



ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ГАЗА МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ

А.В. Кротов, Е.Н. Браго (РГУНГ им. И. М. Губкина),
В.В. Смирнов (ОАО "Газпром")

Приводится анализ дополнительной систематической погрешности, возникающей при измерении расхода пульсирующих потоков газа методом переменного перепада давлений, для двух видов пульсаций. Рассматривается способ устранения погрешности на газоизмерительных станциях. Особенность способа заключается в коррекции расхода пульсирующих потоков газа с помощью устройства, преобразующего сигналы от быстродействующих датчиков давления перед диафрагмой и перепада давлений на диафрагме. Приводятся примеры коррекции расходов газа для пульсаций произвольной формы.

Учет количества газа при его транспортировке по магистральным газопроводам связан с рядом трудностей, основной из которых является проблема учета расхода пульсирующих потоков газа. При транспортировке газа по магистральным газопроводам в последних возникают пульсации параметров потока, которые оказывают негативное влияние как на саму газотранспортную систему, так и на результаты измерений технологических параметров. Эта проблема особенно существенна для систем коммерческого учета газа, так как затрагивает экономические стороны при расчетах между поставщиками и потребителями газа. Пульсации расхода газового потока носят случайный характер и возникают по ряду причин, например:

- за счет поршневых перекачивающих нагнетателей или двигателей, скопления конденсата в газопроводах (или газов в водопроводах), срывов вихрей с различного рода неровностей (швов, уступов, углов, неполностью закрытой запорной арматуры);
- из-за недостаточно отлаженных насосов, образования пробок, тройников, заглушенных участков трубопроводов, образующих "свистки";
- вследствие изношенных клапанов или плохо настроенных регуляторов давления, автоматического слива конденсата или уда-

ления шлаков из сепараторов, коммутационных процессов в газовых сетях.

Основным методом измерения расхода газа на газоизмерительных станциях в настоящий момент является метод переменного перепада давлений. Структурная схема измерения расхода газа методом переменного перепада давлений показана на рис. 1.

Этот метод является косвенным методом измерения, то есть в нем отсутствует непосредственное измерение расхода, а о его величине судят по значениям параметров потока (давлению, перепаду давления на диафрагме и температуре). Для определения расхода используется следующая зависимость между расходом газа и параметрами потока:

$$q_c = c_q \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \Delta P}{T}}, \quad (1)$$

где: q_c — объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям; c_q — коэффициент расхода (зависит от свойств газа и параметров измерительного трубопровода и диафрагмы); P — давление газа перед диафрагмой; ΔP — перепад давлений на измерительной диафрагме; T — температура газа.

Данная зависимость носит квадратичный характер и здесь заключается основная проблема, связанная с измерением пульсирующих потоков газа, так как точность данного метода напрямую

зависит не только от точности используемых датчиков давления, перепада давлений и температуры (на газоизмерительных станциях используются датчики с высоким классом точности порядка 0,015...0,1 %), но и от быстродействия используемой системы измерения расхода газа.

Высокая точность измерения используемых датчиков влечет за собой увеличение инерционности схем преобразования, за счет этого датчики измеряют нереальные значения пульсирующих параметров потока, а усредненные. Но корень квадратный из произведения средних значений давления на перепад давлений всегда больше среднего корня из произведения мгновенных значений параметров. В результате в метод переменного перепада давлений вносится дополнительная систематическая погрешность. Увеличение инерционности систем измерения расхода газа связано также с использо-

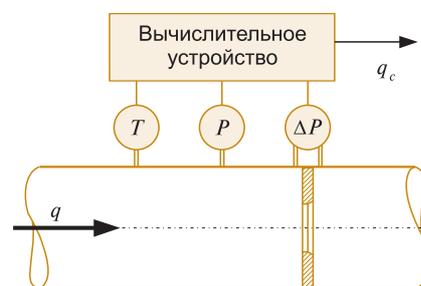


Рис. 1. Структурная схема измерения расхода газа методом переменного перепада давлений

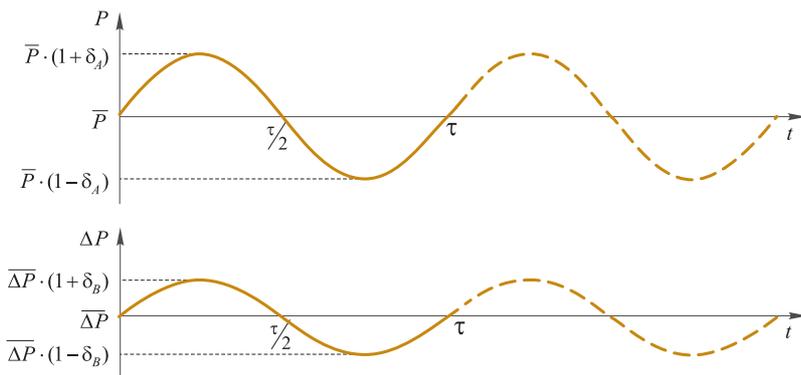


Рис. 2. Синфазные пульсации давления и перепада давлений синусоидальной формы

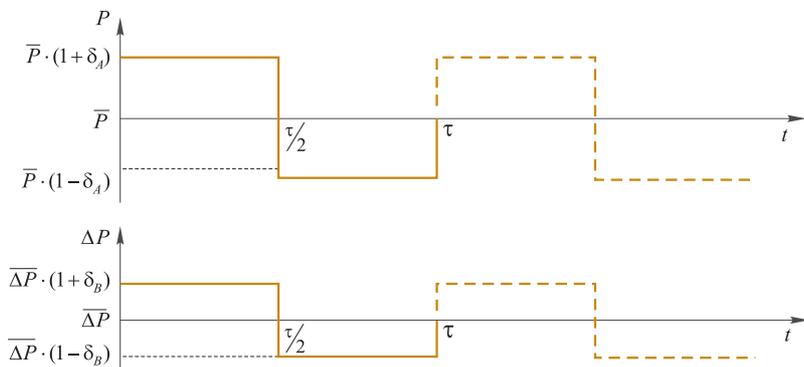


Рис. 3. Синфазные пульсации давления и перепада давлений прямоугольной формы

ванием импульсных трубок для подключения датчиков к измерительной диафрагме, а также низкой скоростью обработки поступающей информации вычислятелями расхода газа.

Произведем оценку погрешности определения расхода пульсирующих потоков газа, возникающую за счет усреднения параметров потока. Для этого рассмотрим пульсации двух крайних видов – синусоидальной формы и прямоугольной формы. Эти пульсации представляют собой граничные формы импульсов, так как, с одной стороны, при резких изменениях параметров потока они стремятся принять форму прямоугольных импульсов, а при выравнивании потока форма импульсов принимает синусоидальный вид. Однако в реальных условиях пульсации давления и перепада давлений носят случайный характер и могут иметь различные спектры.

Рассмотрим импульсы синусоидальной формы для случаев синфазного (рис. 2) и противофазного

изменения давления и перепада давлений.

Давление и перепад давлений для данного типа пульсаций выражаются следующим образом:

$$P(t) = \bar{P} \cdot \left(1 + \delta_A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot t\right) \right), \quad (2)$$

$$\Delta P(t) = \bar{\Delta P} \cdot \left(1 \pm \delta_B \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot t\right) \right), \quad (3)$$

где: \bar{P} и $\bar{\Delta P}$ – средние значения давления и перепада давлений соответственно;

$$\delta_A = \frac{\tilde{P}}{\bar{P}} \text{ и } \delta_B = \frac{\tilde{\Delta P}}{\bar{\Delta P}} - \text{соответственно}$$

относительные отклонения давления и перепада давлений от своих средних значений;

\tilde{P} и $\tilde{\Delta P}$ – переменные составляющие давления и перепада давлений. В выражении (3) знак "+" ставится для синфазного изменения давления и перепада давлений, а знак "-" – для противофазного изменения P и ΔP .

Ограничимся рассмотрением дополнительной систематической

погрешности от пульсаций только для одного периода, так как для остальных периодов погрешность будет идентичной.

Выражение для определения среднего расхода, вычисляемого по средним значениям параметров, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{q}_c &= \frac{\int_0^\tau \tilde{N} \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \bar{P} \cdot dt}{\tau} = \\ &= \frac{C \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \bar{P} \cdot \tau}{\tau} = C \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \bar{P}}, \quad (4) \end{aligned}$$

где: \bar{q}_c – расход газа, рассчитываемый по усредненным параметрам; t – период пульсаций;

$$C = \frac{c_q}{\sqrt{T}}$$

Выражение для определения среднего расхода газа с учетом переменной составляющей давления и перепада давлений является интегральным и неудобно для аналитических расчетов. Чтобы просчитать интеграл численным методом, разделим период импульса на n равных частей. Тогда средний расход можно приближенно вычислить так:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{cн} &\approx \bar{q}_c \cdot \\ &\frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{\left(1 + \delta_A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right) \cdot \left(1 \pm \delta_B \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right)}}{n} \quad (5) \end{aligned}$$

Используя выражение (5), состоящее из n слагаемых, можно добиться требуемой точности определения расхода пульсирующих потоков газа, увеличивая число разбиений периода пульсаций (число n). Для нашего примера используем $n = 100$.

Принимая во внимание выражения (4) и (5), погрешность измерения расхода газа по усредненным параметрам будет определяться следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \frac{\bar{q}_c - \bar{q}_{cн}}{\bar{q}_{cн}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\bar{n} - \sum_{i=0}^n \sqrt{\left(1 + \delta_A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right) \cdot \left(1 \pm \delta_B \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right)}}{\sum_{i=0}^n \sqrt{\left(1 + \delta_A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right) \cdot \left(1 \pm \delta_B \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{n} \cdot i\right)\right)}} \cdot 100\% \quad (6) \end{aligned}$$

Произведем оценку этого выражения для следующих значений: $\delta_A = 0,05$; $\delta_B = 0,2$.

Тогда $\gamma_c = 0,143\%$ – для случая синфазного изменения давления и перепада давлений и $\gamma_c = 0,395\%$ – для случая противофазного изменения давления и перепада давлений.

Далее рассмотрим пульсации давления и перепада давлений прямоугольной формы, изменяющихся синфазно (рис. 3) и в противофазе.

Выражения, описывающие изменения давления и перепада давлений за один период, имеют вид:

$$P(t) = \begin{cases} \bar{P} \cdot (1 + \delta_A), & 0 \leq t < \tau/2 \\ \bar{P} \cdot (1 - \delta_A), & \tau/2 \leq t < \tau \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta P(t) = \begin{cases} \overline{\Delta P} \cdot (1 \pm \delta_B), & 0 \leq t < \tau/2 \\ \overline{\Delta P} \cdot (1 \mp \delta_B), & \tau/2 \leq t < \tau \end{cases} \quad (8)$$

где: $\delta_A = \frac{\tilde{P}}{\bar{P}}$ и $\delta_B = \frac{\tilde{\Delta P}}{\overline{\Delta P}}$ – соответственно относительные отклонения давления и перепада давлений от своих средних значений; \bar{P} и $\overline{\Delta P}$ – переменные составляющие давления и перепада давлений. В выражении (8) верхний знак ставится для синфазного изменения давления и перепада давлений, а нижний – для противофазного изменения P и ΔP .

Средний расход газа за один период пульсации, определяемый по усредненным значениям давления и перепада давлений, рассчитывается по формуле (4). Средний расход газа за один период пульсации с учетом переменной составляющей давления и перепада давлений определяется как:

$$\bar{q}_{cП} = \bar{q}_c \cdot \frac{[\sqrt{(1+\delta_A) \cdot (1 \pm \delta_B)} + \sqrt{(1-\delta_A) \cdot (1 \mp \delta_B)}]}{2} \quad (9)$$

Определим относительную погрешность измерения расхода газа при усреднении параметров потока, используя выражения (4) и (9):

$$\gamma_n = \frac{\bar{q}_c - \bar{q}_{cП}}{\bar{q}_{cП}} \cdot 100\% = \frac{2 \cdot [\sqrt{(1+\delta_A) \cdot (1 \pm \delta_B)} + \sqrt{(1-\delta_A) \cdot (1 \mp \delta_B)}]}{\sqrt{(1+\delta_A) \cdot (1 \pm \delta_B)} + \sqrt{(1-\delta_A) \cdot (1 \mp \delta_B)}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Произведем оценку погрешности определения расхода газа по

средним значениям параметров для следующих величин: $\delta_A = 0,05$; $\delta_B = 0,2$.

В этом случае $\gamma_n = 0,287\%$ – для синфазного изменения давления и перепада давлений; $\gamma_n = 0,795\%$ – для случая противофазного изменения P и ΔP .

Так как синусоидальные и прямоугольные формы импульсов являются граничными случаями пульсаций, можно считать, что погрешность от пульсаций параметров потока для всех остальных видов пульсаций будет лежать между значениями рассмотренных выше форм импульсов.

Основной характеристикой систем коммерческого учета газа является точность измерения расхода, поэтому дополнительная погрешность на газоизмерительных станциях крайне нежелательна. В связи с этим в настоящее время на предприятиях газотранспортного комплекса предпринимаются различные меры по снижению погрешности, вызванной пульсациями параметров потока газа.

Один из способов борьбы с пульсациями заключается в устранении пульсаций конструктивными методами – обустройство газоизмерительных станций различными дорогостоящими спрямителями потоков, балластными емкостями, акустическими фильтрами и т. д. Этот способ производит сглаживание пульсаций потока, но не устраняет их полностью и, что особенно важно, имеет высокие капитальные затраты.

Другой способ борьбы с пульсациями потоков газа рекомендован ГОСТ 8.563.2-97 (формула Д.3). Он заключается во введении в измерение коррекции на систематическую погрешность $\bar{\gamma}_q$, которую предлагают вычислять по эмпирической формуле:

$$\bar{\gamma}_q = 12,5 \cdot \left[\frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P} \cdot \left(\frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P} - 2 \cdot \frac{\tilde{P}}{\bar{P}} \right) + \left(\frac{\tilde{P}}{\bar{P}} \right)^2 \right], \quad (11)$$

где $\bar{\gamma}_q$ – дополнительная систематическая погрешность определения среднего расхода за определенный период времени (в ГОСТ 8.563.2-97 эта величина называется дополнительной си-

стематической погрешностью определения количества среды);

$\frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P}$ и $\frac{\tilde{P}}{\bar{P}}$ – относительные изменения параметров потока: соответственно перепада давления на диафрагме и плотности среды.

Чтобы произвести оценку величины погрешности при определении количества среды по выражению (11), перейдем от рассмотрения относительного изменения плотности к относительному изменению давления. Известно, что плотность потока и давление связаны между собой следующей зависимостью:

$$\rho = \frac{P}{z \cdot R \cdot T}, \quad (12)$$

где: ρ – плотность потока; P – давление в трубопроводе; z – коэффициент сжимаемости газа; R – газовая постоянная; T – температура газа.

Тогда относительное изменение плотности газа в формуле (14) можно заменить на относительное изменение давления следующим образом:

$$\bar{\gamma}_q = 12,5 \cdot \left[\frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P} \cdot \left(\frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P} - 2 \cdot \left(\frac{\tilde{P}}{\bar{P}} - \frac{\tilde{z}}{z} \right) \right) + \left(\frac{\tilde{P}}{\bar{P}} - \frac{\tilde{z}}{z} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Подставим в выражение (13) следующие величины:

$$\frac{\tilde{P}}{\bar{P}} = 0,05; \quad \frac{\Delta \tilde{P}}{\Delta P} = 0,2; \quad \frac{\tilde{z}}{z} = 0,01.$$

В этом случае получим $\bar{\gamma}_q = 0,344\%$.

Таким образом, эмпирическая формула, предлагаемая в ГОСТ 8.563.2-97, дает значение, лежащее между оценочными значениями, полученными для пульсаций синусоидальной и прямоугольной формы. Однако в данной формуле значение погрешности от пульсаций зависит только от относительных изменений параметров потока и не учитывает форму и характер пульсаций, что также дает неточное значение для корректирования расхода пульсирующих потоков газа.

Следующий вопрос, который остается неясным при использова-

нии формулы Д.3. из ГОСТ 8.563.2-97, каким образом определять значения относительных отклонений давления и перепада давлений. Ведь для этого необходимо знать величины переменных составляющих давления и перепада давлений \bar{P} и $\Delta\bar{P}$, которые необходимо измерять быстродействующими датчиками и постоянно отслеживать их изменение.

На основании рассмотренного выше материала предлагается использовать новый метод автоматической коррекции систематической погрешности, возникающей при измерении расхода пульсирующих потоков газа. С этой целью в существующую систему измерения расхода газа необходимо ввести дополнительные быстродействующие датчики давления и перепада давлений, которые способны производить измерение высокочастотных составляющих переменного сигнала в РМВ. Однако высокое быстродействие датчиков обычно связано с низкой точностью измерения давления и перепада давлений. Поэтому непосредственное использование значений от быстродействующих датчиков для определения расхода пульсирующих потоков газа нецелесообразно за счет того, что высокая погрешность показаний датчиков вызывает увеличение погрешности при определении расхода. В связи с этим предлагается использовать такие датчики для коррекции расхода пульсирующих потоков газа,

определяемого по усредненным значениям параметров, измеряемых с помощью высокоточных датчиков давления и перепада давлений с высокой инерционностью.

Структурная схема коррекции систематической погрешности при определении расхода пульсирующих потоков газа показана на рис. 4.

Принцип действия такой системы выглядит следующим образом. В существующую систему измерения расхода газа с высокоточными инерционными датчиками давления и перепада давлений (на схеме обозначены P и dP), которые служат для измерения усредненных значений давления и перепада давлений \bar{P} и $\Delta\bar{P}$, добавляются быстродействующие датчики давления и перепада давлений, которые имеют невысокую точность и измеряют переменную составляющую параметров потока \tilde{P} и $\Delta\tilde{P}$ (на схеме обозначены как P_{\sim} и dP_{\sim}).

Таким образом, пульсирующие значения давления и перепада давлений можно выразить так:

$$P(t) = \bar{P} + \tilde{P}(t) = \bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\tilde{P}(t)}{\bar{P}}\right), \quad (14)$$

$$\Delta P(t) = \Delta\bar{P} + \Delta\tilde{P}(t) = \Delta\bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\tilde{P}(t)}{\Delta\bar{P}}\right), \quad (15)$$

Средний расход пульсирующих потоков газа за интервал времени t

с учетом переменной составляющей потока определяется следующим образом:

$$\bar{q} = C \cdot \frac{\int_0^{\tau} \sqrt{\bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\tilde{P}(t)}{\bar{P}}\right) \cdot \Delta\bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\tilde{P}(t)}{\Delta\bar{P}}\right)} \cdot dt}{\tau} \quad (16)$$

Учитывая выражения (16) и (4), а также тот факт, что пульсации параметров потока не оказывают существенного влияния на расчет коэффициента расхода C , что позволяет вынести его за знак интеграла как постоянную величину, и заменяя интеграл на сумму, получим следующую формулу для определения коэффициента коррекции расхода пульсирующих потоков газа:

$$k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\tilde{P}_i}{\bar{P}}\right) \cdot \Delta\bar{P} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\tilde{P}_i}{\Delta\bar{P}}\right)}}{n \cdot \sqrt{\bar{P} \cdot \Delta\bar{P}}} \quad (17)$$

В выражении (17) величина n показывает число измерений переменной составляющей за интервал времени t .

В соответствии с теоремой Котельникова величина n должна выбираться из расчета, чтобы частота измерения переменной составляющей была как минимум в два раза больше максимальной частоты из

Http://www.ipu.ru/avtпром

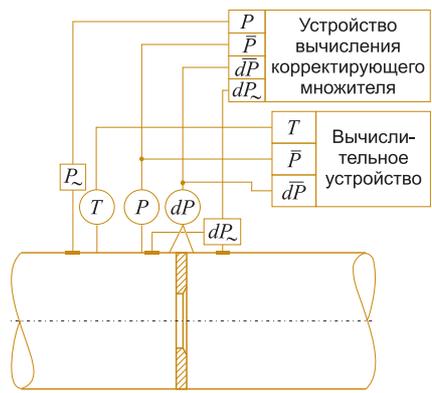


Рис. 4. Структурная схема коррекции систематической погрешности при определении расходов пульсирующих потоков газа.

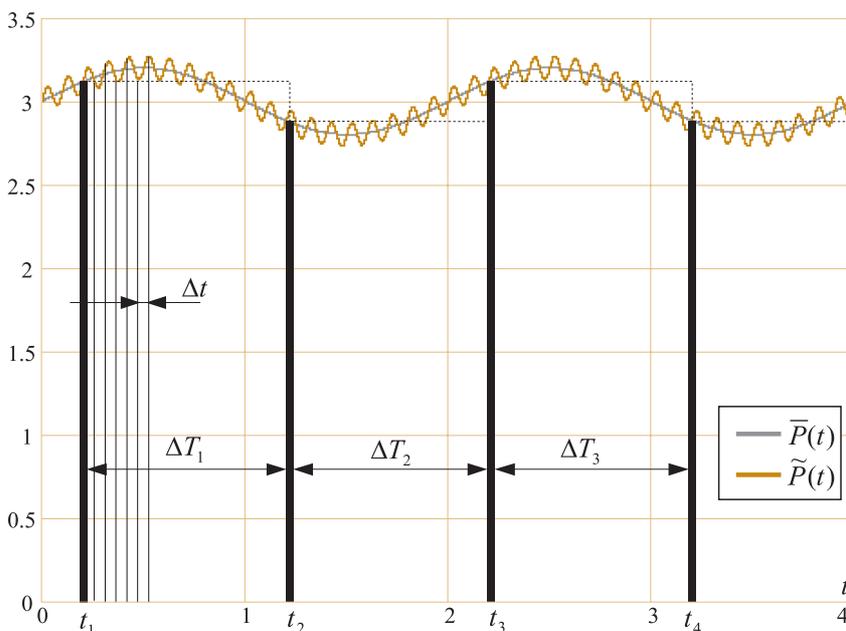


Рис. 5. Временная диаграмма процесса измерения давления.

спектра пульсаций параметров потока. В этом случае по дискретным значениям переменной составляющей можно полностью восстановить форму измеряемого сигнала.

Рассмотрим процесс коррекции расхода пульсирующих потоков газа с помощью временной диаграммы процесса измерения давления, показанной на рис. 5 (процесс измерения перепада давлений имеет аналогичную временную диаграмму).

В моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$ производят измерения среднего значения давления. Измерения среднего давления производят через равные промежутки времени с шагом дискретизации $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \dots = \Delta T_n = \dots = \Delta T$.

Шаг дискретизации выбирается в соответствии с теоремой Котельникова. Если верхняя частота среднего давления имеет частоту $f_p^g = 0,5$ Гц, то для полного восстановления сигнала необходимо производить измерения среднего значения давления с частотой $f_p^{изм} = 2 \cdot f_p^g = 1$ Гц.

$$\text{Тогда } \Delta T = \frac{1}{f_p^{изм}} = 1 \text{ с.}$$

Таким образом, система измерения расхода газа должна произ-

водить измерения средних значений параметров потока через 1 с.

Однако при пульсирующих потоках газа на среднее значение параметров потока накладываются высокочастотные составляющие, которые вносят в результаты измерения дополнительную систематическую погрешность. Чтобы избавиться от этой погрешности необходимо определять амплитуду и форму этой составляющей, как было показано выше. Амплитуда переменной составляющей параметров потока измеряется с помощью быстродействующих датчиков давления и перепада давлений. Если учесть, что верхняя частота высокочастотной составляющей равна $f_p^g = 1,5$ кГц, то для восстановления формы переменной составляющей измеряемого параметра необходимо производить измерения параметров с частотой, по крайней мере, в два раза большей, то есть $f_p^{изм} = 2 \cdot f_p^g = 3$ кГц. В этом случае шаг дискретизации по времени измерения переменной высокочастотной составляющей

$$\text{составляет } \Delta t = \frac{1}{f_p^{изм}} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

или 0,33 мкс.

Затем результаты измерения высокочастотной составляющей

параметров потока перемножаются, и из произведения вычисляется квадратный корень, который затем усредняется за интервал времени ΔT , равный шагу дискретизации измерения средних значений давления и перепада давлений. Эта процедура необходима для вычисления коэффициента коррекции из выражения (17). Как только система измерения расхода газа считывает новые средние значения давления и перепада давлений, система коррекции пульсирующих потоков газа производит вычисление коэффициента коррекции по выражению (17) и через каждый интервал времени ΔT вводит коррекцию на расход пульсирующих потоков газа в газоизмерительную систему, то есть:

$$\bar{q}_c^k = \bar{q}_c - \bar{q}_c \cdot k \quad (18)$$

После того, как измерительная система считает новые средние значения параметров потока, система коррекции расхода начинает новый цикл измерений высокочастотной переменной составляющей давления и перепада давлений и процедура определения коэффициента коррекции расхода повторяется.

Кротов Александр Васильевич – аспирант, **Браго Евгений Николаевич** – д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, преподаватель кафедры "Автоматизация технологических процессов" Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина; **Смирнов Валерий Викторович** – начальник управления метрологии и контроля качества газа ОАО "Газпром".

Контактный телефон (095) 135-75-96.

БИБЛИОТЕКА

"ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА"

Под ред. зав. лабораторией методов автоматизации производства ИПУ РАН Э. Л. Ицковича.

Предлагаются аналитические работы, помогающие правильной ориентации специалистов по автоматизации на современном насыщенном рынке программных и технических средств автоматизации производства и рациональном выборе этих средств.

I. Методика оценки конкурсных заявок и программа обработки результатов голосования экспертной комиссии. Работа состоит из методики проведения экспертизы заявок на средства и системы автоматизации, программы решения задачи многокритериального выбора, инструкции конечного пользователя.

II. Серия аналитических обзоров

Выпуск 1. "Программные средства визуализации измерительной информации для дисплейных пультов оператора (SCADA-программы)".

Выпуск 2. "Микропроцессорные ПТК отечественных фирм".

Выпуск 3. "Сетевые комплексы контроллеров зарубежных фирм на рынке СНГ".

Выпуск 4. "Полномасштабные микропроцессорные распределенные системы управления".

Выпуск 5. "Перспективные программные и технические средства автоматизации: их стандартизация, свойства, характеристики, эффективность эксплуатации".

Выпуск 6. "Интеллектуальные датчики общепромышленного назначения на рынке СНГ".

Выпуск 7. "Современные интегрированные АСУП (ERP-системы) на рынке СНГ. Часть 1. Пакеты отечественных производителей".

Выпуск 8. "Современные интегрированные

АСУП (ERP-системы) на рынке СНГ. Часть 2. Пакеты зарубежных производителей".

По единой форме в этих обзорах описываются важные для потенциальных заказчиков свойства и характеристики разных средств и систем отечественного и зарубежного производства, используемых на предприятиях СНГ и активно поддерживаемых на нашем рынке; проводится сопоставление важнейших показателей однотипных средств разных производителей, что позволяет определить рациональную нишу применения каждого средства. Объем каждого выпуска 100 – 160 страниц.

Справки по вопросам, касающимся содержания работ и их заказа можно получить у проф. Э. Л. Ицковича по тел. и факсу (095) 334-90-21, по E-mail: itskov@ipu.rssi.ru