенного типа корпуса, определяется следующим образом:

а) для вварного корпуса без фланцев в пределах *2R,* где *R* — внешний радиус трубопровода от мест расположения ультразвуковых преобразователей, K_s = 1, то есть корпус счетчика ведет себя как простая труба;

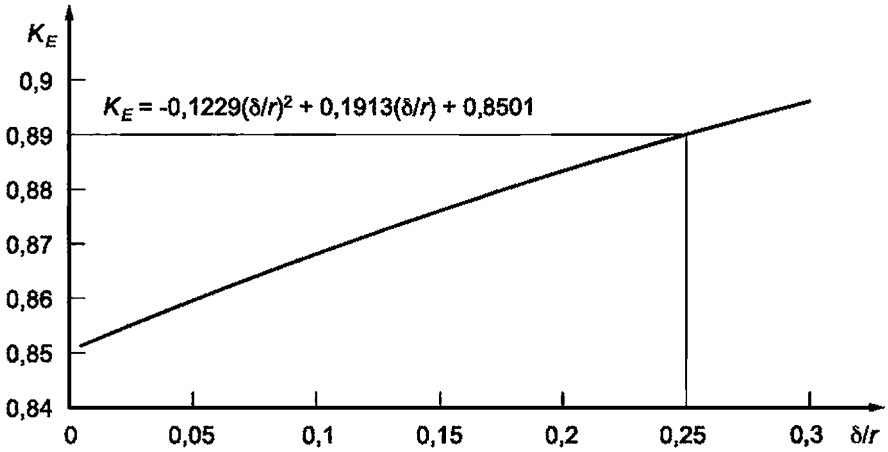
Ь) для фланцевого корпуса счетчика (например, состоящего из двух фланцев, приваренных к трубопроводу) или вварной конструкции, в которой соседние фланцы находятся в пределах *2R* от положения ультразвукового преобразователя, значение K_s должно быть рассчитано согласно описанию, приведенному в Е.2.3 (приложение Е);

с) для корпусов счетчика нестандартных форм, например для литых корпусов, K_s получают на основании средней погрешности измерения расхода следующим образом:

1) формула (19) или рисунок 16 используются для получения значения погрешности измерения расхода *у,* основанного на использовании толщины самого толстого участка стенки;
2) после этого K_s рассчитывается как K_s = 0,5 • (1 + *у/х),* где х— первоначальная оценка погрешности, основанная на использовании толщины самого тонкого участка стенки.

9.1.2.4 Уточнение первоначальной оценки с учетом влияния торцевой нагрузки и торцевого крепления или ограничения

Формула (19) и рисунок 16 основаны на условиях наихудшего случая радиального расширения корпуса (отсутствие торцевых нагрузок и свободные в осевом направлении торцы). Влияние условий наилучшего случая (наличие торцевых нагрузок и свободные в осевом направлении торцы) на минимальное радиальное расширение корпуса может быть учтено введением поправочного коэффициента торцевой нагрузки и крепления K_E(см. приложение Е), приведенного на рисунке 17 для коэффициента Пуассона, равного 0,3.



г— внутренний радиус трубопровода; 5 — толщина стенки трубопровода

Рисунок 17 — Поправочный коэффициент торцевой нагрузки и крепления K_E

Поправочный коэффициент торцевой нагрузки и крепления просто выводится из соотношения формул (Е.12) и (Е.14). В примере на рисунке 17 K_E = 0,89 для *Ыг*= 0,25. Из рисунка 17 следует, что наименьшее значение K_E может быть равно 0,85.

Погрешность измерения расхода Aq_V/q_VВ таком случае принимает вид:

Т 'b,p 'ь,p,так ■ (20)

Примечание — Формула (20) дает оценку ожидаемой минимальной погрешности измерения расхода. Следовательно, ее можно использовать в сочетании с максимальной погрешностью измерения расхода (то есть при K_E = K_s = 1) для получения начальной оценки диапазона или допуска ожидаемой погрешности измерения расхода.

9.1.2.5 Влияние монтажных каналов ультразвуковых преобразователей

Совместное влияние ультразвукового преобразователя и его монтажного канала обычно на порядок меньше, чем влияние корпуса счетчика, и в большинстве случаев им можно пренебречь. В Е.2.5 для справки приведен простой метод оценки влияния монтажных каналов ультразвуковых преобразователей. В уравнениях, которые применяются для оценки влияния монтажных каналов ультразвуковых преобразователей, должны быть известны коэффициенты материала ультразвукового преобразователя (их можно получить у изготовителя).

9.1.2.6 Суммарная погрешность измерения

Первоначальная оценка суммарной погрешности измерения расхода $(Aq_V/q_V)_{cest'}$ обусловленная изменением температуры и давления, определяется по формуле

------- ------- + ■ (21)
^У 'c,est Уу ' 9У 'b,p,так

Если погрешность измерения расхода считается незначительной, то ею можно пренебречь.

Если погрешность измерения расхода считается существенной и, следовательно, требует коррекции, необходимо выполнить подробный расчет, описанный в 9.1.2.7, для получения более точного поправочного коэффициента по расходу.

Примечание — Если расчеты по пунктам 9.1.2.3 и 9.1.2.4 были пропущены при оценке влияния давления, можно выполнить повторную оценку с использованием этих разделов, чтобы получить заниженную оценку, прежде чем пересматривать необходимость более подробного расчета.

9.1.2.7 Подробная процедура расчета

В приложении Е приведены подробный расчет и процедуры оценки влияния давления и температуры на монтажные каналы ультразвуковых преобразователей, а также оценки влияния на корпус счетчика его формы и торцевой нагрузки.

Соотношение между q_{VQ} при эталонных условиях калибровки и q_{v1} при других условиях может быть записано (см. Е.1) как поправочный коэффициент по расходу q_v^/q_{vo}, определяемый как

Qv.1 I ^1 I M /22)
Qv.o vo J vo J v J

Подробный расчет содержит оценку предельных значений и предусматривает представление погрешности измерения расхода в одной из следующих эквивалентных форм:

$$\frac{1}{Qv,0} = x, xxxx + x, xxxx; \quad (23)$$

^^- = (x,xx + x,xx)%. (24)
Qv

Указание окончательного поправочного коэффициента по расходу *q^lq^^* с точностью до четырех десятичных разрядов и погрешности измерения расхода Aq_v/q_v с точностью до двух десятичных разрядов отражает общий уровень точности метода вычислений. Поскольку всегда существует некоторая неопределенность в отношении фактических условий торцевой нагрузки на счетчик, оценка расхода никогда не бывает более точной, чем допуски, указанные в формулах (23) и (24).

Для корпусов счетчиков, которые обычно имеют цилиндрическую форму и либо вварены в трубопровод, либо имеют прикрепленные фланцы, в приложении Е приведена простая процедура, основанная на прямом расчете с использованием физических характеристик счетчика. В приложении Е приведен пример такого прямого расчета.

В случае если форма корпуса счетчика отличается от простой цилиндрической формы, фланцы составляют значительную часть от всей длины корпуса или монтажные каналы ультразвуковых преобразователей не являются цилиндрическими, то метод конечных элементов (FE) дает более точную оценку изменения размеров корпуса и монтажных каналов ультразвуковых преобразователей и, как следствие, погрешность измерения расхода, полученную по формуле (18), а не определенную прямыми расчетами по Е.2.2—Е.2.5. В приложении Е.3 представлено руководство по использованию метода FE для прогнозирования эффектов расширения под действием температуры и давления.

Независимо от сложности конструкции счетчика можно использовать метод FE для корпуса и монтажных каналов ультразвуковых преобразователей. Рекомендуется использовать формулы (Е.12) — (Е.15), включая любые поправки для формы корпуса согласно (Е.2.3) при необходимости, в качестве средства проверки полученных с помощью метода FE размеров для обеспечения дополнительной достоверности метода FE. Формулу (18) следует применять для оценки погрешности измерения расхода вдоль каждой траектории на основе изменений физических размеров при различных условиях.

Приложение А
(справочное)

Определение допустимых границ отклонений результатов калибровок

А.1 Общие сведения

Величина смещения между результатами калибровок в потоке может представлять особый интерес, когда требуется ретроспективная сверка результатов калибровки или необходимо установить допуски на воспроизводимость. В настоящем приложении представлен метод оценки достоверности измерений на основе результатов последовательных калибровок с использованием допустимых границ отклонений результатов калибровок, а также принцип определения этих границ или «порогового значения».

Допустимые границы отклонений результатов калибровок или «пороговое значение», □ (reg), должно быть получено по формуле

$$A(reg)=L(USM)^2+u(TF)^2 \qquad (A.1)$$

где u(USM) — основная составляющая неопределенности USM (влияние USM);

u(TF) — основная составляющая неопределенности испытательной установки (влияние испытательной установки).

В величину u(USM) должны быть включены составляющие неопределенности, которые указаны в п. 4.4.

Установка, применяемая для проведения повторной калибровки, должна обеспечивать u(TF), которое варьируется для различных испытательных центров.

Приложение В
(справочное)

Установление и коррекция погрешностей USM

В.1 Методы коррекции погрешности измерения расхода USM

Суммарная погрешность измерения расхода USM состоит из случайной погрешности и систематической погрешности.

Случайная погрешность может быть вызвана различными воздействиями на функционирование счетчика, как правило, не зависящими друг от друга. Обычно случайная погрешность соответствует определенному статистическому распределению (и часто выражается в виде неопределенности измерения). Величина случайной погрешности обычно может быть уменьшена путем получения нескольких выборок измерений и применения общепринятых принципов статистического анализа. Систематическая погрешность обычно приводит к тому, что повторяющиеся показания измерений USM имеют погрешность примерно одинаковой величины. В большинстве случаев калибровка в потоке USM может помочь исключить или, по крайней мере, свести к минимуму систематическую погрешность измерения счетчика по отношению к используемому эталону. Подробное описание неопределенностей и погрешностей при измерении расхода см. в ИСО 5168.

Вследствие допусков на механическую обработку, различий в процессах изготовления компонентов, различий в процессе сборки счетчика и других факторов каждый USM имеет свои уникальные рабочие характеристики. Таким образом, чтобы полностью свести к минимуму погрешность измерения расхода, конкретный USM должен быть калиброван в потоке, а данные калибровки должны использоваться для коррекции или компенсации погрешности измерения счетчика. Изготовителю доступно несколько методов коррекции погрешности в зависимости от области применения счетчика и потребностей пользователя.

Ниже приводится описание метода коррекции погрешности, в котором используется единственный поправочный коэффициент счетчика: коэффициент средневзвешенного по расходу значения погрешности (FWME). Если выходной сигнал USM исключительно линейный в рабочем диапазоне расхода счетчика, метод коррекции FWME эффективен для минимизации смещения счетчика. Также доступны другие методы коррекции с одним поправочным коэффициентом. Если выходной сигнал USM является нелинейным в рабочем диапазоне счетчика, то могут применяться более сложные методы коррекции погрешности. Например, алгоритм аппроксимации кривой погрешности с помощью уравнения второго или третьего порядка.

Перед расчетом FWME целесообразно определить сдвиг нуля по результатам калибровки в потоке и применить ее таким образом, чтобы кривая отклонения стала как можно более плоской. После определения и применения погрешности нуля можно определить FWME, как подробно описано в В.2 (приложение В).

В.2 Расчет средневзвешенного по расходу значения погрешности (FWME)

В.2.1 Общие сведения

FWME е(рф вычисляется по формуле

$$\bar{e}Ы = \text{^---------------- -------------—J.} \quad \frac{\text{max, op) } ^{e}i \text{]}}{\text{' ^}V\text{, max, op)}} \tag{В.1}$$

где q_v j — расход при испытаниях;

^Утах ор — заявленный максимальный эксплуатационный расход счетчика;

$e_{;}$ — погрешность, выраженная в процентах, указанная при расходе, q_v ■.

- диапазоны q^ $j.$ q^ $_{m}$j$_{n}$ ^ q^ j ^ q^ $_{max\ O}$р, когда q^ $_{max\ ca}$| ^ q^ $_{max\ O}$р,
- диапазоны q^ $j.$ q^ $_{m}$j$_{n}$ s q^j ^ q^ $_{max\ ca}$|, когда q^ $_{max\ ca}$| < q^ $_{max\ O}$р.

В.2.2 Пример расчета средневзвешенного по расходу значения погрешности

Расчет FWME по данным испытаний на фактическом расходе является всемирно принятым методом калибровки, когда к выходному сигналу счетчика можно применить только один поправочный коэффициент. Применение этого коэффициента к выходному сигналу USM аналогично использованию передаточного отношения в турбинном или роторном счетчике газа. Как отмечено в В.1, использование коэффициента FWME является лишь одним из нескольких возможных методов настройки USM для сведения к минимуму неопределенности измерения расхода счетчиком.

В следующем примере показано, как рассчитать FWME.

USM DN200 был калиброван в потоке (см. набор данных в таблице В.1) при рабочих условиях, подобных тем, в которых счетчик будет эксплуатироваться в полевых условиях. В начале определяется поправочный коэффициент (коэффициент коррекции погрешности измерения расхода), а затем он применяется к результатам испытаний таким образом, чтобы полученное в результате FWME было равно нулю.

Таблица В.1 — Таблица данных калибровки в потоке для USM DN200

Стандартный расход при испытаниях	Номинальный расход при испытаниях	Фактический расход по показаниям эталонного счетчика $q_{v\ ref}$	Фактический расход по показаниям испытуемого счетчика q_v ,	Погрешность USM е,-, %
^*V,* min	950	930	938,8629	+0,9530
0,10 Qy $_{max}$	1900	1950	1957,3320	+0,3760
0,25 $q_{v\ max}$	4750	4780	4764,7996	-0,3180
0,40 $q_{v\ max}$	7600	7650	7625,9025	-0,3150
0,70 $q_{v\ max}$	13 300	13 250	13 200,7100	-0,3720
^*V,* max	19 000	18 950	18 880,6430	-0,3660

FWME для данных, представленных в таблице В.1, вычисляется по формуле

x[кА,max)ᵉi]

^*S^VJ !* ^V.max) (В.2)

где q_v *jlqy*$_{max}$ — весовой коэффициент *f-,*

в) — указанная погрешность измерения расхода, выраженная в процентах, при расходе, q_v *j.*

Применение формулы (В.1) к данным испытаний, приведенным в таблице В.1 (Qy$_{max}$ = 19000), позволяет получить результаты, показанные в таблице В.2.

Таблица В.2 — Результаты вычисления средневзвешенного по расходу значения погрешности для USM DN200

Отображаемый расход 9/	Весовой коэффициент ^*i* ~ ^*V, i*^*V,* max	Погрешность измерения расхода e_z	Взвешенная погрешность расхода f, *е.*
938,8629	0,049414	0,9530	0,047091
1957,3320	0,103017	0,3760	0,038735
4764,7996	0,250779	-0,3180	-0,079748
7625,9025	0,401363	-0,3150	-0,126429
13 200,7100	0,694774	-0,3720	-0,258456
18 880,6430	0,993718	-0,3660	-0,363701
	£/; =2,493066		*Y^i* =-0,742508

В результате получим:

У fe
=^~ = 0,742508 / 2,493066 = 0,29782928.

Поправочный коэффициент *F,* применяемый к выходному сигналу USM, может быть рассчитан по формуле

$$\frac{100}{100 + e(q_v)}' \qquad (В.3)$$

При FWME, равном -0,29782928, полученный в результате поправочный коэффициент *F* равен 1,002987. Если этот поправочный коэффициент, равный 1,002987, применить в качестве множителя к выходному сигналу USM, вычисленное значение FWME будет равно нулю. Это показано в таблице В.3, в которой каждое значение $e_;$ было скорректировано для получения значения с поправкой на калибровочный коэффициент e_{icf}*c* использованием формулы:

в/,$_с$г= (е,+ЮОУ³-¹⁰°. (В.4)

Таблица В.3 — Результат данных калибровки в потоке с корректировкой на FWME для USM DN200

Указанная погрешность измерения расхода e_i	Погрешность расхода, скорректированная с учетом калибровочного коэффициента ®/, cf	Погрешность расхода, скорректированная с учетом взвешенного калибровочного коэффициента б ®/, cf
0,9530	1,254566	0,061993
0,3760	0,675842	0,069624
-0,3180	-0,02023	-0,005074
-0,3150	-0,01722	-0,006912
-0,3720	-0,07439	-0,051686
-0,3660	-0,06837	-0,067945
		У f(e; c/ 0,0000

В результате получим:

$$^{e}Ы = 1^{\wedge} \frac{0,0000}{2,493066} = 0,000.$$

На рисунке В.1 приведены данные калибровки в потоке с корректировкой на FWME и данные испытаний, представленные в таблице В.1. Треугольные точки на графике представляют погрешность счетчика после применения поправочного коэффициента FWME, равного 1,002987, к исходным данным калибровки в потоке.

На рисунке В.1 показано, что для расхода газа выше примерно 25 % от пропускной способности счетчика погрешность измерения была практически исключена путем применения одиночного поправочного коэффициента FWME ко всему набору данных испытания. Однако для расходов ниже приблизительно 25 % производительности счетчика коррекция по FWME не устраняет полностью погрешность измерения, поскольку USM имеет нелинейную характеристику в этой части своего рабочего диапазона. Следовательно, пользователю необходимо либо принять более высокую погрешность измерения в нижней части рабочего диапазона счетчика, либо применить более сложную схему коррекции для уменьшения или исключения погрешности измерения в нижней части рабочего диапазона счетчика.

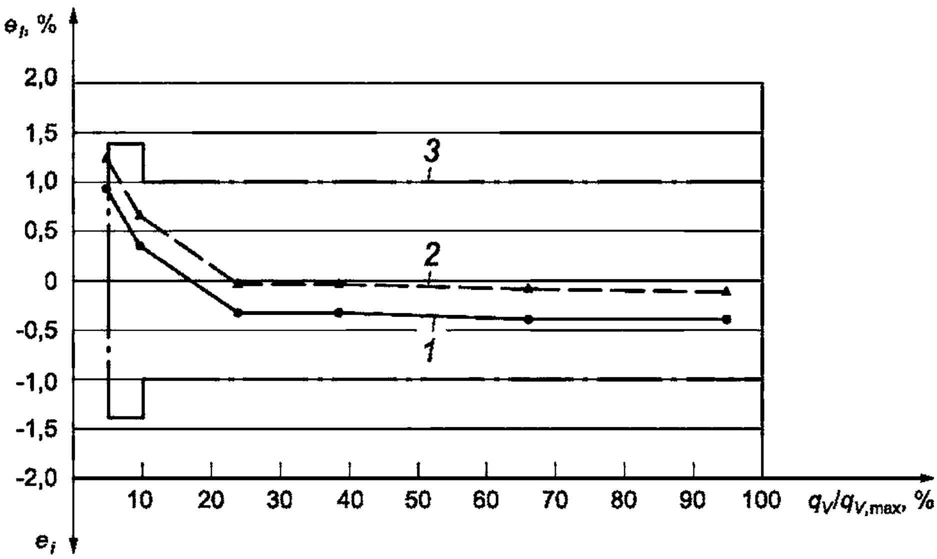


Рисунок В.1 — График результатов калибровки без корректировки (линия *1)* и скорректированных на FWME (линия 2) для USM DN200 (линия *3* — предел допускаемой погрешности)

Приложение С
(справочное)

Характеристика запорного оборудования и шум на газоизмерительной и регулирующей станции

С.1 Введение

Чтобы заранее оценить, удовлетворительно ли работает USM, в данном приложении в качестве руководства приводится следующее.

Клапаны регулирования давления производят шум в слышимом, а также в ультразвуковом диапазоне частот. Уровень шума зависит от перепада давления и значения расхода. Когда регулирующий клапан (клапан регулирования давления) установлен вблизи USM, уровни создаваемого акустического шума могут препятствовать акустическому сигналу, вследствие чего неизбежна потеря точности измерений расхода. Эмиссия и спектральное распределение шума зависят от типа клапана и его внутреннего механизма. Излучение акустического шума на определенной частоте характеризуется весовым коэффициентом клапана N_v. Наряду с характеристикой клапана следует учитывать состав трубопроводной системы, включающей USM, колена, тройники и глушители (если имеются).

Чтобы быть уверенным, что счетчик будет работать хорошо в рабочем диапазоне, на ранней стадии проектирования газоизмерительной и регулирующей станции рекомендуется получить консультацию от изготовителей клапана и USM.

С.2 Метод расчета

С.2.1 Общие сведения

Для оценки функциональности USM в конкретной области применения необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- генерация шума регулирующим клапаном на газоизмерительной и регулирующей станции в зависимости от перепада давления на клапане Ар и объемного расхода, приведенного к стандартным условиям, через клапан q_n,
- затухание шума при распространении от клапана до USM (коэффициент затухания, N_d\,
- уровень сигнала, P_s, в USM;
- S/N в USM и минимальное необходимое S/N в USM для прогнозирования рабочих характеристик счетчика.

С.2.2 Генерация шума регулирующим клапаном

Создаваемое акустическое давление клапана p_n, Па, пропорционально перепаду давления Ар, Па, на клапане, и квадратному корню объемного расхода, приведенного к стандартным условиям q_n, м^3/ч, то есть

P_n~^P^- (С.1)

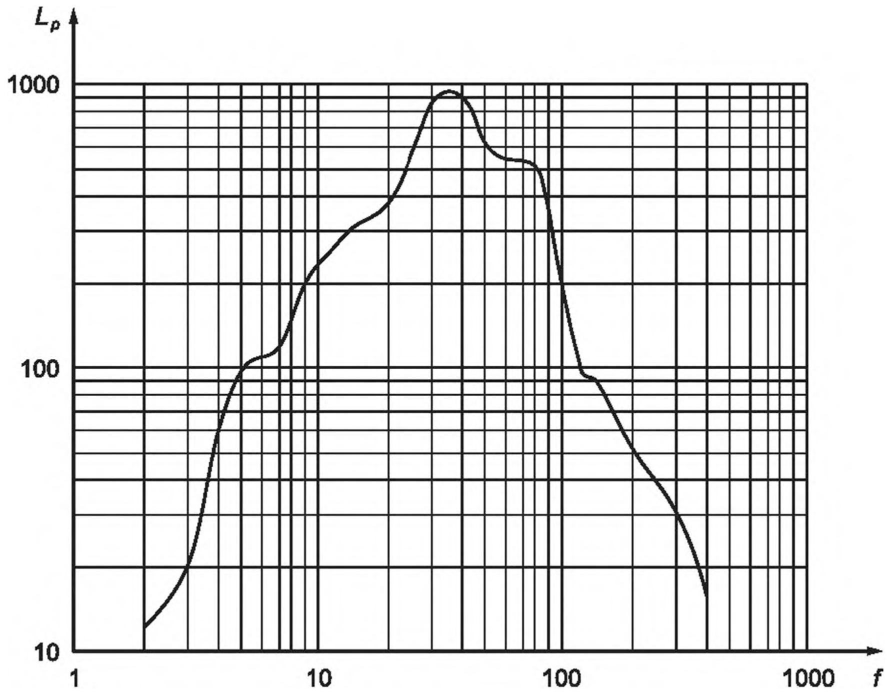
С учетом весового коэффициента клапана N_v, который является функцией акустического давления, и значения *Ар^/q^*

Рп ~ ^V ' ^Р'^п- (С.2)

Весовой коэффициент клапана описывает, насколько шумным является клапан на определенной частоте и в определенном направлении (вверх или вниз по потоку). Чем выше значение N_v, тем шумнее клапан.

Примечание — Единица измерения весового коэффициента клапана N_v — [м$^{-1}$-^{5}]$^{0{,}5}$.

Анализируя частотный спектр шума, создаваемого клапанами, можно сделать вывод, что большинство клапанов имеет широкий диапазон полосы частот с максимумом приблизительно между 30 кГц и 90 кГц (см. рисунок С.1).



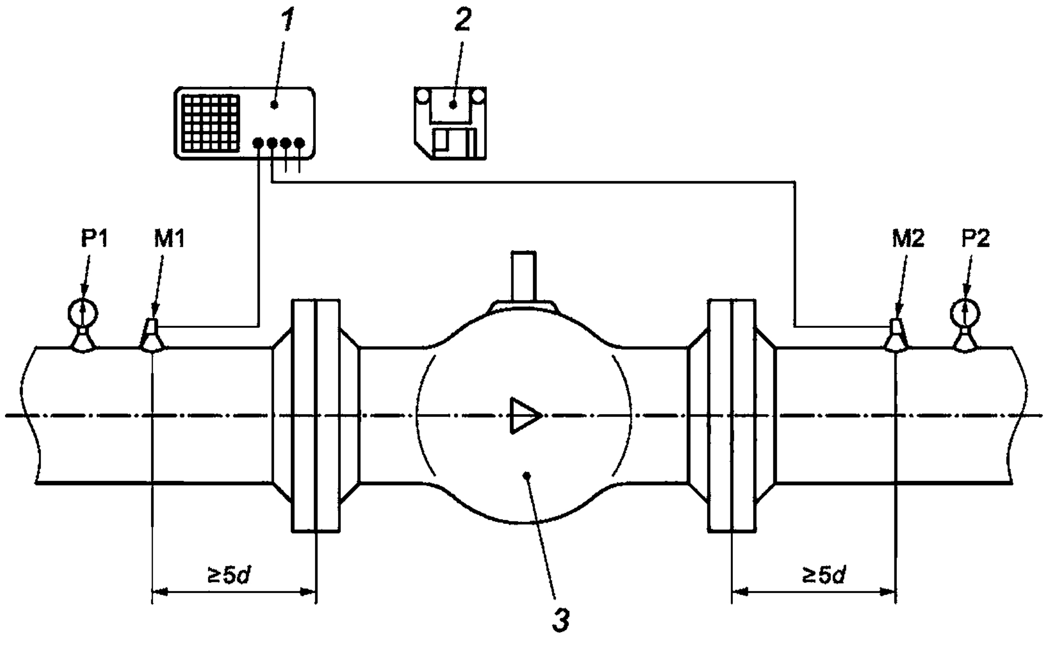
f— частота в кГц; L_p — амплитуда шума, дБ

Рисунок С.1 —Характерный спектр акустического шума, генерируемого клапаном

С.2.3 Экспериментальный метод определения весового коэффициента клапана N_v

Для определения весового коэффициента клапана $A/_v$ с учетом его обвязки во всем диапазоне рабочих условий необходимо измерить перепад давления, расход и акустическое давление.

На рисунке С.2 изображена установка для определения весового коэффициента клапана.



1 — осциллограф; *2* — запоминающее устройство для записи бинарных данных; *3* — регулирующий клапан; М1, М2 — микрофоны; Р1, Р2 — датчики давления; *d*— внутренний диаметр трубопровода

Рисунок С.2 — Схема установки

Следует обратить внимание на следующее:

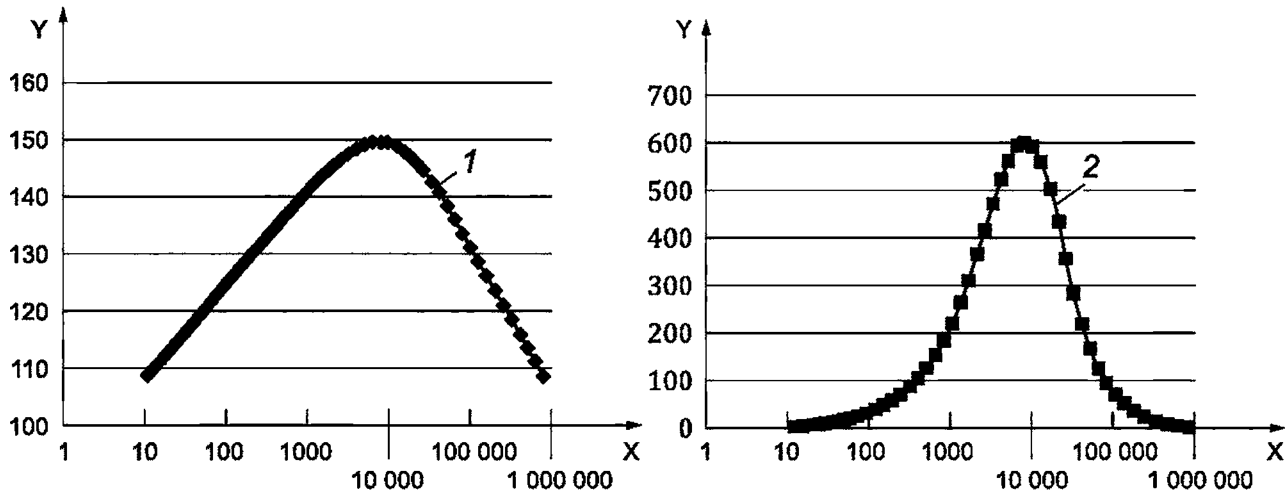
- расстояние между микрофоном и регулирующим клапаном может быть 5с/ и более;
- в трубопроводе между микрофоном и регулирующим клапаном отсутствуют препятствия;
- между микрофоном и регулирующим клапаном отсутствуют U-образные колена, тройники и т.п.;
- установка микрофона выполнена вровень с внутренней стенкой трубопровода;
- перед началом испытания необходимо измерить фоновый шум, при этом значения Др и расхода должны быть равны нулю, а трубопровод должен находиться под рабочим давлением;
- шум рассчитывается для ширины полосы в одну треть октавы (терц);
- каждое измерение шума при определенных рабочих условиях может состоять из трех — пяти измерений;
- измерения можно проводить в установившихся условиях процесса;
- по окончании испытания можно повторно измерить уровни фонового шума;
- в большинстве случаев значение N_v различно для сторон выше или ниже по потоку.

С.2.4 Теоретическое определение весового коэффициента клапана N_v

Если экспериментальное определение весового коэффициента клапана не выполнено, то определение весового коэффициента клапана может быть выполнено методом, приведенным в стандарте IEC 60534-8-3. Данный стандарт описывает метод прогнозирования аэродинамического шума регулирующего клапана. Он используется для расчета слышимого шума, создаваемого регулирующим клапаном снаружи трубопровода на расстоянии 1 м от трубопровода, и спектра шума внутри трубопровода. Метод позволяет рассчитать спектр только до 20 кГц (слышимый диапазон). Для расчета спектра в области ультразвукового шума стандарт IEC 60534-8-3 допускает метод экстраполяции. Для определенного сочетания расхода q_n и перепада давления на клапане Др спектр издаваемого шума регулирующего клапана определяется на основании данных об общем уровне внутреннего звукового давления на стенке трубопровода L_{pi} и генерируемой пиковой частоте f_p.

Спектр вычисляется с помощью следующей формулы:

$$L_{p,}(f) = L_{p,} - 8 - 10.\log - \left[1+\left(\frac{f_p}{2f}\right)^{1,7}\right] \qquad (С.3)$$



X — частота, Гц; Y — акустический уровень; *1* — L_{pi} *(f)*, дБ; *2* — *Pj (f)*, Па

Рисунок С.3 — Характерные графики пиковой частоты, акустический уровень как функция частоты

Для каждого сочетания Др и q_n можно рассчитать уровень шума для конкретной частоты и, используя формулу (С.3), можно рассчитать весовой коэффициент клапана N_v.

Предпочтительным методом определения весового коэффициента клапана N_v является метод его экспериментального определения, а использование IEC 60534-8-3 следует рассматривать как резервный метод.

С.2.5 Оценка распространения шума от клапана к USM с использованием коэффициента затухания N_d

USM работает в высокочастотном диапазоне, в котором, к сожалению, легко распространяется шум. Необходимо создавать препятствия для распространения акустического шума (исключая прямую видимость) или позволить акустическому шуму взаимодействовать со стенкой трубопровода, тем самым ослабляя акустическую энергию, чтобы уменьшить интенсивность этих высоких частот ультразвукового шума. Поэтому для ослабления ультразвукового шума можно использовать элементы трубопровода, такие как колена и тройники, или специально разработанные глушители.

Снижение ультразвукового шума, распространяющегося от клапана к USM, оценивают с помощью коэффициента затухания N_d.

Все элементы трубопровода, присутствующие в установке, ослабляют акустический шум, при этом ослабление акустического шума зависит от частоты.

Основываясь на теории линейных систем, элементы трубопровода могут быть представлены числом, указывающим на уровень затухания ультразвука в соответствующей полосе частот.

В качестве примера в таблице С.1 показаны коэффициенты затухания различных элементов трубопровода на частоте 200 кГц.

Таблица С.1 — Затухание в элементах трубопровода на частоте 200 кГц

Элемент трубопровода	Коэффициент N_d	Затухание дБ
Колено 90°	0,56	5
Колено 45°	0,79	2
Тройник	0,32	10
Два колена в различных плоскостях	0,20	14
Трубопровод 100 м	0,56	5
Примечание — Значения отличаются для других частот.		

Из данных, приведенных в таблице С.1, видно, что колена и тройники значительно ослабляют уровень ультразвукового шума, а прямолинейные участки трубопровода оказывают слабое влияние на затухание шума. Если уровень шума превышает допустимые пределы, то могут быть установлены дополнительные колена или тройники, выполняющие роль глушителя, или глушители, специально предназначенные для этой цели. Такой глушитель должен быть спроектирован для конкретного применения (например, в зависимости от частоты).

С.2.6 Уровень сигнала в USM P_s

Для уровня сигнала в USM соблюдаются следующие правила:

- P_s<* *p:* чем выше давление в USM, тем сильнее сигнал;
- P_s ос 1// • чем больше длина траектории, тем слабее сигнал;
- P_s *ж jt :* чем больше продолжительность времени интегрирования или количество выборок, тем мощнее сигнал (или: более точное усреднение данных улучшает соотношение S/N на *4п).*

Поэтому:

Ps~^- *p* (С.4)

Вышеуказанные параметры не зависят от счетчика. Чтобы точно определить уровень сигнала в USM, необходимо также использовать параметры, зависящие от счетчика, например, эффективность ультразвукового преобразователя, напряжение возбуждения.

Можно определить специальный параметр счетчика a_{mf}, который включает все дополнительные параметры и преобразует формулу (С.4) в

Ps = amf ~, • (С-5)

Примечание — Единицей величины a_{mf} является метр [м].

С.2.7 Соотношение сигнал/шум в USM

Сочетание коэффициента затухания N_d с уровнем шума, генерируемого регулирующим клапаном [формула (С.2)], имеет результатом уровни акустического шумового давления в USM

Pп, USM ~ ^d^v^P^Pn • (С.6)

Применяя формулы (С.5) и (С.6), можно получить формулу (С.7), которая описывает отношение S/N, PJp_n, в USM

S/N = ^s / *Pп, USM* = *^mfP^* / *lpNdN\AP4Pn* (С.7)

Определив отношение S/N в USM, последним оставшимся параметром, подлежащим определению, является требуемое минимальное отношение S/N, при котором счетчик все еще работает. Минимальное значение отношения S/N устанавливает изготовитель:

$$S/N > S/N_{mf} \Rightarrow \text{USM работает;} \quad (C.8)$$

$$S/N < S/N_{mf} \Rightarrow \text{USM перестает работать.} \quad (C.9)$$

Пример расчета: используется международная система единиц[1])

Частота [Гц]	Уровень шума	
	[Па]	ДБ
2000	100	40
2520	200	46
3175	300	50
4000	250	48
5040	380	52
6350	380	52
8000	500	54
10 079	880	59
12 699	880	59
16 000	1100	61
20 159	1700	65
25 398	2000	66
32 000	2100	66
40 317	2300	67
50 797	3000	70
64 000	3800	72
80 635	2800	69
101 594	1600	64
128 000	1500	64
161 270	1000	60
203 187	680	57
256 000	400	52
322 540	230	47
406 375	170	45

Исходные данные: ДР = 2,5 МПа; P = 6,0 МПа; q = 20 000 м^3/ч ; 1_p = 0,5 м; t = 1.

Рабочая частота ультразвукового преобразователя: 200 кГц.

Уровень шума, измеренный на частоте 200 кГц, составляет приблизительно 680 Па, поэтому: p_n = 680 Па.

Вместо линейного расчета уровней шума уровни шума также могут быть рассчитаны в децибелах, в этом случае: $P_{n\,\mathrm{dB}}$ = 20 lg(680) = 57 дБ.

Объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям, q_n, можно просто оценить, умножив давление P на расход в трубопроводе q. Для официального расчета q_n, кроме того, необходимо учитывать влияние температуры 7 и сжимаемости Z газа. Однако методическая неопределенность применяемой модели расчета намного больше, чем коррекция на температуру и сжимаемость. Таким образом, можно использовать упрощенную формулу q_n = ^/р^ q , где P_o = 0,1 МПа. В результате получим q_n = 1 200 000 м^3/ч.

[1]) *Пример расчета 2 в имперской системе единиц из настоящего стандарта исключен.*

Весовой коэффициент клапана можно рассчитать по формуле

$N_v = \_\_\_ \_\_\_\_$

ДР = 25 бар = 2 500 000 Па,

N ----------------^ = 2,5-10-^{7} м-$^{1'5*0'5}$.
2500000^1200000

Если между клапаном регулирования давления и USM имеются два колена в плоскости, то согласно таблице С.1 они создадут затухание:

N_d = 2 • 5 дБ = 10 дБ (коэффициент 3,2).

Тогда акустический шум в USM будет:

Pn,USM, dB = *Pn,* dB “ W_d = 57 дБ - 10 дБ = 47 дБ

или

Рпизм = —= —= 215 Па.
$n{'}USM$ N_d 3,2

Для определения уровня сигнала в USM требуется специальный параметр изготовителя a_{mf}.

a_{mf}=2,2 • Ю^м,

р = 60 бар = 6 000 000 Па,

l_p = 0,5 м,

t= 1,

^{P}s = ^*mf* ’ “7 >
'p

R_s =2,2-10 ^{4}-------------------- — = 2640 Па,
6 000 ОООл/i_m
0,5

^{p}s, dB = ^{20} ’ lg(2640) = 68 дБ.

Отношение S/N будет:

S/N = 2640 / *Pn.usM* 215 = 12,3,

S^dB “ ^{P}s, dB “ *Pn,* USM, dB - 68 дБ - 47 дБ - 21 дБ.

Предполагается, что для USM SIN_{mf} = 20 дБ (коэффициент 10), это означает, что дополнительное затухание не требуется.

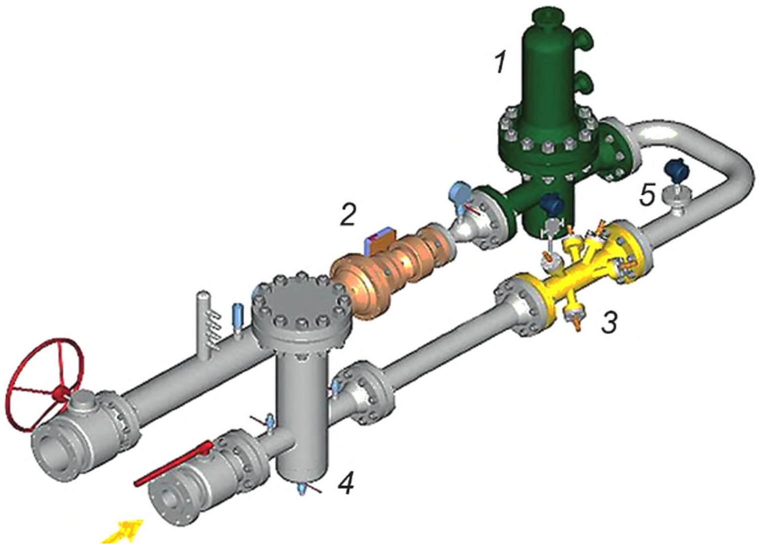
С.3 Конструкция газоизмерительной и регулирующей станции

Из С.2.2—С.2.5 следует, что успешная работа газоизмерительной и регулирующей станции, включающей USM, зависит от:

- шумовых характеристик источника шума, то есть клапана, в связи с этим изготовитель клапана обязан представить коэффициенты N_v, как для входной выше по потоку, так и для выходной ниже по потоку стороны;
- необходимого рабочего диапазона процесса, определяемого Р/[АР^Р71, выбранного и определенного пользователем;
- конфигурации трубопровода, которая может быть изменена для включения в конструкцию глушителей;
- уровня помехоустойчивости USM, в связи с этим изготовитель должен указать минимальное допускаемое значение S/N.

Чтобы найти оптимальное решение, эти проблемы необходимо решить на ранней стадии проектирования газоизмерительной и регулирующей станции. В отличие от конструкции газоизмерительной и регулирующей станции с применением турбинных счетчиков, в которых счетчик обычно устанавливают после регулирующего клапана, для станции с применением USM счетчик может быть размещен перед регулирующим клапаном и теплообменником (см. рисунок С.4). Очевидными преимуществами такой установки являются:

- USM размещается в области повышенного давления, что улучшает уровень ультразвукового сигнала;
- теплообменник размещается между счетчиком и клапаном, генерирующим шум, при этом выступая в роли глушителя (во многих случаях теплообменник снижает уровень шума более чем на 20 дБ).



1 — теплообменник; *2* — регулирующий клапан; *3* — USM; *4* — фильтр; *5* — гильза термометра

Рисунок С.4 — Газораспределительная станция, оптимизированная для ультразвуковых измерений

В большинстве случаев значение N_v на 3—6 дБ ниже для стороны выше по потоку, чем для стороны ниже по потоку, что должно быть подтверждено изготовителем клапана.

Приложение D
(справочное)

Время калибровки ультразвуковых счетчиков

D.1 Введение

На большинстве калибровочных установок ультразвуковые счетчики сличаются с турбинными счетчиками, которые выступают в качестве эталона. Поскольку турбинные счетчики ведут себя по-разному в условиях турбулентности и возмущенного потока, необходимо соблюдать предельную осторожность, чтобы обеспечить корректную калибровку. В процессе калибровки требуется избегать пульсаций и обеспечивать стабильные значения давления и температуры. Требования к этим условиям представлены в п. 6.3.

В п. 6.3.2 предыдущей версии стандарта минимальное время калибровки определено следующим образом: продолжительность одного измерения должна быть не менее 300 с (правило «300 секунд») или 400 ■ *г /v* (где *г* — внутренний радиус трубопровода счетчика, а 7— средняя скорость потока), в зависимости от того, что больше.

В этом приложении приведено обоснование этого требования, и оно распространено в качестве нового требования на счетчики классов точности 0,5 и 1 по OIML [36], а также предложен усовершенствованный метод определения минимального времени калибровки.

D.2 Сравнение турбинных счетчиков с ультразвуковыми счетчиками

Турбинные счетчики много лет использовались в калибровочных лабораториях задолго до появления технологии ультразвуковых счетчиков. Имея стабильный спрос, турбинные счетчики все еще продолжают преобладать в калибровочных лабораториях, но сейчас ситуация немного меняется. В новых и самых передовых лабораториях уже применяются обе измерительные технологии, что позволяет максимально эффективно использовать каждую из них.

Одна из основных причин, по которой турбинные счетчики до сих пор используются в качестве эталонных счетчиков, заключается в том, что они относительно нечувствительны к турбулентным колебаниям в потоке. В турбинных счетчиках турбулентные колебания усредняются по длине рабочего колеса, а сами вихри уменьшаются благодаря ускорению потока в турбинном счетчике. В результате турбинные счетчики имеют меньшую полосу пропускания и не могут измерять быстрые колебания расхода. Также турбинные счетчики не в состоянии справиться с пульсирующими потоками, поскольку в таких ситуациях возникают большие погрешности измерений. По этой причине при калибровке не допускаются пульсации потока.

Ультразвуковые счетчики, в отличие от турбинных счетчиков, имеют гораздо большую полосу пропускания и способны улавливать гораздо более высокие частоты. В результате ультразвуковые счетчики измеряют фактические колебания потока и могут превосходно справляться с точным измерением пульсирующих потоков.

Поскольку при калибровке сравниваются результаты обоих счетчиков, то необходимо обеспечить, чтобы влияние турбулентных пульсаций было снижено до такого уровня, который не влияет на качество калибровки. В зависимости от класса точности счетчика по OIML [36] конечное значение дополнительной неопределенности, обусловленной турбулентными пульсациями, не должно превышать 1/3 допустимой расширенной неопределенности для соответствующего класса счетчика.

D.3 Минимальное время калибровки

В калибровочной лаборатории оператор должен убедиться, что условия потока и турбулентность идентичны условиям в бесконечно длинном и прямолинейном участке трубопровода. Предполагается, что частота дискретизации измерений счетчика достаточно высока, чтобы рассматривать их как непрерывное измерение.

В длинном прямолинейном участке трубопровода колебания потока происходят вследствие естественной турбулентности, которая создается трением о стенку трубопровода. На стенке трубопровода касательное напряжение создает градиент в профиле скорости потока, что является основной причиной возникновения турбулентности.

Интенсивность турбулентности зависит как от градиента профиля скорости потока, так и от расстояния до стенки трубопровода (свободное пространство, в котором может образоваться вихрь). Для труб со стандартной шероховатостью стенки это приводит к ситуации, когда:

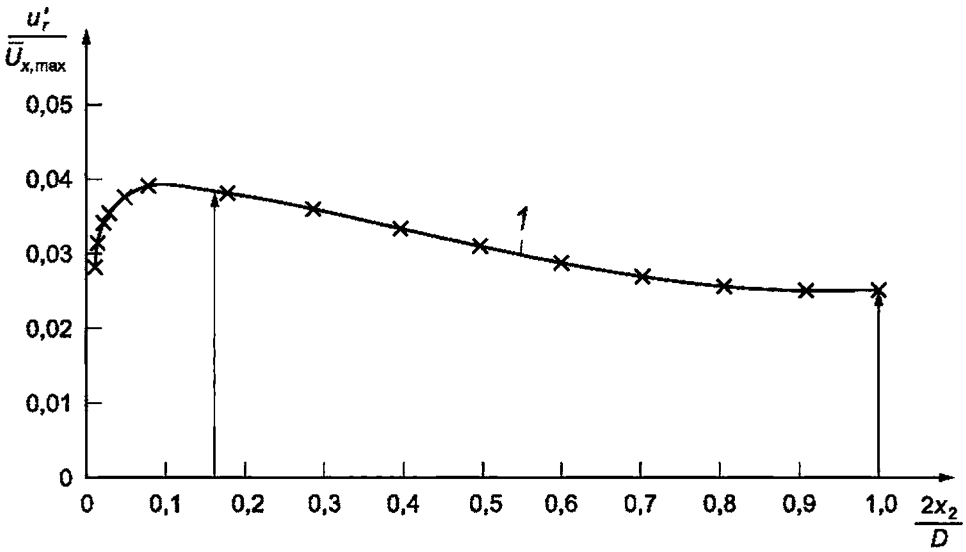
- преобладающие вихри имеют характерный размер примерно 0,20 — 0,30 для течений в трубопроводе с Re > 8000;
- степень интенсивности турбулентности равняется примерно 4 % у стенки трубопровода и около 3 % в середине трубопровода; 3,5 % в среднем (см. также: Hinze «Turbulence» [84]).

Интенсивность турбулентности в трубопроводе приведена на следующем рисунке, взятом из главы 7.13 [84].

Существует два способа определения степени интенсивности турбулентности u^*.

a) Когда измерительный участок возможно рассматривать как прямую трубу, можно использовать график, приведенный в [84], для оценки уровня турбулентности в положении ультразвуковых траекторий.

Ь) Путем регистрации односекундных значений скорости по траектории и вычисления ее среднеквадратического отклонения.



u'г— радиальная компонента турбулентной пульсации; $U_{x\ max}$ — максимальная скорость на оси потока в трубе; x_2 — расстояние от стенки трубы в радиальном направлении; *D* — внутренний диаметр трубы

Рисунок D.1 — Относительная интенсивность турбулентности в трубе (Re > 8000) [84]

Измерение уровня турбулентности предпочтительнее в ситуациях, когда ожидается гораздо более высокий уровень турбулентности, чем обычно, например, в случаях, когда формирователь потока расположен близко к ультразвуковому счетчику.

Турбулентность — это стохастический процесс, и его влияние можно уменьшить путем усреднения. Поскольку это естественный процесс, предполагается классическое гауссовское распределение вероятностей, и тогда влияние турбулентности будет уменьшено с коэффициентом, равным квадратному корню из числа пульсаций.

Чтобы уменьшить уровень мгновенных пульсаций, например, с 4 % до 0,1 %, измерение должно быть усреднено по общему количеству вихрей $(4 / 0,1)^2 = 1600$ (при доверительной вероятности, соответствующей 1о, где л — стандартное отклонение).

Учитывая характерный размер вихря 0,25 • *D,* для одной точки трубопровода усреднение должно быть выполнено по длине 1600 • 0,25 0 = 400 • О; то есть по времени в течение 400 ■ *D* /v\ где?— средняя скорость потока.

Более общее уравнение для измерения в одной точке трубопровода имеет следующий вид:

$$t_{min} = (ulu_d)^2 \blacksquare 0,25 \bullet D/7. \qquad (D.1)$$

где *u* — уровень турбулентности (определяемый как среднеквадратичное отклонение мгновенных турбулентных пульсаций скорости);

u_d — требуемый уровень турбулентности (требуемое среднеквадратическое отклонение турбулентных пульсаций скорости после их усреднения);

tain — требуемое минимальное время усреднения.

Поскольку ультразвуковые счетчики также усредняют скорость по длине акустического канала, общая длина усреднения может быть уменьшена на внутреннюю общую длину канала L_M, по которой турбулентность уже усреднена.

Этот коэффициент показан в таблице D.1, в которой представлена характерная длина усреднения различных счетчиков (для разных конструкций счетчиков значения длины усреднения могут незначительно отличаться от приведенных в таблице).

Таблица D.1 — Внутренние длины усреднения L_{AV} различных конструкций счетчиков

Число акустических каналов	Характерная длина усреднения
3	3,5 0
4	4,5 0
5	5,5 О

В этом расчете используется только длина одной прямой траектории. Счетчики с перекрещивающимися и отраженными траекториями теоретически должны иметь более высокое значение L_M, но поскольку распределение турбулентных пульсаций скорости идентично для обеих траекторий, образующих пересечение, информация от обеих траекторий вместе не может больше рассматриваться как полностью независимая со случайным рассеянием. Традиционно для этих конструкций используется то же значение, что и для вариантов с прямыми траекториями.

При этом минимальное время усреднения f_{mjn} при доверительной вероятности, соответствующей интервалу 1G, уменьшается до значения, рассчитанного по формуле

U = (ᵘЮ² ' °-25 ' D/^ ᴸAV)- (D-2)

Формула (D.2) не является точной, так как она получена на основе методов статистического анализа.

При работе со статистическими данными следует учитывать уровень доверительной вероятности. Для случайного гауссовского распределения уровень доверительной вероятности при 1 о составляет около 68 % (см. также рисунок D.2). В случае если требуется меньшая неопределенность, минимальное время усреднения должно быть умножено на соответствующий коэффициент охвата. Коэффициенты охвата для различных уровней доверительной вероятности показаны в таблице D.2.

Таблица D.2 — Гауссовские коэффициенты охвата

Параметр	Коэффициенты охвата для распределения Гаусса					
Уровень доверительной вероятности, %	68,27	90,00	95,00	95,45	99,00	99,73
Коэффициент охвата *к*	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

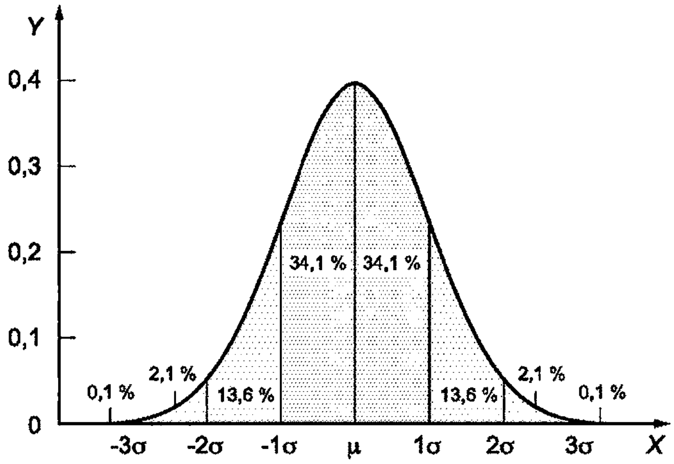


Рисунок D.2 — Распределение вероятностей Гаусса

В нефтегазовой отрасли в большинстве случаев используется доверительный интервал 95 %, что приводит к коэффициенту охвата $к = 2$. При этом минимальное время усреднения f_{mjn}, с учетом формулы (D.2), при уровне доверительной вероятности, соответствующем интервалу 2G, составляет

r_{min} = (u/u^ • 0,5 ■ D/(v- L_M\ (D.3)

где $u*$ — среднеквадратическое отклонение мгновенных турбулентных пульсаций скорости;

u_d — требуемое среднеквадратическое отклонение турбулентных пульсаций скорости после их усреднения;

7 — средняя скорость потока;

L_M — характерная длина усреднения в ультразвуковом счетчике.

D.4 Определение значения u_d

Величина дополнительной допускаемой неопределенности, обусловленной турбулентностью, зависит от требуемой точности. Для счетчиков класса 0,5 по OIML [36] максимально допустимое отклонение между погрешностями на одной точке расхода составляет 0,167 % (1/3 класса точности). Аналогично значение ^должно составлять менее 1/3 от допустимой расширенной неопределенности для соответствующего класса.

В результате значения u_d в зависимости от класса счетчика равны:

- 0,05 % для счетчиков класса 0,5 по OIML [36];
- 0,1 % для счетчиков класса 1 по OIML [36].

Результаты расчетов для счетчика DN300 показаны на рисунке D.3 при уровне турбулентности 3,5 % и L_M, равной 4,5.

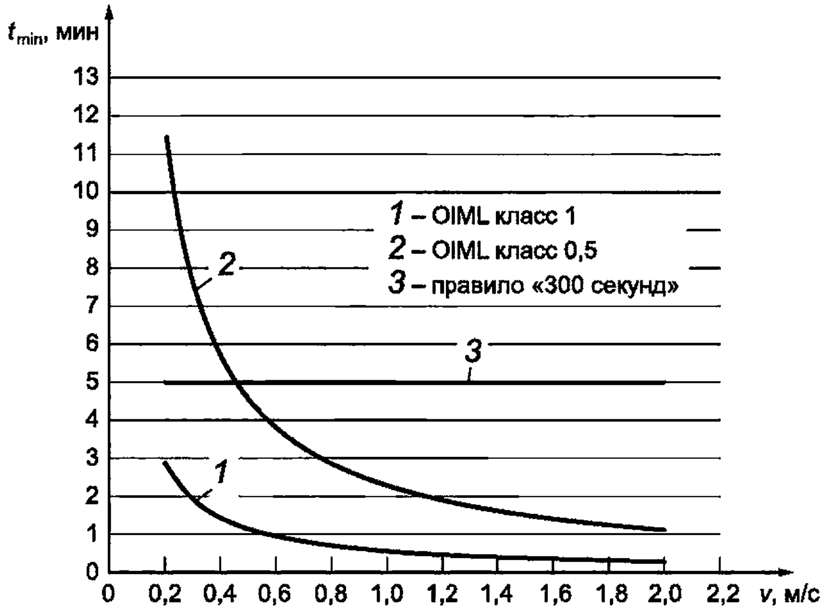


Рисунок D.3 — Минимальное время усреднения для счетчика DN300

Результаты расчетов для счетчика DN800 показаны на рисунке D.4 при использовании уровня турбулентности 3,5 % и t_{AV} равной 4,5.

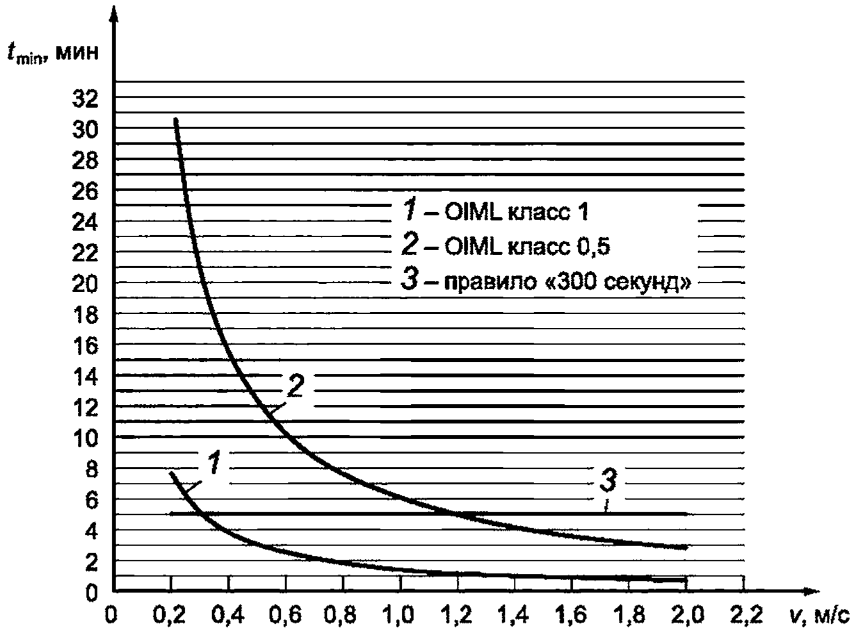


Рисунок D.4 — Минимальное время усреднения для счетчика DN800

Из этих рисунков видно, что «старое» правило «300 секунд» подходит для всех счетчиков класса 1 по OIML [36] до DN800 с v_{min} около 0,3 м/с.

Для нового поколения высокоточных счетчиков класса 0,5 по OIML [36] правило «300 секунд» больше не подходит, и следует применять более длительное время усреднения в самых нижних точках калибровки.

Приложение Е
(справочное)

Подробный расчет связанных с геометрией поправок по температуре и давлению

Е.1 Общие сведения

В этом приложении представлен метод оценки систематических погрешностей, обусловленных изменением геометрии счетчика, независимо от среды, конкретного типа, марки или модели счетчика, основанного на измерении времени прохождения сигналов.

Изменение геометрии вызывает два основных эффекта:

а) нескорректированное изменение фактической длины акустической траектории и угла наклона траектории между ультразвуковыми преобразователями вносит дополнительную погрешность измерения скорости по определенной траектории и погрешности измерения расхода;

Ь) любое изменение диаметра приводит к изменению площади сечения и, если его игнорировать, вносит дополнительную погрешность измерения расхода.

Для любой заданной траектории формула (11) может быть переписана в виде следующей формулы, в которой используются внутренний диаметр корпуса счетчика *d,* длина траектории 1_p и осевое расстояние между ультразвуковыми преобразователями х:

qy = nd² lp / 4 2x\ 1 / lAB 1 / lBA (Е-1)

Для простой конструкции счетчика, показанной на рисунке 4, х определяется из простой тригонометрической формулы как:

$$X = l_p \cos(p.$$

Таким образом, отношение между q_{VQ} при эталонных условиях калибровки и $q_{v\ 1}$ при других условиях может быть записано как поправочный коэффициент по расходу q_v ^$lq_{v\ 0}$, определяемый по формуле

$$\frac{q_{V,1}}{q_{V,0}} = \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 \left(\frac{l_{p1}}{l_{p0}}\right)^2 \left(\frac{x_0}{x_1}\right) \tag{Е.2}$$

где индекс «0» обозначает значение параметров в эталонных условиях, а индекс «1» — при других (отличных от эталонных) условиях.

Формула (Е.2) позволяет разделить влияние проходного сечения d^2 от влияния длины траектории $1p$ и от влияния осевого удлинения (или влияния угла наклона траектории) х.

В качестве альтернативы можно использовать уравнение, эквивалентное формуле (Е.2), но выраженное как относительная погрешность измерения расхода, ^q_v/q_v:

^dvAfi / qy,o _ dvA ~∂y$ / qy,o _ ЧУА / Уу$ _ ^ (Е.3)

В многолучевом счетчике влияние должно рассчитываться для каждой из отдельных траекторий, а влияние на суммарный расход должно быть получено в результате интегрирования расходов после применения весовых коэффициентов траекторий.

Результаты для одной диаметральной траектории используются для оценки величины требуемых геометрических коррекций.

Температура и давление имеют независимые влияния, которые необходимо оценивать отдельно, но оба влияния следует оценивать и учитывать. Соответствующие влияния могут работать как в одном направлении, так и в противоположных друг другу направлениях. Например, повышение давления, связанное с понижением температуры, частично компенсируют друг друга, в то время как повышение давления в сочетании с увеличением температуры (или снижение давления в сочетании с понижением температуры) усиливают необходимость коррекции.

Расчет коррекции, необходимой между динамической калибровкой и полевыми условиями, может осуществляться в виде трехэтапного процесса, поскольку физические размеры счетчика, скорее всего, были измерены при условиях статической калибровки, калибровка в потоке выполнена при условиях динамической калибровки, а счетчик использовался в полевых условиях.

На первом этапе следует рассчитать коррекцию по расходу от статической калибровки до динамической калибровки, используя:

ЧУА / Яу,о _ М Р¹ | ˣо | 1^3 7 vpo J (Е 4)

На втором этапе следует вычислить коррекцию по расходу от статической калибровки к полевым условиям, используя:

/ \2 / \2/ x
_ ^2 P2. (x0 |

^Л/.О 1^0 J V0 7 кx2 7

где индекс «2» обозначает значение парметров в полевых условиях.

На третьем этапе следует рассчитать разницу между динамической калибровкой и полевыми условиями, используя:

^,2 ^,2 QV.O I ^2 P2 xH
---------------------- ~ т и— — (Е.6)
Qy,1 Qy.O Qv,1 k ^1 7 VP1 J k x2 7

или в альтернативном виде:

^Оудл _ ^,2 ~^,1 _ Qy,2 1

Qy,i Qy,i Фуд

Этот трехэтапный подход применяют, если требуется проверка фактических физических размеров на промежуточных этапах расчетов, как, например, может быть в случае, если конкретные размеры необходимо сравнить с моделированием по методу конечных элементов (FE). Однако, как видно из формулы (Е.6), расчет может быть выполнен в один этап (от динамической калибровки до эксплуатации в полевых условиях), вместо более длительного трехэтапного процесса, поскольку фактическая коррекция по расходу между этими двумя условиями предполагает относительное изменение размеров, а не абсолютных значений.

В Е.6.4 и Е.6.5 представлены примеры прямого одноэтапного расчета и трехэтапного расчета.

Для корпусов счетчика, которые по форме обычно являются цилиндрическими и либо вварены, или имеют прикрепленные фланцы, может быть выполнен прямой расчет на основе физических характеристик счетчика. Метод прямого расчета описан в Е.2 и основан на шестиэтапном процессе.

Если корпус счетчика по форме не является простым цилиндром, фланцы занимают значительную часть полной длины корпуса или монтажные каналы ультразвуковых преобразователей не являются простыми трубами, то метод конечных элементов обеспечивает более точную оценку размеров корпуса и монтажных каналов ультразвуковых преобразователей и соответствующей погрешности измерения расхода, полученной с использованием формулы (Е.2), чем при прямых расчетах по формулам (Е.3) — (Е.6).

В Е.3 приводятся рекомендации по использованию метода конечных элементов для моделирования оценки изменений геометрии параметров счетчика, вызванных изменениями температуры и давления.

Е.2 Прямой расчет

Е.2.1 Шаг 1 — влияние температуры корпуса

Влияние разности температур, Д7, относительно легко учесть, поскольку изменяются размеры счетчика в соответствии с формулами:

$$
\begin{aligned}
&{}^{l}p\hat{}= {}'po\ (^1 + « ¤ ’0;\\
&x_1 = x_0(1 + аДТ);\\
&ф = c/_0(1 + аДТ). \qquad (Е.8)
\end{aligned}
$$

Подстановка формул (Е.8) в формулу (Е.2) дает:

$$\frac{\hat{}-}{Зуд} = (1 + аДТ)^3 = Г1 + ЗаДТ + 3(аДТ)^2 + (аДТ)^3 1. \qquad (Е.9)$$

Поскольку аДТ обычно мало, выражение можно упростить до:

$$— = 1 + ЗаДТ, \qquad (Е.10)$$

где *«Ь,Т»* указывают на температуру корпуса счетчика.

Для расчета погрешности от влияния температуры может быть применена формула:

$$k\ Civ\ Jbj = ЗаДТ. \qquad (Е.11)$$

Е.2.2 Шаг 2 — расширение, вызванное давлением внутри корпуса

Влияние изменения давления заключается в изменениях диаметра и длины корпуса счетчика, которые зависят от ряда факторов, включая:

а) отношение толщины стенок счетчика к внутреннему радиусу (т. е. отношение 5/г);

Ь) способ установки или крепежа счетчика в смежном трубопроводе;

c) жесткость смежных трубопроводов;

d) любые осевые нагрузки;

e) общую геометрию корпуса счетчика и наличие у него фланцев;

f) коэффициент гибкости счетчика (то есть отношение полной длины корпуса к диаметру корпуса).

Для корпусов счетчиков в общем случае, имеющих цилиндрическую форму, в основу анализа положены уравнения Роркa (см. [73]). Уравнения Роркa в течение многих лет использовались в качестве фундаментальной основы для анализа напряжений сосудов под давлением и являются производными от основных уравнений Ламе-Клапейрона 1833 года.

Для корпусов с толстыми стенками (то есть *ыг>* 0,1) при наличии только радиального внутреннего давления, но без торцевых нагрузок (это называется условием «свободные торцы»), и при значительном удалении от торцов, в статье [73] приводятся следующие формулы для определения изменений геометрических размеров:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta p}{E}\left(\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \mu\right);$$

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{-\Delta p\mu}{E}\left(\frac{2r^2}{R^2 - r^2}\right).$$

Для радиального внутреннего давления в сумме с торцевой нагрузкой от давления (это называется условием «заглушенные торцы») при значительном удалении от торцов в статье [73] приводятся следующие формулы:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta p}{E}\left(\frac{R^2(1+\mu) + r^2(1-2\mu)}{R^2 - r^2}\right.$$

$$\frac{\Delta x}{} = \frac{\Delta p}{E}\left(\frac{r^2(1-2\mu)}{R^2 - r^2}\right),$$

где ц — коэффициент Пуассона, равный 0,3 для стали;

R — внешний радиус в тех же единицах измерения, что и *г.*

Для тонкостенного корпуса (5/г< 0,1) при наличии только радиального внутреннего давления при значительном удалении от торцов в статье [73] приведены более простые уравнения:

- при условии «свободные торцы»

- при условии «заглушенные торцы»:

Аг _ Ар г

г ЕЬ (E.18)

Т = ^0’5-^ (E.19)

В целях настоящего стандарта для всех типов счетчиков предполагается, что торцы счетчика не закреплены и могут свободно перемещаться в осевом направлении.

Следует отметить, что для точек, удаленных от торцов, формулы (E.12) — (E.15) для толстостенных труб являются более точными, поскольку они также охватывают более простой случай тонкостенной трубы.

Следовательно, для всех типов корпусов счетчика теория толстостенной оболочки [формулы (E.12)—(E.15)] является предпочтительной, поскольку она является более общей, чем теория тонкой оболочки [формулы (E.16)—(E.19)]. По сути, выбор между применением теории тонкостенной или толстостенной оболочки основан на отношении 3/г На практике это фактически означает, что выбор уравнений связан с номинальным давлением корпуса, поскольку счетчики для систем высокого давления имеют более толстые стенки, чем счетчики для систем низкого давления. При проектировании корпуса счетчика, рассчитанного в соответствии с правилами ASME и с использованием одного из наиболее распространенных типов стали (сталь А333), ко всем счетчикам до ANSI 900 могут быть применены уравнения для тонкостенной трубы. Это также справедливо для большинства счетчиков ANSI 1500, изготовленных из высокопрочной стали.

Уравнения тонкостенной трубы в общем случае не применяются, если 8/г> 0,1, но в качестве альтернативы применению поправки на влияние формы, указанной в E.2.3, могут использоваться, как описано в E.3.2, в целях настоящего стандарта для толстостенных корпусов в сочетании с моделированием по методу конечных элементов (см. E.3.1), если ограничения понятны.

Е.2.3 Шаг 3 — поправка на влияние формы корпуса или близости фланцев

Если участки ультразвуковой траектории расположены ближе, чем на один наружный диаметр трубопровода, к фланцам или корпус имеет нестандартную форму, радиальное расширение вследствие местного упрочнения будет меньше, чем рассчитанное по формулам (Е.12) и (Е.14) [или формулам (Е.16) и (Е.18) для тонкостенного корпуса]. Чтобы учесть это местное упрочнение, используется коэффициент формы корпуса K_s.

K_s всегда меньше или равен 1. Значение K_s, используемое для данного типа корпуса, выбирается следующим образом:

а) для вварного корпуса без фланцев в пределах *2R* от расположения ультразвуковых преобразователей K_s = 1, т. е. корпус счетчика ведет себя как простая труба;

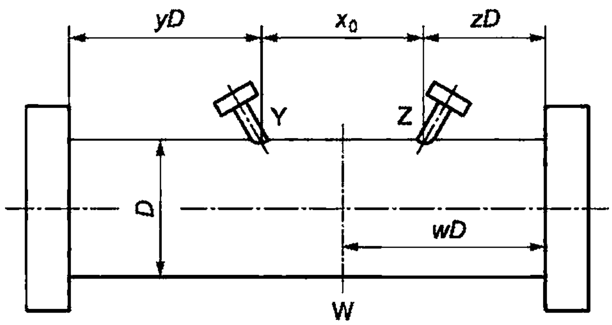
Ь) для фланцевого корпуса счетчика (например, состоящего из двух фланцев, приваренных к корпусу) или вваренной конструкции, в которой соседние фланцы находятся в пределах *2R* от расположения ультразвуковых преобразователей, значение K_s рассчитывается, как описано в следующем абзаце.

Для целей настоящего стандарта предполагается, что диаметральное расширение изменяется линейно от нуля на фланце до значения, заданного формулами (Е.12) и (Е.14) [или формулами (Е.16) и (Е.18) для тонкостенных корпусов] на расстоянии от фланца равном одному наружному диаметру корпуса счетчика *D* или больше. Также предполагается, что коррекция при наличии фланцев влияет только на радиальное расширение корпуса и не влияет на линейное расширение вблизи ультразвуковых траекторий.

Расположение монтажных каналов ультразвуковых преобразователей показано на рисунке Е.1.

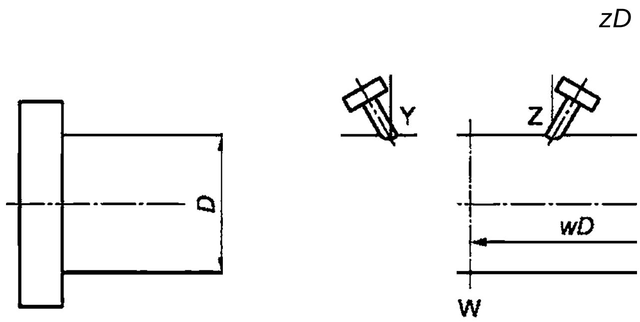
Поскольку ультразвуковая траектория охватывает определенный диапазон расстояния до фланца в осевом направлении, среднее расстояние траектории $и/_a$ *D* рассчитывается от трех положений на заданной траектории: И/ в середине траектории, У и Z в фактических положениях ультразвуковых преобразователей. Расстояния до ближайшего фланца измеряются от позиций *W, Y* и *Z.*

Если все ультразвуковые преобразователи счетчика явно ближе к одному фланцу, чем к другому, используется альтернативное расположение, показанное на рисунке Е.2.



D — наружный диаметр корпуса счетчика; W — середина траектории; *w*— коэффициент для выражения расстояния от фланца до середины траектории по отношению к *D;* x_0 — расстояние между ультразвуковыми преобразователями Y и Z; Y — расположение ультразвукового преобразователя; *у*— коэффициент для выражения расстояния от фланца до ультразвукового преобразователя Y по отношению к D; Z — расположение ультразвукового преобразователя; z — коэффициент для выражения расстояния от фланца до ультразвукового преобразователя Z по отношению к *D*

Рисунок Е.1 — Места установки ультразвуковых преобразователей относительно фланцев



D — наружный диаметр корпуса счетчика; W — середина траектории; *w*— коэффициент для выражения расстояния от фланца до середины траектории по отношению к D; Y — расположение ультразвукового преобразователя; *у* — коэффициент для выражения расстояния от фланца до преобразователя Y по отношению к D; Z — расположение ультразвукового преобразователя; z — коэффициент для выражения расстояния от фланца до ультразвукового преобразователя Z по отношению к *D*

Рисунок Е.2 — Места установки ультразвуковых преобразователей относительно фланцев — счетчик с увеличенной длиной корпуса и со смещенными ультразвуковыми преобразователями

Если любое из значений и/, y или z больше 1, то значение, используемое для этого параметра в расчете, должно быть принято равным 1.

Среднее расстояние траектории от фланца рассчитывается по формуле

$$w_aD = \left[\frac{w + y + zK}{3}\right] D. \qquad (E.20)$$

Коэффициент формы корпуса, K_s, определяют по формуле

$$K_s = \frac{\sim}{1} \qquad (E.21)$$

Упрочнение также возникает рядом с любой частью корпуса, которая имеет такие элементы, как отводы или сварные швы. Как правило, они создают меньшее влияние, чем близость к фланцам, поскольку они обычно занимают лишь небольшую часть окружности корпуса.

Е.2.4 Шаг 4 — влияние комбинированной коррекции по давлению

Радиальное расширение корпуса, с учетом поправки на форму корпуса счетчика, рассчитывается по формуле

^^'^Trb^fi+KsvUIr^^ I ^o J V) d_0 г <E22>

Длина траектории рассчитывается по формулам:

$$lp_0=(N + 1)^2\text{^} + x\text{^}; \qquad (E.23)$$

$$l^2p\text{^}(N_+ y\text{^} + xl \qquad (E.24)$$

где N— число отражений по заданной траектории (для одной траектории прохождения).

Следовательно, для данного счетчика с известной толщиной стенки 5 и исходной геометрией x_0, $c/_0$ и $/_0$ в условиях сухой калибровки скорректированные размеры x^ ф и $/_1$ могут быть рассчитаны для разности давлений по формулам (Е.22) — (Е.24).

Поправочный коэффициент расхода в таком случае вычисляется по формуле

Ы = И Ш1 Ы,
I ^7,0 $)_{bp}$ I ^0 J VpO J V ^{x}1 7 (Е.25)

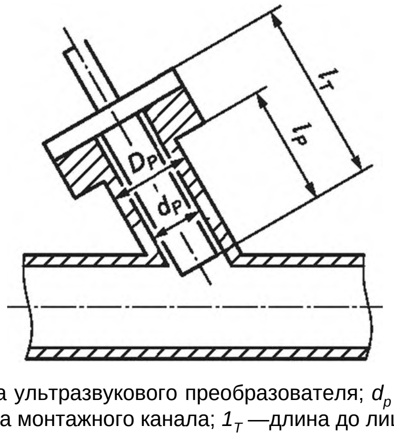
где «ь, р» обозначает давление внутри корпуса.

Коррекция погрешности должна быть рассчитана по формуле (Е.25) для случая «свободные торцы» и для случая «заглушенные торцы». Расчеты позволяют получить диапазон поправочных коэффициентов. Этот диапазон в общем случае должен быть небольшим и достаточным для определения необходимости введения поправки по расходу.

Е.2.5 Шаг 5 — влияние расширения монтажных каналов ультразвуковых преобразователей

Е.2.5.1 Общие сведения

Изменения давления и температуры оказывают влияние не только на корпус счетчика, но и на длину монтажных каналов ультразвуковых преобразователей. Изменения давления и температуры приводят к перемещению торца ультразвукового преобразователя и, следовательно, влияют на длину акустической траектории. Хотя это влияние в общем случае невелико, ниже приводится простая процедура, позволяющая оценить влияние изменения давления и температуры на размеры монтажных каналов. На следующем рисунке показаны геометрические размеры монтажных каналов, использованные для этой оценки.



D_p — наружный диаметр монтажного канала ультразвукового преобразователя; d_p — внутренний диаметр монтажного канала ультразвукового преобразователя; 1_P—длина монтажного канала; 1_T —длина до лицевой стороны ультразвукового преобразователя

Рисунок Е.3 — Размеры монтажного канала ультразвукового преобразователя

Поправки на температуру и давление рассматриваются отдельно, и учитывается только эффект изменения длины траектории.

Е.2.5.2 Коррекция по температуре для монтажного канала ультразвукового преобразователя

Способ крепления ультразвукового преобразователя обычно предусматривает его фиксацию на конце монтажного канала. Вследствие этого любое расширение самого монтажного канала происходит в направлении, противоположном расширению ультразвукового преобразователя. Следовательно, расширения в некоторой степени компенсируются в зависимости от относительного коэффициента теплового расширения материала монтажного канала a_p и материала ультразвукового преобразователя $a_г$ Изменение положения лицевой поверхности ультразвукового преобразователя M_m в зависимости от температуры определяется по формуле

Al-j- = 1m [^p AT — (Xy AT) = l-j- (o.p — ct-j- AT. (E.26)

Это изменение положения лицевой поверхности наблюдается в каждом монтажном канале ультразвукового преобразователя, поэтому влияние на данную ультразвуковую траекторию составляет 2 $A1_T$. Предполагая отсутствие изменений диаметра или осевых изменений, формула (Е.2) для случая расширения канала монтажного канала ультразвукового преобразователя под влиянием температуры упрощается до

$$\left(\frac{q_V}{q_{V,0}}\right)_{P,T} \left(\frac{l_{p1}}{l_{p0}}\right)^2$$ 'po + 2A\T < 'P° > 21m (aP ~am) ^0 (E.27)

где «P,T» обозначает температуру монтажного канала.

Формула (Е.27), с учетом малости величин a_p, a_m, может быть записана в следующем виде:

$$\left(\frac{q_V}{q_{V,0}}\right)_{P,T}$$ [^m (a_P - am) / l pO (E.28)

или как вариант:

= 4(a_P -a_г)—AT. Чу 1p0 (E.29)

Е.2.5.3 Коррекция по давлению для монтажного канала ультразвукового преобразователя

Давление оказывает влияние на монтажный канал ультразвукового преобразователя и ультразвуковой преобразователь в одном направлении; монтажный канал расширяется, а ультразвуковой преобразователь сжимается. Для этого простого подхода предполагается, что монтажный канал и ультразвуковой преобразователь действуют как простые линейно-упругие материалы. Линейная деформация стенок монтажного канала определяется по формуле

- h Ap , ^P f dP) / E_m P Ep \D_P -d_p) = Ap lT { 'P [dP / E_m E_P[D^-d^ (E.3O)

Формула (Е.3О) позволяет рассчитать изменение положения лицевой поверхности ультразвукового преобразователя в каждом монтажном канале. Предполагая отсутствие изменений диаметра или осевых изменений, формула (Е.2) для случая расширения монтажного канала только под влиянием давления упрощается до

Чу \ _ ^>1 _ ^po+^A/p^ _ 2д/p / Чу,o)_Pp \!po) V 'po) [^o (E.31)

где P,p обозначает давление в монтажном канале.

Для малых значений изменения положения лицевой поверхности ультразвукового преобразователя формула (Е.31) примет следующий вид:

Чу / Чу,o P~P 1 + 4 4Д/P / 1p0 (E.32)

или как вариант:

^Чу _ Д Alp / Чу 1po (E.33)

Е.2.5.4 Комбинированная коррекция для монтажного канала ультразвукового преобразователя

Комбинированная коррекция для монтажного канала ультразвукового преобразователя рассчитывается по формуле

$$\left(\frac{q_{V,1}}{q_{V,0}}\right)_P$$ qy,i) (ЧУ,1 / qV'0Jp,p 1^.0 (E.34)

В качестве альтернативы этой простой оценке может быть применен метод конечных элементов, как описано в Е.3.

Е.2.6 Шаг 6 — комбинированная коррекция по расходу

Комбинированный поправочный коэффициент по расходу на влияние изменения давления и температуры рассчитывают по формуле

$$\frac{Чу,_x}{Чу,o} = \frac{Чу,_x}{{}^qW\ k,p} \quad \frac{Чу,x}{Чу,o}\ bj \quad \frac{Чу,_x}{Чу,o} \qquad (E.35)$$

что может быть выражено в форме относительной погрешности:

$$\frac{\hat{}Чур\hat{}}{Чу,o} = \frac{Чу,x - Чу,O}{Чу,o} = \frac{Чу,_x}{Чу,o} - 1 \qquad (E.36)$$

Для малых значений коррекции это уравнение упрощается до

$$\frac{\hat{}чу\hat{}}{Чу,o} = \frac{\&Чу,_x}{Чу,o}\ Ь.p \quad Зуд\ ь,m \quad \frac{\hat{}Чу,_x}{Чу,o} \qquad (E.37)$$

Определяют два значения для комбинированной коррекции по расходу; одно с поправкой на давление при условии «свободные торцы», а другое при условии «заглушенные торцы». Это позволяет выразить погрешность расхода в любой из эквивалентных форм, как в формулах (21) и (22):

$$\frac{Чу\ 1}{Чу,o} = x,\ xxxx + x,\ xxxx; \qquad (E.38)$$

$$\frac{\hat{}-}{Чу} - (x,\ XX + x,\ xx)\ \%. \qquad (E.39)$$

Е.3 Руководство по использованию методов конечных элементов

Е.3.1 Общие сведения

Если монтажные каналы ультразвуковых преобразователей располагаются вблизи торцевых фланцев или форма корпуса не является простой цилиндрической, можно применить метод конечных элементов, который позволяют оценить влияние расширения, вызванное давлением и температурой, на значения d, x, $1_{p!}$ а также на длину монтажного канала и ультразвукового преобразователя. Формула (Е.2) должна использоваться для оценки погрешности измерения расхода по каждой траектории и в случае применения метода конечных элементов.

Проверку результатов расчета можно выполнить путем сравнения значений d, x, 1_p и длины монтажного канала ультразвукового преобразователя, полученных методом конечных элементов, с результатами, полученными по формулам (Е.12)—(Е.15), включая описанную в Е.2.3 коррекцию влияния любой формы корпуса или фланцев, и эффекты, имеющие место в монтажных каналах ультразвуковых преобразователей, описанные в Е.2.5.

Если стенка корпуса счетчика нестандартная или нецилиндрическая (например, как в случае литого корпуса), то в целях проверки результатов расчетов, выполненных с применением метода конечных элементов, можно провести прямые расчеты для двух сценариев: один, в котором внешний радиус R, используемый в формулах (Е.12)—(Е.15), берется в качестве точки, в которой стенка является самой тонкой, и другой для случая, когда внешний радиус измерен в точке, в которой стенка имеет наибольшую толщину.

Поскольку метод конечных элементов позволяет рассчитать абсолютные изменения физических размеров, более близкое соответствие с результатами метода прямого расчета по Е.2 достигается для фактических размеров счетчика при заданных условиях, если расчет с применением метода конечных элементов выполняется в виде трехэтапного процесса, как описано в Е.1, а именно:

а) от условий калибровки в статическом режиме к условиям калибровки в динамическом режиме — как в формуле (Е.4);

Ь) от условий калибровки в статическом режиме к рабочим условиям — как в формуле (Е.5);

с) сравнение относительного изменения между этими двумя значениями — как в формулах (Е.6) и (Е.7).

Однако необходимо соблюдать осторожность при выборе граничных условий, используемых для метода конечных элементов, поскольку их часто сложно оценить для данной установки. Рекомендуется применять различные граничные условия, чтобы можно было оценить чувствительность результатов расчета к граничным условиям. По сути, это задание граничных условий для случаев «свободные торцы» и «заглушенные торцы» в методе прямого расчета Е.2.

Для каждого варианта моделирования погрешность измерения расхода рассчитывается по формуле (Е.2). Это позволяет выразить погрешность измерения расхода в любой из форм, заданных формулами (21) или (22). В Е.6.4 и Е.6.5 представлены примеры прямого одноэтапного подхода и более длинного трехэтапного подхода.

В Е.4 содержатся дополнительные рекомендации по использованию теории тонкостенных труб для проверки результатов анализа по методу конечных элементов, выполненного для толстостенного корпуса счетчика.

Е.3.2 Примечание о преднамеренном использовании уравнений теории тонкостенной трубы вне области их нормального применения

В области анализа напряжений и проектирования сосудов под давлением общепризнано, что теория тонкостенных труб применяется только там, где $8/г< 0,1$. Причины этого заключаются в том, что по мере увеличения $8/г$

разница с более точной теорией толстостенной трубы становится неприемлемо большой, по крайней мере, если дело касается оценки уровней напряжения стенки. На рисунке Е.4 показано влияние на *М/г* различных подходов [описанных в формулах (Е.12), (Е.14), (Е.16) и (Е.18)] для различных отношений 5/г.

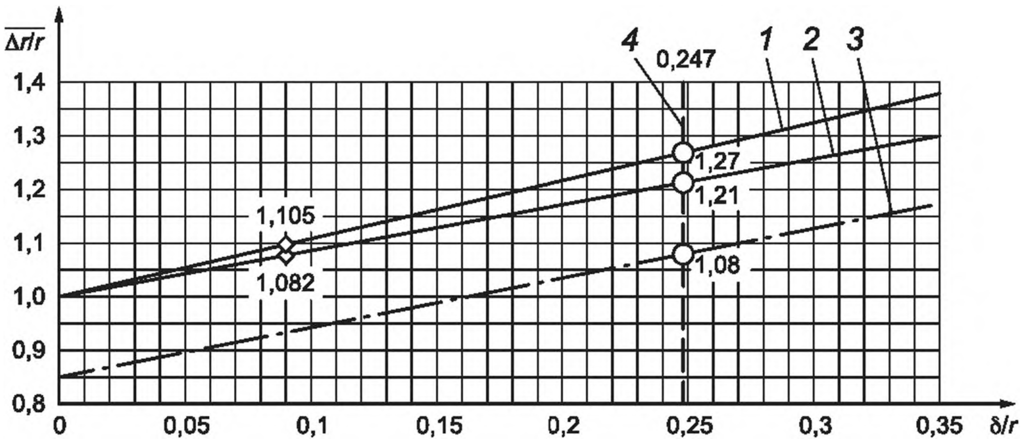
Как видно из рисунка Е.4, отношения 5/г выше 0,1 дают различия в *Мг* более чем на 10 % по сравнению с теорией толстостенной трубы для тех же условий торцевой нагрузки. Если, например, *Ыг=* 0,247, различия составляют примерно от 21 % до 27 % в зависимости от применяемой конфигурации нагрузки.

Применение уравнений теории тонкостенных труб при условии «свободные торцы» для случая с толстой стенкой при условии «заглушенные торцы» дает завышенную оценку *М/г* при 5/г < 0,16 и заниженную оценку при *Ыг>* 0,16. Для *Ыг=* 0,247 занижение оценки *М/г* составляет 8 %.

На рисунке Е.4 показано, что по уравнениям теории тонкостенной трубы получаются более низкие значения *М/г,* чем по уравнениям теории толстостенной трубы для тех же условий нагрузки. Это дает эффект, аналогичный использованию теории толстостенной трубы вместе с коррекцией на близость фланцев или форму корпуса, как в Е.2.3, хотя степень сходства зависит от фактической геометрии, близости фланцев и условий торцевой нагрузки для данного счетчика.

Следовательно, в сочетании с моделированием по методу конечных элементов (Е.3), по вышеуказанным причинам может быть обнаружено, что простая теория тонкостенной трубы дает адекватное совпадение с результатами моделирования по методу конечных элементов для заданной геометрии счетчика и впоследствии может использоваться в качестве достоверного средства оценки погрешности измерения расхода при других условиях.

Следует отметить, что результаты анализа относятся только к конкретному счетчику, и их не следует воспринимать как общее правило, применимое ко всем счетчикам.



Аг / г — соотношение *Мг* «толстая стенка»/«тонкая стенка»; *b/г* — отношение толщины трубы к внутреннему радиусу трубы; *1* — при условии «заглушенные торцы»; *2*— при условии «свободные торцы»; *3*— с толстой стенкой при условии «заглушенные торцы» / с тонкой стенкой при условии «свободные торцы»; *4* — пример

Рисунок Е.4 — Сравнение теории толстостенной трубы с теорией тонкостенной трубы для различных отношений *8/г*

Е.4 Расчет первоначальной оценки влияния давления внутри корпуса

Для выполнения первоначальной оценки влияния давления внутри корпуса в целях упрощения пренебрегают используемыми в 9.1.2.2 осевым изменением x и любым влиянием близости фланца или формы корпуса K_s. В этом случае, используя формулы (Е.23) и (Е.24), формула (Е.25) принимает вид:

w \2 / .) 'Р1
^'® 'b.p.est dО) VPO,

$$\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2 \quad \left(\frac{d_1}{d_0}\right)^4 \quad \left(1+\frac{\Delta r}{r}\right)^4 \tag{Е-40}$$

где индекс «est» означает первоначальную оценку.

Для малых значений Дг/г формулу (Е.40) можно упростить, опуская члены более высокого порядка:

$$\left(\frac{q_{V,1}}{q_{V,0}}\right) \quad \left(1+\frac{\Delta r}{r}\right)^4 = 1 + 4\frac{\Delta r}{r}. \tag{Е.41}$$

Тогда для расчета ^q^q_v может быть применена формула

$$\frac{\text{^^,1}}{q\text{^^ L.est}}\ \text{j}\_\ \frac{Чу,!}{qW}\ \frac{\text{Ar}}{r} \qquad (E.42)$$

Формула (E.12) для варианта толстой стенки при условии «заглушенные торцы» используется для расчета *кг/г,* чтобы дать оценку худшего сценария, поскольку она приводит к наибольшему изменению Дг/г для заданного значения Ар. Следовательно, максимальное ожидаемое значение *kq^qy* вследствие влияния изменения давления внутри корпуса определяется как

$$\frac{Чу,у}{qV\$\ /Ь,р,max} = 4\frac{\Delta r}{r} = 4\left(\frac{R^2+r^2}{R^2-r^2}\right)\frac{\text{^}p}{E}' \qquad (E.43)$$

Е.5 Пример

Е.5.1 Параметры счетчика

Корпус счетчика имеет форму прямолинейного участка с фланцами.

Параметры счетчика, которые используются в качестве данных для расчета поправки по расходу, приведены на рисунке Е.1.

На основе указанных в таблице Е.1 параметров вычисляются общие основные параметры, приведенные в таблице Е.2.

Таблица Е.1 — Параметры счетчика

Параметр	Обозначение	Значение
Внутренний радиус корпуса[3]	r_b	183,25 мм
Внешний радиус корпуса[3]	R_b	228,6 мм
Толщина стенки[3]		45,35 мм
Длина монтажного канала ультразвукового преобразователя	^p	230 мм
Внешний диаметр монтажного канала	D_P	50 мм
Внутренний диаметр монтажного канала	d_P	32 мм
Расстояние до левого фланца[3]	—	366 мм
Расстояние до правого фланца[3]	—	686 мм
Траектория с одним отражением	Л/	1
Угол наклона траектории	Ф	70°
Длина траектории	^p0	780,117 мм
Осевое расстояние между ультразвуковыми преобразователями	x_0	267,007 мм
Модуль Юнга материала корпуса[3]	*E*	2,00 • 10^2 ГПа
Коэффициент Пуассона[3]	ц	0.3
Коэффициент теплового расширения[3]	a	1,26 ■ 10^{-5} K^{-1}
Длина монтажного канала без фланца	!p	220 мм
Диаметр ультразвукового преобразователя	d_T	32 мм
Длина ультразвукового преобразователя	'm	230 мм
Коэффициент теплового расширения ультразвукового преобразователя (расчетный)	a_m	1,5 • 10^{-5} K^{-1}
Модуль Юнга ультразвукового преобразователя (расчетный)	E_T	1,9 ■ 10^2 ГПа
Условия статической калибровки	—	0 МПа (избыточное), 20 °С
Условия динамической калибровки[3]	—	6,3 МПа (избыточное), 7 °С
Полевые рабочие условия[3]	—	23,0 МПа (избыточное), 40 °С
[3] Необходимо для первоначальной оценки.		

Таблица Е.2 — Основные параметры счетчика

Параметр		Значение	Примечание
Отношение толщины стенки, *д/г*		0,2475	=> толстая стенка
Внешний диаметр счетчика		2 ■ 228,6 = 457,2 = D_b	
Расстояние до фланцев	ближайший	366/457,2 = 0,8D_b	=>z = 0,8
	дальний	(366 + 267)/457,2 = 1,38D_b	^y= 1
	посередине	[366 + 0,5 • 267] / 457,2 = 1,09$O_й$	=> W = 1
Коэффициент формы корпуса		(w + y + z)/3 = 2,8/3 = 0,93 = K_S	

Е.5.2 Первоначальная оценка погрешности измерения расхода

Используя простые оценки, представленные на рисунках 15 и 16, ожидаемые погрешности измерения расхода Aqy/q_v при переходе от условий динамической калибровки к полевым рабочим условиям составляют +0,13 % для ДТ = 33 °С и +0,16 % ■ 0,93 = +0,15 % для Др = 16,7 МПа.

Из рисунка 17 для *д/г* = 0,247 поправочный коэффициент на торец K_E = 0,89, и это дает меньшую оценку 0,13 % (то есть 0,89 0,15 %) для составляющей по давлению.

Таким образом, получается комбинированная первоначальная оценка погрешности измерения расхода от +0,26 % до +0,28 % [или (0,27 ± 0,01) %], что является значительным, и поэтому необходим подробный расчет.

Е.5.3 Общие элементы для подробного расчета

Общие элементы для подробного расчета для любых значений Др и Е приведены ниже.

Изменение длины монтажного канала вследствие давления определяется по формуле (Е.3О):

230 220 [32²
1,9Ю^И +2 Ю^И (50² -32²   = 1,97367-10"⁹ Др.

В результате вычислений по формулам (Е.12) — (Е.15) получаем:

- для варианта «свободные торцы»

Дг = Г 228,62+183,25? Q3W = 489585 Др
г 228,6² -183,25²)Е   Е

х ^228,6²-183,25² J £   — = -0,3 f= —1107876^:
Е

- для варианта «заглушенные торцы»

Дг   [1,3.228,6? +183,25?. (1-2-0,3)+03Ь = 4 3564? Др .
г   228,6² -183,25²   \Е   Е'

Дх   183,25²-(1-2-0,3)   Ар = 0,71917—.
х   228,6² -183.25²   Е   Е

Примечание — Отношение между случаями «заглушенные торцы» и «свободные торцы» для Дг/г составляет 4,356 47/4,89585 = 0,89, что также можно получить из рисунка Е.4.

В результате вычислений по формулам (Е.16) — (Е.19) для тонкостенных труб получаем:

- для варианта «свободные торцы»:

Дг = 1^25 Др = 4 0407д Др
г 45,35 Е   Е '

^ . -0,3133J25 Др = —1 ! 224 ^Р .
х 45,35 Е   Е '

- для варианта «заглушенные торцы»:

Аг/г = (1-0,3/2 183,25 Др / 45,35 Е = 3,43467— ;
Е '

— = (0,5 - 0,3) • ^1^.^Р = 0,80816^.
х   45,35 Е   Е

Результаты для тонкой стенки приведены только в качестве примера, поскольку фактическое используемое отношение *д/г* составляет 0,247. Однако, следует обратить внимание, что отношение условий толстой стенки к условиям тонкой стенки *кг / г =* 4,89585 / 4,04079 = 1,21 при *д/г* = 0,247 для варианта «свободные торцы» и *кг / г =* 4,35647 / 3,43467 = 1,27 для варианта «заглушенные торцы». Эти значения использовались в примере на рисунке Е.4.

Е.5.4 Прямой одноэтапный подробный расчет

Из данных таблицы Е.1 следует, что разница температур и давления между динамической калибровкой и полевыми рабочими условиями составляет:

$$ДТ= 40 - 7 = +33\ °С\ Др = 23,0 - 6,3 = +16,7\ МПа.$$

Тогда получаем:

$$кр/Е = (16,7\text{-}10^6)/(2 \cdot 10^{11}) = 83,5\text{-}10\text{-}^6;$$

$$kl_p = (16,7 ■ 10^6) \cdot (1,97367 ■ 10''^9) = 0,03296.$$

а) Влияние температуры корпуса из формулы (Е.10):

$$\text{^},1^{/(}?1/,о^{=1} + (3 \cdot 1,26\ Ю''^5\ \text{-}33,0)= 1,001247.$$

Ь) Влияние давления внутри корпуса из формул (Е.12) в (Е.15) и формулы (Е.43) для случаев:
- «свободные торцы»:

$$кг/г = 4,89585 \cdot 83,5 \cdot 10\text{~}^6 = 4,08803 \cdot 10''^4;$$

$$кх/х = \text{-}1,07876 ■ 83,5 \cdot 10''^6 = \text{-}0,90076 \cdot 10''^4.$$

При этом первоначальная оценка влияния изменения давления внутри корпуса *4кг/г =* 0,164 %;
- «заглушенные торцы»:

$$кг/г = 4,35647 \cdot 83,5 \cdot 10\text{~}^6 = 3,63765 \cdot 10''^4;$$

$$Дх/х = 0,71917 \cdot 83,5\text{-}10''^6 = 0,60051 \cdot 10''^4$$

с) Близость фланцев на основе формулы (Е.21):

$$K_s = 0,93;$$

d) Комбинированное влияние давления внутри корпуса из формул (Е.22) — (Е.25):
- для случая «свободные торцы»:

^1^0	$= 1 + (0,93\text{-}4,08803\text{-}10\text{-}^4)$	= 1,000380
^1	= 1,000380 • 366,5	= 366,6393
*?*о	$= 1 \text{-}(0,90076 \cdot 10\text{-}^4)$	= 0,999910
$^x1$	= 0,999910 • 267,007	= 266,9830
$^z1$	$= (2^2 \cdot 366.6393^2 + 266,983О^2)^{0'5}$	= 780,3701
^l^O	= 780,3701/780,117	= 1,000324
^v, i^c/v, о	$= 1.000380^2 ■ 1,000324^2/0,999910$	**= 1,001499**

для случая «заглушенные торцы»:

	$= 1 + (0,93 ■ 3,63766 \cdot 10\text{-}^4)$	= 1,000338
^{d}i	= 1,000338 ■ 366,5	= 366,6239
*?*о	$= 1 + (0,60051 \cdot IO''^4)$	= 1,0000601
*1	= 1,0000601 • 267,007	= 267,02305
^1	$= (2^2 \cdot 366.6239^2 + 267.0230^2)^{0\text{-}5}$	= 780,3548
^l^O	= 780,3548/780,117	= 1,000305
Civ, ^V, 0	$= 1,000338^2 \cdot 1,000305^2/1,0000601$	**= 1,001226**

е) Влияния монтажных каналов на основе формул (Е.28), (Е.32) и (Е.34):

Температура	$q_{v/1}/p_{v/\ 0}$=1 + [4 • 230 • (1,25- 1,5) • 10~^{5} • 33]/780,117	=0,999903
Давление	$q_{v\ 1}/q_{v\ 0}$ = 1 + 4 • 0,03295/780,117	= 1,000169
Комбинированный	$q_{v\ A}/q_{v\ 0}$ = 0,999903 ■ 1,000169	**= 1,000072**

f) Суммарная комбинированная коррекция по расходу из формулы (Е.35):

- для случая «свободные торцы»:

^JAO = 1,001247 • 1,001499 • 1,000072 **= 1,002820**

- для случая «заглушенные торцы»:

^JAO = 1,001247-1,001226-1,000072 **= 1,002547**

= 1,002684 ±0,000136

= 1,0027 ± 0,0001

Значение ^q^q^ из формулы (Е.36):

- для случая «сводные торцы»

^v, 1,о^V, о = **+0»2820 %**

- для случая «заглушенные торцы»

^V, 1,0^У, О = **+0>2547 %**

= +(0,2684 ±0,0136) %

= +(0,27 ±0,01) %

Е.5.5 Трехэтапный подробный расчет

Е.5.5.1 Этап 1 —от условий статической калибровки к условиям динамической калибровки

ДГ = -13°С Ар = 6,3 МПа

Ьр/Е $= 6,3 \cdot 10^6 / 2 \cdot 10^{11}$ $= 3,15 \cdot 10^{-5}$

M_p $= (6,3 \cdot 10^6) \cdot (1,97367 \cdot 10^{-9})$ $= 0,01243$

а) Влияние температуры корпуса из формулы (Е.10):

4|/,iA,0 = 1 + (3 • 1,26 • IO"5-(-13,0)) **=0,999509**

Ь) Влияние давления внутри корпуса из формул (Е. 12) — (Е. 15) и формулы (Е.43):

- для случая «свободные торцы»:

Дг/г $= 4,89585 \cdot 31,5 \cdot 10^{-6}$ $= 1,542\,19 \cdot 10^{-4}$

Дх/х $= -1,07876 \cdot 31,5 \cdot 10^{-6}$ $= -0,33981 \cdot 10^{-4}$

Начальная оценка влияния изменения давления внутри корпуса равна 4 *кг/г=* **0,062 %**

- для случая «заглушенные торцы»:

Мг $= 4,35647 \cdot 31,5 \cdot 10^{-6}$ $= 1,37229 \cdot 10^{-4}$

Дх/х $= 0,71917 \cdot 31,5 \cdot 10^{-6}$ $= 0,22654 \cdot 10^{-4}$

с) Близость фланцев из формулы (Е.21):

$K_s = 0,93$

d) Комбинированное влияние давления внутри корпуса из формул (Е.22) — (Е.25):

- для случая «свободные торцы»:

^1^0 $= 1 + (0,93 \cdot 1,54219 \cdot 10^{-4})$ = 1.000143

^1 = 1,000143 ■ 366,5 = 366,5524

x?xo $= 1 - (0,33981 \cdot 10^{-4})$ = 0.999967

x1 = 0,999967 • 267,007 = 266,9979

/1 $= (2^2 \cdot 366,5524^2 + 266.9979^2)^{0,5}$ = 780,2118

V^ = 780,211 8/780,117 = 1.000122

Qv, ^Qv, 0 $= (1.000143^2 \cdot 1,000122^2)/0,999967$ **= 1,000563**

- для случая «заглушенные торцы»:

^1^0 $= 1 + (0,93 \cdot 1,37229 \cdot 10^{-4})$ = 1,000128

^1 = 1,000128 • 366,5 = 366,5469

x?x0	= 1 + (0,22654 • 10^{-4})	= 1,0000227
*1	= 1,0000227 ■ 267,007	= 267,0131
^1	= (2^2 • 366.5469^2 + $267,O131^2)^{0-5}$	= 780,2067
^1^0	= 780,2067/780,117	= 1,000115
$У, 1%, 0	= ($1,000128^2$ • $1,000115^2$)/1,0000227	**= 1,000463**

e) Влияние монтажных каналов из формул (E.29), (E.33) и (E.34):

Температура	^У, 1^У, 0	= 1 +[4-230-(1,25-1,5)- 10"5- (-13)]/780,117	= 1,000038
Давление	^У, 1^у 0	= 1 + (4 ■ 0,01243)/780,117	= 1,000064
Комбинированный	^У, 1^У, 0	= 1,000038 ■ 1,000064	**= 1,000102**

f) Суммарная комбинированная коррекция по расходу из формулы (E.35):

- для случая «свободные торцы»

q_v 1 о% О = 0-999509 ■ 1,000557 ■ 1,000102 **= 1,000168**

- для случая «заглушенные торцы»

q_v 1,0%, О =0,999509 • 1,000463 • 1,000102 **= 1,000074**

= 1,000121 ±0,000047

Значение $A.q_{vo}/q_v$ из формулы (E.36):

- для случая «свободные торцы»:

¤ ^у, 1,о^у, о **-+0,0168%**

- для случая «заглушенные торцы»

¤ Qу 1,0^У, о — +®>®^4 %

= +(0,0121 ±0,0047) %

E.5.5.2 Этап 2 — от условий статической калибровки к полевым рабочим условиям

ДТ=+20 °С, Др = +23,0 МПа

^p/E	= 230 • 10^5/2 • 10^{11}	= 115 ■ 10"6
M_p	= (230 • 10^5) ■ (1,97367 • 10%	= 0,04539

a) Влияние температуры корпуса из формулы (E.10):

^,1,0%, О = 1 + (3 ■ 1,26 • 10"5 • 20,0) **= 1,000756**

Ь) Влияние давления внутри корпуса из формул (E.12) — (E.15) и формулы (E.43):

- для случая «свободные торцы»

Дr/r	= 4,89585 ■ 115 • 10"6	= 5,63023 • 10"4
Дx/x	=-1,07876 • 115 • IO"6	=-1,24057 • 10^{-4}

Начальная оценка давления внутри корпуса равна 4 ■ *Мг=* 4 • 5,63023 ■ 10^{-4} = **0,23 %**

- для случая «заглушенные торцы»

Дr/r	= 4, 35647 • 115 • 10"6	= 5,00994 ■ 10"4
Дx/x	=0,71917 • 115 • 10"6	= 0,82705 ■ 10^{-4}

c) Близость фланцев по формуле (E.21):

K_s = 0,93

d) Комбинированное влияние давления внутри корпуса из формул (E.22) — (E.25):

- для случая «свободные торцы»:

^2^0	= 1 + (0,93 • 5,63023 • 10^{-4})	= 1,000524
	= 1,000524 • 366,5	= 366,6920
x2%	= 1 -(1,24057 • 10^{-4})	= 0,999876
x2	= 0,999876 • 267,007	= 266,9739
	= (2^2 • 366.6920^2 + $266.9739^2)^{0-5}$	= 780,4660
^^О	= 780,4660/780,117	= 1,000447
9 у, 2^У, 0	= ($1,000524^2$ • $1,000447^2$)/0,999876	**= 1,002068**

Для случая «заглушенные торцы»:

^2^0 = 1 + (0,93 • 5,00994 • 10"4) = 1,000466

d_2 = 1,000466 ■ 366,5 = 366,6708

x_2/x_0 = 1 + (0,82705 ■ 10"4) = 1,0000827

x_2 = 1,0000827 • 267,007 = 267,0291

l_2 = $(2^2$ • 366.6708^2 + 267,0291$^2)^{0'5}$ =780,4450

l_2/l_0 = 780,4450/780,117 = 1,000420

4v,2,c1v,0 =(1,000466^2-1,000420^2)/1,0000827 **= 1,001690**

) Влияние монтажных каналов из формул (Е.28), (Е.33) и (Е.34):

Температура Qy^v.o = 1 + [4 • 230 ■ (1,25-1,5) • 10~^{5} ■ 20]/780,117 = 0,999941

Давление q_v 2/ch, 0 = (1 + 4 ■ 0,04539)/780,117 = 1,000233

Комбинированный qy ^Qv o =0,999941-1,000233 **= 1,000174**

f) Суммарная комбинированная коррекция по расходу из формулы (Е.35):

- для варианта «свободные торцы»:

q_v 2,0/c/y, O = 1 -000756 • 1,002070 • 1,000174 **= 1,003002**

- для случая «заглушенные торцы»

^V, 2,0/c/v, O = 1-000756 ■ 1,001690 • 1,000174 **= 1,002622**

= 1,002812 ±0,00019

Значение ^q^q^ из формулы (Е.36):

- для случая «свободные торцы»

Aqy 2,O^V, O = +**0,3002 %**

- для случая «заглушенные торцы»

My, 2,o^y, o = +**0,2622 %**

= +(0,2812 ±0,019) %

E.5.5.3 Этап 3 — поправочный коэффициент по расходу от условий динамической калибровки к полевым рабочим условиям

Общая коррекция по расходу определяется из формулы (Е.6):

- для случая «свободные торцы»:

Q,2,I Qv,2,O Ф/,O 1,003002 / ^,1 ^,o ^,1,0 1,000174 = IjUUZoZo

- для случая «заглушенные торцы»:

Q.,2,1 4v,2.O Qv,O 1,002622 / q_v,i ^,0 ^,1,0 Ю00074 = 1, UUzo4o

= 1,002688 ±0,00014

Значение &$q_{v\,2}$ Jqy T

- для случая «свободные торцы»

&q_v 2Л^У, 1 = +°**,2828 %**

- для случая «заглушенные торцы»

A$q_{v\,2}$ ^q^ $_1$ **= +0,2548 %** «заглушенные торцы»

= +(0,2688 ±0,014) %

Поправочный коэффициент по расходу и погрешность измерений расхода, выраженные в соответствии с формулами (21) и (22):

^V ^v 1 = **1-0027 ± 0,0001;**

kq_v 2^v, 1 = **(o>27 ± 0’01) °/°-**

Е.6 Примечания по примеру расчета

Е.6.1 Общие сведения

Для обеспечения точности расчетов для отдельных значений в общем случае были указаны до шести значащих цифр, но следует понимать, что это не отражает предполагаемую точность метода оценки. В соответствии с 9.1.2.7 окончательный суммарный поправочный коэффициент по расходу q_v ^q^ $_1$ должен указываться с точностью до четырех десятичных разрядов, а ^q^q^— с точностью до двух десятичных разрядов.

Разница в значениях поправочных коэффициентов по расходу между условиями динамической калибровки и рабочими условиями, рассчитанным прямым одноэтапным расчетом по Е.5.4 и более сложным трехэтапным подходом по Е.5.5, незначительна. Однако, как упоминалось в Е.1, трехэтапный подход может оказаться более полезным для сравнения промежуточных результатов и конкретных размеров с результатами, полученными методом конечных элементов.

Первоначальная оценка погрешности измерения расхода, сделанная в Е.5.2 с использованием простого подхода, описанного в 9.1, совпадает с результатом более подробного расчета Е.5.4 или Е.5.5. По всей вероятности, это особенность выбранного примера, поскольку можно было бы ожидать незначительную разницу.

Промежуточные этапы расчета полезны для оценки относительных размеров и, следовательно, значимости влияния коррекции по расходу вследствие причин, описанных в Е.6.2 или Е.6.7.

Е.6.2 Начальная оценка влияния давления внутри корпуса

Начальные оценки влияния давления внутри корпуса составляли 0,062 % и 0,23 % для двух исследованных случаев, и они сравниваются со значениями 0,056 % и 0,21 % из более подробного расчета на шаге 4 для каждого случая. В обоих случаях, как и следовало ожидать, первоначальная оценка завышена по отношению к более подробному расчету.

Е.6.3 Условия торцевой нагрузки счетчика

Изменение торцевой нагрузки влияет только на изменение размеров корпуса вследствие влияния давления. Результаты расчетов для условий «свободные торцы» и «заглушенные торцы» указывают на чувствительность коррекции к условиям торцевой нагрузки. В двух рассмотренных случаях разница между случаями «свободные торцы» и «заглушенные торцы» составляет всего от +0,05 % до +0,06 % в варианте 1 и от +0,17 % до +0,21 % в варианте 2. Это указывает на то, что условия торцевой нагрузки имеют второстепенное значение.

Е.6.4 Влияние давления внутри корпуса

Для двух рассмотренных вариантов влияние давления внутри корпуса было порядка +0,05 % в варианте 1 (6,3 МПа) и +0,2 % в варианте 2 (23,0 МПа). Влияние площади вследствие изменения $(ф/c/_0)^2$ было порядка 0,027 % и 0,09 %, соответственно, для двух вариантов. Таким образом, на влияние изменения площади приходится примерно половина коррекции по расходу.

Е.6.5 Влияние температуры корпуса

Для двух рассмотренных вариантов влияние температуры корпуса составило -0,05 % для варианта 1 (минус 13 °С) и +0,08 % для варианта 2 (+20 °С). Это указывает на то, что влияние температуры столь же важно, как и влияние давления. Обратите внимание, что в варианте 1, поскольку ДГ было отрицательным, его влияние частично компенсировало влияние давления, тогда как в варианте 2 ДГбыло положительным, и его влияние добавлялось к влиянию давления.

Е.6.6 Влияние монтажных каналов ультразвуковых преобразователей

В зависимости от способа крепления ультразвуковых преобразователей в монтажных каналах влияния температуры могут компенсироваться (то есть расширение монтажного канала компенсируется увеличением размера ультразвукового преобразователя). Комбинированное влияние давления и температуры в варианте 1 составляет +0,01 %, а в варианте 2 — +0,02 %. Это указывает на то, что влияние монтажного канала ультразвукового преобразователя на порядок меньше, чем влияние температуры или давления на сам корпус счетчика.

Е.6.7 Сравнение с результатами вычислений, выполненных методом конечных элементов

В приведенных примерах и в методе конечных элементов применялись одинаковые значения давления и температуры, а также размеры счетчика. Результаты этого моделирования показывают, что погрешности измерения расхода находятся в переделах от +0,003 % до +0,006 % для диаметральных траекторий с одним отражением для варианта 1 и суммарная погрешность измерения расхода для разницы между вариантом 2 и вариантом 1 от +0,264 % до +0,272 %. Они вполне сравнимы со значениями от +0,007 % до +0,017 % для варианта 1 и от +0,25 % до +0,28 % для комбинированного варианта 2 и варианта 1, рассчитанных в Е.6.5. Согласование находится в пределах 0,01 % от полной погрешности измерения расхода в процентах.

Е.6.8 Заключение

Эти наблюдения сделаны на основе рассмотрения отдельного конкретного примера. Следовательно, можно ожидать некоторое изменение значений различных влияний при использовании других моделей измерения и рабочих условий. Тем не менее, также можно ожидать, что относительная величина конкретных влияний будет соответствовать наблюдениям, сделанным в примерах.

Приложение F
(обязательное)

Спецификация данных связи MODBUS

F.1 Общие сведения

USM должен обеспечивать определенную структуру данных для последовательной связи, чтобы упростить обмен данными с подключенной системой связи (например, вычислителем расхода или системой сбора данных).

Протокол передачи данных основан на общедоступных спецификациях «Modbus Organization, Inc.» ([83]).

Протокол передачи данных характеризуется следующими обязательными параметрами:

- Протокол последовательной передачи данных: MODBUS RTU;
- Скорость передачи данных: поддержка 9600 бод (заводская установка), возможна более высокая скорость передачи данных, если она поддерживается подключенной системой связи;
- Размер регистра: 16 бит;
- Порядок байтов Big Endian (формат с порядком следования байтов, начиная со старшего): сначала старший байт (MSByte), сначала старшее слово (MSWord);
- Значения измерений и диагностики должны быть представлены в виде 32-битных чисел с плавающей запятой в соответствии с IEEE 745;
- Счетчики объема должны быть представлены в виде 32-битного двойного целочисленного слова, представляющего 9-значный индекс счетчика (со сбросом в 0 при достижении 999 999 999).

При двунаправленном применении счетчика измеренные объемы регистрируются в двух отдельных счетчиках в зависимости от направления потока газа (Vact_forward, Vact_reverse). Объемы, измеренные в аварийном состоянии, подсчитываются в отдельном счетчике погрешности объема для каждого направления потока (Vact_err_forward, Vact_err_reverse).

Для передачи данных от счетчика в систему связи определены три структуры данных:

- идентификационные данные счетчика (типовая электронная табличка), см. таблицу F.3;
- значения результатов измерений и диагностики, не зависящие от траектории измерения, см. таблицу F.1;
- измеренные диагностические параметры, связанные с траекторией измерения, см. таблицу F.2.

Структурные данные, приведенные в таблице F.4, используется для отправки значений параметров процесса (например, давления и температуры) от системы связи счетчику, если счетчик и система связи поддерживают эту функцию. Счетчик должен указать в «идентификаторе функциональности счетчика» (часть 3 структуры данных, регистр # 33850, бит 0), доступна ли эта функциональность технически и активирована ли она. Активация может быть запрещена вследствие законодательного метрологического контроля или договорных правил в области учета газа.

Счетчик должен поддерживать контрольный таймер для наблюдения за периодическим обновлением значений данных процесса.

В приводимой в качестве примера реализации счетчик запускается с настроенными замененными значениями давления и температуры. Сбор значений данных процесса в счетчике инициируется и последовательно запускается доступом для записи к «состоянию данных процесса» (часть 4 структуры данных, регистр # 34048). Не имеет значения, были ли данные записаны системой связи в счетчик в виде блока или в виде отдельного регистра. После первого доступа записи из системы связи к счетчику активируется сторожевой таймер (watchdog), и счетчик использует обновленные значения процесса в своих расчетах. В случае, если системе связи не удается обновить эти значения и их статус в течение времени ожидания:

- счетчик будет использовать замещающие значения до следующего успешного доступа для записи вычислителя расхода;
- счетчик регистрирует момент сбоя связи и ее восстановления как события в журнале событий;
- и счетчик выдает предупреждение после потери связи.

Таблица F.1 — Таблица структуры данных, часть 1 — значения данных, не зависящих от траектории

Адрес	Тип	Наименование (фактические значения, не зависящие от траектории)	Единица измерения/описание
32768	Число с плав, точкой	Расход	[$м^3$/ч] или [$фут^3$/ч]
32770	Число с плав, точкой	Скорость газа	[м/с] или [фут/с]
32772	Число с плав, точкой	Скорость звука	[м/с] или [фут/с]
32774	dword	Общий счетчик объема газа (прямой поток)	[количество регистров]
32776	dword	Общий счетчик объема газа (обратный поток)	[количество регистров]

Окончание таблицы F. 1

Адрес	Тип	Наименование (фактические значения, не зависящие от траектории)	Единица измерения/описание
32778	dword	Счетчик объема газа (прямой поток) $V_{act\ forward}$	[количество регистров]
32780	dword	Счетчик объема газа (обратный поток) $V_{act\ reverse}$	[количество регистров]
32782	dword	Погрешность счетчика объема газа (прямой ПОТОК) $V_{act\ err}$ f_{orwarc}j	[количество регистров]
32784	dword	Погрешность счетчика объема газа (обрат-ный поток)\ V t Cl! icvcioc	[количество регистров]
32786	dword	Разрешение счетчика	Десятичная степень[3] наименьшей значащей цифры (допустимое значе-ние -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3) указанных выше регистров
32788	dword	Расход выше Q_t	0 = нет, не равный 0 = да
32790	dword	Коэффициент приема сигнала[13]	[%], концепция “светофора”: - 0 %...33 % = красный - 34 %...66 % = желтый - 67 %...100 % = зеленый
32792	dword	Состояние погрешности	Состояние = 0: погрешности нет Состояние <> 0: погрешность есть
32794	dword	Количество траекторий[0]	
32796	Число с плав, точкой	Отклонение скорости звука траектории 1	[^] C^jtjey- (ф — $C_a$vg)/Cavg Ю0
32798	Число с плав, точкой	Отклонение скорости звука траектории 2	[/o] Cz_dev “ (C2 — фуд^фуд ’ ^^
32800	Число с плав.точкой	Отклонение скорости звука траектории 3	[%] c3_dev = (ф - фудУфуд ' ^^
32802	Число с плав.точкой	Отклонение скорости звука траектории 4	[^] ^4_dev — (ф — фуд^фуд Ю0
32804	Число с плав, точкой	Отклонение скорости звука траектории 5	[%] c5_dev = (ф “ фудУфуд ' 100
32806	Число с плав.точкой	Отклонение скорости звука траектории 6	[^] c6_dev ~ (ф — фуд^фуд Ю^
32808	Число с плав, точкой	Отклонение скорости звука траектории 7	[/°] c7_dev ” (c7 — фуд^фуд ^^
32810	Число с плав, точкой	Отклонение скорости звука траектории 8[d]	[/°] c8_dev “ (ф ~ фуд^фуд ^^
32812 ... 32894		Зарезервировано для дополнительных траекто-рий и опциональной подписи набора данных	

[a] Целые числа регистров должны быть умножены на коэффициент 10^x м^3.

[b] Коэффициент приема сигнала должен быть определен как отдельное значение, зависящее от изготовителя, рассчитанное из всех отдельных скоростей приема сигнала на траекторию и нормированное. Нормированное значение представляет независимое от изготовителя значение от 0 до 100. Ноль соответствует максимально худшему, а 100 — максимально хорошему. Значения вне указанного диапазона не допускаются. Для значений коэффициента приема сигнала от 0 до 33 значение регистра «состояние погрешности» не равно 0.

[c] Рекомендуется, чтобы система связи учитывала информацию о регистре #32794 (количество траекторий) счетчика и адаптировалась к этому значению при считывании структур данных значений, связанных с траекторией, как показано в части 2 таблицы структуры данных.

[d] Значения скорости звука несуществующей измерительной траектории должны отвечать «нулевому» значению. Рекомендуется, чтобы система связи учитывала информацию о регистре #32794 (количество траекторий) при оценке полученных значений.

Таблица F.2 — Таблица структуры данных, часть 2 — значения данных, связанных с траекторией

Адрес	Тип	Наименование (фактические значения, связанные с траекторией)	Единица измерения/ описание
Траектория 1			
32896	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
32898	Число с плав, точкой	Скорость звука	[м/с]
32900	Число с плав, точкой	Коэффициент приема сигнала	[%]
32902	Число с плав, точкой	Соотношение сигнал/шум (S/N) AB	[ДБ]
32904	Число с плав, точкой	Соотношение сигнал/шум (S/N) BA	[ДБ]
32906	Число с плав, точкой	Усиление сигнала (AGC) AB	[ДБ]
32908	Число с плав, точкой	Усиление сигнала (AGC) BA	[ДБ]
32910	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 2			
32912	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
32926	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 3			
32928	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
32942	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 4			
32944	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
32958	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 5			
32960	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
32974	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
32976	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
32990	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 7			
32992	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	
33006	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
Траектория 8			
33008	Число с плав, точкой	Скорость на акустической траектории	[м/с]
		См. Траектория 1	

Окончание таблицы F.2

Адрес	Тип	Наименование (фактические значения, связанные с траекторией)	Единица измерения/ описание
33022	Число с плав, точкой	Зарезервированный, всегда = 0	
33024 .. 33278		Зарезервировано для дополнительных траекторий	
[a] В случае если система связи считывает структуру данных, связанную с траекторией, которая в счетчике отсутствует, счетчик может ответить ошибкой (код исключения 2).			

Таблица F.3 — Таблица структуры данных, часть 3 — виртуальная паспортная табличка счетчика

Адрес	Тип	Наименование (фактические значения, независящие от траектории)	Единица измерения/описание
33792	Символьный [16]	Изготовитель	Свободный текст не более 16 символов [a]
33800	Символьный [16]	Тип устройства/модель №	Свободный текст не более 16 символов
33808	Символьный [16]	Серийный номер	Свободный текст не более 16 символов
33816	Символьный [16]	Год выпуска	Свободный текст не более 16 символов
33824	Символьный [16]	Версия ПО	Свободный текст не более 16 символов
33832	Символьный [32]	Контрольная сумма ПО	Свободный текст не более 32 символов
33848	dword	Идентификатор системы единиц измерения	0: бар, °С, $м^3$, $м^3$/ч, м/с 2: МПа, К, $м^3$, $м^3$/ч, м/с
33850	dword	Идентификатор функциональности счетчика	бит 0: счетчик будет принимать и использовать записанные значения данных процесса для давления и температуры
			бит 1...31: зарезервированный
33852	Число с плав, точкой	Минимальный фактический расход в час[b]	$м^3$/ч , в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33854	Число с плав, точкой	Максимальный фактический расход в час	$м^3$/ч, в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33856	Число с плав, точкой	Минимальное рабочее давление	бар или МПа, в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33858	Число с плав, точкой	Максимальное рабочее давление	бар или МПа, в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33860	Число с плав, точкой	Минимальная рабочая температура	°С или К, в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33862	Число с плав, точкой	Максимальная рабочая температура	°С или К, в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
33864 ... 34047		Резервный диапазон	

[a] Строка символов отображается в непрерывном диапазоне регистров MODBUS. Строка должна быть выровнена по левому краю, а неиспользуемые байты должны определяться кодом 0x00.

Допустимые коды ASCII:

- диапазон от 0x20 (32) до 0x3F (63) включительно,
- диапазон от 0x41 (65) до 0x5A (90) включительно и
- диапазон от 0x61 (97) до 0x7A (122) включительно.

[b] Значения в регистрах 33852 ... 33862 должны соответствовать значениям, указанным на паспортной табличке.

Таблица F.4 — Таблица структуры данных, часть 4 — Значения данных процесса

Адрес	Тип	Наименование	Единица измерения/описание
34048	dword	Состояние процесса	Битовая строка, по одному биту на значение, указывающая состояние записанных значений[3] «1» — значение действительно «0» — значение неверно или не используется бит 0: значение #1 — давление газа бит 1: значение #2 — температура газа бит 2...31: неиспользуемые значения всегда 0
34050	Число с плав, точкой	Значение #1: давление газа (абсолютное)	бар или МПа в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
34052	Число с плав, точкой	Значение #2: температура газа	°С или К в соответствии с «идентификатором системы единиц», см. выше
34054	Число с плав, точкой	Значение #3: зарезервированное	
34112	Число с плав. Точкой	Значение #32: зарезервированное	

[a] Система связи, подключенная к счетчику, может записывать метрологически значимые измеряемые значения, например давление и температуру. В случае недействительных значений измерения в системе связи введенные значения с клавиатуры, настроенные в счетчике, должны использоваться в расчетах счетчиком. Счетчик должен обозначить эту ситуацию сигналом частичного отказа.

Счетчик должен сверять полученные измеренные значения с пределами согласно данным заводской таблички для рабочего давления и температуры. Если счетчик вычисляет расход с данными, превышающими эти пределы, расход считается недействительным.

События ошибок и/или предупреждений, связанные со значениями давления и температуры, должны регистрироваться в журнале событий счетчика.

F.2 Пример

Ниже приведен пример считывания полного набора (44 регистров) не зависимых от траекторий значений (см. таблицу, часть 1) ведущим устройством Modbus (например, вычислителем расхода) из USM, имеющего адрес подчиненного устройства Modbus «1».

Запрос

01 03 7F FF 00 2C 6D F3

Ответ

01 03 58 CO 00 69 72 BC AO E7 91 43 AB DA DC 00 00 00 2A 00 00 00 10 00 00 00 00 00 00 00 07 00 00 00 2A 00 00 00
08 00 00 00 03 00 00 00 00 00 00 00 64 00 00 00 01 00 00 00 08 3E 03 39 73 3D 1CAC 40 3CA8 62 21 3D 10 7D57 3E
01 A4 75 BE 5A 99 28 BC B1 67 0D BD E8 EF B2 5F 14

Представленные значения

Расход	-2,006436	$м^3/ч$
Скорость газа	-0,01964167	м/с
Скорость звука	343,7098	м/с
Общий счетчик объема газа (прямой поток)[a]	42	
Общий счетчик объема газа (обратный поток)	15	
Счетчик объема газа (прямой поток) $V_{act\ forward}$	0	
Счетчик объема газа (обратный поток) $V_{act\ reverse}$	7	
Погрешность счетчика объема газа (прямой поток) $V_{act\ err\ forward}$	42	
Погрешность счетчика объема газа (обратный поток) $V_{act\ err\ reverse}$	8	
Разрешение счетчика	3	10^3 $м^3$
Расход выше Q_t	0	

Коэффициент принятия сигнала	100	%
Состояние погрешности	1	
Количество траекторий	8	
Отклонение скорости звука траектории 1	0,1281488	%
Отклонение скорости звука траектории 2	0,03825021	%
Отклонение скорости звука траектории 3	0,0205546	%
Отклонение скорости звука траектории 4	0,03527578	%
Отклонение скорости звука траектории 5	0,1266039	%
Отклонение скорости звука траектории 6	-0,2134749	%
Отклонение скорости звука траектории 7	-0,02165558	%
Отклонение скорости звука траектории 8	-0,1137384	%
[a] Учитывая разрешающую способность передаваемого счетчика, равную 3, счетчик общего объема газа составляет 42 • 10^3 $м^3$ = 42000 $м^3$.		

Приложение G
(справочное)

Испытания на устойчивость к внешним возмущениям

Таблица G.1 — Испытания на устойчивость к внешним возмущениям

№	Испытание (соответствующий стандарт)	Предел отказа/ условия испытаний[0]	Необходимая помехоустойчивость
1	Сухое тепло IEC 60068-2-2 ([5])	MPE	Номинальная температура, продолжительность 2 часа
2	Холод IEC 60068-2-1 ([4])	MPE	Номинальная температура, продолжительность 2 часа
3	Влажное тепло, постоянный режим (без конденсации) IEC 60068-2-78 ([12])	MPE	Номинальная верхняя температура, относительная влажность 93 %, продолжительность 4 дня
4	Влажное тепло, циклические испытания (конденсация) IEC 60068-2-30 ([8])	7_2 MPE / NSFa	Номинальная верхняя температура при относительной влажности не менее 95 % во время изменения или при 93 % в верхней фазе, два цикла по 24 часа
5	Вибрация (случайная) IEC 60068-2-47 ([10]), IEC 60068-2-64 ([11])	7г MPE / NSFa	Диапазон частот: от 10 Гц до 150 Гц. Уровень RMS: 7 м • $с^{-2}$. Уровень ASD 10 Гц — 20 Гц: 1 $м^2$ • $с^{-3}$. Уровень ASD 20 Гц — 150 Гц: -3. дБ/октава, три оси, продолжительность на ось 2 мин
6	Механический удар IEC 60068-2-31 ([9])	7г MPE / NSFa	По одному разу на каждой грани, высота 50 мм
7	Излучаемые, радиочастотные, электромагнитные поля IEC 61000-4-3 ([23])	MPE / NSFd	Диапазон частот: от 26 МГц до 3 ГГц, напряженность поля: 10 В/м, модуляция: 80 % АМ', 1 кГц, синусоида
8	Кондуктивные радиочастотные поля IEC 61000-4-6 ([26])	MPE/NSFd	Диапазон частот: от 0,15 МГц до 80 МГц. Амплитуда РЧ: 10 В e.m.f. j (50 Ом), модуляция: 80 % AMi, синусоида 1 кГц
9	Электростатический разряд IEC 61000-4-2 ([22])	7г MPE / NSFa +d	Испытательное напряжение контактного разряда: 6 кВ, испытательное напряжение воздушного разряда: 8 кВ, 10 разрядов в каждом предварительно выбранном месте
10	Пачки (переходные процессы) на линиях сигналов, данных и управления IEC 61000-4-4 ([24])	7_2 MPE / NSFd	Амплитуда: 1 кВ, частота повторения: 5 кГц
11	Пачки (переходные процессы) в сетях переменного и постоянного тока IEC 61000-4-4 ([24])	7_2 MPE / NSFd	Амплитуда: 2 кВ, частота повторения: 5 кГц
12	Скачки (переходные процессы) в сетях переменного и постоянного тока IEC 61000-4-5 ([25])	7_2 MPE / NSFa+d	Между линиями 1,0 кВ, линия на землю 2,0 кВ

Окончание таблицы G. 1

№	Испытание (соответствующий стандарт)	Предел отказа/ условия испытаний[0]	Необходимая помехоустойчивость
13	Скачки на сигнальных линиях, линиях данных и управления IEC 61000-4-5 ([25])	$^1/_2$ MPE / NSFd	Несимметричные линии: между линиями 0,5 кВ, линия на землю 1,0 кВ. Симметричные линии: между линиями (нет), линия на землю 1 кВ. Экранированные линии ввода/вывода и связи: между линиями (нет), линия на землю 0,5 кВ
14	Изменение напряжения сети постоянного тока IEC 60654-2 ([18])	MPE	Переключение между верхним ($L/_{max}$) и нижним пределом ($t/_{min}$)
15	Изменение напряжения сети переменного тока IEC/TR 61000-2-1 ([19])	MPE	Напряжение сети: *Unom*]*^
16	Падения напряжения в сети переменного тока, кратковременные перебои и колебания напряжения IEC 61000-4-11 ([28]), IEC 61000-6-1 ([31]), IEC 61000-6-2 ([32])	$/_2$ MPE / NSFd	Тест a: 0 % 0,5 цикла. Тест Ь: 0 % 1 цикл. Тест c: 40 % 10/12[b] циклов. Тест d: 70 % 25/30[b] циклов. Тест e: 80 % 250/300[b] циклов
17	Падения напряжения, кратковременные прерывания и колебания напряжения в сети постоянного тока IEC 61000-4-29 ([30])	% MPE / NSFd	Падения напряжения: амплитуда: 40 % и 70 % от номинального напряжения, продолжительность: 10 мс; 30 мс; 100 мс. Короткие перерывы: амплитуда: 0 % от номинального напряжения, продолжительность: 1 мс; 3 мс; 10 мс. Колебания напряжения: амплитуда: 85 % и 120 % от номинального напряжения, продолжительность: 0,1 с; 0,3 с; 1 с; 3 с; 10 с
18	Пульсации в сети постоянного тока[a] IEC 61000-4-17 ([29])	$/_2$ MPE / NSFd	2 % от номинального напряжения

[a] Если применимо.
[b] Для 50 Гц/60 Гц соответственно.
[c] NSFa: (no significant fault) после возмущения не должно возникать существенных сбоев;
NSFd: во время возмущения не должно возникать существенных сбоев.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
130 4006:1991	—	*
ISO 5168:2005	—	*
ISO/IEC 17025	IDT	ГОСТ ISO/IEC 17025—2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его принятия рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандарта:

- IDT — идентичный стандарт.

Библиография

[1] ISO 5167-1:2003	Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 1: General principles and requirements
[2] ISO 9951:1993	Measurement of gas flow in closed conduits — Turbine meters
[3] ISO 11631:1998	Measurement of fluid flow — Methods of specifying flowmeter performance
[4] IEC 60068-2-1	Environmental testing — Part 2-1: Tests — Test A: Cold
[5] IEC 60068-2-2	Environmental testing — Part 2-2: Tests — Test B: Dry heat
[6] IEC 60068-2-6	Environmental testing — Part 2-6: Tests — Test Fc: Vibration (sinusoidal)
[7] IEC 60068-2-18	Environmental testing — Part 2-18: Tests — Test R and guidance: Water
[8] IEC 60068-2-30	Environmental testing — Part 2-30: Tests — Test Db: Damp heat, cyclic (12 h + 12 h cycle)
[9] IEC 60068-2-31	Environmental testing — Part 2-31: Tests — Test Ec: Rough handling shocks, primarily for equipment-type specimens
[10] IEC 60068-2-47	Environmental testing — Part 2-47: Test — Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests
[11] IEC 60068-2-64	Environmental testing — Part 2-64: Tests — Test Fh: Vibration, broadband random and guidance
[12] IEC 60068-2-78	Environmental testing — Part 2-78: Tests — Test Cab: Damp heat, steady state
[13] IEC 60068-3-1	Environmental testing — Part 3: Background information — Section 1: Cold and dry heat tests
[14] IEC 60068-3-4	Environmental testing — Part 3-4: Supporting documentation and guidance — Damp heat tests
[15] IEC 60068-3-8	Environmental testing — Part 3-8: Supporting documentation and guidance — Selecting amongst vibration tests
[16] IEC 60512-14-7	Electromechanical Components for Electronic Equipment— Basic Testing Procedures and Measuring Methods — Part 14: Sealing Tests — Section 7: Test 14g: Impacting Water
[17] IEC 60529	Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
[18] IEC 60654-2	Operating conditions for industrial-process measurement and control equipment — Part 2: Power
[19] IEC/TR 61000-2-1	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2: Environment — Section 1: Description of the environment — Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems
[20] IEC 61000-2-2	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-2: Environment — Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
[21] IEC 61000-4-1	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-1: Testing and measurement techniques — Overview of IEC 61000-4 series
[22] IEC 61000-4-2	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test
[23] IEC 61000-4-3	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-3: Testing and measurement techniques — Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
[24] IEC 61000-4-4	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-4: Testing and measurement techniques — Electrical fast transient/burst immunity test
[25] IEC 61000-4-5	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-5: Testing and measurement techniques — Surge immunity test
[26] IEC 61000-4-6	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-6: Testing and measurement techniques — Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields
[27] IEC 61000-4-8	Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-8: Testing and measurement techniques — Power frequency magnetic field immunity test

[28] IEC 61000-4-11 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-11: Testing and measurement techniques — Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests

[29] IEC 61000-4-17 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-17: Testing and measurement techniques — Ripple on d.c. input power port immunity test

[30] IEC 61000-4-29 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-29: Testing and measurement techniques — Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input power port immunity tests

[31] IEC 61000-6-1 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 6-1: Generic standards — Immunity for residential, commercial and light-industrial environments

[32] IEC 61000-6-2 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 6-2: Generic standards — Immunity for industrial environments

[33] ISO/IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)

[34] API MPMS 13.2:1996 Manual of petroleum measurement standards — Chapter 13: Statistical aspects of measuring and sampling — Section 2: Methods of evaluating meter proving data

[35] Transmission Measurement Committee. Speed of sound in natural gas and other related hydrocarbon gases. Washington, DC: American Gas Association, 2003. (AGA Report No. 10.)

[36] OIML R 137-1 & 2:2012 Gas Meters — Part 1: Metrological And Technical Requirements; Part 2: Metrological Controls And Performance Tests, https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r137-p-e12.pdf

[37] AGA Transmission Measurement Committee. Measurement of gas by multipath ultrasonic meters, 2nd Edition. Washington, DC: American Gas Association, 2007. (AGA Report No. 9.)

[38] Broca O., Escanda J., Delenne B. Influence of flow conditions on an ultrasonic flow meter. Flomeko 2003

[39] de Boer G., Huijsmans F. New design concepts in ultrasonic gas flow meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 2000

[40] de Boer G., Kurth M. Investigation regarding installation effects for small ultrasonic metering packages. North Sea Flow Measurement Workshop, 1999

[41] Bokhorst E. Impact of pulsation sources in pipe systems on multipath ultrasonic flow meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 2000

[42] Brown G. Velocity profile effects on multipath ultrasonic flow meters. 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 2006

[43] Calogirou A., Boekhoven J., Henkes R.A.W.M. Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters. Flow Meas. Instrum. 2001, 12 (3), pp. 219—229

[44] Commissaris K.H., De Boer G. Realisation of compact metering runs with ultrasonic gas flow meters and reducing measurement uncertainty. Flomeko, 2003

[45] Coull J.C., Barton N.A. Investigation of the installation effects on ultrasonic flow meters and evaluation of computational fluid dynamics prediction methods. North Sea Flow Measurement Workshop, 2002

[46] Dane H.J., Wilsack R. Upstream pipe wall roughness influence on ultrasonic flow measurement. AGA Operations Conference, 1999

[47] Drenthen J.G., Kurth M., Vermeulen M. The use of ultrasonic flow meters at M&R stations. AGA Operations Conference, 2006

[48] Drenthen J.G., De Boer G. The manufacturing of ultrasonic gas flow meters. Flow Meas. Instrum. 2001, 12 (2), pp. 89—99

[49] Drenthen J.G., De Boer G. Temperature and pressure correction for ultrasonic gas flow meters. Instromet International publication, 1999-03

[50] Drenthen J.G. The use of the speed of sound as a verification tool. Instromet International publication, 2000-03

[51] Drenthen J.G., Kurth M. Van Klooster, J. A novel design of a 12 chord ultrasonic gas flow meter with extended diagnostic functions. AGA Operations Conference, 2007

[52] Folkestad T, Flolo D., Tunheim H., Nesse O. Operating experience with two ultrasonic gas meters in series. North Sea Flow Measurement Workshop, 2003

[53] Furuichi N., Sato H., Terao Y. Effect of surface roughness of pipe wall for transit time ultrasonic flowmeter. 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 2006

[54] GERG Project Group. Present status and future research on multi-path ultrasonic gas flow meters. Programme Committee No. 2: Transmission and Storage, Groupe Europeen de Recherches Gazieres, 1995. (GERG Technical Monograph 8.)

[55] GERG Project Group. GERG project on ultrasonic gas flow meters, Phase II. (GERG Technical Monograph 11)

[56] GERG Project Group. Evaluation of flow conditioners — Ultrasonic meter combinations. North Sea Flow Measurement Workshop, 2004

[57] Grimley TA. Performance testing of ultrasonic flow meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 1997

[58] Karnik U., Geerlings J. The effect of steps and wall roughness on multipath ultrasonic meters. 5th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 2002

[59] Kaye & Laby: Tables of physical and chemical constants. Available (2010-08-02) at: http://www.kayelaby.npl.co.uk/

[60] Kegel TM. Uncertainty analysis of turbine and ultrasonic meter volume measurements. AGA Operations Conference, Orlando, FL, 2003-05

[61] Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. on behalf of GERG Working Groups 1.34 and 1.46. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. Dusseldorf: VDI, 2007. (GERG Technical Monograph 15.) Available (2010-08-02) at: http://www.gerg.info/publications/tm/tm15_04.pdf

[62] Lansing J., De Boer G. Benefits of dry calibration of ultrasonic gas flow meters. AGA Operations Conference, 1998

[63] Lunde P. et al. Pressure and temperature effects forormen lange ultrasonic gas flow meters. 25th International North Sea Flow Measurement Workshop, Gardermoen, Norway, 2007-10-16/19

[64] Lunde P, Froysa K.-E. Ormen Lange ultrasonic gas flow meters — A study for establishment of corrections for pressure and temperature effects. CMR-06-A10048-RA-01, Bergen (Norway), 2007-03-12

[65] Mantilla J., Haner W. Process variable stability, data processing and installation end environmental influences during ultrasonic meter calibration. 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 2006

[66] Moore P.I., Brown G.J., Stimpson B.R Modelling of transit time ultrasonic flow meters in theoretical asymmetric flow. Flomeko, 2000

[67] Moore RI. Modelling of installation effects on transit time ultrasonic flow meters in circular pipes, Ph.D. thesis. University of Strathclyde, 2000

[68] Morrison G.L., Tung K. Numerical simulation of the flow field downstream of 90 degree elbows and the simulated response of an ultrasonic flow meter. Chicago, IL: Gas Research Institute, 2001. (Report No. GRI-01/0090)

[69] Morrison G.L. Pipe wall roughness effect upon orifice and ultrasonic flow meters. Chicago, IL: Gas Research Institute, 2001. (Report No. GRI-01/0091)

[70] Morrison G.L., Brar P. CFD evaluation of pipeline gas stratification at low flow due to temperature effects. Chicago, IL: Gas Research Institute, 2004. (Topical Report GRI-04/0185)

[71] Morrow TB. Line pressure and low-flow effects on ultrasonic gas flow meter performance. Chicago, IL: Gas Research Institute, 2005. (Topical Report GRI-05/0133)

[72] Riezebos H.J. Whistling flow straighteners and their influence on US flow meter accuracy. North Sea Flow Measurement Workshop, 2000

[73] Young W.C., Budynas R.G. Roark's formulas for stress and strain, 7th Edition. New York, NY: McGraw-Hill, 2002. 852 p.

[74] Sloet G.H. Bi-directional fiscal metering stations by means of ultrasonic meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 1999

[75] Sloet G., Nobel G. Experiences with ultrasonic meters at the Gasunie export stations. North Sea Flow Measurement Workshop, 1997

[76] Vermeulen M.J.M., De Boer G. A model for the estimation of the ultrasonic noise level emitted by pressure regulating valves and its influence on ultrasonic flow meters. North Sea Flow Measurement Workshop, 2003

[77] Vermeulen M.J.M., De Boer G., Buijen van Weelden A., Botter E., Dijkmans R. Coded multiple burst (CMB) signal processing applied to ultrasonic flow meters in applications with high noise levels. North Sea Flow Measurement Workshop, 2004

[78] Volker H., Wehmeier M., Dietz T, Ehrlich A., Dietzen M. The use of an 8 path ultrasonic meter as a reference standard. 5th International South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, 2005

[79] Whitson R.J., Casey N. Review of report: Ormen Lange ultrasonic gas flow meters —A study for establishment of corrections for pressure and temperature effects. TUV NEL— Report 2007/290 for Norwegian Petroleum Directorate, 2007-12

[80] Wilsack R. Integrity of custody transfer measurement and ultrasonic technology. CGA Measurement School, 1996

[81] Zanker K. The calibration, proving and validation of ultrasonic flow meters. 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement, 2006

[82] ISO 800004 Quantities and units — Part 4: Mechanics

[83] Modbus Organization. Technical Resources. [Online] http://modbus.org/specs.php.

[84] Hinze “Turbulence” second edition, 1975, McGraw-Hill

[85] Drenthen J.G. Diagnostics, verification and validation of ultrasonic gas measurement systems. Ceesi, European Flow measurement Workshop 2017

[86] V.d. Heuvel, Doorman, Herik, Stehouwer & Kruithof: Calibration errors of ultrasonic flow meters in the Bernoulli laboratory due to non-isothermal flow conditions, NSFMWS 2009

[87] ISO/IEC Guide 983:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement

[88] AGA Transmission Measurement Committee. AGA Report No. 8, Part 1, Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases, DETAIL and GROSS Equations of State

УДК 681.121.89:006.354 ОКС 17.120.10

Ключевые слова: измерение, расход, закрытые каналы, ультразвуковые счетчики газа, коммерческий учет, распределение

Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 10.12.2025. Подписано в печать 27.01.2026. Формат 60x847в. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 10,12.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru