

Основные принципы измерений расхода природного газа с помощью ОСРЕДНЯЮЩЕЙ НАПОРНОЙ ТРУБКИ

Г. Ливелли
Dieterich Standard, Inc.

Введение

Доступность и низкая цена природного газа (ПГ) обуславливает его использование основным источником энергии. Транспортирование и распределение ПГ требует многих технических решений в области добычи, транспортировки, хранения и продажи. Зачастую система включает в себя сотни компрессорных станций, которые транспортируют ПГ посредством труб и создают давление в хранилищах. Доставка ПГ требует значительного опыта и знаний в вопросе измерения расхода. Точность этих измерений продиктована точностью при направлении или перенаправлении потоков ПГ, увеличения или уменьшения размеров хранилищ, запуска или остановок дополнительных компрессорных станций.

Традиционными средствами измерения расхода ПГ являются сужающие диафрагмы, однако существует целый ряд применений требующих использования осредняющих напорных трубок (ОНТ)-трубок Пито. ОНТ на участке транспортирующих трубопроводов позволяет измерить расход, заполнить линии. В составе компрессорных станций ОНТ позволяет оптимизировать работу турбины компрессора, повысив срок эксплуатации ее.

ОНТ имеет малую площадь поперечного сечения, что приводит к малым потерям давления и обуславливает экономический эффект от применения ОНТ. Простая процедура монтажа ОНТ уменьшает дополнительно стоимость установки.

Экономический эффект от использования ОНТ требует высокой точности измерений. Это требование выполнимо при использовании многоточечных осредняющих напорных трубок. Как и в случае использования измерительных диафрагм теоретическая часть расчетной части базируется на основе теоремы Бернулли. ОНТ имеют простое устройство, сравнимое с традиционными сужающими устройствами для измерения расхода для промышленных применениях.

Основные принципы

ОНТ является первичным устройством, которое измеряет расход посредством измерения перепада давления (ПД). ОНТ создает перепад давления пропорционально квадрату скорости потока согласно теореме Бернулли. Этот сигнал имеет две компоненты: давление набегающего потока (высокое) и давление уходящего потока (низкое) (см. рис. 1).

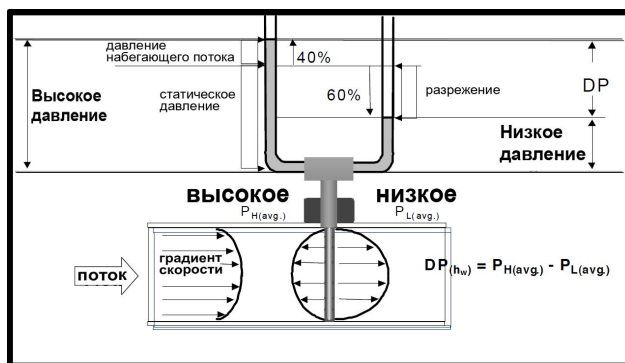


рис. 1 Принцип действия ОНТ.

Градиент скорости потока соответствует градиенту давления. ОНТ измеряет давление набегающего потока

через серию отверстий, расположенных на ребре ОНТ, охватывающий весь диаметр трубы. Таким образом высокое давление складывается из статического давления в трубе и давления набегающего потока.

Поток огибая профиль ОНТ образует вихри и зону пониженного давления. Низкое давление воспринимается серией отверстий, расположенных на тыльной стороне профиля зонда. Используя то же принцип низкое давление усредняется, уменьшая зависимость от скорости потока или числа Рейнольдса.

Перепад давления двусторонней ОНТ практически в два раза больше чем при измерении трубкой с использованием только набегающего потока.

Измерение расхода

Семейство устройств, которые используют принцип сужения потока включают в себя следующие устройства: диафрагмы, трубки Вентури, Трубки Пито, сопла и другие. Все эти устройства функционируют согласно теореме Бернулли о непрерывности потока и уравнения энергии. Теорема Бернулли утверждает о законе сохранения энергии потока жидкости в трубе. А именно: сумма энергий в любой точке трубы есть сумма статической энергии (давление, оказываемое жидкостью во все направлениях), кинетической (скорость жидкости) и потенциальной энергией (гравитационная составляющая). В стационарном несжимаемом потоке, без учета силы трения сумма энергий постоянна в любой точке. И в таком случае теорема Бернулли записывается так:

$$\frac{V_1}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{V_2}{2g} + \frac{P_2}{\rho}$$

где V-скорость потока, g - гравитационная постоянная, P-давление, ρ - плотность жидкости. Данное выражение применимо в условиях стационарного идеального потока. Уравнение непрерывности утверждает что:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

Используя закон сохранения энергии и уравнение непрерывности, применяется гидравлическое уравнение для несжимаемой жидкости:

$$Q = KA (2gh)^{1/2}$$

где Q-объемный расход, K-коэффициент, A-площадь сечения трубы, g-гравитационная постоянная, h-перепад давления, выраженный как подъем протекающей жидкости.

Основной единицей измерения расхода в США является кубический фут. Q-измеряется в ft³/sec. Именно такой является единица измерений для газа, но для при этом нужно указывать при каком давлении или температуре этот объем указан. Теория указывает что количество вещества в кубическом футе при давлении 1000psia, больше чем при атмосферном давлении. Энергия которая может быть получена от такого количества газа тем больше, чем больше молекул газа находится в этом объеме. А так как в промышленных применениях важно количество энергии, то давление и температура должны быть определены.

Решение задачи измерения массового расхода, что требуется при транспортировании газа по трубам, делает измерения не простой задачей. Так как нельзя сравнивать массы газа при различных условиях применяется приведение расхода к стандартным условиям. Такими условиями являются давление 14,73 psia и температура 60°F.

Приблизительное соответствие расхода при рабочих условиях дает закон Бойля-Чарли:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Данное равенство применимо только к идеальному газу и отклонение в случае с реальным газом имеет зависимость от давления, температуры и состава смеси газов. Это отклонение называется коэффициентом сжатия газа. Формулой объемного расхода приведенного к стандартным условиям:

$$Q_s = \frac{P_2}{14.73} \times \frac{(460 + 60)}{T_2} \times Q_2$$

Для большинства случаев измерений приведение к стандартным условиям при помощи формулы Бойля-Чарли дает погрешность всего несколько процентов. Для увеличения точности можно использовать модернизированную формулу:

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2}$$

где Z - коэффициент сжатия при фактическом давлении и расходе. Такое изменение приводит к:

$$Q_s = \frac{P_2}{14.73} \times \frac{(460 + 60)}{T_2} \times \frac{Z_b}{Z_2} \times Q_2$$

в которой Z_b -коэффициент сжатия при стандартных условиях и обычно равен $Z_b=1,000$ и Z_2 -коэффициент сжатия при рабочих P_2 и T_2 .

Сравнение показывает что это выражение есть ни что иное как уравнением расхода для стандартной сужающей диафрагмы. Фактор диафрагмы F_b состоит из трех частей: коэффициента преобразования размерностей - F_{na} , коэффициента потока - K и квадрата внутреннего диаметра трубы - D^2 :

$$F_b = F_{NA} * K * D^2$$

Уравнение потока для ОНТ заменяет F_b -фактор из трех компонентов, позволяя получить большую гибкость при вычислениях расхода.

Так как вычисление потока во многом идентичны для разных сужающих устройств коэффициенты полученные для сужающих диафрагм могут быть использованы для расчетов с использованием ОНТ.

Особенности устройства

Как и многие другие измерители потока ОНТ может быть выполнена в различными способами, но используя основные принципы функционирования напорных труб. Как и диафрагмы ОНТ не имеют движущихся частей, это позволяет отказаться от периодического обслуживания.

Одним из важных факторов, которые обеспечивают функционирование зонда является его форма. Овальная или круглая формы представляет ряд ограничений. На стороне низкого давления поток имеет склонность к срыву от поверхности зонда(рис.2). При круглой форме зонда срыв потока происходит на разных участках зонда и это приводит к погрешности измерения расхода в пределах 10...20%.

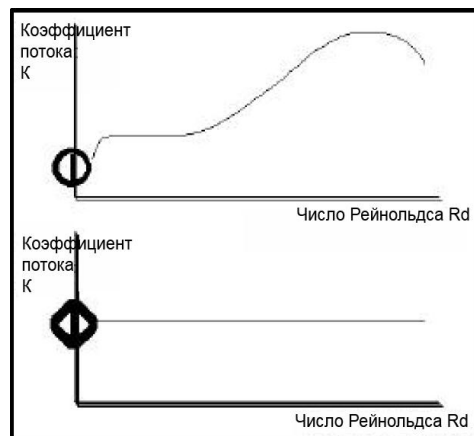
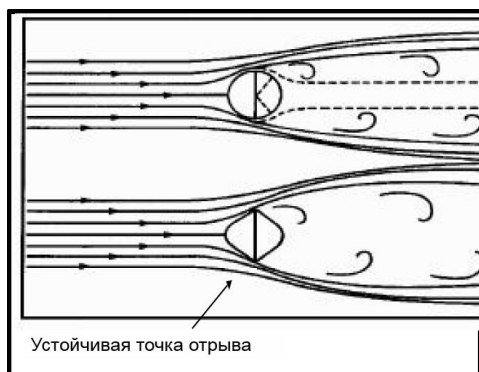


рис.2 Прохождение потока через ОНТ.

Положение точки срыва зависит от числа Рейнольдса, искривления профиля зонда и турбулентности потока в трубе.

Изучение ОНТ показывает что стабильные результаты измерений возможны в случае применения формы зонда с резкими краями. Это аналог кромки диафрагмы. Про этом отсутствует износ кромки что позволяет признать несомненным преимуществом ОНТ перед диафрагмами.

Строение ОНТ

Квадратное сечение ОНТ широко используется в мировой практике, позволяя получить стабильный результаты измерений в широком диапазоне расходов.

Эллиптической и пулевидной формы зонды тоже находят применение при создании ОНТ. Подобной формы зонды образуют меньший перепад давления чем зонд квадратной формы, а так же имеют значительную чувствительность к направлению потока, что приводит к погрешности около 20%

Все первичные ОНТ сводят сумму давлений в множественных отверстиях до одного, усредненного, который представляет скорость потока в трубе. Это означает что все отверстия в зонде должны быть по возможности одинаково использованы, иначе у одного из отверстий может быть больший вклад в среднее значение давления. Лучшим способом этого может быть оптимизация размера отверстия к площади поперечного сечения зонда. Отверстия должны быть расположены таким образом чтобы перекрыть возможные градиенты скорости потока в трубе. Таким образом большее количество отверстий должно быть у ОНТ для большего диаметра трубы, равно расположенные на встречном и отходящем потоке.

Особенности строения описываемые ниже необходимы для ОНТ высокой точности. Высокая точность измерений ОНТ в значительной степени зависит от определения коэффициента K . Коэффициент K определяет коррекцию в идеализированном потоке согласно влиянию скорости потока в трубе и отсутствию потерь в уравнении потока и расположению точек измерения давления. K -это аналог коэффициента C_d в расчете сужающей диафрагмы. Это коэффициент любого расходомерного устройства определяющий отношение фактического потока к теоретическому. Коэффициент K определяется в лабораторных условиях при калибровке ОНТ.

Большинство первичных расходомеров не проходят калибровочной стадии, поэтому важно чтобы имелась возможность рассчитать коэффициент K для труб разного диаметра. В этом случае результат длительных проверок и сбора сведений дало возможность обобщить коэффициент для сужающих диафрагм. Тем же образом и был собран материал для усреднения коэффициента K для ОНТ.

Были изучены характер обтекания ОНТ потоком для ОНТ различных сечений, при этом установлено что коэффициент

К зависит от сопротивления потоку, которое оказывает ОНТ. Сопротивление потоку определяется как площадь сечения ОНТ к площади сечения трубы.

Изменение скорости потока от сопротивления ОНТ влияет на давление образованное нисходящим потоком. Корреляция между коэффициентом К и сопротивлением потоку не только возможна, но и необходима. Недостаточно просчитанная ОНТ может определять коэффициент К только для некоторых диаметров трубы. А этого недостаточно. Для правильного конструирования ОНТ необходимо точный расчет потока, который можно применить к различным диаметрам труб, не калибруя ОНТ.

Точность измерения

При рассмотрении точность первичных устройств важно учитывать разницу между точностью устройства и точностью измерительного узла в целом. Точность устройства зависит от нескольких факторов:

- присутствуют ли необходимые прямые участки до и после устройства,
- присутствует ли турбулентный поток,
- обладает ли труба должной внутренней шероховатостью,
- обладает ли труба расчетными геометрическими размерами,
- соответствуют геометрические размеры расчетным,
- является ли поток однофазным.

Погрешность таких устройств как диафрагмы и ОНТ составляет $\pm 1\%$.

Диапазон измерений и точность

Диапазон измерений расхода есть отношение максимального расхода к минимальному. Этот параметр задан для потока с определенным числом Рейнольдса для конкретного измерения и определяет точность измерений. Важно понимать что более широкий диапазон измерений может привести к большей погрешности и при увеличении потока следует подбирать новый коэффициент К.

Так же необходимо учитывать влияние погрешности ОНТ для вторичных приборов, таких как датчик перепада давления. Погрешность большинства вторичных приборов определяется как процент от полной шкалы, а не от измеренного значения. Точность в процентах это ошибка в каждом конкретном значении, а так же подразумевается что эта ошибка накапливается в течении всего периода измерений. Это означает что ошибка полученная на любом потоке сравнивается с полной шкалой и полным диапазоном. Это приводит к отбрасыванию столь малой ошибки.

Точность полной шкалы соотносится с ошибкой при измерении ста процентов выходного сигнала. Настоящие значения появляются при приведении ошибки полной шкалы к фактическому значению. Это означает что лучшая точность появляется только при полной шкале, а фактическая ошибка при меньшей шкале возрастает. Для примера, типичный датчик разности давлений производит ошибку 0,1% при полной шкале, тогда как при 25% полной шкалы ошибка составляет менее 2%. Это соотношение эквивалентно диапазону измеряемого потока 4:1. Преобразователи с большей точностью имеют такую же тенденцию.

Метрологические службы не устраивает точность измерения более чем 2%. Это привело к тому что в промышленном применении используется диапазон измерений не более чем 4:1. Таким образом вопрос точности датчиков перепада давления стал сдерживающим фактором при применении первичных устройств с более широким динамическим диапазоном. При том что ОНТ с легкостью дают точность 1% в динамическом диапазоне 10:1.

Существует несколько методов, которые позволяют расширить диапазон без увеличения ошибки. Один из методов - использование нескольких датчиков перепада давления, перекрывающих требуемый диапазон измерений.

Другой состоит в том что несколько измерительных узлов автоматически расщепляют поток на потоки с требуемой точностью измерения. Так же перспективным является мокрая калибровка измерительного узла, первичного и вторичного прибора, в результате получается некоторая корректирующая линеаризирующая функция, которая и используется вторичным прибором.

Энергосбережение

Стоимость энергии используемой в газовой отрасли, становится решающим фактором. Измерение расхода как и любого другого процесса, требует затрат энергии, количество которой напрямую зависит от первичного устройства расходомера.

В связи с этим потеря энергии на первичных устройстве хотя и незначительна, в настоящее время требует пристального внимания. Сравнение потери давления на ОНТ и соответственно энергии потока, с потерями на обычных сужающих диафрагмах показывает источник существенного снижения энергозатрат. Это замечание напрямую относится к газотранспортным предприятиям, имеющих многочисленные расходомерные узлы в своем хозяйстве.

Рис.3 отображает зависимость относительного значения разности давлений и потери давления на обычной сужающей диафрагме и ОНТ для различных диаметров труб.

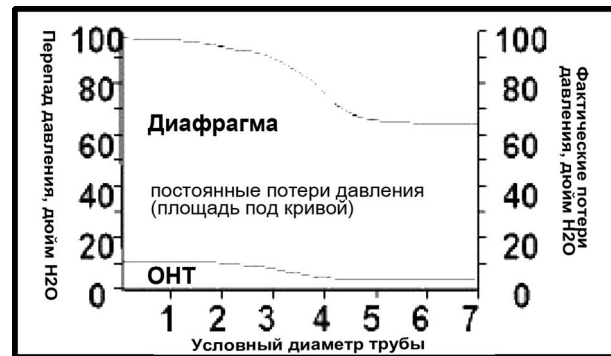


Рис.3 Сравнение потерь давления для диафрагмы и ОНТ.

Уменьшение потерь давления на первичном расходомерном устройстве напрямую приводит к экономии эксплуатационных затрат и энергосбережению. Используя следующее уравнение можно рассчитать эксплуатационные расходы для каждого первичного устройства.

$$HP = \frac{(SCTH)(PPL)(T_f + 460)}{(P_f)(10.78 \times 10^6)}$$

$$\$ / yr = (HP)(0.746)(hrs / yr)(\$ / KWH)$$

где HP-мощность компрессора или насоса для компенсации потери давления. PPL - постоянные потери давления на первичном устройстве, выраженные в дюймах водяного столба. T_f — температура газа, выраженная в градусах по Фаренгейту. P_f — абсолютное давление газа в трубе, выраженное в фунтах на квадратный дюйм. S/yr — количество часов в календарный год для измерительного устройства и S/kWh — стоимость киловатт-часа.

Полный версию программы расчета энергосбережения и детальную инструкцию для расчета природного газа можно получить в дополнительном запросе автору этой статьи.

Учитывая что расходомерных узлов газотранспортных и газораспределительных предприятий может быть сотни, уменьшение потерь на измерительных узлах приводит к существенной экономии.

Установка

Простота монтажа ОНТ вызвана тем что для установки ее требуется только наличие одного (для ОНТ специального типа двух) отверстия в трубе. Для большинства типов ОНТ это отверстия диаметром 1/2", 1", 2". Присоединение ОНТ к отверстию в трубе производится несколькими способами: резьбовым соединением, фланцевым компрессионным, приварным, в зависимости от условий эксплуатации. ОНТ типа **Flow-Tap** благодаря использованию специального изолирующего устройства позволяет устанавливать и извлекать ОНТ без остановки потока в трубе. В случае монтажа ОНТ на трубы малого диаметра достигается большая экономия времени на установку ОНТ. Точное измерение расхода требует точного изготовления, установки и эксплуатации ОНТ. Установка ОНТ с большим количеством отверстий требует точного расположения этих отверстий в расчетных положениях, чтобы обеспечить правильный и надлежащий сигнал.

Хорошая повторяемость заявленных характеристик ОНТ достигается выполнением всех рекомендаций производителя при установке ОНТ.



Рис.4 GTABAR-зонд.

Вторичные приборы измерительных узлов на базе ОНТ

ОНТ как первичный прибор создает перепад давления так же образом как и сужающие диафрагмы, трубки Вентури, сопла и поэтому для ОНТ используются те же вторичные приборы. Типичный перепад давления, создаваемый ОНТ лежит в пределах от 5-ти до 50-ти дюймов водяного столба, тогда как типичная диафрагма создает перепад 100 дюймов водяного столба и более. Улучшенные современные датчики перепада давления позволяют измерять такие малые перепады. Упрощенно подбор датчика перепада давления состоит в определении размера этого перепада. Датчики многих производителей позволяют сделать такой выбор.

Другие датчики, такие как датчики абсолютного давления и температуры, вычислители-корректоры, индикаторы, самописцы, системы автоматического управления выбираются так же как и для других первичных измерительных устройств.

Информация от ОНТ и измерительных устройств газового хозяйства аккумулируется и архивируется для следующей обработки.

ОНТ успешно применяется для технологического учета газа на предприятиях в определении газового баланса, производительности компрессоров, газовых заправочных станциях и прочих. Возможность установки и извлечения ОНТ без остановки технологического процесса и возможность измерять расход в двух направлениях потока обуславливает широкое применение ОНТ в газовой промышленности.

Заключение

Традиционные расходомеры имеют широкое применение в газовой промышленности. Однако в более чем миллионе расходомерных узлов найдут своё применение ОНТ благодаря своей стабильной и точной работе, с хорошей повторяемостью результата. Применение ОНТ дает существенные преимущества перед традиционными сужающими диафрагмами. Этими преимуществами являются простота установки, извлечение без остановки процесса, низкими затратами на установку и низкими потерями давления на приборе.

Использование ОНТ типа **GTABAR-зонд** позволяет улучшить технологию измерения расхода газа и автоматизированного управления процессом в газовой промышленности.