

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ НА ЭТАЛОНАХ

Рассмотрены вопросы оценки неопределенности измерений массового и объемного расхода, массы и объема жидкости, протекающей по трубопроводу, на соответствующих эталонах. Развита методика определения неопределенности измерений применительно к эталонам единиц расхода жидкости. Определены составляющие погрешности (бюджет погрешности) и расширенная неопределенность измерений посредством государственного первичного эталона Украины единиц расхода жидкости.

массовый расход жидкости, объемный расход жидкости, погрешность измерения, эталон единиц расхода жидкости

С целью обеспечения единства измерений и сличения национальных эталонов единиц расхода жидкости различных стран, а так же возможности сопоставления результатов измерения расхода жидкости, необходимо осуществить оценку неопределенности, как воспроизведения единиц расхода, так и результатов измерения, которые осуществляются на эталонах единиц расхода жидкости. Это необходимо еще и потому, что при составлении отчета о результатах измерения физической величины, для определения верности ее оценки, необходимо предоставлять количественное значение качества результата так, чтобы можно было верно оценить его надежность. Без такого значения результаты измерений нельзя сличать не между собой, не со справочными значениями, приведенными в спецификации или стандарте [1]. Поэтому всеми государствами, являющимися членами Международного комитета мер и весов (МКМВ) и Международной организации по стандартизации (ISO), было принято характеризовать точность результатов измерений (их погрешности) в терминах неопределенности.

Понятие неопределенности как количественной характеристики есть сравнительно новым в истории измерений, хотя погрешность и анализ погрешности давно применяется в метрологии [2]. В настоящее время признано, что, когда уже оценены все известные и допустимые компоненты погрешности и внесены соответствующие поправки, все еще остается неопределенность относительно истинности установленного результата, то есть остается сомнение в том, насколько хорошо результат измерения отображает значение измеренной величины [1].

Таким образом, для того, что бы результаты измерения, проведенные в разных странах, можно было бы сличить, необходимо, что бы метод оценки и выражения неопределенности был идентичным [1, 3].

На сегодняшний день одними из наиболее значимых измерений являются измерения расхода воды и энергоносителей [4]. Обеспечение единства измерения в данной области в Украине осуществляется

посредством государственного первичного эталона единиц объемного и массового расхода жидкости, объема и массы жидкости, протекающей по трубопроводу, который создан и функционирует в ННЦ «Институт метрологии», г. Харьков [5].

В настоящее время в рамках КООМЕТ проводятся подготовительные работы по сличению этого эталона с аналогичными национальными эталонами Беларуси, Германии, России, Словакии.

В этой связи рассмотрение вопроса о неопределенности измерений расхода жидкости посредством соответствующих эталонов является весьма актуальным, а оценка неопределенности результатов измерений на государственном эталоне Украины представляет очевидный конструктивный интерес.

Целью данной статьи и является развитие методики оценки неопределенности измерений при воспроизведении единиц расхода и калибровке СИТ расхода жидкости на эталонах, определения неопределенности измерений на государственном первичном эталоне Украины единиц расхода жидкости.

Построение эталонов единиц расхода жидкости осуществляется на различных принципах воспроизведения и измерения расхода жидкости в зависимости от необходимой точности измерений, свойств измеряемой среды, диапазона воспроизводимых единиц, требований к автоматизации процесса измерений, стоимости сооружения и проведения метрологических работ и т.п. факторов [6]. Они различаются по способам измерения количества протекающей по трубопроводу жидкости и делятся на статические и динамические, а по виду измерения – на объемные и весовые. При этом существует несколько способов измерения количества жидкости [6]:

- статический весовой, при котором применяется только непосредственное взвешивание;
- статический объемный, при котором применяется только измерения количества жидкости по разнице ее уровня в резервуаре в конечный и начальный моменты измерения;

– динамический объемный, который делится на способы, при которых: объем измеряется по разнице уровня жидкости в резервуаре – уровневые эталоны; измерительный резервуар отсутствует, а количество протекающей жидкости определяется перемещением поршня, который перемещает жидкость в трубопроводе, – трубопоршневые; а так же с системой автоматического регулирования (стабилизации) расхода, в которых в качестве измерительного органа применяется высокоточный расходомер-счетчик.

До последнего времени в мировой гидрометрической практике наибольшее распространение получили эталоны, построенные на принципе статического измерения массы и объема. На этом же принципе построен государственный эталон единиц расхода жидкости Украины. Поэтому рассмотрим методологию оценки неопределенности измерений на эталонах, в основу построения которых положен именно этот принцип измерений.

В рассматриваемом случае измеряемую величину при воспроизведении и передаче единиц расхода эталонами являются объемный или массовый расход, объем или масса жидкости, прошедшая по трубопроводу. Уравнение измерений $y = f(Y_k)$ в этом случае одновременно описывает как метод измерения, так и является исходным функционалом при оценке точности результата измерения.

Для более точного определения объема и объемного расхода жидкости в рассматриваемых эталонах, как было указано выше, реализован метод статического взвешивания, и уравнение измерений $y = f(Y_k)$ описывает значения выходных величин при определении массы (m , кг), объема (V , м³), среднего массового (q_m , кг/час) и объемного (q_v , м³/час) расхода жидкости в зависимости от ее свойств и условий измерения следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} m &= (t_1 - t_0) \cdot \frac{P_1 - P_0}{g} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right); \\ V &= V_1 - V_0 = \frac{m}{\rho} = \frac{P}{g \cdot \rho} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right); \\ q_m &= \frac{m}{\tau} = \frac{P_1 - P_0}{g \cdot \tau} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right); \\ q_v &= \frac{V}{\tau} = \frac{P_1 - P_0}{g \cdot \rho \cdot \tau} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) / \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где m_0 – масса бака с оставшейся жидкостью, кг; m_1 – масса бака с поступившей жидкостью, кг; $P = P_1 - P_0$ – вес жидкости, Н; P_0 – вес бака с оставшейся жидкостью, Н; P_1 – вес бака с поступившей жидкостью, Н; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; V_0 – объем оставшейся в баке жидкости, м³; V_1 – объем заполнившей бак жидкости, м³; τ – время измерения заполнения измерительного бака, час.; ρ_a – плотность воздуха при нормальных условиях (температура $t = 20$ °С, давление $p = 10^5$ Па), кг/м³; $\rho_p = 8000$ – плотность стандартных взвешиваемых объектов, кг/м³.

Второй сомножитель в правой части уравнений (1) есть составляющая коррекции, которая введена для учета влияния выталкивающей силы атмосферы на эту массу жидкости и на эквивалентную массу, которая применяется при проверке взвешивающего устройства.

Для случайных значений погрешности, входящих в модель измерения, в качестве меры рассеивания значений применяется дисперсия или корень квадратный из них – так называемое стандартное отклонение. Как известно, стандартная неопределенность ($u(y)$), связанная с оценкой измеряемой величины y , является стандартным отклонением измеряемой величины и ее оценка по типу А осуществляется по следующей формуле [8]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{q=1}^n (x_q - \bar{x})^2},$$

где n – количество измерений; x_q – значение измеряемой величины; \bar{x} – среднее значение измеряемой величины.

Стандартная неопределенность по типу В оценивается по формуле [8]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial Y_k} \cdot \Delta Y_k \right)^2} / 3,$$

где $\frac{\partial f}{\partial Y_k} \cdot \Delta Y_k$ – границы неисключенной систематической погрешности результата измерения входной величины; ΔY_k – неисключенная систематическая погрешность измерения величины Y_k .

Суммарная стандартная (u_c) и расширенная (U) неопределенности определяются по формулам:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}; \quad U = k \cdot u_c,$$

где k – коэффициент охвата.

В международной расходомерной практике принято пользоваться расширенную неопределенностью при доверительной вероятности $p \approx 0,95$ и соответствующим коэффициентом охвата $k = 2$, то есть $U = 2 \cdot u_c$.

С полным основанием можно предположить, что все значения измеряемых величин, входящих в формулы (1), являются случайными и подчиняются нормальному закону распределения.

При анализе процесса воспроизведения рассматриваемых единиц расхода жидкости, источниками погрешностей являются погрешности, связанные с функционированием взвешивающего устройства, таймера, перекидного устройства и погрешности, обусловленный неточным измерением плотности воды и воздуха.

Проанализировав характер каждой конкретной составляющей погрешности воспроизведения массы, объема и расхода жидкости эталоном, можно констатировать, что:

1) погрешность, обусловленная функционированием весового устройства приводит как к систематической, так и к случайной погрешностям измерения веса;

2) погрешность измерителя времени приводит к систематической погрешности измерения времени наполнения бака;

3) дефекты функционирования перекидного устройства приводят к погрешностям определения времени переброски потока, являющимися составляющими погрешности определения времени наполнения бака при измерении расхода жидкости;

4) коррекция на выталкивающую силу определяется из известных величин ρ и ρ_a . В этом случае имеет место систематическая погрешность, обусловленная определением данных величин;

5) при проведении расчета объемного расхода жидкости имеет место систематическая погрешность определения величины плотности жидкости. Эта погрешность возникает при:

– определении температуры жидкости в измерительном баке;

– использовании СИТ для измерения плотности или таблиц плотности;

6) воспроизводимость процесса переброски потока в измерительный бак и обратно, которым характеризуется работа перекидного устройства, зависит от динамики его движения и степени асимметрии этого движения. Асимметрия движения перекидного устройства приводит к погрешностям измерения величин, воспроизводимых эталоном, которые включают в себя как неисключенные, так и случайные составляющие.

Составляющие погрешностей воспроизведения массы, объема, массового и объемного расхода жидкости – неисключенные систематические погрешности (НСП) $\theta_m, \theta_v, \theta_{q_m}, \theta_{q_v}$ и средние квадратические отклонения (СКВ) $S_m, S_v, S_{q_m}, S_{q_v}$ результатов их воспроизведения могут быть определены в соответствии с [9] следующим образом:

$$\theta_m = K \left[\left(\frac{\partial \tau}{\partial P_1} \Delta P_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial P_0} \Delta P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial g} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial \rho_a} \Delta \rho_a \right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$\theta_v = K \left[\left(\frac{\partial V}{\partial P_1} \Delta P_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} \Delta P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial g} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho_a} \Delta \rho_a \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$\theta_{q_m} = K \left[\left(\frac{\partial q_m}{\partial P_1} \Delta P_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial P_0} \Delta P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \tau} \Delta \tau \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial g} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_a} \Delta \rho_a \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$+ \left(\frac{\partial q_m}{\partial g} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_a} \Delta \rho_a \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$\theta_{q_v} = K \left[\left(\frac{\partial q_v}{\partial P_1} \Delta P_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial P_0} \Delta P_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial \tau} \Delta \tau \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial g} \Delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial \rho_a} \Delta \rho_a \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$S_m = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial P_1} S_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial P_0} S_{P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2};$$

$$S_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial P_1} S_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial P_0} S_{P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2};$$

$$S_{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_m}{\partial P_1} S_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial P_0} S_{P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2};$$

$$S_{q_v} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_v}{\partial P_1} S_{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial q_v}{\partial P_0} S_{P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2}, \quad (2)$$

где K – коэффициент зависимости неисключенных систематических погрешностей от выбранной доверительной вероятности при их равномерном распределении; $\Delta P_0, \Delta P_1, \Delta g, \Delta \rho_a, \Delta \rho, \Delta \tau, \theta_{\Pi}$ – НСП измерения соответствующих величин; $S_{P_0}, S_{P_1}, S_{\Pi}$ – СКО соответствующих величин.

Таким образом, относительные НСП и СКО результатов воспроизведения эталоном единиц массы и объема, массового и объемного расхода жидкости, протекающей по трубопроводу, в соответствии с (2), а так же с тем, что ускорение силы тяжести определено посредством государственного специального эталона единицы ускорения силы тяжести с наивысшей в Украине точностью ($\sigma \leq 2,5 \cdot 10^{-5} \%$) и погрешностью его измерения заведомо можно пренебречь, определяются следующим образом:

$$\theta_{Bm} = K \left[\left(\frac{\Delta P_1}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_a}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\rho_a}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$\theta_{Bv} = K \left[\left(\frac{\Delta P_1}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_a}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2};$$

$$\theta_{Bq_m} = K \left[\left(\frac{\Delta P_1}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{\Delta \rho_a}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\rho_a}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \Big)^{1/2}; \\
 \theta_{BqV} = & K \left[\left(\frac{\Delta P_1}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{\Delta \rho_a}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho - \rho_a} \right)^2 + \theta_{\Pi}^2 \right]^{1/2}; \\
 S_{Bm} = & \sqrt{\left(\frac{S_{P_1}}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{S_{P_0}}{P_1 - P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2}; \\
 S_{BV} = & \sqrt{\left(\frac{S_{P_1}}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{S_{P_0}}{P_1 - P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2}; \\
 S_{Bq_m} = & \sqrt{\left(\frac{S_{P_1}}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{S_{P_0}}{P_1 - P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2}; \\
 S_{Bq_V} = & \sqrt{\left(\frac{S_{P_1}}{P_1 - P_0} \right)^2 + \left(\frac{S_{P_0}}{P_1 - P_0} \right)^2 + S_{\Pi}^2}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Средние квадратические отклонения результатов измерений величин P_0 , P_1 , и $\delta\tau$ определяются по формуле:

$$S_{F_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \Delta F_{ij}^2}{n \cdot (n-1)}},$$

где для удобства записи введены следующие обозначения: $F_1 = P_0$, $F_2 = P_1$, $F_3 = \delta\tau$; $\Delta F_{ij} = F_{ij} - \bar{F}_i$; F_{ij} – результат j -го наблюдения величины F_i ; $\bar{F}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_{ij}$ –

среднее значение величины F_i ; n – количество наблюдений.

Значения составляющих погрешностей измерений единиц расхода созданным эталоном (бюджет его погрешности) в соответствии с формулами (3) представлены в табл. 1.

Таким образом, в результате выполненных исследований развита методика определения неопределенности измерений применительно к эталонам единиц массового и объемного расхода жидкости, показано, что созданный в ННЦ «Институт метрологии» Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единиц объемного расхода жидкости в диапазоне от $2,8 \cdot 10^{-4}$ м³/с до $2,8 \cdot 10^{-2}$ м³/с, массового расхода жидкости в диапазоне от $2,8 \cdot 10^{-1}$ кг/с до 28 кг/с, объема жидкости в диапазоне от 0,1 м³ до 3,0 м³ и массы жидкости в диапазоне от 100,0 кг до 3000 кг; его метрологические характеристики находятся на уровне эталонов развитых стран: НСП (θ_0), СКО (S_0) и расширенная неопределенность U эталона при воспроизведении единиц массового и объемного

расхода, массы и объема жидкости, протекающей по трубопроводу, а также погрешности передачи $S_{\Sigma 0}$ размеров их величин следующие:

$$\begin{aligned}
 \theta_{от} &= 2,86 \cdot 10^{-4}; & \theta_{oV} &= 2,86 \cdot 10^{-4}; \\
 \theta_{oq_m} &= 8,17 \cdot 10^{-5}; & \theta_{oq_V} &= 8,23 \cdot 10^{-5}; \\
 S_{om} = S_{oV} &= 1,76 \cdot 10^{-5}; & S_{oq_m} = S_{oq_V} &= 1,45 \cdot 10^{-5}; \\
 S_{\Sigma om} &= 1,67 \cdot 10^{-4}; & S_{\Sigma oV} &= 1,67 \cdot 10^{-4}; \\
 S_{\Sigma q_m} &= 4,94 \cdot 10^{-5}; & S_{\Sigma q_V} &= 4,97 \cdot 10^{-5}; \\
 U &= 0,02 \%.
 \end{aligned}$$

Таблица 1

Бюджет погрешности измерений эталона

Составляющие погрешности:	Значения погрешностей							
	СКО (S_0)				НСП (θ_0)			
	m	V	q _m	q _V	m	V	q _m	q _V
абсолютного значения ускорения свободного падения	–				2,5·10 ⁻⁷			
плотности воздуха	–				1,7·10 ⁻⁸			
плотности воды	–				9,3 × 10 ⁹	7,2 × 10 ⁶	9,3 × 10 ⁹	7,2 × 10 ⁶
массы порожнего бака	1,0·10 ⁻⁵				4,0·10 ⁻⁵			
массы бака с водой	2,0·10 ⁻⁵	1,0·10 ⁻⁵			2,0·10 ⁻⁴	4,0·10 ⁻⁵		
асимметрии движения ПУ	3,0·10 ⁻⁶				1,0·10 ⁻⁵			
времени наполнения бака	–				1,0·10 ⁻⁵			

Список литературы

1. Керівництво з вираження невизначеності у вимірюваннях. – Х.: ХДНДІМ, 2002. – 114 с.
2. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М. Изд-во стандартов, 1972. – 318 с.
3. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях. – Х.: Консум, 2002. – 256 с.
4. Большаков В.Б., Косач Н.И. // Украинський метрологічний журнал. – 2006. – №.4. – С. 52-55.
5. Косач Н.И. // Украинський метрологічний журнал. – 2005. – №.3. – С. 50-52.
6. Косач Н.И. // Украинський метрологічний журнал. – 1999. – Вип. 4. – С. 52-55.
7. Большаков В.Б., Косач Н.И. // Украинський метрологічний журнал. – 2001. – Вип. 4. – С. 50-53.
8. РМГ 43-2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
9. ГОСТ 8.381. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей.

Поступила в редколлегию 17.05.2007

Рецензент: канд. техн. наук, доц. А.Б. Егоров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.