

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ: ПРИЛОЖЕНИЯ РЕШЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ГАЗА НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ «ТОЧНОЙ» МОДЕЛИ

Левин С.Ф. (Levin S.), д.т.н., профессор, Московский институт экспертизы и испытаний

## ВВЕДЕНИЕ

Учет расхода природного газа [1] по данным измерений физических величин, характеризующих его свойства при движении в трубопроводе, требует решения измерительных задач [2 – 3], математическое и программное обеспечение которых должно быть аттестовано путем экспериментального определения характеристик погрешности неадекватности используемых математических моделей и вычислительных алгоритмов. Эти погрешности, возникающие за счет аналитической структуры математических моделей, методов оценивания их параметров, погрешностей измерений и их трансформирования при вычислениях, разделяют на структурные, параметрические и размерностные [4].

Внедрение в методики определения расхода газа [5 – 6] «Руководства по выражению неопределенности измерения» (GUM) [7] выразилось в том, что «относительную стандартную неопределенность результата измерений величины  $y$ , определяемую косвенным методом, которая связана функциональной зависимостью с измеряемыми величинами  $y_i$  (например, температурой, давлением, компонентным составом)  $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , рассчитывают по формуле

$$u'_y = \left[ u_{MF}^2 + \sum_{i=1}^n \partial_{y_i}^2 u_{y_i}^2 \right]^{0,5}$$

где  $u'_{MF}$  — неопределенность, приписываемая функциональной зависимости;  $u'_{y_i}$  — неопределенность результата измерения  $i$ -й величины;  $\partial_{y_i}^2$  — относительный коэффициент чувствительности величины  $y$  к изменению  $i$ -й измеряемой величины». Это — «закон трансформирования неопределенности», и «при известной абсолютной погрешности  $\Delta y$  или относительной погрешности  $\delta y$ , приписываемой функциональной зависимости, неопределенность  $u'_{MF}$  рассчитывают по формуле

$$u'_{MF} = \Delta y \cdot 100 / (y \cdot \sqrt{3}) = \delta y / \sqrt{3} \quad [5].$$

В рамках метода максимального правдоподобия эти формулы являются

следствием принятия гипотез о гауссовом распределении погрешностей измерений и равномерном распределении погрешности неадекватности модели  $y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

Методика [5] предусматривает указание расширенной суммарной неопределенности результатов определения объемного расхода газа, соответствующей «уровню доверия» 0,95. В то же время значение доверительной вероятности  $P$  согласно [8] поверочной схемой для средств измерений объемного расхода газа [9] не установлено, хотя в ней для заимствованных из поверочных схем [10 – 11] рабочих эталонов принято  $P = 0,95$ . При этом пределы допускаемой относительной погрешности для эталонов 1-го разряда должны составлять (0,2...0,5) %, а для рабочих средств измерений — (0,3...4,0) %, чему соответствует  $P = 1$  [12].

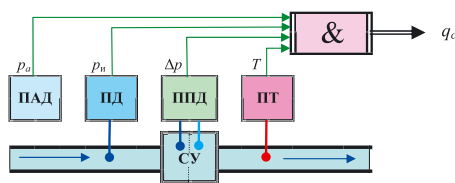


Рис. 1. Измерительная система объемного расхода газа (ПАД, ПД, ППД, ПТ — преобразователи  $p_a$ ,  $p_n$ ,  $\Delta p$  и  $T$ )

Однако в свидетельствах о метрологической аттестации программ, реализующих методики [5 – 6], в монографиях [2 – 3] и в рекомендациях [13] какие-либо данные о характеристиках погрешности неадекватности, в том числе и о  $u'_{MF}$ , отсутствуют.

Так, в свидетельстве № 29605–07 о метрологической аттестации программы «Расходомер-ИСО» указано только то, что она предназначена для расчета неопределенности (погрешности) результата измерений расхода газа, государственного метрологического контроля и надзора, аттестации методик измерений, и соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119 [14].

Однако этот стандарт метрологических требований не содержит.

Сличение [15] показало, что при нулевых стандартных неопределенностях исходных данных для программ «Расходомер-ИСО» и «Расходомер-ОМЦ» расхождение по значениям расхода газа, приведенного к стандартным условиям, не превышает 0,004859 %, а для программы «Флоуметрика» — достигает 0,022292 %. Сличение же расчетных значений расширенной неопределенности для значений расхода газа двух первых программ дало следующие результаты [15]:

при нулевых стандартных неопределенностях исходных данных совпадают первые пять значащих цифр, т. е.  $U_{qc} = 0,52165...%$  при расхождении 0,00015336 % (расчет № 1);

при относительных стандартных неопределенностях плотности, молярных долей азота и диоксида углерода  $u_c = 0,5%$  — две цифры, т. е.  $U_{qc} = 0,72...%$  при расхождении 0,3% (расчет № 2);

при относительных погрешностях определения концентрации компонентов газовой смеси не более 0,05 % и учете норм относительных погрешностей измерений  $\Delta p = 0,25%$  для каждого измерительного канала — ни одной цифры, т. е.  $U_{qc} = 0,602806%$  и  $U_{qc} = 0,596431%$ , а относительное расхождение увеличивается до 0,85% (расчет № 13).

Поэтому ВНИИР не рекомендует «применять программы, не прошедшие сличения на соответствие ГОСТ 8.586.(1-5)–2005 и нормативным документам, регламентирующим расчет физических свойств» газа на территории России.

Следует заметить, что Институтом энергоаудита и учета энергоносителей Украины для решения этих же измерительных задач разработана программа САПР «РАСХОД-РУ». В ее сертификате соответствия № 06.0001.0028 уже фигурируют требования МИ 2891–2004 [16], согласно которым оценивание погрешности, вносимой программным обеспечением, производится по согласованному с заказчиком и исполнителем методикам, а в приложении к сертификату с этого года — еще и « $\pm 0,05%$ » как пределы относительной погрешно-

## КОНТРОЛЬНАЯ ТОЧКА И ВАРИАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Таблица 1

Входная переменная	Значение в контрольной точке	Границы интервалов вариации данных измерений с учетом погрешностей измерений	
		левая	правая
Абсолютное давление, $кгс/см^2$	3,0196	$p_a + p_n - \Delta_1 - \Delta_2 = 2,9713$	$p_a + p_n + \Delta_1 + \Delta_2 = 3,0679$
Перепад давления, $кгс/м^2$	128	$\Delta p - \Delta_3 = 126,112$	$\Delta p + \Delta_3 = 129,888$
Температура, $^{\circ}C$	17	$t - \Delta_4 = 16,62$	$t + \Delta_4 = 17,38$

сти вычислений расхода. При этом тестирование математической модели расхода проводилось путем использования в качестве эталонной программы Microsoft Excel [17 – 18].

Так как сличение не заменяет метрологической аттестации программ, то к организаторам сличений и исполнителям «безгрешной метрологической аттестации» возникает вопрос: существуют ли объективные данные о соответствии результатов вычислений расхода газа установленным требованиям по точности? Каков реальный уровень доверия к результатам подобных вычислений? О каком «уровне доверия» идет речь, если в теории вероятностей и математической статистике [19] уровень доверия представляет собой нижнюю границу доверительной вероятности? И, самое главное, как пользователям оценить соответствие результатов вычислений, например, по программе «Флоуметрика», требованиям поверочной схемы [9]?

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ИЗМЕРЕНИЙ**

Выходной переменной статической математической модели узла учета с измерительным трубопроводом (ИТ) и стандартным сужающим устройством (СУ) [5] является приведенный к стандартным условиям (в обозначениях величин — нижний индекс «с») объемный расход газа

$$q_c = 0,25\pi \cdot d_{20}^2 \cdot [1 + \alpha_{tc} \cdot (T - 293,15)]^2 \cdot \frac{C(Re) \cdot K_{ш} \cdot K_{и} \cdot \varepsilon}{\sqrt{(1 - \beta^4)} \cdot K \cdot \rho_c \cdot p_c / (2T_c)} \cdot \sqrt{\frac{p \cdot \Delta p}{T}} \quad (1)$$

где перепад давления  $\Delta p$ , сумма избыточного и атмосферного давлений  $p = p_u + p_a$  как абсолютное давление и температура  $T$  — непрерывно измеряемые величины,  $d_{20}$  — диаметр отверстия СУ при температуре 20 °С,

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \beta}{Re}\right)^{0,7} + \left[0,0188 + 0,0063\beta^{3,5} \cdot \left(\frac{19000\beta}{Re}\right)^{0,8}\right] \cdot \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,3} + \left[1 - 0,11 \cdot \left(\frac{19000\beta}{Re}\right)^{0,8}\right] \cdot \frac{0,043 + 0,08 \cdot e^{-10\beta} - 0,123 \cdot e^{-7\beta}}{1 - \beta^4} \cdot \beta^4 - 0,031\beta^{1,3} \cdot \left[\frac{2L'_2}{1 - \beta} - 0,8 \cdot \left(\frac{2L'_2}{1 - \beta}\right)^{1,4}\right] \quad (2)$$

— коэффициент истечения при  $D > 0,07112$  м,  $\beta = d/D$  — отношение диаметров отверстия СУ и ИТ при рабочей температуре,  $D = D_{20} \cdot [1 + \alpha_{tT} \cdot (T - 293,15)]$

— диаметр ИТ при рабочей температуре,  $D_{20}$  — диаметр ИТ при температуре 20 °С,  $\alpha_{tcy}$  и  $\alpha_{tT}$  — температурные коэффициенты линейного расширения материала СУ и ИТ, которые рассчитывают по формуле  $\alpha_t = 10^{-6} \cdot [\alpha_0 + \alpha_1 \cdot (t/1000) + \alpha_2 \cdot (t/1000)^2]$ , а коэффициенты  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  находят по таблице Г.1 [20],  $L_1 = L'_2 = 0$  — для углового способа отбора давления,  $L_1 = 1$ ,  $L'_2 = 0,47$  — для 3-радиусного,  $L_1 = L'_2 = 0,00254/D$  — для фланцевого;

$$Re = 4q_c \rho_c / (\pi \cdot D \mu) \quad (3)$$

— число Рейнольдса,  $\mu$  — динамическая вязкость,  $K_{ш} = 1 + 5,22\beta^{3,5} \cdot (\lambda - \lambda^*)$  —



**Проверка средств измерений расхода газа**

коэффициент шероховатости внутренней поверхности ИТ при  $Re_{\min} > Ra > Re_{\max}$ ,  $Ra$  — среднеарифметическое отклонение профиля внутренней поверхности ИТ вида и материала согласно таблице Д.1 [20],

$$Re_{\max} = 10^4 D \begin{cases} 0,718866\beta^{-3,887} + 0,364 & \text{при } Re \leq 10^4 \\ A_0\beta^{-4} + A_2 & \text{при } Re > 10^4 \text{ и } \beta < 0,65 \\ A_0,65^4 + A_2 & \text{при } Re > 10^4 \text{ и } \beta \geq 0,65 \end{cases} \quad (4)$$

$$Re_{\min} = 10^4 D \begin{cases} \frac{7,1592 - 12,387\beta - (2,0118 - 3,469\beta) \cdot \lg(Re) + (0,1382 - 0,23762\beta) \cdot [\lg(Re)]^2}{-0,892363 + 0,243081\lg(Re) - 0,0162562 \cdot [\lg(Re)]^2} & \text{при } \beta < 0,65 \\ \geq 0 & \text{при } \beta \geq 0,65 \end{cases} \quad (5)$$

при  $Re < 3 \cdot 10^6$  принимают  $Ra_{\min} = 0$ , коэффициенты  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  рассчитывают по формуле

$$A_j = \sum_{k=0}^3 B_k [\lg(Re)]^k \quad (6)$$

$B_k$  — постоянные коэффициенты согласно таблице 2 [21];  $\lambda$  и  $\lambda^*$  — коэффи-

циенты трения, рассчитанные по формуле  $\lambda = \{1,74 - 21\lg[2A_{ш}/D - (37,361g(k_D - k_R \lg(k_D + 3,333k_R)))/Re]\}^{-2}$  при действительном числе Рейнольдса и действительном  $R_{ш}$  и условном  $R_{ш}^*$  значениях эквивалентной шероховатости согласно п.7.1.5 [20],  $A_{ш}$ ,  $k_D$ ,  $k_R$  — коэффициенты из таблицы 3 [21];  $K_{и} = 0,9826 + \{[1,95 \cdot 10^{-4} - (1,95 \cdot 10^{-4} - r_n) \cdot e^{-\tau/73}]/d + 0,0007773\}^{0,6}$  — коэффициент притупления входной кромки диафрагмы при ее радиусе более 0,0004d (иначе принимают  $K_{и} = 1$ ),  $r_n$  — начальный радиус входной кромки диафрагмы,  $\tau$  — текущее время эксплуатации диафрагмы с момента последнего определения  $r_n$ ;  $\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) [1 - (1 - \Delta p/p)^{1/\alpha}]$  — коэффициент расширения при  $\Delta p/p \leq 0,25$ ,  $\alpha$  — показатель адiabаты; плотность,  $\text{кг/м}^3$ , —

$$\rho = (\rho_c T_c / p_c) p / (KT) \rho \quad (7)$$

$K = z/z_c$  — коэффициент сжимаемости,  $z$  и  $z_c$  — фактор сжимаемости [22], определяемый по данным измерений химического состава газа 1) модифицированным методом «NX19 мод» для не содержащих сероводород газов с плотностью  $\rho_c = (0,668...0,700)$   $\text{кг/м}^3$ , температурой (250...290) К и давлением до 3 МПа — при распределении газа потребителям; 2) методом «GERG-91 мод» [23 – 24] и AGAS-92DC [25] для не содержащих сероводород газов с плотностью  $\rho_c = (0,668...0,700)$   $\text{кг/м}^3$  при температуре (250...330) К и давлении до 12 МПа — при транспортировании газа по магистральным газопроводам; 3) методом ВНИЦ СМВ для природных газов, в т. ч. содержащих сероводород до 30 мол. %, с плотностью  $\rho_c = (0,70...1,00)$   $\text{кг/м}^3$ , температурой (270...340) К и давлением до 12 МПа — при добыче и переработке газа.

При апробации методов расчета коэффициента сжимаемости было установлено, что в рекомендуемом для применения диапазоне значений параметров состояния газа [22] относительная погрешность распространенного метода «NX19 мод» составляет (0,12...1,09) %.

**АНАЛИЗ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДА ГАЗА ОТ НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН**

Для данных геометрических характеристик измерительной системы (рис. 1) узла учета, физико-химических свойств газа и материала ИТ и СУ, времени эксплуатации диафрагмы и других априорных данных при измеряемых входных переменных модели — атмосферном давлении  $p_a$ , избыточном давлении  $p_u$ , перепаде давления  $\Delta p$  и температуре газа  $T$  — задачу определения расхода газа решают по системе уравнений (1) — (7) методом косвенного измерения.

Схема приведения этого метода [26] позволяет рассчитывать инструментальные погрешности результата в контрольной точке путем вариации данных измерений в пределах допускаемых по-

**ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ПРОГРАММЕ «РАСХОДОМЕР ИСО»**

**Таблица 2**

Таблица расчета неопределенностей измерений расхода при заданных отклонениях температуры и давления среды и заданных значениях перепада давления.				
Температура, град. С	16,62	16,62	17,38	17,38
Абсолютное давление, $\text{кгс/см}^2$	2,9713	3,0679	2,9713	3,0679
Перепад давления $\text{кгс/м}^2$		Объемный расход в стандартных условиях, $\text{м}^3/\text{ч}$		
%		Относительная расширенная неопределенность, (%)		
129,888	(81,18)	17654,4023 1,4156	17940,978 1,4052	17631,0685 1,4156
126,112	(78,82)	17396,919 1,424	17679,2919 1,4136	17373,9263 1,424
Максимально-допустимая расширенная неопределенность определения расхода 4 %				

грешностей средств измерений  $\Delta_k$ ,  $k = \overline{1,4}$ , (см. пример в табл. 1).

Для этого примера надо найти комбинации знаков пределов допускаемых погрешностей измерений, соответствующие верхней и нижней границам вариации расчетного значения расхода газа — границам инструментальной составляющей погрешности (табл. 2).

Здесь контрольной точке соответствуют расчетные значения расхода  $q_c = 17657,24823 \text{ м}^3/\text{ч}$  и расширенной неопределенности  $U_q = 1,414406 \%$  для «уровня доверия» 0,95. При этом только инструментальная составляющая погрешности вычислений расхода газа, приведенного к стандартным условиям, превышает 1,6 % ( $>1,424 \%$ ) и составляет

$$q_c = 17657,24823 \begin{matrix} +283,72977 \\ -283,32193 \end{matrix} \approx \approx (17657 \pm 284) \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Анализ данных таблицы 2 по программе «ММК-стат М» при использовании алгоритма ММКМНК согласно [4] показал, что они могут быть аппроксимированы моделью

$$q_{c-\Delta_3}^{+\Delta_1} = q_{0-\Delta_3}^{+\Delta_1} + C_{э,кв} \cdot \sqrt{\frac{(p_a \pm \Delta_1 + p_{н, \pm \Delta_2}) \cdot (\Delta p \pm \Delta_3)}{T \pm \Delta_4}}, \quad (8)$$

где  $q_0 = -30,607985 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $C_{э,кв} = 15325,2267$  — параметры аппроксимирующей функции, а интервал  $[\Delta_0; \Delta_0^+] = [-1,5152; +1,5129]$  соответствует погрешностям

аппроксимации, которые не превышают 0,0086 %, что по порядку соответствуют расхождению при сличении программ [15] и даже менее погрешности использованного при этом метода «NX19 мод» [22]:

$$17657,25288 \begin{matrix} +285,19277 \\ -284,823071 \end{matrix} \approx (17657 \pm 285) \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Если принять пределы допускаемых погрешностей измерений такого же порядка, как и для первичных преобразователей при аттестации программы «САПР «РАСХОД-РУ», а именно,  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_4 = 0,25 \%$ ,  $\Delta_3 = 0,1 \%$  [27], то инструментальная составляющая погрешности вычислений расхода газа, приведенного к стандартным условиям, точке составит не менее 0,1912 %.

А так как математические модели программ «Расходомер-ИСО» и «САПР «РАСХОД-РУ» имеют общий источник, ГОСТ 8.586-2005, то указанные выше пределы относительной погрешности вычислений расхода, « $\pm 0,05 \%$ », вызывают более чем трехкратное сомнение.

Таблица 3

**ДАНЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТИПОВОГО РАСЧЕТА ПО ПРОГРАММЕ «РАСХОДОМЕР ИСО»**

Абсолютное давление, кгс/см <sup>2</sup>		2,0073	2,8081	2,0073	2,8081
Перепад давления		Объемный расход в стандартных условиях, м <sup>3</sup> /ч			
кгс/м <sup>2</sup>	%	Относительная расширенная неопределенность, %			
160	100	16706,3305	19787,4518	16037,7758	<b>18990,7091</b>
		2,1154	1,8388	2,1143	<b>1,8376</b>
128	80	14951,9778	17707,0257	14353,8079	16994,2345
		2,2600	2,0035	2,2590	2,0023
96	60	12957,745	15343,0795	12439,5565	14725,6554
		2,5445	2,3197	2,5436	2,3187
80	50	11833,3115	14010,5812	11360,2072	13446,901
		2,8017	2,5992	2,8009	2,5984
64	40	10588,595	12535,8396	10165,3871	12031,6301
		3,2219	3,0475	3,2212	3,0468
48	30	<b>9174,6349</b>	10860,9181	8808,0937	10424,238
		<b>3,9811</b>	3,8414	3,9806	3,8408
Максимально-допустимая расширенная неопределенность определения расхода 4 %					

Что же касается возможности (!) оценивания  $u'_{MF}$ , то эту составляющую погрешности неадекватности, по-видимому, должны определять характеристики эталонов 1-го разряда [9].

Если теперь данные расчета объемного расхода газа по программе «Расходомер ИСО» аппроксимировать моделью (8) во всем диапазоне изменения непрерывно измеряемых переменных (табл. 3), то погрешность аппроксимации уравнений модели составит менее 0,107 %.

Рассчитаем теперь инструментальную составляющую погрешности определения расхода газа в точках с наименьшей и наибольшей относительной

При  $\Delta p = 48 \text{ кгс/м}^2$ ,  $p = 2,8081 \text{ кгс/см}^2$  и  $t = +18 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T = 291,15 \text{ K}$ ) расчетное значение объемного расхода газа при относительной расширенной неопределенности 1,8376 % в стандартных условиях  $q_c = 18990,7091 \text{ м}^3/\text{ч}$ , согласно же (8) —  $q_c = 18976,2058 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Пределам допускаемых погрешностей измерений  $\Delta_1 + \Delta_2 = 1,087608524 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2 + 0,0448 \text{ кгс/см}^2$ ,  $\Delta_3 = 1,792 \text{ кгс/м}^2$  и  $\Delta_4 = 0,310 \text{ }^\circ\text{C}$  соответствует инструментальная составляющая погрешности определения расхода газа в пределах  $[-288,3989732; +288,5674469] \text{ м}^3/\text{ч}$ , т. е. не менее 1,52 %, что несколько меньше численного значения относительной расширенной неопределенности.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ УЗЛА УЧЕТА

Таблица 4

Измеряемая величина	Средство измерений	Диапазон измерений		
			основной	дополнительной
избыточное давление	манометр ДМ 1001-400 кПа-1 ТУ	(0...4) кгс/см <sup>2</sup>	1 %	0,06 %/°C × (20 - t) °C
атмосферное давление	барометр М-67	(610...790) мм рт. ст.	0,8 мм рт. ст.	—
температура газа	термометр сопротивления типа МВ	(-50...+50) °C	0,3+0,005× t  °C	—
перепад давления	манометр ДСС-711-1,6 кПа -1,0 ТУ	(0...160) кгс/м <sup>2</sup>	1 %	(0,06 %/°C) × (20 - t) °C

Температура и влажность воздуха в помещении узла учета нормальным условиям соответствуют.

расширенной неопределенностью, учитывая, что при решении прикладных измерительных задач вместо действительных метрологических характеристик средств измерений используют их нормы (табл. 4).

Согласно расчету по программе «Расходомер ИСО» при  $\Delta p = 160 \text{ кгс/м}^2$ ,  $p = 2,0073 \text{ кгс/см}^2$  и  $t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  значение объемного расхода газа в стандартных условиях составляет  $9174,6349 \text{ м}^3/\text{ч}$  с относительной расширенной неопределенностью 3,9811 %, а при расчете согласно (8) без линейризации  $q_c = 9184,441513 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В последнем случае пределам допускаемых погрешностей средств измерений  $\Delta_1 + \Delta_2 = 1,087608524 \cdot 10^{-3} \text{ кгс/см}^2 + 0,10 \text{ кгс/см}^2$ ,  $\Delta_3 = 4,0 \text{ кгс/м}^2$  и  $\Delta_4 = 0,325 \text{ }^\circ\text{C}$  соответствует инструментальная составляющая погрешности определения расхода газа в пределах  $[-634,6875659; +632,9443237] \text{ м}^3/\text{ч}$ , т. е. не менее 6,91 %, что почти ровно в «корень из трех» раз больше относительной расширенной неопределенности.

Таким образом, расчет относительной расширенной неопределенности результата вычисления расхода газа, приведенного к стандартным условиям, по линейризованным формулам закона трансформирования неопределенности GUM приводит к принятию ошибочных решений.

Частично этот дефект устраняет Приложение 1 к GUM [28], где определено условие применимости GUM как «основной концепции неопределенности» и предложено ее обобщение путем трансформирования методом Монте-Карло распределений вероятностей входных переменных модели объекта измерений. «Трансформирование распределений... позволяет получать более обоснованные оценки неопределенности, чем при использовании основной концепции в тех случаях, когда условия для применения последней не выполняются. Эта операция — трансформирование распределений — не нуждается в законе трансформирования неопределенности» [28].

Продолжение следует



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ: ПРИЛОЖЕНИЯ РЕШЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ГАЗА НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ «ТОЧНОЙ» МОДЕЛИ

Левин С.Ф. (Levin S.), д.т.н., профессор, Московский институт экспертизы и испытаний

(Окончание, начало см. № 3-2008)

Тем не менее, два основных дефекта GUM все еще остаются, а именно:

1) постановочный этап оценивания неопределенности не предусматривает статистической идентификации распределений, а ориентирован либо на экспертное оценивание в рамках субъективной концепции вероятности, либо на использование распределения Гаусса;

2) уровень доверия «реалистического» оценивания GUM не соответствует доверительной вероятности «безопасного» оценивания поверочных схем из-за различия между доверительными и толерантными интервалами — первые используются для вычисления последних [29].

В случае распределения Гаусса это различие выражается коэффициентом верхней границы доверительного интервала для оценки параметра рассеяния [30].

Кроме того, приравнивание численных значений относительной расширенной неопределенности и пределов допускаемой относительной погрешности при принятии решения о соответствии точности получаемых результатов нормам поверочной схемы просто недопустимо.

Таким образом, использование аппроксимации (8) для конкретных узлов учета позволяет существенно упростить решение измерительной задачи определения расхода газа, а также использовать программы «Расходомер-ИСО» «САПР РАСХОД-РУ» и прошедшие с ними сличения в целях государственного метрологического контроля.

Квалифицированный надзор за решением этой задачи на сегодняшний день способны осуществлять только специалисты государственной метрологической службы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила учета газа. М.: Минтопэнерго РФ, 1996.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества. Справочник. Кн. 1: 5-е изд. перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2002.
3. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. Львів: Видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергосіів», 2006.
4. Р 50.2.004-2000 ГСИ. Определе-

ние характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

5. ГОСТ 8.586.5-2005 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений.

6. ПР 50.2.019-2006 ГСИ. Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков.

7. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Sec. Ed. — Geneva: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995 (Пер. с англ.: Руководство по выражению неопределенности измерения. СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999).

8. ГОСТ 8.061-80 ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.

9. ГОСТ Р 8.618-2006 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.

10. ГОСТ 8.021-84 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы.

11. ГОСТ 8.558 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.

12. МИ 1317-2004 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

13. МИ 3018-2006 ГСИ. Определение метрологических характеристик измерительных комплексов на базе сужающих устройств современными методами вычислительной гидродинамики.

14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000 Информационная технология. Пакеты программ. Требования к качеству и тестированию.

15. Результаты сличения программных комплексов Флуометрика (ФГУП «ВНИИМС»), Расходомер-ОМЦ (ООО «ОМЦ Газметрология»), Расходомер-ИСО (ФГУП ВНИИР). Казань: ВНИИР, 2007.

16. МИ 2891-2004 ГСИ. Общие требования к программному обеспечению средств измерений.

17. ПМА 081/39.378-2007 Компьютерная программа «САПР «РАСХОД-РУ» (версия 1.0). Программа и методика аттестации. К.: Укрметрстандарт, 2007.

18. МИ 2955-2005 ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений и порядок ее проведения.

19. Вероятность и математическая статистика. Энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999.

20. ГОСТ 8.586.1-2005 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.

21. ГОСТ 8.586.2-2005 ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.

22. ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.

23. Jaeschke M., Humphreys A.E. Standard GERG Virial Equation for Field Use. Simplification of the Input Data Requirements for the GERG Virial Equation — an Alternative Means of Compressibility Factor Calculation for Natural Gases and Similar Mixtures. GERG TM5 1991. GERG Technical Monograph, 1991.

24. ICO/TC 193 SC1 № 63. Natural gas — calculation of compression factor. Part. 3: Calculation using measured physical properties.

25. ICO/TC 193 SC1 № 62. Natural gas — calculation of compression factor. Part. 2: Calculation using a molar composition analysis.

26. Левин С.Ф. Схема приведения в методе косвенного измерения. Измерительная техника, 2004, № 3, с. 5.

27. Свидетельство № 39-1/0466. Протокол аттестации компьютерной программы «САПР «РАСХОД-РУ» (версия 1.0) от 04 июня 2007 г.

28. Кокс М., Харрис П. Основные положения Приложения 1 к Руководству по выражению неопределенности в измерениях. Измерительная техника, 2005, № 4, с. 17.

29. ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов.

30. ГОСТ 50779.21-2004 Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. ☑