

Импульсный счетчик-расходомер газа «Прамер-210 Ех»**О. А. Цыбульский, к.т.н.***ЗАО “ПромСервис”, Димитровград*multimer@promservis.ru, www.promservis.ru

В статье рассмотрен новый метод измерения расхода газа - импульсный метод. С помощью критерия для обобщенной оценки широкодиапазонного прибора по точности и диапазону измерений показана взаимосвязь погрешности меры и диапазона измерения широкодиапазонных приборов. А также показано, что для счетчиков газа импульсное преобразование позволяет разрешить противоречие между точностью и диапазоном измерения. Приведены характеристики испытаний импульсного счетчика-расходомера, в котором в качестве меры применяется критическое сопло, что обеспечивает сочетание высокой точности и широкого диапазона измерения.

Критические сопла благодаря свойству точного задания массового расхода нашли широкое применение в эталонных установках в качестве задатчика и меры расхода газа [1,2,3]. Одновременно, предпринимаются попытки применения критических сопел для осуществления измерения расхода на узлах учета газа. Например, в [4] предлагалось использование критического сопла последовательно с регулятором давления и общим контуром обратной связи.

Отличительной особенностью применения критического сопла является необходимость достаточного перепада давления на сопле для поддержания критического потока через него. Поэтому измерительное устройство, использующее критическое сопло, должно устанавливаться перед газорегуляторным пунктом. Поскольку газорегуляторный пункт понижает давление газа перед потребителем, то целесообразно использовать часть этого перепада давления для работы критического сопла. Предлагаемые решения применения критических сопел на узлах учета газа позволяют повысить точность измерения расхода, но в достаточно узком диапазоне измерения.

Существует известное противоречие между точностью и диапазоном. Хотим больше точность, теряем диапазон. Расширяем диапазон - теряем точность. Эта зависимость имеет количественное выражение, которое можно иллюстрировать следующим образом.

В настоящее время полосу предельной погрешности расходомеров в диапазоне измерения часто задают в виде постоянных значений в каждом из поддиапазонов. Например, предельная относительная погрешность 1% в диапазоне измерения от 1,25 до 40 м³/час, и 2% в диапазоне измерения от 0,16 до 1,25 м³/час в графическом виде выглядит как ступенчатая функция рис.1. Если же нарисовать на этом рисунке реальную полосу предельной погрешности, то она разместится внутри ступенчатой функции.

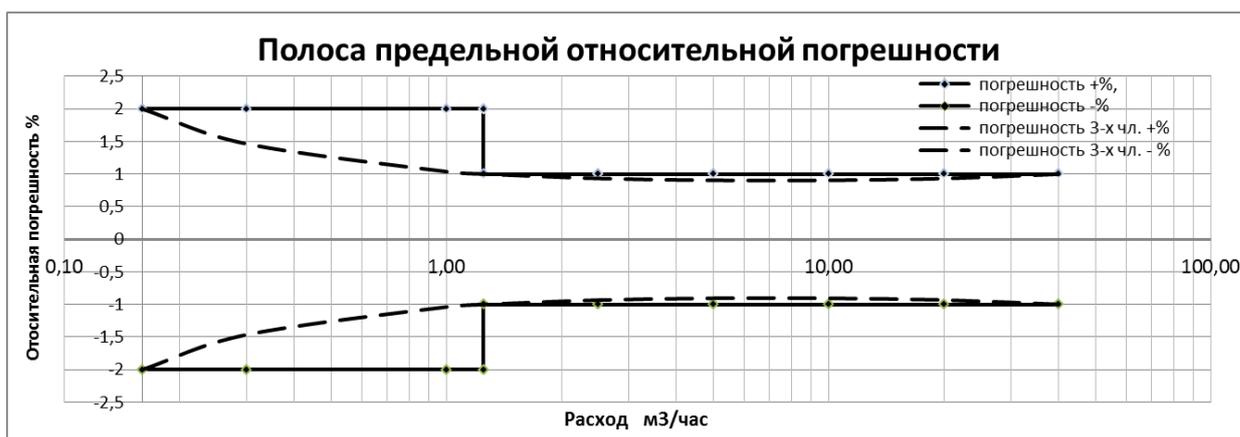


Рис.1 Полоса предельной относительной погрешности. Масштаб логарифмический

Наглядно видно, что ступенчатое задание функции предельной погрешности не адекватно отражает полосу погрешности в нижней части диапазона. Двухчленная формула нормирования предельной погрешности, использующая аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности, в широком диапазоне также не позволяет задавать полосу предельной погрешности без поддиапазонов.

В [5] показано, что полосу предельной относительной погрешности широкодиапазонных приборов, к которым относятся также и расходомеры, целесообразно и обоснованно нормировать выражением, состоящим из трех составляющих

$$\delta X = \delta_a \cdot \frac{X_n}{X} + \delta_m + \delta_2 \cdot \frac{X}{X_v} \quad (1)$$

где X , X_n , X_v - соответственно, текущее значение измеряемой величины, нижняя и верхняя границы диапазона измерения;

δ_m - мультипликативная составляющая относительной погрешности.

$\delta_a = \Delta_a / X_n$ - составляющая относительной погрешности, определяемая аддитивной погрешностью измерения, Δ_a - аддитивная составляющая абсолютной погрешности;

$\delta_2 = \Delta_2 / X_v$ - составляющая относительной погрешности, определяемая абсолютной погрешностью нелинейности Δ_2 при $X = X_v$.

Тогда, приведенная внутри ступенчатой функции на рис.1 полоса предельной относительной погрешности будет записана с помощью выражения (1) в виде

$$\delta X = \left(1,15 \frac{0,16}{X} + 0,85 + 0,15 \frac{X}{40} \right) \% \quad (2)$$

где 0,16 ; 40 - нижняя и верхняя границы диапазона измерения,

1,15; 0,85; 0,15 - значения аддитивной, мультипликативной и нелинейной (гиперболической) составляющих предельной погрешности, рассчитанные из данных ступенчатой функции (0,16; 2%), (1,25; 1%), (40; 1%).

Такая форма нормирования предельной погрешности дает информацию об изменении предельной погрешности вдоль всего диапазона измерения и на ее основе может быть проведен анализ прибора.

В работе [6] получено выражение критерия для обобщенной оценки широкодиапазонного прибора по точности и диапазону измерений, справедливого для приборов, полоса предельной погрешности которых нормируется формулой (1).

$$N_{эф} = \frac{\ln\left(\frac{D \cdot \delta_m^2}{(\delta_a + \delta_m) \cdot (\delta_z + \delta_m)}\right)}{2\delta_m} \approx \frac{\ln\left(\frac{D \cdot \delta_m^2}{\delta X_H \cdot \delta X_B}\right)}{2\delta_m} \quad (3)$$

где $N_{эф}$ - количество эффективных (реальных) квантов, на которые данный прибор может разделить диапазон измерения с заданной полосой погрешности

$D = X_B/X_H \gg 1$ - динамический (относительный) диапазон измерения;

$\delta X_H \approx \delta_a + \delta_m$, $\delta X_B \approx \delta_z + \delta_m$ - относительные погрешности, соответственно, в нижней и верхней границе диапазона измерения.

Критерий для обобщенной оценки широкодиапазонного прибора по точности и диапазону измерений не только связывает основные параметры измерительного преобразования: динамический (относительный) диапазон измерений, мультипликативную составляющую относительной погрешности, относительные погрешности в граничных точках диапазона измерения, но и учитывает их взаимное изменение.

Количество эффективных квантов прибора позволяет оценить совокупность ресурсов, заложенных в прибор для проведения измерений. При неизменном $N_{эф}$, невозможно изменить какой-либо из параметров, например, динамический диапазон измерения, не изменив при этом значения одного или нескольких других параметров, в соответствии с формулой (3). Но можно увеличить количество эффективных квантов, снизив, например, мультипликативную составляющую погрешности. А за счет этого уже можно расширить диапазон, не ухудшая граничные погрешности. Значение мультипликативной составляющей это, по сути, погрешность применяемой в приборе однозначной меры. Все значения, лежащие на измерительной шкале прибора ниже, или выше значения меры, будут измеряться с большей погрешностью, чем погрешность меры.

Таким образом, для расширения диапазона необходимо применять более точную меру. Но наибольшая точность достигается только в однозначной мере, которая может быть применена только при измерении в одной точке. Противоречие между точностью и диапазоном справедливо для многих приборов, но при измерении объема оно может быть разрешено. Измерение объема газа представляет собой процесс интегрирования расхода по времени. При этом измеряются оба параметра: и переменный расход и интервал времени. Если всегда выполнены условия равенства объема газа, прошедшего потребителю, и объема, прошедшего через счетчик, то один из измеряемых параметров можно зафиксировать. Из рассмотренного выше критерия следует, что зафиксировать необходимо расход. Интервал времени измеряется и проще и точнее.

В расходомерии газа в качестве меры расхода применяют критическое сопло. С помощью критического сопла можно точно задать постоянный расход, а потребителю нужен широкий диапазон расходов. Это противоречие разрешимо, если допустить, что мгновенный расход через счетчик и мгновенный расход потребителя могут отличаться. Равными должны быть объемы потребителя и счетчика за время работы счетчика. Тогда

применение критического сопла в импульсном режиме позволяет совместить точность однозначной меры с широким диапазоном измерения расхода, определяемым диапазоном изменения времени включения сопла. Импульсный режим достигается применением клапана.

Что это дает?

1. Расход газа через критическое сопло постоянен и задан геометрией сопла, т.е. мы используем точность узкодиапазонной эталонной меры.
2. Но диапазон измерений расхода газа определяется изменением частоты пульсаций клапана, точнее величиной коэффициента импульсного заполнения, который может изменяться в очень широком диапазоне и не зависит от меры.

Таким образом, применяя импульсный метод преобразования расхода, мы принципиально снимаем противоречие между точностью и диапазоном измерения. По крайней мере, теоретически.

Предельные характеристики импульсного счетчика определяются следующими параметрами:

- Предельная нижняя граница диапазона измерения расхода определяется утечкой клапана.
- Предельная точность измерения расхода, приведенного к стандартным условиям, определяется стабильностью расхода критического сопла и точностью измерения температуры и давления.
- Предельная верхняя граница диапазона измерения расхода определяется пропускной способностью критического сопла.

Точность измерения интервала времени намного выше, чем точность задания критического потока. Поэтому точность измерения расхода импульсным методом определяется точностью критического сопла.

Верхняя граница диапазона измерения расхода задается пропускной способностью критического сопла.

Нижняя граница диапазона измерения расхода определится утечкой клапана. Для электромагнитного клапана утечка согласно ГОСТ Р 51842-2001 составляет для Ду от 25 до 80 мм величину не более $0,00006 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На конференциях и в центральных журналах [7,8] сообщалось о ведущейся в ЗАО «ПромСервис» разработке принципиально нового счетчика-расходомера газа «Прамер-210Ех» (далее «счетчик») на основе применения критического сопла в импульсном режиме.

Эта разработка основана на новом методе измерения расхода, называемом импульсный метод. Импульсный метод измерения применим для измерения расхода ко всем текучим средам (газ, пар, жидкость). Но наиболее просто он реализуется для газа.

Принцип действия импульсного счетчика можно проиллюстрировать с помощью структурной схемы импульсного счетчика газа Рис 2.



Рис. 2 Структурная схема импульсного счетчика газа

Структурная схема импульсного счетчика-расходомера состоит из критического сопла, клапана, буферного объема и регулятора давления. Когда клапан открыт, критическое сопло заполняет буферный объем стабильным потоком газа, повышая в нем давление. Когда клапан закрыт, газ, уходя из буферного объема к потребителю, понижает в нем давление. Регулятор давления компенсирует колебания давления в буферной камере и поддерживает у потребителя требуемое выходное давление.

В счетчике «Прамер-210», помимо нового принципа действия, применен новый магнитомеханический клапан. Для своей работы клапан использует энергию потока газа и силу взаимодействия постоянных магнитов. Когда перепад давления на клапане меньше граничного, клапан закрыт под действием силы притяжения постоянных магнитов. По мере расхода газа потребителем, давление газа в буферном объеме падает, увеличивая перепад давления на клапане. При достижении верхней границы перепада давления клапан импульсно открывается и поток газа через клапан заполняет буферную камеру. Поскольку перед камерой расположено сопло с критическим режимом истечения газа, то расход газа через клапан стабилен и не зависит от изменения давления в буферной камере. По мере заполнения буферной камеры газом, рост давления в ней вызывает уменьшение перепада давления на клапане и, при достижении перепадом порога закрытия, клапан скачком закрывается. После чего цикл повторяется. Расход газа через регулятор не прерывен.

Расход газа через счетчик G , приведенный к стандартным условиям, определяется выражением

$$G = G_{кл}(K) \cdot \frac{P}{P_{ст}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ст}}{T}} \cdot \frac{K}{K_{сж}} \quad (4)$$

где $G_{кл}(K)$ - значение расхода через критическое сопло клапана, приведенное к стандартным условиям, определяется в процессе градуировки счетчика. Значение расхода через критическое сопло немного изменяется у нижней границы диапазона измерения из-за специфики работы магнитомеханического клапана, поэтому оно задается в виде функции от коэффициента заполнения K .

$P, P_{ст}$ - рабочее и стандартные абсолютные давления;

$T, T_{ст}$ - рабочая и стандартная абсолютные температуры;

В отличие от известных объемных расходомеров газа, в формуле приведения рабочего объема к стандартным условиям, отношение стандартной и рабочей температур находится под квадратным корнем. Это отличие определяется применением критического сопла, являющимся мерой расхода в счетчике-расходомере.

$K_{сж}$ - коэффициент сжимаемости измеряемого газа.

$K = \frac{\tau}{t}$ - коэффициент заполнения импульсного выходного сигнала клапана, τ - интервал времени открытого состояния клапана в течение периода пульсации, t - период пульсаций клапана.

Параметры импульсного сигнала определяются с помощью индуктивного датчика, размещенного вблизи взаимодействующих магнитов.

Поскольку критическое сопло характеризуется независимостью массового расхода газа от давления после сопла, то встраивание критического сопла в конструкцию клапана не влияет на стабильность расхода через сопло, когда клапан находится в открытом состоянии.

Для работы счетчика необходим достаточный перепад давления на нем. Поскольку счетчик устанавливается на среднем давлении, то за ним далее по трубопроводу всегда стоит регулятор, снижающий давление до низкого. Счетчик берет на себя часть перепада давления регулятора. Регулятор давления, установленный после буферной камеры, обеспечивает снижение пульсаций давления газа у потребителя до нормативных значений и, одновременно, выполняет функции регулирования и стабилизации выходного давления.

Как видно из рис.2 между клапаном и регулятором расположен буферный объем, в котором осуществляется пульсация давления газа. От величины этого объема зависит частота пульсаций клапана, но практически не зависит коэффициент заполнения K . Небольшая погрешность от изменения объема корректируется алгоритмом измерения. Поэтому в качестве буферного объема может использоваться трубопровод между счетчиком и регулятором давления. В счетчике «Прамер-210Ех» буферный объем может изменяться от 8л. до 24л., что для трубы Ду100 соответствует расстоянию от 1 до 3 метров. При этом, ни до себя, ни после себя счетчик не требует прямых участков.

Измерительный участок счетчика «Прамер-210Ех» изображен на Рис.3.

Датчик давления и температуры размещены на корпусе измерительного участка. Текущие значения коэффициента заполнения, абсолютного давления и температуры газа измеряются измерительно-вычислительным блоком (ИВБ) с автономным питанием 3.6 В на литиевой батарее. Автономное питание и близкое расположение датчиков к измерительной схеме упрощает требования к ИВБ по взрывобезопасности, помехоподавлению, защите линии связи от перенапряжений.



Рис. 3 Измерительный участок счетчика «Прамер-210Ех»

Измерительно-вычислительный блок выполнен на простом микроконтроллере с 10-ти разрядным АЦП. Для повышения точности измерения применен метод сложного отношения. [9] Недостаток разрядности АЦП компенсируется необходимым усреднением отсчетов измеряемых величин, а инструментальная систематическая погрешность корректируется методом сложного отношения.

Применение метода сложного отношения позволило выполнить каналы измерения температуры и давления на основе дешевых, малопотребляющих электронных элементов. При этом обеспечен 4-х кратный запас точности по отношению к требованиям по точности для каналов измерения температуры и давления.

Примененное решение также значительно снизило потребление энергии, что позволило на одной литиевой батарее обеспечить работоспособность счетчика в течение срока эксплуатации не менее 10 лет.

На Рис.4 изображена структурная схема измерительного участка (ИУ) с блоком интерфейса, коррекции и связи (БИКС), буферным объёмом и регулятором давления.

В измерительный участок (обведен пунктирной линией) входят элементы:

- первичный преобразователь расхода с установленным внутри магнитомеханическим клапаном с критическим соплом (ММК),
- измерительно-вычислительный блок (ИВБ),
- первичный преобразователь абсолютного давления (ППД),
- первичный преобразователь температуры (ППТ).

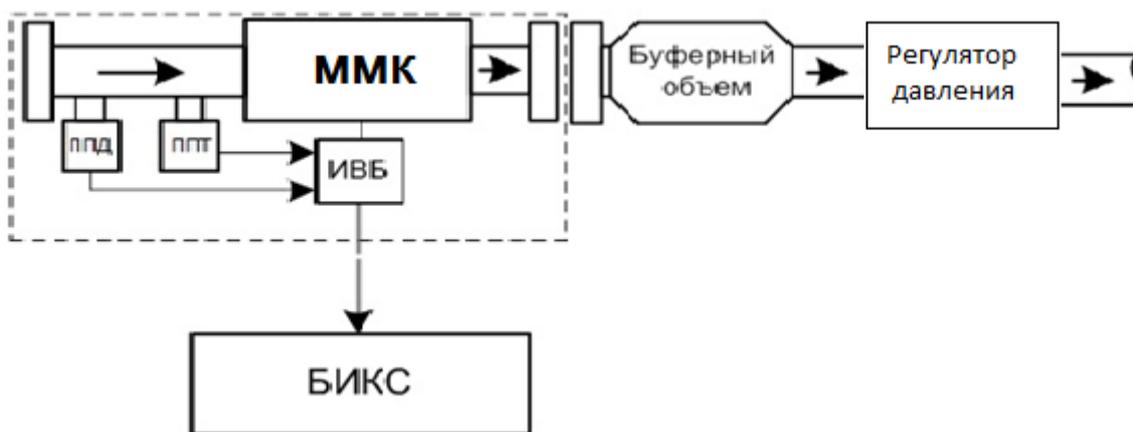


Рис. 4 Структурная схема ИУ с БИКСом, буферным объемом и регулятором давления.

Информация от ИВБ передается по линиям связи цифрового интерфейса RS 485 на БИКС, предназначенный для установки во взрывобезопасной зоне. БИКС устанавливается в месте, удобном для визуального контроля показаний, но не более чем 400 м от измерительного участка. Питание интерфейса RS 485 обеспечивается от БИКС.

Принятая структурная схема узла учета газа позволяет разнести измерительную (аналоговую и аналого-цифровую) и вычислительную (цифровую) электронику, оставив между ними только цифровой интерфейс. Уходят аналоговые линии связи, дополнительные барьеры искрозащиты, канал цифровой связи делается гальванически развязанным, что важно для защиты от перенапряжений. Функции корректора могут выполнять панельные компьютеры с сенсорным экраном и развитой периферией. Это дает еще одно преимущество по сравнению с существующими корректорами.

Испытания

В декабре 2013г. во Всероссийском НИИ Расходомерии (ВНИИР) г.Казань были проведены метрологические исследования опытного экземпляра импульсного счетчика газа «Прамер-210Ех». Испытания проходили на участке ЭУ-4 государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006 при давлении газа в трубопроводе 0,5МПа. По результатам испытаний получены метрологические характеристики импульсного счетчика газа «Прамер-210Ех». После проведенной калибровки, отклонения результатов измерений расхода, приведенного к стандартным условиям, в диапазоне от 3 до 80 ст. м³/час не превысило 0,5%.

Испытания на меньших расходах обеспечивает эталонный газовый стенд ЗАО "ПромСервис". Нижняя граница диапазона измерения счетчика "Прамер-210Ех" на эталонном стенде ЗАО «ПромСервис» составляет 0,26 ст. м³/час, но этот стенд пока не аттестован.

Поскольку градуировка и поверка счетчика проводится при рабочем давлении в трубопроводе в диапазоне 0,3-0,6 МПа, то в процессе градуировки и поверки должны участвовать преобразователи давления и температуры комплекса счетчика "Прамер-210Ех", которые размещены в конструктиве измерительного участка. Таким образом, при приведении объема газа к стандартным условиям, в характеристике счетчика частично учтены систематические погрешности измерения температуры и давления.

В испытаниях, проводимых на эталонной установке ЗАО "ПромСервис", опытные экземпляры счетчика "Прамер-210Ех" показали относительную погрешность измерения объема газа не более 0,6% в диапазоне измерения от 0,5 до 60 ст. м³/час (1:120) и не более 1% в диапазоне измерения от 0,26 до 80 ст. м³/час (1:300).

При нормировании формулой (1) полоса предельной относительной погрешности счетчика «Прамер-210 Ех» соответствует выражению (5) и имеет вид Рис.5.

$$\delta X = \left(0,634 \frac{0,26}{X} + 0,366 + 0,134 \frac{X}{80} \right) \% \quad (5)$$

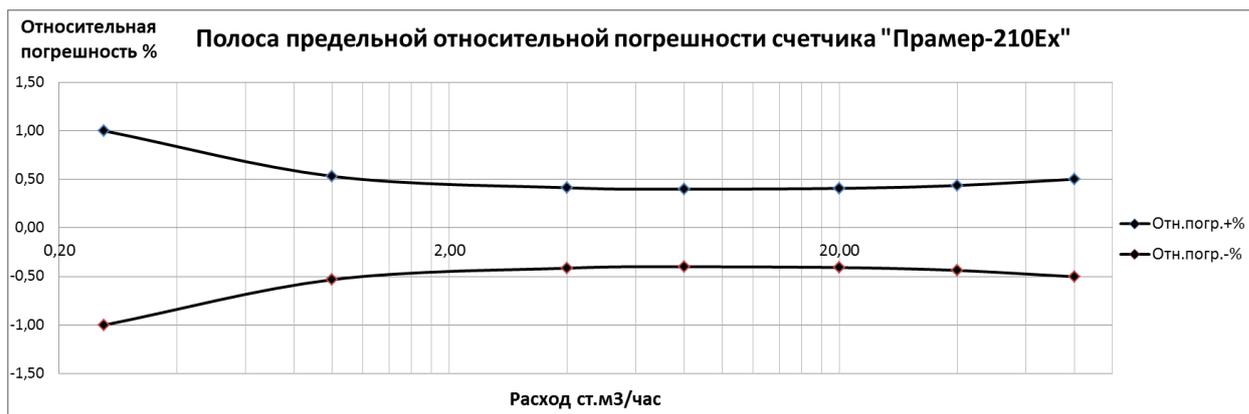


Рис.5 Полоса предельной относительной погрешности счетчика «Прамер-210Ех»

Эти результаты получены при проведении испытаний в четырех режимах :

- при двух различных значениях абсолютного давления 0,55 и 0,6 МПа;
- при двух различных значениях буферного объема 8л. и 24л.

Таким образом, применение критического сопла, работающего в импульсном режиме, в качестве меры счетчика-расходомера газа, показало высокую точность измерений. При этом, динамический (относительный) диапазон измерений с относительной погрешностью 1% достигает значения 1:300 и ограничивается только свойствами и конструкцией магнитомеханического клапана.

В отличие от счетчиков без движущихся частей, импульсный счетчик включает в себя магнитомеханический клапан, поршень которого совершает возвратно-поступательное движение при срабатывании клапана. Поэтому к вопросам обеспечения надежности работы клапана обращено особое внимание. Конструкция клапана выполнена таким образом, чтобы в граничных положениях движение поршня максимально тормозилось для минимизации усилия остановки. Это значительно снижает нагрузку на конструкцию. Приняты меры, предупреждающие загрязнение трущихся поверхностей. Поток газа, истекающий со сверхзвуковой скоростью из критического сопла, надежно очищает пространство внутри клапана от загрязнения и оледенения. Импульсный счетчик показал работоспособность при температуре газа -20°С при влажности газа выше точки росы.

Важно, что точность измерения счетчиком определяется, прежде всего, не состоянием клапана, а состоянием критического сопла. Как известно [3] , критические

сопла характеризуются повышенной стабильностью метрологических характеристик. Увеличение протечки клапана по мере эксплуатации отражаются только на пороге чувствительности счетчика и погрешности в нижней границе диапазона измерения.

Структурные схемы импульсных счетчиков защищены патентами [10,11].

Работа выполнена в ЗАО "ПромСервис" г. Димитровград. Автор статьи выражает свою благодарность руководству ЗАО "ПромСервис" за предоставленную возможность выполнения этой работы, а также, коллективу ПТО, принимающего активное участие в разработке нового счетчика.

Литература

1. ISO 9300:1990 (E). Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
2. МИ 1538-86, ГСИ Критические расходомеры, Методика выполнения измерений массового расхода газа.
3. А. П. Герасимов, В. П. Иванов, В. М. Красавин, В. М. Лахов, С. В. Раинчик, О. К. Семенова. Свойства потоков газа при разных режимах течения через сопла Лавалья // Измерительная техника-2005.-№4, с.40-44.
4. А. П. Герасимов, В. П. Иванов, В. М. Красавин, В. М. Лахов, С. В. Раинчик, О. К. Семенова Область применения сопел Лавалья в расходоизмерительной технике // Измерительная техника-2005.-№4, с.48-52.
5. Цыбульский О.А. Погрешность широкодиапазонных измерений // Законодательная и прикладная метрология-2010.-№4, с.5-10.
6. Цыбульский О.А. Критерий для обобщенной оценки широкодиапазонного прибора по точности и диапазону измерений // Измерительная техника. -2014. - №5. – С. 5-7.
О. А. Tsybulskii Criterion for Generalized Evaluation of Wide-Range Instrumentation with Respect to Accuracy and Measurement Range // Measurement Techniques August 2014, Volume 57, Issue 5 , Page 479-483.
7. Цыбульский О.А. «Импульсный счетчик газа «Прамер-210» // Материалы Международной метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов», 4-6 сентября 2013г., Казань, Россия, с. 58-61.
8. Цыбульский О.А. Импульсный счетчик - расходомер газа // Мир измерений. -2013. №4.- С. 11-16.
9. Цыбульский О.А., Гумеров М.Ф. Применение метода сложного отношения для повышения точности измерения температуры и давления в счетчике-расходомере «Прамер-210» // Материалы XV Международной научно-практической конференции «Энергоресурсосбережение. Диагностика-2013» г. Димитровград, 26-28 марта 2013 г., с.110-118.
10. Цыбульский О. А. Способ и система измерения расхода в линии подачи текучей среды, варианты. - Евразийский патент на изобретение №010613. Приоритет от 06.12.2006г.
11. Цыбульский О.А. Система измерения расхода текучей среды. – Российский патент на полезную модель №111637. Приоритет от 22.09.2011г.