

# Расходомерия факельных газов: уменьшаем неожиданности

Max Melnyk, Anatoli Chtcherbakov  
Lauris Technologies Inc., Coquitlam, BC, Canada

Anton Soukhachev  
Simon Fraser University, BC, Canada

Boris Melnik  
BG Technology, Novosibirsk, Russia

## Введение

Измерение потоков факельных газов представляет собой сложную задачу и данные расходомеров, установленных на факельных линиях, часто полны неожиданностей. Неожиданные результаты стимулируют исследования влияния профиля потока и заключений о пригодности одних методов измерения по сравнению с другими. Показатели работоспособности и качества часто приносятся в жертву удобству и стоимости, особенно на малых производствах, когда стоит вопрос о выборе расходомеров.

Доклад на недавнем годовом собрании ассоциации переработчиков газа (GPA – Gas Processors Association) ставил под вопрос пригодность существующих времяпролетных однолучевых ультразвуковых расходомеров для измерения потоков факельных газов.<sup>1</sup> Указывалось, что такие расходомеры весьма неточны при установке в изогнутых факельных линиях и предполагалось, что многоточечные трубки Пито будут более подходящими для таких измерений. Такая точка зрения может лишить пользователей технологии, которая прошла, как никакая другая, самые детальные проверки, включая влияние шероховатости труб, загрязнения преобразователей и т.п.



перед тем, как быть принятой для фискальных измерений газов. С момента своего появления, ультразвуковая технология признается наилучшей для измерения факельных газов.<sup>2,3</sup>

Другой неожиданностью можно назвать растущую рекламу масс-термальных расходомеров, как наиболее удобоприемных для факельных и вентиляционных измерений.<sup>4,5</sup> Почти столь же недорогие как и трубки Пито, термальные зонды достаточно лишь установить в трубе через единственный порт и получать точные значения расхода факельного газа. Это выглядит просто, однако зонд начнет показывать неожиданные результаты, как только состав факельного газа изменится.

Данная статья содержит наши экспериментальные результаты о применимости дешевых расходомеров для измерения факельных газов. Также приводится анализ ограничений традиционных времяпролетных расходо-

ров, которые используются в настоящее время в расходомерии факельных газов. Параллельно приводятся характеристики ультразвуковых фазопреломных расходомеров на основе полученных нами экспериментальных данных.

## 1. Специфика факельных газов

Особенности измерения расхода факельного газа известны со времени установки первых расходомеров для измерения этого огромного убытка энергии, составляющего ежегодно 40 миллиардов долларов. Ими являются:

**Низкая скорость** газового потока в нормальных условиях работы, факельные газы – это отходы и их стараются сводить к минимуму. Канадское законодательство, например, требует непрерывного измерения на добывающих и перерабатывающих предприятиях, где расход факельного или вентилируемого газа превышает 500м<sup>3</sup> в день. Такой поток соответствует скоростям 0.08 м/сек в 12-дюймовой трубе (30см);

**Очень высокая скорость** газа в экстремальных условиях (аварийный выдув). Некоторые факельные системы проектируются для скоростей выше 130 м/сек с целью пропускания гигантских потоков в миллионы кубических метров во избежание взрыва;

**Переход** от нормального до экстремального режимов может составлять единицы минут.

**Препятствие потоку** должна быть минимальным или вовсе обструкция не допускается для обеспечения беспрепятственного сброса газа во время аварийного выдува;

**Низкое давление**, часто атмосферное, обычно слегка негативное (вытяжка) до слегка положительного;

**Химический состав** может изменяться в зависимости от режима потока, захвата конденсата потоком, влаги и т.д.

Все это оставляет немного возможностей для трубок Пито с их ограниченным динамическим диапазоном (менее чем 10:1) и чувствительностью к жидкостям и засорению.

## 2. Масс-термальные расходомеры

### 2.1. Влияние состава газа

Масс-термальные расходомеры изготавливаются в большом количестве рядом производителей и получили хорошую репутацию при измерении чистых газов. Их пригодность для измерения расходов факельных и вентиляционных газов, однако, не столь очевидна, как это зачастую рекламируется. Основа масс-термальных расходомеров, анемометрия нагретой проволоки, включает в себя, помимо скорости, тепловые свойства подвижной среды. Это родимое пятно масс-термальных расходомеров, аналогично как и других методов имеющих свои специфические особенности. Например, перепад давления в дифференциальных расходомерах зависит, помимо скорости, от размера сужающего устройства и плотности среды. Увеличение числа датчиков температуры на самом деле не представляет собой новой парадигмы в масс-термальной анемометрии. Это лишь эквивалентно разделению крупного сужающего устройства в расходомере переменного давления на ряд малых без знания реальных размеров каждого из них. Естественно это не решает проблемы без обращения к калибровке в идентичной среде.

Один из производителей масс-термальных расходомеров признал недавно этот принципиальный недостаток в своей патентной заявке.<sup>6</sup> Проведенный изготовителем тест показывал, что добавка лишь 1,6% водяной пыли к воздушному потоку приводило к увеличению выходного сигнала в 14 раз. Подобная ошибка в 1400% делает масс-термальные расходомеры бесполезными для измерения факельных газов т.к. мокрота может изменяться непредсказуемо вследствие влажности, захвата жидкости сепараторами, аварийных выдувов, и т.д.

Установка завихрителя перед нагреваемым контактом для осушки газа путем центрифугирования мокроты выглядит привлекательно, однако практическая выгода от такого решения остается под вопросом. Завихритель добавит еще одну неопределенность к измерениям, вызванную локальными возмущениями потока, которые будут зависеть от скорости газа, диаметра трубы, размера капель, и т.д. Рис. 1 показывает влияние содержания водяной пыли на показания масс-термального расходомера. Экспериментальная установка включала 6-дюймовую трубу, вентилятор, и эталонный измеритель, установленные на скорость воздуха в 2,5 м/сек. Водяная пыль создавалась ультразвуковыми распылителями, один из которых генерировал частицы диаметром 2 мкм, другой – 40 мкм. Массовая фракция воды составляла 1,1%. Тест указал на различие показаний в зависимости от размера водяных частиц. Различие в общем увеличении показаний (9,6 раз для малых частиц и 7,2 раза для больших частиц), вероятно, происходило из-за низкой скорости и влияния гравитации.

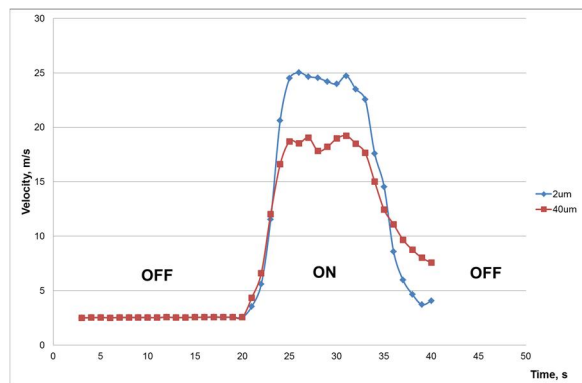


Рис. 1. Выход масс-термального расходомера в сухом воздухе (дымка OFF) и влажном воздухе (дымка ON). Средний диаметр капель 2 мкм и 40 мкм.

## 2.2. Влияние загрязнения

Перенос тепла к и от тепло-чувствительного контакта зависит от интерфейса между контактом и протекающим газом. Покрытие контакта жидким слоем углеводородов и сажи уменьшает передачу тепла и изменяет показания масс-термального расходомера. Зная этот принципиальный недостаток производители забрасывают клиентов заявлениями о нечувствительности их приборов к загрязнениям.

Руководство пользователя под авторством основателя одного из производителей масс-термальных расходомеров указывает, что пользователи будут испытывать эффект загрязнения и с целью уменьшения погрешности им следует ждать одну-две недели пока покрытие окончательно не образуется и показания стабилизируются.<sup>7</sup> Однако это не устраняет проблему поскольку неизвестно, где процесс образования налета был прерван, отсутствуют данные о реальном потоке т.к. прибор калибровался до того, как он был покрыт слоем угольной пыли, маслом, и т.п. Используемый термин «небольшое количество остаточного покрытия» также весьма неопределен и в сильной степени зависит от конкретных условий эксплуатации.

Мы провели следующий тест на влияние загрязнения. Чистый масс-термальный

расходомер был помещен в центре 6-дюймовой трубы длиной 7,5 м. Верхний и нижний участки трубы были 30D и 20D, соответственно. Поток воздуха скоростью 1,0 м/сек создавался вентилятором и эталонным расходомером переменного давления. Тест проводился в нормальных лабораторных условиях (температура +18.5С, влажность 75%). Данные регистрировались каждую секунду в течение одного часа.

Тест с чистым зондом показал постоянный сдвиг около 1,5%, что соответствовало спецификации на прибор. Тот же прибор, покрытый слоем чистого синтетического моторного масла, вел себя совершенно по-другому (Рис.2). В начале теста, он измерял почти 55% выше 1.0 м/сек, разница уменьшилась до приблизительно 37% после 15 минут и оставалась неизменной после этого. Можно предположить, что показания изменились в следствие уменьшения толщины слоя под влиянием силы тяжести и изначальном высыхании масла. Это лишь подчеркивает факт того, что масс-термальные расходомеры чувствительны к жидкостным субстанциям в факельных линиях

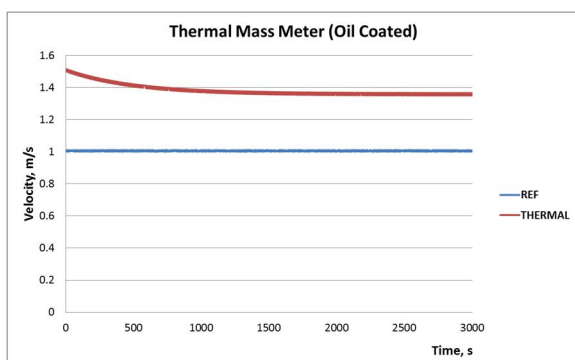


Рис. 2. Показания масс-термального расходомера, покрытого синтетическим моторным маслом

Второй тест на эффект загрязнения (см. ниже) не был проведен т.к. масс-термальный расходомер показывал сдвиг при нулевой скорости воздуха и этот сдвиг не устранялся путем обычного обнуления.

### 3. Традиционные ультразвуковые расходомеры газа

#### 3.1. Работа на малых скоростях

За традиционными времяпролетными ультразвуковыми расходомерами газа (УРГ) установилась репутация наиболее пригодных для измерения факельных газов. Ни один из других расходомерных методов (за исключением, возможно, оптических расходомеров<sup>8</sup>) не может обеспечить динамический диапазон 2000:1. Минимальная скорость газа для УРГ заявлялась на уровне 0,03 м/сек или 0,1 фт/сек, установленном для удовлетворения контроля выбросов на нефтеперерабатывающих предприятиях, впервые принятых в Калифорнии в 1998 году.

Все три наиболее активные производители УРГ для факельных газов рекламируют точность своих приборов от  $\pm 2,5\%$  до  $\pm 5,0\%$  на всем диапазоне скоростей. Однако, их некоммерческие публикации указывают на то, что этот уровень еще далеко не достигнут.<sup>9</sup> В частности, УРГ при нулевой скорости показывал значения скоростей изменяющиеся в пределах от -0,3 до 0,3 м/сек в 60-дюймовой факельной трубе низкого давления.

Причина объяснялась наличием поперечного течения, вызываемым термальной конвекцией в больших трубах (Рис.3).

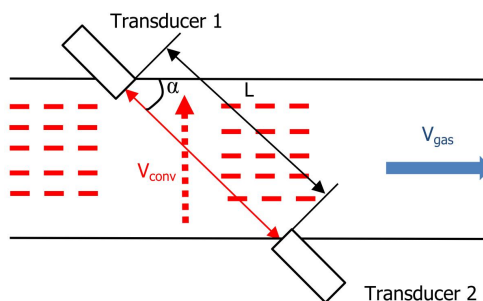


Рис.3. Иллюстрация влияния термальной конвекции при измерении на малых скоростях

Температурный градиент в трубе приводит к возникновению конвекции газа. Дополнительно к продольному потоку газа со скоростью  $V_{gas}$ , газ приобретает вертикальную компоненту скорости  $V_{conv}$  которая возрастает с увеличением диаметра трубы и разностью температур между верхом и низом трубы. Вертикальная компонента вносит поправку к измеряемой разности времен вдоль-и-против потока вследствие влияния проекции скорости на путь  $L$ :

$$V_{conv} \sin(\alpha)$$

где  $\alpha$  – угол между ультразвуковым лучем и трубой.

Продольная установка датчиков устраняет влияние поперечного потока. Это также позволяет увеличивать продольное расстояние  $L$  между датчиками без ограничения размером трубы. Расстояние  $L$  в действительности прямо влияет на минимально измеряемую скорость время-пролетным методом. Однако, хотя такое решение может оказаться полезным для малых скоростей, оно будет ограничивать верхнюю скорость  $V_{max}$  вследствие дополнительной турбуленции, генерируемой на держателях датчиков (Рис.4).<sup>10</sup>

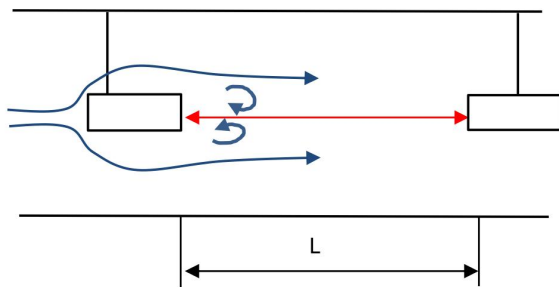


Рис. 4. Осевое расположение датчиков снижает  $V_{min}$ , но одновременно снижает и  $V_{max}$  из-за дополнительной турбуленции

### 3.2. Работа на высоких скоростях

Во время аварийного сброса скорость факельных газов может превышать 100м/сек. Некоторые операторы в канадских провинциях Британская Колумбия и Альберта требуют максимальной скорости измерения вплоть до 150 м/сек исходя из P&ID расчетов.

Высокая скорость влияет на традиционные УРГ несколькими путями. Во-первых, звук сдувается уменьшая, таким образом, величину сигнала на приемнике (Рис.5).

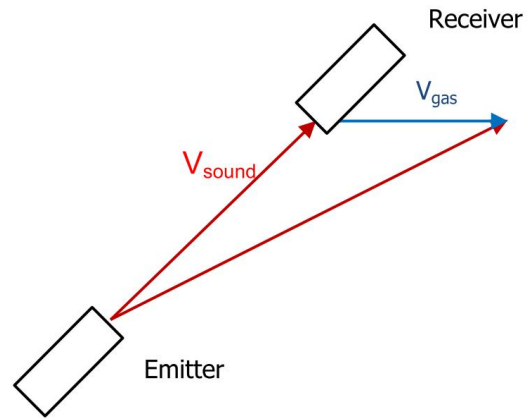


Рис.5. Звук сносится на высокой скорости газа  $V_{gas}$  уменьшая величину сигнала на приемнике

Этот эффект может быть уменьшен путем использования датчиком с более широкой диаграммой направленности. Однако генерация звука в более широком телесном угле уменьшает величину сигнала.

Кроме того, датчики могут ориентироваться против потока, как показано на Рис. 6.

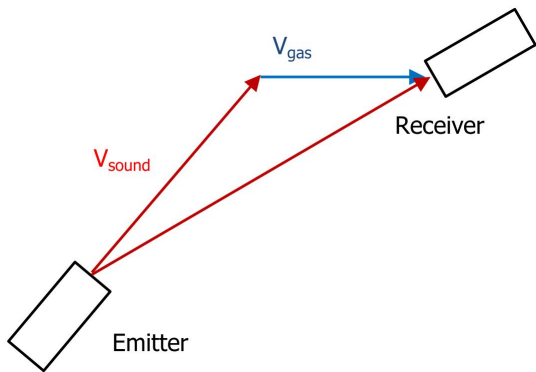
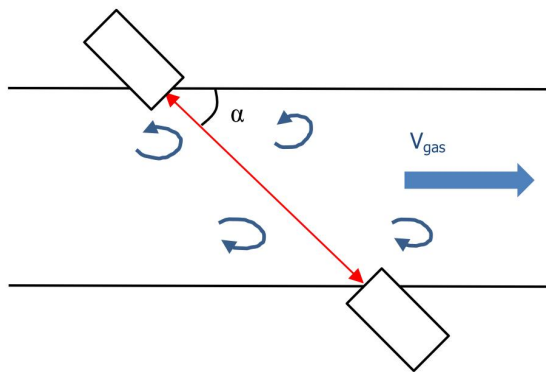


Рис.6. Ориентация датчиков против газового потока для уменьшения эффекта сдувания

Однако такое расположение будет уменьшать  $V_{min}$  из-за снижения отношения сигнал-шум.

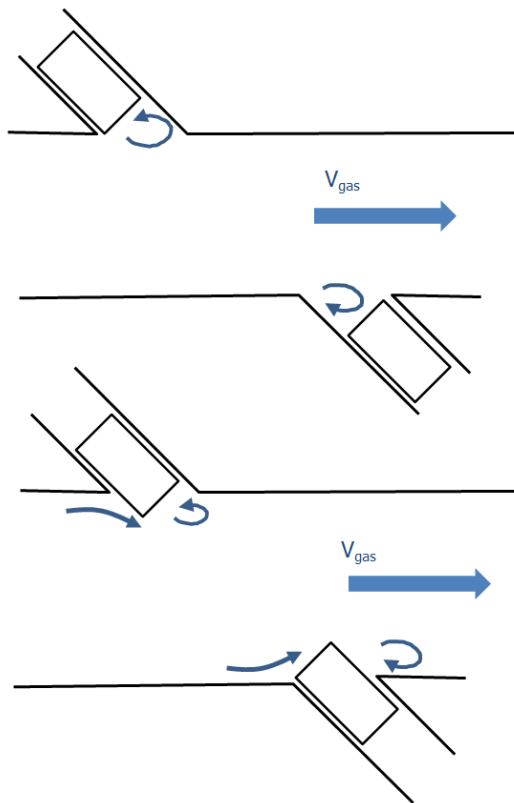
Турбулентия вызывает поперечную скорость газа в трубе, как описано Rans<sup>11</sup> (Рис.7). Это изменяет временные интервалы до-и-против течения случайным образом и увеличивает ошибку измерения.



Фиг.7. Поперечное течение, вызываемое турбуленцией

Подобный эффект еще больше усиливается путем увеличения длины пути и изменения трамсы ультразвукового сигнала.<sup>12,13</sup>

Ориентация датчиков под углом  $\alpha$  во время-пролетном методе связана с появлением углублений или выступов в трубе, которые становятся источником дополнительной турбулентии на скоростях выше 20 м/сек (Рис.8).



Фиг.8. Турбулентия, вызываемая угловым расположением датчиков во время-пролетном методе

#### 4. Решения Lauris Technologies Inc.

Компания Lauris Technologies Inc. как раз и сосредоточена на нефискальных измерениях потоков газа, которые представляются затруднительными для традиционных ультразвуковых и других методов измерения. Применения включают в себя измерения:

1. Факельных газов в малых и больших факельных линиях диаметром от 0,15 м до 1,0 м;
2. Дымовых газов в средних и больших трубах диаметром от 0,9 м до 15 м;
3. Попутных газов в сеператорах и газомерных установках с трубами диаметром от 50 мм до 150 мм;
4. Вентиляционных и попутных газов в трубах от 15 мм до 50 мм;

5. Сланцевых газов во время сверления и подготовки скважин, диаметры труб от 100 мм до 200 мм.

#### 4.1. Фазопробные измерения

Расходомеры для измерения факельных газов в малых и средних трубах компании Lauris Technologies Inc. основаны на фазопробном методе измерения, как иллюстрируется на Рис.9.

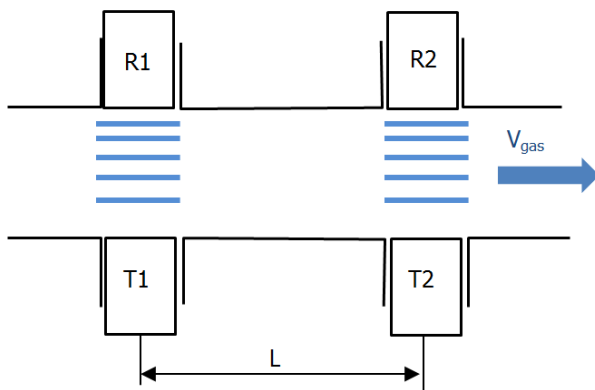


Рис.9. Схема фазопробного ультразвукового расходомера

Фазопробный УРГ включает в себя как минимум две пары ультразвуковых преобразователей, размещенных на противоположных сторонах трубы, и сдвинутых одна относительно другой на расстояние  $L$ . Каждая пара состоит из передатчика (Т) и приемника (R). Передатчики и приемники монтируются заподлицо со стенкой трубы и просвечивают трубу перпендикулярно газовому потоку. Сдвиг фазы между сигналами двух пар записывается в устройстве обработки сигналов и является пропорциональным скорости потока  $V_{gas}$ .

Передатчики и приемники могут устанавливаться друг против друга (Фиг.10,а) или располагаться из расчета отражения от противоположной стенки (Фиг.10,б), при

котором увеличивается длина прохождения ультразвукового луча и, соответственно, накопленная фаза.

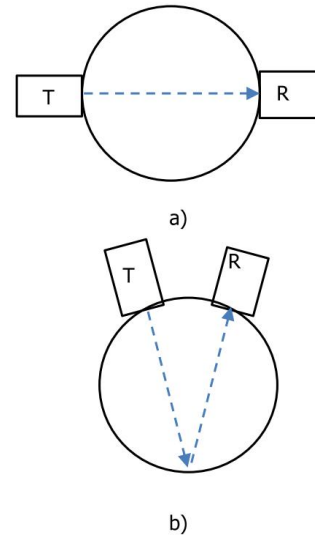


Рис.10. Расположение датчиков: прямое (а) и отражательное (б)

Отражательное или зеркальное расположение датчиков иногда выгодно в малых трубах. Однако это решение может ограничивать максимальную скорость  $V_{max}$  из-за того, что датчики не могут быть установлены точно заподлицо со стенкой трубы.



Fig.11. Flow meter FC1221-6

На Рис 11. представлена фотография фланцевого варианта фазопролетного расходомера модели FC1221-6, имеющего 6-дюймовый просвет для совмещения с трубой Schedule 40 piping и ANSI #150 фланцев.

#### 4.2. Минимальная скорость

Минимальная скорость  $V_{min}$ , обеспечиваемая фазо-пролетным методом не ограничивается наличием неконтролируемых выхрей и поперечных потоков, а как раз наоборот – отсутствием каких либо изменений фазы ультразвукового импульса, проходящего через движущийся газ. Идеально ламинарный поток не вызывает изменений фазы ультразвукового сигнала и, поэтому, не может быть измеренным данным методом.

Значение  $V_{min}$  может рассчитываться через число Рейнольдса на границе ламинарного режима потока ( $Re=2000$ ) как

$$V_{min} = \frac{\mu 2000}{D\rho}$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость газа;  $D$  – диаметр трубы и  $\rho$  – плотность газа.

Действительное значение минимальной скорости оказывается ниже расчетного вследствие влияния шероховатости трубы, турбуленции, возникающей на фланцах и сварных швах, вибрации труб, и т.д. Выхри и поперечные потоки в больших трубах также вносят положительный эффект на снижение  $V_{min}$ . Экспериментально мы установили, что реальное значение  $V_{min}$  в прямых трубах примерно на 25% меньше расчетного. Изгиб трубы, соединение труб, рукава и другие атрибуты реального трубоукладывания еще больше снижают  $V_{min}$ . Например, минимальная скорость воздуха снижается с 0,18 м/сек до 0,05 м/сек в 6-дюймовой трубе если расходомер установлен на расстоянии 10 диаметров после 90-градусного колена.

Минимальная скорость может быть еще дальше понижена путем генерации турбуленции потока с использованием механических или термальных турбуляторов. Таким путем  $V_{min}$  может быть снижена до 1 см/сек в трубе в несколько дюймов. Необходимо иметь в виду, однако, что механические турбуляторы будут ограничивать максимальную скорость из-за увеличения газодинамического сопротивления и появления периодической осцилляции плотности вследствие эффекта Кармана. Последнее вызывает неопределенность сигнала, приводя, таким образом, к затруднению точного измерения фазы.

#### 4.3. Максимальная скорость

Перечисленные выше факторы, ограничивающие  $V_{max}$  у времяпролетных УРГ, не относятся к фазопролетному методу. Этот метод работает на обратном принципе – чем выше неоднородность потока, тем лучше сигнал. Эффект сдувания также становится минимальным так как лучи направляются перпендикулярно к потоку. Точное значение  $V_{max}$  необходимо еще установить экспериментально. Это становится проблемой вследствие необходимости создания огромных потоков в трубах более 12 дюймов и скоростях выше 100 м/сек. Следующий начальный тест на определение верхнего предела скорости был проведен на нашем предприятии (Рис.11).

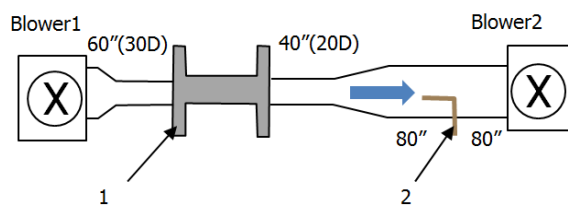




Рис.12. Схема 2-дюймового стенда для проверки расходомера FC1221 на максимальную скорость. 1- расходомер; 2- трубка Пито

Расходомер малого диаметра, модель FC1221-2 (внутренний диаметр 2 дюйма, расстояние между лучами 30 мм) был установлен на 2-дюймовом стенде, который включал 30-диаметровый верхний и 20-диаметровый нижний участки и передний вентилятор (Blower 1). Труба расширялась в 4-дюймовую с помощью 20-дюймового расширителя, а 4-дюймовая труба имела 160-дюймовую длину, по середине которой была установлена трубка Пито, таким образом обеспечивались 20-диаметровые верхние и нижние участки для эталонного расходомера. Второй вентилятор (Blower 2) был установлен на выходе 4-дюймовой трубы. Коэффициент преобразования  $\times 4$  был использован для пересчета скорости потока через расходомер FC1221-2 не учитывая сжимаемости воздуха т.к. увеличение давления в 2-дюймовой трубе было незначительным. Усреднение сигнала в 1 сек было установлено в фиксированном режиме т.к. FC1221 автоматически уменьшает усреднение при увеличении скорости.

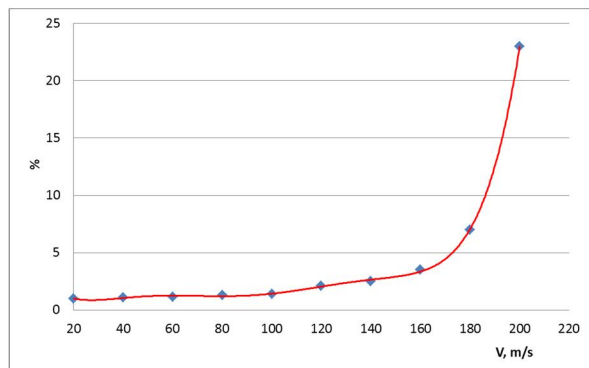


Рис.13. Неопределенность скорости ( $2\sigma$ ) как функция скорости

Данные, представленный на Рис.13 показывают, что исходя из точности в 5% расходомер FC1221-2 способен измерять потоки до 170 м/сек, а при 10%-ом пределе поток может измеряться до 190 м/сек.

При необходимости максимальная скорость  $V_{max}$  может быть увеличена дальше за счет увеличения фильтрации сигнала и выравнивания потока путем использования длинных труб и сглаживания соединенной. Установка датчиков в трубе влияет на ошибку скорости в наибольшей степени при скоростях выше 120 м/сек. Небольшое выдвижение или углубление датчика в трубе уменьшает  $V_{max}$  вследствие изменения фазы в непосредственной близости от датчика. Так, в 2-дюймовой трубе осевое смещение датчика на 1мм увеличивает ошибку скорости в 3 раза уменьшая таким образом  $V_{max}$  ниже 100 м/сек. Так как внешний диаметр датчиков составляет 20 мм, то этот эффект уменьшается с увеличением диаметра трубы D.

#### 4.4. Влияние установки

Влияние изгиба трубы исследовалось на стенде с 6-дюймовой ПВХ трубой категории 40. Стенд включал 22-диаметровый верхний и 20-диаметровый нижний участки. Тестировался расходомер модели FH1223-6 (фланцы ANSI 150, длина корпуса 500 мм, расстояние между лучами 120 мм), работающий в фазо-пролетном режиме. Набор из трех расходомеров переменного давления использовался в качестве эталонного измерителя, перекрывающего диапазон скоростей от 0,2 до 25 м/сек.

Было выполнено шесть тестов с одиночным 90-градусным коленом для трех установок: 10, 4 и 2 диаметра трубы (10D, 4D и 2D) и двух ориентаций: в плоскости лучей и перпендикулярно плоскости лучей. Прямой участок перед коленом имел длину 12 диаметров.

В дополнение к этому были выполнены три теста с двумя 90-градусными коленами с изгибом вне плоскости и удалением первого колена на те же расстояния 10D, 4D и 2D. Расстояние между коленями было 4D и первое колено ориентировалось в плоскости

лучей. Прямой участок перед коленом имел длину 12 диаметров.

Уход показаний скорости определялся по отношению к скорости, измеренной в прямой трубе. Результаты испытаний представлены на Рис.14-17.

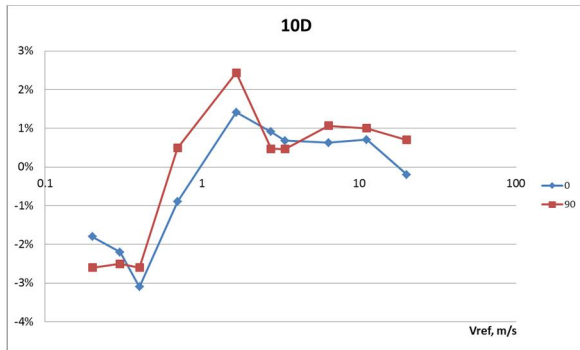


Рис. 14. Одиночное колено, расположенное на удалении 10D (0 – в плоскости лучей; 90 – перпендикулярно плоскости лучей)

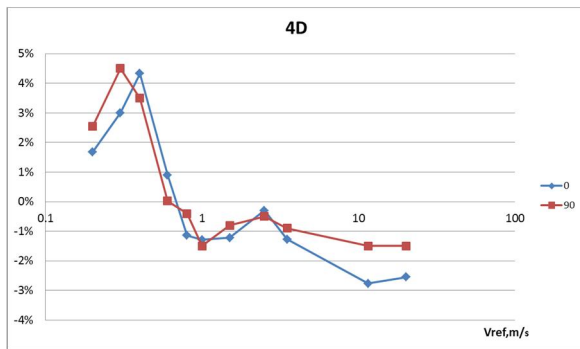


Рис. 15. Одиночное колено, расположенное на удалении 4D (0 – в плоскости лучей; 90 – перпендикулярно плоскости лучей)

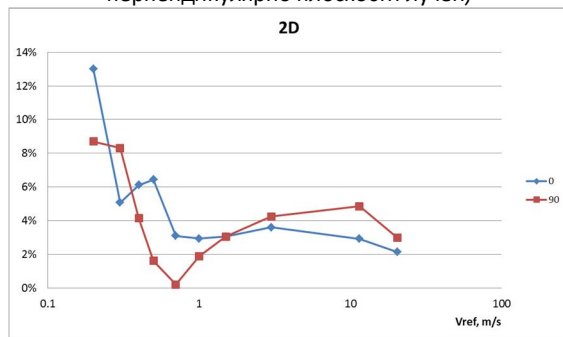


Рис. 16. Одиночное колено, расположенное на удалении 2D (0 – в плоскости лучей; 90 – перпендикулярно плоскости лучей)

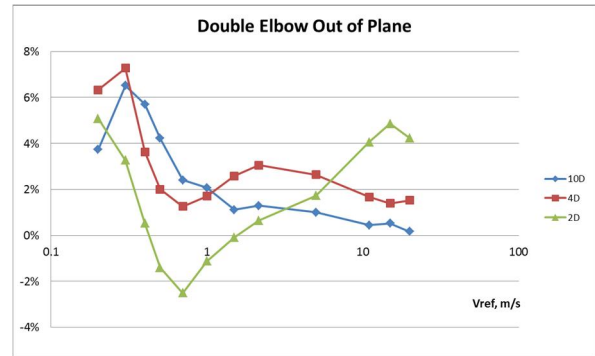


Рис. 17. Два колена вне плоскости. Удаления первого колена 10D, 4D и 2D; расстояние между коленями 4D, прямой участок спереди второго колена 12D

Приведенные данные свидетельствуют о следующем:

- 1) Поведение инсталляционных кривых в фазопрелетном УРГ отличается от аналогичных кривых для время-прелетных УРГ;
- 2) Установка расходомера вплоть до 4D от одиночного 90-градусного колена не приводит к уходу измеряемой скорости более 5%;
- 3) Очень короткие передние участки трубы (2D) могут вызывать уход скорости более 10% на скоростях ниже 0.5 м/сек;
- 4) Уход скорости существенно не зависит от ориентации колена – в плоскости лучей или перпендикулярно ей;
- 5) Наличие второго колена вне плоскости значительно не изменяет уход скорости, уход слегка возрастает на малых скоростях; двойной изгиб действует аналогично одиночному изгибу при скоростях выше 1 м/сек.

#### 4.5. Влияние загрязнения

Тест на влияние загрязнения проводился параллельно с испытанием масс-термального расходомера, описанного выше. Фазопротный расходомер модели FC1223-6 (внутренний диаметр корпуса 6 дюймов, расстояние между лучами 120 мм) был установлен в стенд на расстоянии 10D выше масс-термального расходомера.

Расходомер FC1223-6 был покрыт чистым синтетическим моторным маслом изнутри включая датчики и тест был проведен аналогично масс-термальному расходомеру. Никаких изменений не было зафиксировано при измерении воздушных потоков до и после покрытия.

Во время второго теста, расходомер FC1223-6 был покрыт изнутри черной смазкой производства MotorMaster марки Moly Extreme. Внутренняя поверхность расходомера показана на Рис.18 и Рис.19.



Рис. 18. Корпус расходомера, покрытого черной смазкой



Рис.19. Вид ближе, датчики полностью покрыты слоем смазки

Полное покрытие датчиков слоем густой смазки толщиной около 1мм не повлияло на работоспособность расходомера FC1223-6 как можно видеть из Рис.20.

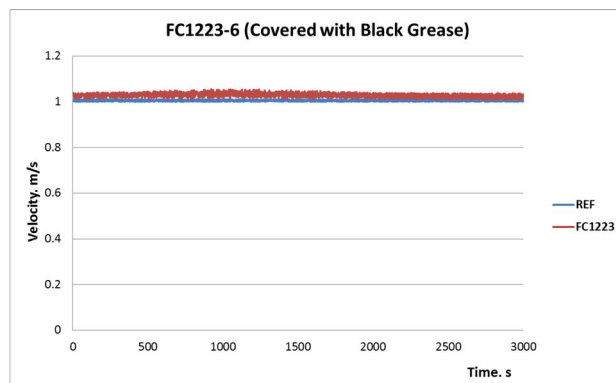


Рис.20. Расходомер FC1223-6 с датчиками, покрытыми слоем густой смазки

Величина сигналов, измеренных в обоих каналах во время каждого теста и средние значения скоростей за один час показаны в следующей таблице:

	Сигнал, В		Средняя скорость, м/сек	
	Канал 1	Канал 2	Эталон. Изм.	FC1223-6
Тест1, Сухой	0.75	0.80	1.010	1.025
Тест2, Масло	0.78	0.79	1.015	1.020
Тест3, Смазка	0.79	0.76	1.012	1.028

Данные показывают отсутствие влияния загрязнения на показания ультразвукового расходомера газа FC1223-6. Амплитуда сигнала в одном канале уменьшилась на 5% после покрытия смазкой, в то время как в другом канале она увеличилась на 5%.

Масс-термальный расходомер не функционировал вообще при покрытии его таким же слоем смазки. Очевидно, что расходомеры на других принципах, включая многоточечные трубки Пито, не будут функционировать при таком грязном применении, как показано на Рис.17.

## 5. Стоимость

### 5.1. Продажная цена

Высокая продажная цена ультразвуковых факельных расходомеров в течении долгого времени остается основным аргументом у сторонников более дешевых расходомеров переменного давления и масс-термальных расходомеров. Цена промышленных масс-термальных расходомеров упала более чем наполовину в течение последнего десятилетия из-за конкуренции; сейчас такие расходомеры предлагаются по цене около 4500 долларов. Однако ультразвуковые факельные расходомеры держат свою цену неизменной и в настоящее время они стоят примерно в 10 раз больше, чем масс-термальные.

### 5.2. Стоимость установки

Расходомеры факельного газа обычно устанавливаются в трубы через шаровые задвижки, монтируемые с помощью свариваемых врезок с трубной резьбой. Сварка двух врезок для одной пары время-пролетных датчиков требует несколько больше затрат по сравнению с одним отверстием, которого достаточно для установки масс-термального расходомера. Затраты на работу (сверление трубы, сварка

врезок) составляют основную часть стоимости и могут равняться нескольким сотням долларов. Установка в горячем состоянии может быть в несколько раз дороже этого. Расходомеры модели FC1223 имеют четыре датчика, соответственно необходимо четыре установочных врезки.

### 5.3. Стоимость обслуживания

Стоимость обслуживания варьируется в большой степени в зависимости от вида предприятия, расположения объекта, организации сервиса, местного и национального законодательства и других факторов. Этот аспект может быть в дальнейшем изучен в деталях отдельно и результат может оказаться на уровне многих тысяч долларов, требуемых для ежегодной проверки и обслуживания расходомеров.

### 5.4. Цена неработоспособности

Небольшие предприятия, такие как нефтяные накопители в Альберте, производят десятки тысяч тонн CO<sub>2</sub> ежегодно, газоперерабатывающие предприятия в Британской Колумбии (British Columbia, BC) выбрасывают ежегодно от 50 до 100 тысяч тонн CO<sub>2</sub>.<sup>14</sup> Это все еще лишь доля того, что выбрасывает любой нефтеперерабатывающий завод. Факельный расходомер, установленный в газодобывающей провинции BC, показывающий, например, поток на 50% выше реального вследствие наличия влаги в факельном газе, обходится пользователю в более чем 500 000 долларов ежегодно из-за преувеличения потока (налог на CO<sub>2</sub> эмиссию в BC был 21 доллар за 1 тонну в 2012 году). По этой причине нефте-и газоперерабатывающие предприятия BC не оборудуются дешевыми и неработоспособными расходомерами факельного газа. Дешевые расходомеры оказываются слишком дорогими для их владения.

### Что можно вынести отсюда:

1. В настоящее время для измерения факельных газов ультразвуковым расходомерам нет альтернативы. Фазо-пролетный метод минимизирует влияние уставки расходомера и позволяет измерять потоки в коротких изогнутых трубах.

2. Масс-термальные расходомеры в целом не являются пригодными для измерения факельных газов вследствие принципиального влияния состава газа и загрязнения датчика.

3. Трубки Пито имеют ограниченный динамический диапазон, многоточечные трубки Пито будут оказывать сильную обструкцию на поток.

4. Пользователи должны принимать решения стоит ли экономить на приобретении дешевых расходомеров факельного газа и затем расплачиваться за их обслуживание и неработоспособность или устанавливать ультразвуковые расходомеры, которые работают.

### Ссылки:

- 1 Estrada E., Baldwin S, Harman E, (2013). Flare measurement – proper calibration is essential to obtain good results, <https://gpaglobal.org/publications/view/id/3708/>
- 2 Flare metering challenges and methodologies – CB Engineering, <http://www.cbeng.com/resources/whitepaper/Flare%20Measurement%20Challenges.pdf>
- 3 Flare measurement “best practices” to comply with national & provincial regulations – CB Engineering [http://www.cbeng.com/resources/whitepaper/Flare\\_Measurement\\_Prov\\_Reg.pdf](http://www.cbeng.com/resources/whitepaper/Flare_Measurement_Prov_Reg.pdf)
- 4 Mass flow meters for flare /vent gas measurement – Sage Metering Inc. <http://www.sagemetering.com/pdf/2-5-1-FlareVentGasMeasurementFlyer.pdf>

- 5 Flare Gas Flow Measurement and Control – Fluid Components International. <http://www.fluidcomponents.com/Articles/Flare-Gas-ST100-0812.pdf>
- 6 Dalla Beta, R. A., Kurz, D.R., et al. Thermal anemometer flow meter for the measurement wet gas flow, US Patent application 2011/0308311.
- 7 Kurz J. Thermal flow monitor design and performance in acid rain stack. P.6 <http://www.kurzinstruments.com/Documents/TechnicalPapers/KURZ-DCN364007.pdf>
- 8 Parker J., Stobie G., Melnyk I., Letton C., Flare Metering with Optics From Blue-Sky Technology to the Real World, 25-th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2007, Norway
- 9 Flare Gas Measurement at Low Flow and Cross Flow Conditions - GE Measurement & Control, [http://www.hetinstrument.nl/2012/images/stories/downloads/Conferentieprogramma/Gas%20II/GerardBottino\\_GESensing.pdf](http://www.hetinstrument.nl/2012/images/stories/downloads/Conferentieprogramma/Gas%20II/GerardBottino_GESensing.pdf)
- 10 Temperley N. C. (2002) Optimisation of an Ultrasonic Flow Meter Based on Experimental and Numerical Investigation of Flow and Ultrasound Propagation. PhD Thesis, Univ. New South Wales.
- 11 Rans R., Sawchuk B., Weiss M. Flow Conditioning and Effect on Accuracy of Fluid Flow Measurement. 7-th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.
- 12 Weber F. J. Ultrasonic Beam Propagation in Turbulent Flow. PhD Thesis, Worcester Polytechnic Institute, 2003
- 13 Moore P., Johnson A., Espina P. Simulations of Ultrasonic Transit Time in a Fully Developed Turbulent Flow using a Ray-Tracing Method. North Sea Flow Measurement Workshop, 2002
- 14 [http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/donnees-data/index.cfm?do=results&lang=en&year=2011&gas=all&fac\\_name=&prov=BC&city=&naics=2111&submit=Submit](http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/donnees-data/index.cfm?do=results&lang=en&year=2011&gas=all&fac_name=&prov=BC&city=&naics=2111&submit=Submit)