

# Измерение расходов факельных газов

## Состояние вопроса

Утилизация факельных газов представляет собой систему транспортировки и сжигания неиспользуемых газов после срабатывания предохранительных клапанов и устройств, поддерживающих рабочее давление в технологических установках и трубопроводах. Помимо рабочих условий, определяющих интенсивность выбросов газов в силу технологических особенностей получения и переработки газов, существуют утечки предохранительно-запорной арматуры, вызванные износом оборудования или отклонением рабочих параметров, а также залповые выбросы газа, вызываемые совпадением во времени пиковых нагрузок отдельных технологических установок. Эти особенности истечения факельных газов определяют спектр задач, связанных с измерением их расходов, и спектр средств измерения, удовлетворяющих достаточно разнообразным условиям.

Измерение расходов факельных газов преследует решение ряда задач. Среди них:

1. Контроль за состоянием окружающей среды
2. Контроль балансов потребления энергоресурсов и повышение энергоэффективности производства
3. Контроль за утечками оборудования и повышение качества регламентных работ

В силу технологических особенностей конкретных производств и установок, сроков эксплуатации и качества изготовления оборудования факельные газы отличаются:

- широким динамическим диапазоном расходов;
- различным во времени составом газа;
- вариацией давлений и температур;
- различной степенью очистки от механических примесей и влаги;
- формированием взрывоопасной зоны для применения электрических приборов.

**Метод переменного перепада давлений**, реализуемый с помощью **стандартных сужающих устройств (ССУ)**, является традиционным способом измерения расходов факельных газов. Его популярность основана на нескольких китах:

- наглядный физический принцип измерения расхода;
- аналитический метод расчета ССУ упрощает поверку изготовленных первичных преобразователей (ССУ),
- длительный срок использования хорошо известных преобразователей давления и температуры снимает проблемы с монтажом и обслуживанием приборов.

В упрощенном виде теорема Бернулли и условие неразрывности потока приводят к измерению расхода при рабочих условиях (объемного расхода) в виде:

$$Q = K \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}$$

где

- K - коэффициент расхода ССУ;
- $\rho$  - плотность среды;
- S - площадь проходного сечения ССУ;
 $\Delta P$  - перепад давления на ССУ (разность полного и статического давлений).

K недостаткам применения стандартных сужающих устройств следует отнести такие факторы как:

- Большие потери давления на ССУ;
- Небольшой динамический диапазон измеряемых расходов ССУ (1 : 3);
- Высокие затраты на монтаж, требующие, как правило, больших прямолинейных участков трубопроводов до и после места монтажа ССУ, дегазацию трубопровода и установку дополнительных опор в месте монтажа ССУ;
- Зависимость коэффициента расхода от качества изготовления и условий эксплуатации ССУ;
- Высокие эксплуатационные затраты, обусловленные сложностью контроля состояния ССУ.

В последние годы появились альтернативные средства измерения, снижающие отрицательные аспекты применения ССУ.

К ним прежде всего следует отнести нестандартные сужающие устройства (НСУ).

**Осредняющие напорные трубки (ОНТ)** являются отличной альтернативой ССУ, сохраняя все достоинства метода переменного перепада давлений (рис.1).

При этом появляются новые возможности:

- диапазон расходов ОНТ расширяется до 1 : 10;
- появляется возможность монтажа и профилактики ОНТ под давлением;
- потери давления на ОНТ становятся существенно меньшими, а на больших диаметрах трубопроводов пренебрежимо малыми;
- доступный диапазон трубопроводов расширяется до 10 000 мм и более.

Недостатком ОНТ является чувствительность измерительных каналов к загрязненным потокам. Системы периодической продувки ОНТ служат сохранению эффективности применения ОНТ, однако требуют дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат.

Проверка ОНТ выполняется путем контроля ее геометрических параметров.

Это является важнейшим фактором при обслуживании удаленных от ЦСМ измерительных комплексов, а также трубопроводов больших диаметров.

**Инвертированная трубка Вентури или V-cone** представляет собой НСУ, объединяющее несколько функций (рис.2):

- преобразователь скоростного напора в перепад давления;
- формирователь стандартизованного профиля потока (идеальной эпюры скоростей);
- гомогенизатор потока (статический смеситель).

Отсутствие требований к прямолинейным участкам делает V-cone чрезвычайно экономически выгодным устройством из-за отсутствия затрат на строительство трубопроводов измерительного участка.

Калибровка V-cone предусматривает обязательную проливку каждого преобразователя на стенде, что обеспечивает относительную погрешность преобразования скоростного напора в перепад давления +/- 0,5% в отличие от +/- 1% типовых ОНТ.

Расходомеры на базе сужающих устройств имеют общий недостаток, вызванный методом измерения. Точностные характеристики дифференциальных преобразователей давления приводятся к верхней шкале измерения. Поэтому при снижении расхода в два раза по отношению к верхней шкале погрешность возрастает также в два раза и при дальнейшем снижении скорости потока растет в геометрической прогрессии.

Амплитуда сигнала пропорциональна квадрату скорости потока ( $\rho V^2$ ), что ограничивает измеряемый диапазон скоростей потока снизу и оставляет на практике рабочий диапазон в пределах 50-100% шкалы используемого дифференциального преобразователя давления.

Общим «недостатком» может служить и необходимость корректировки плотности среды при изменении давления и/или температуры потока. Необходимость использования дополнительных приборов и корректора для вычисления массового расхода или приведения к стандартным значениям объема сжимаемой среды присуща всем методам и расходомерам на их основе, не использующим принципы прямого измерения массы потока.

Выпуск многопараметрических преобразователей дифференциального давления с встроенными датчиком давления и корректором плотности потока при подключении



Рис. 1. ОНТ Torbar



Рис. 2. Тело обтекания V-cone

преобразователя температуры привел к модернизации ОНТ, предусматривающей карман для монтажа термометра сопротивления. Данная модификация расходомеров на базе ОНТ с многопараметрическим преобразователем дифференциального давления минимизирует число врезок в трубопровод, упрощает монтаж измерительного узла и повышает точность измерения массовых расходов (рис.3).

**Термические расходомеры (тепловые или термодифференциальные)** получили широкое распространение в промышленности в последние годы (рис.4). Они построены на принципе измерения потерь тепловой энергии при обтекании тела набегающим потоком, известном как закон Кинга:

$$h = A + B \times (\rho V_f)^C$$

Здесь

$h$  – коэффициент теплопередачи нагреваемого тела, находящегося в термодинамическом равновесии с окружающей средой (зависит от теплоемкости и теплопередачи среды);

$A$ ,  $B$ ,  $C$  – константы, определяемые эмпирически (в процессе калибровки расходомера);

$\rho V_f$  – «массовая» скорость потока.

Поскольку электрическая мощность, подводимая к нагреваемому телу, в равновесном состоянии равна потере тепловой энергии  $E$  при охлаждении тела молекулами обтекающей его среды, то потери тепловой энергии оказываются пропорциональны разности температур потока и нагреваемого тела:

$$I^2 R = E = h \times A (T - T_f),$$

где

- $I$  – ток
- $R$  – сопротивление нагреваемого тела
- $A$  – площадь поверхности нагрева
- $T$  – температура нагреваемого тела
- $T_f$  – температура потока.

Из приведенных соотношений видно, что скорость массового потока  $\rho V_f$  и потери тепловой энергии являются функцией двух переменных – температуры среды и температуры нагреваемого тела, т.е.

$$\rho V_f = F (T, T_f).$$

Это обстоятельство объясняет привлекательность данного метода измерения:

- потери тепловой энергии измеряются путем измерения потерь электрической энергии на нагреваемом электрическим током термометре и термометре, не имеющем подвода тепла, размещенным в одной и той же точке набегающего потока;
- датчик состоит из сравнительно простых двух термометров сопротивления;
- не требуется корректировка измеренного значения массового расхода при колебаниях давления и температуры (в определенном диапазоне температур и давлений);
- динамический диапазон расходов тепловых приборов достигает значений 1 : 100;
- измеряются низкоскоростные потоки от 0,04 м/с.



Рис.3. Массовый расходомер Tribar



Рис. 4. Тепловой расходомер

К недостаткам тепловых расходомеров следует отнести зависимость интенсивности охлаждения термометров не только от массы потока, но и от теплопроводности и теплоемкости измеряемой среды. Последние характеристики являются производными от состава газа. Поэтому изменение состава газа требует новой калибровки прибора. Если смесь газов является постоянной, то ряд изготовителей калибруют прибор на несколько заранее известных составов газов, обеспечивая возможность корректировки калибровки расходомера при изменении состава среды.

Следует обратить внимание на влажность и загрязненность газа. Возможная конденсация на датчике приводит к неприемлемой погрешности измерения теплового расходомера.

Недостатком является также конструкция расходомера, в которой датчик устанавливается в определенной точке потока. Конструктивно зондовые расходомеры имеют дополнительную ошибку, определяемую позиционированием датчика.

Главной особенностью теплового расходомера, тем не менее, является чувствительность датчика к составу газа, что ограничивает применение прибора средами с постоянными характеристиками химического состава.

**Вихревые расходомеры** используют эффект зависимости частоты образования вихрей за телом, помещенным в поток, от скорости потока и геометрических параметров тела возмущения потока:

$$f = Sh \cdot V/d$$

Здесь

- f - частота образования вихрей,
- Sh - коэффициент Штрухала ( $Sh = Sh(Re)$ ),
- d - поперечный размер тела возмущения (const),
- V - скорость потока.

Коэффициент Штрухала является постоянной величиной в достаточно большом диапазоне чисел Рейнольдса (Re). (Простота измерения скорости потока дала основание некоторым изготовителям утвердить методику поверки, проверяющую только неизменность геометрии тела возмущения. Это было бы действительно очень привлекательным атрибутом данных приборов, если оставить без внимания контроль погрешности датчика, детектирующего появление вихря).

Вихревые расходомеры при установке дополнительных датчиков давления и температуры и, особенно, при интеграции микроконтроллера в состав блока преобразователей приобрели действительно интеллектуальные свойства развитых микропроцессорных систем.

Многопараметрические интеллектуальные расходомеры PRO-V™ являются универсальными измерительными комплексами, применяемыми для измерения различных сред – различных газов и смесей газов, насыщенного и перегретого пара, жидкостей с изменяющейся плотностью (напр., аммиак, ГСМ, газовый конденсат), а также криогенных жидкостей. Их конфигурирование на рабочие условия, включая изменение измеряемой среды, а для погружных приборов – установку на разные диаметры трубопроводов, выполняется по месту эксплуатации при неизменной первичной калибровке.

Расходомеры PRO-V™ отличаются возможностью измерения в одной точке трех параметров (скорости, давления и температуры), встроенной коррекцией значений плотности, числа Рейнольдса, вязкости и массы потока, по текущим измерениям температуры и давления, коррекцией базовой плотности измеряемой среды по внешнему аналоговому сигналу, развитыми средствами передачи данных.

Погружной вариант вихревого расходомера (рис.5) имеет такие же достоинства в части монтажа и профилактики прибора, как погружные конструкции ОНТ и тепловых расходомеров, и те же недостатки, присущие зондовым приборам.

Отсутствие вращающихся частей, большой динамический диапазон расходов (при соответствующем давлении), инвариантность к составу газа, измерение расходов в трубопроводах больших диаметров погружными приборами, интеллектуальные способности, - несомненные достоинства вихревых расходомеров PRO-V.

С точки зрения измерения факельных газов недостатком вихревых расходомеров является зависимость амплитуды полезного сигнала от  $\rho V^2$ , что ограничивает диапазон измерения расходов снизу. Для газов минимальные скорости, генерирующие детектируемые вихри, находятся на уровне 0,3 м/с.

Как видно, ни один из приведенных выше типов расходомеров не решает все задачи измерения расходов факельных газов. Для каждого конкретного случая может подойти один из типов, тогда как другой окажется не применимым либо в связи с требуемым диапазоном измерения, либо динамическим характером изменения состава газа, либо с наличием влаги и других примесей в потоке.

При больших диапазонах расходов факельных газов – от утечек до залповых выбросов, - применение какого-то одного из указанных расходомеров или их комбинации может быть вообще проблематично.

Не случайно измерению расходов факельных газов посвящены специальные разработки расходомеров, прежде всего ультразвуковых.

**Ультразвуковые время-импульсные приборы** ряда компаний являются главным итогом таких разработок, когда могут претендовать на признание **универсальных** типов измерителей расходов факельных газов.

Отличительные признаки универсальных факельных расходомеров следующие.

- |   |   |
|---|---|
| • Динамический диапазон измерения:                            | от 0,03 м/с до 100 м/с<br>Или 1 : 3 333 |
| • Погрешность измерения относительная:<br>(на всем диапазоне) | +/- 2,5%                                |
| • Температура измеряемой среды:                               | от -70 оС до + 200 оС                   |
| • Температура окружающей среды:                               | от - 40 оС до + 60 оС                   |
| • Врезка и профилактика датчиков под давлением                |   |

Факельный расходомер FGM160 (рис.6.) производства Fluenta (Норвегия) имеет ряд отличительных особенностей конструкции датчиков и принципов модуляции сигналов.

В расходомерах Fluenta используются два различных типа ультразвуковых сигналов для измерения скорости во всем диапазоне скоростей факельных газов.

А) Для измерения низких скоростей используется импульсный сигнал с постоянной частотой.

Б) Для измерения высоких скоростей используется импульсный сигнал с частотной модуляцией.

Сочетание обоих типов сигналов позволяет добиться высокой точности измерения низкоскоростных потоков. На высоких скоростях расходомер генерирует только импульсы с переменной частотой.



Рис.5. Вихревой расходомер PRO-V

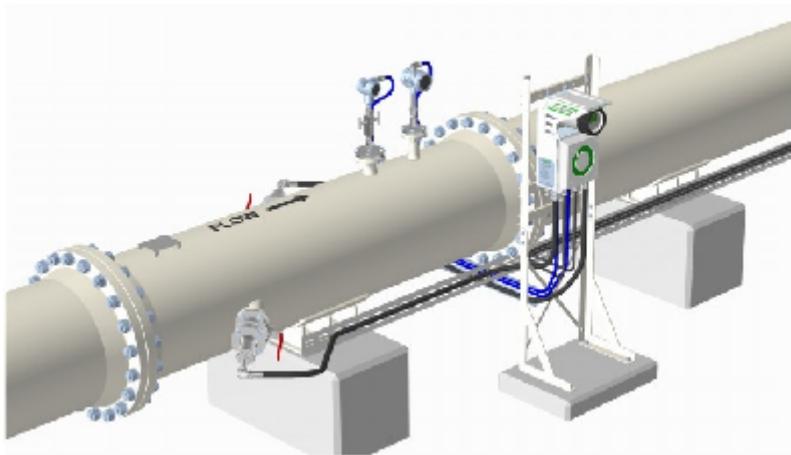
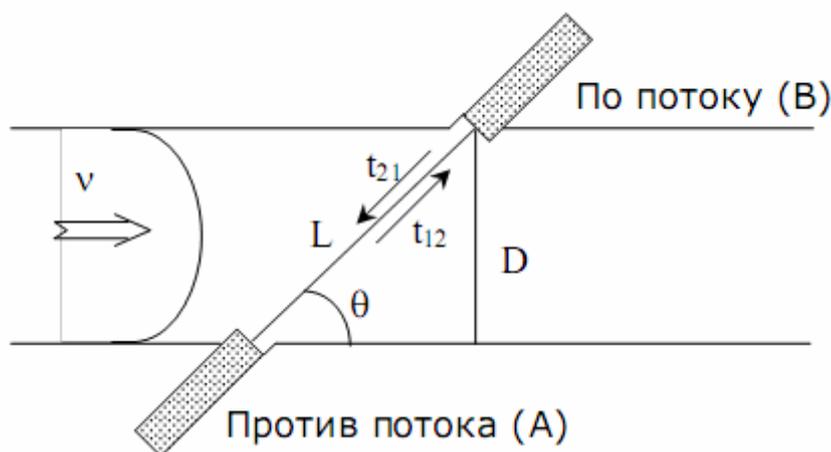


Рис. 6. Расходомер FGM160

- 1) Прибор имеет в турбулентной потоке ( $Re > 10\,000$ ) относительную погрешность измерения приведенного к нормальным условиям расхода газа, не превышающую  $\pm 2,5\%$  на всем диапазоне скоростей, начиная с  $0,03$  м/с.
- 2) Ультразвуковые излучатели врезаются в трубопровод, в том числе под давлением, но погружаются не глубже уровня внутренней поверхности трубопровода, исключая тем самым возмущение потока, особенно при низких скоростях.
- 3) Ультразвуковые излучатели (приемо-передатчики) устанавливаются на противоположных сторонах трубопровода под углом к его оси и на одной оси к друг другу, измеряя время прохождения луча по ( $t_{12}$ ) и против ( $t_{21}$ ) потока.



В результате скорость потока определяется выражением, не зависящим от скорости звука,

$$V = K * L / (2 * \cos\theta) * (1/t_{s12} - 1/t_{21})$$

где

K - коэффициент расхода,

L - расстояние, проходимое лучом.

- 4) Врезка датчиков выполняется с использованием специальных юстировочных устройств, исключающих ошибки монтажа.

- 5) Вычислитель имеет до 6 аналоговых выходов 4-20 мА, настраиваемых пользователем на следующие параметры:
- расход объемный газа при рабочих условиях
  - расход приведенный к нормальным условиям
  - расход приведенный к стандартным условиям
  - расход массовый
  - давление
  - температура
  - плотность потока при рабочих условиях
  - плотность потока при нормальных (стандартных) условиях
  - молекулярный вес

Ультразвуковые расходомеры являются наиболее дорогими приборами из вышеназванных. Вместе с тем их применение для измерения газов в таком широком динамическом диапазоне, каким отличается факельный газ, является пока единственным средством измерения.

Расходомер FGM160 имеет также встроенный алгоритм вычисления расходов инертного газа, используемого для повышения скорости потока при низких скоростях, что снижает налоговую нагрузку и необходимость установки дополнительного оборудования для измерения расходов инертного газа.

При потере давления факельных газов и, соответственно, потере минимально необходимого напора для продувки трубопровода подается извне инертный экологически безопасный газ (например, азот). Тогда измерительный узел оснащается дополнительными измерителями расходов, учитывающих подачу инертного газа, не облагаемого налогом при выбросах, но капитальные и эксплуатационные затраты такого узла еще более возрастают. В противном случае налог на выбросы факельных газов учитывает в общем расходе инертный газ, не образующий налогооблагаемую базу.

В вычислительном блоке FGM160 вычисление доли азота в общем потоке происходит автоматически, устраняя необходимость применения дополнительного оборудования для ее вычисления.

**Измерение расходов газа** требует получения сопоставимых результатов при изменении рабочих условий. Для этих целей используются прямые методы измерения плотности газов и непрямые или косвенные, когда плотность корректируется по дополнительно измеряемым значениям давления и температуры потока.

Тепловые расходомеры можно отнести к классу приборов, измеряющих массу потока прямым методом при условии, что состав смеси газов при измерении остается неизменяемым.

Остальные рассмотренные приборы требуют коррекции плотности для вычисления массового расхода или приведенного к нормальным или к стандартным условиям объемного расхода газа.

Интеллектуальные расходомеры PRO-V являются единственными пока приборами, имеющими аналоговый вход 4-20 мА для подключения сигналов поточного плотномера и вычисления массового расхода сжимаемых жидкостей и газов в реальном времени.

**Вычислители расходов газа** выполняют функцию расчета теплофизических параметров реальных газов и коррекции объемных расходов, измеренных в рабочих условиях первичными приборами. Теплофизические параметры – плотность, коэффициент сжимаемости, показатель адиабаты, вязкость, - определяются для ряда чистых газов и смесей газов на основании единых методик (Табл.1).

Вычислители расходов газов, как правило, например УВП-280, используют алгоритмы, учитывающие данные требования и построенные на базе указанных методик расчетов.

Документ	Тип газа	Параметры газа		Состав газа
		Pa, МПа	t, °C	
ГОСТ 30319	Природный газ, метод NX19	0.1...12	-23...+66	Смесь газов: метан (не менее)
ГОСТ 30319	Природный газ, метод GERG-91	0.1...12	-23...+66	Смесь газов: метан (не менее)
ГОСТ 30319	Природный газ, метод AGA8-92DC	0.1...12	-23...+66	Смесь газов: метан, этан, пропан, нормальный и изобутан, азот, диоксид углерода, сероводород, гелий, кислород, нормальный и изопентан, н-гексан, н-гептан, н-октан, водяной пар, аргон, монооксид углерода
ГСССД МР 107-98	Газовые смеси ШФЛУ	0,1 ... 0,5	-33 ... +75	Смесь газов: метан, этан, пропан, нормальный и изобутаны, нормальный и изопентаны, нормальный гексан + высшие, азот, диоксид углерода, сероводород
ГСССД МР 113-03	Нефтяной газ	0.1...15	-10...+226	Смесь газов: метан, этан, пропан, нормальный и изобутан, нормальный и изопентан, гексан, гептан, азот, диоксид углерода, сероводород, кислород, водяной пар
ГСССД МР 118-05	Умеренно-сжатые газовые смеси переменного состава	0.1 ... 10	-73...+125	Смесь газов: метан, этан, пропан, нормальный и изобутан, нормальный и изопентан, гексан, азот, диоксид углерода, водород, кислород, аргон, оксид углерода, этилен, гелий-4, сероводород и аммиак
ГСССД МР 134-2007	Азот, аммиак, аргон, ацетилен, водород, кислород, диоксид углерода	0.1 ... 10	-73...+150	Чистые газы (7 газов)
ГСССД МР 135-2007	Технически важные газы и смеси газов	0,1...5	-40...+60	Азот, воздух. Водородсодержащая смесь газов: водород (>90%), кислород, диоксид углерода Сероводородная смесь газов: сероводород (>70%), метан, этан, у/в с3 (пропан), н-бутан, бутилен, азот, диоксид углерода, у/в с5 (н-пентан), у/в с6 (н-гексан), этилен, аммиак, водяной пар
ГСССД МР 136-2007	Газовые водородсодержащие смеси	0,1...30	-15...+250	Смесь газов: водород, метан, азот, аммиак, аргон

Табл.1. Нормативные документы расчета теплофизических параметров газов

При известных параметрах сжимаемости газа не прямые методы определяют значения объемных расходов, приведенных к нормальным (0 °С и 101325 Па) или к стандартным (20 °С и 101325 Па) условиям, на основе соотношения

$$Q_n = Q \cdot \frac{P}{101325} \cdot \frac{273,15}{T}$$

$$Q_c = Q \cdot \frac{P}{101325} \cdot \frac{293,15}{T}$$

где

$Q_n$  - объемный расход приведенный к нормальным условиям (0 °С и 101325 Па), Нм<sup>3</sup>/ч

$Q_c$  - объемный расход приведенный к стандартным условиям (20 °С и 101325 Па), Стм<sup>3</sup>/ч

$Q$  – объемный расход при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/ч

$P$  – абсолютное давление газа в рабочих условиях, Па

$T$  – температура газа в рабочих условиях, К

Существует, конечно, серьезное допущение о неизменности или постоянстве состава газов при использовании расчетных значений, полученных на базе этих методик, которое позволяет требовать выполнения условий единства средств измерений хотя бы в лабораторных условиях.

Реальные процессы, однако, далеко не всегда вписываются в нормативные рамки.

В частности, газ в условиях нашей страны часто имеет более низкую температуру, чем предусмотрено методиками. Система транспортировки попутного нефтяного газа характеризуется крайне низкой технологической дисциплиной. Газ практически идет грязный, 100% влажный, с большим включением конденсируемых газов и паров влаги.

Дополнительная жидкость уменьшает живое проходное сечение трубопроводов и ведет к завышению показаний расходомеров, рассчитанных на измерение однофазных сред.

Наличие парафина, твердых частиц льда и других загрязняющих веществ сказывается на работоспособности первичных датчиков и достоверности их показаний, а также стоимости владения измерительными станциями.

Поэтому требования нормативных документов о допустимых погрешностях измерений должны быть дополнены требованиями к измерительным участкам не только в части геометрии участка, но и в части качества измеряемого потока. Невозможно ужесточать и расширять требования к приборной части без повышения требований к технологичности транспортной газовой системы.

ООО АППЭК-Сервис поставляет не только расходомеры в соответствии с требованиями к системам измерения количества свободного нефтяного газа, но и вспомогательные средства формирования измерительных участков и СИКГ:

- соосные сепараторы (осушители) газа;
- автоматические поплавковые влагоудалители газового конденсата, в т.ч. в средн Н2S;
- противодавленческие насосы промежуточной перекачки конденсата (не требующие электроэнергии и не подверженные кавитации);
- струевыпрямители.

В целях эффективного контроля за утечками газа на факел АППЭК-Сервис поставит беспроводные микропроцессорные детекторы запорно-предохранительной арматуры (клапаны, конденсатоотводчики). Совместно с измерением выбросов факельного газа эффективность контроля за утечками поддается непосредственной и прямой оценке.

## Приложение 1.

**Классификация систем измерений количества и параметров свободного нефтяного газа.**

В зависимости от значения: объемного расхода газа, приведенного к стандартным условиям, СИКГ подразделяют на категории:

- I – (большой производительности) – более  $10^5$  м<sup>3</sup>/ч;
- II – (средней производительности) – более  $2 \cdot 10^4 \dots 10^5$  м<sup>3</sup>/ч;
- III – (малой производительности) – более  $10^3 \dots 2 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup>/ч;
- IV – (минимальной производительности) – не более  $10^3$  м<sup>3</sup>/ч.

По назначению СИКГ подразделяются на классы:

А – СИКГ, предназначенные для проведения взаимных расчетов между предприятиями – контрагентами;

Б – СИКГ объектов, потребляющих газ на собственные нужды;

В – СИКГ технологического оборудования, в том числе факельных установок, установок сброса газа на свечу и т.п.

Для СИКГ нормируются пределы допускаемой относительной погрешности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям. (Табл.2).

Категория СИКГ	Пределы допускаемой погрешности, %, для класса		
	А	Б	В
I	± 1,5	± 2,5	± 5,0
II	± 2,0	± 2,5	± 5,0
III	± 2,0	± 3,0	± 5,0
IV	± 2,5	± 4,0	± 5,0

Табл.2. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений объема газа, приведенного к стандартным условиям для разных категорий СИКГ