

де $\delta_2(N) = \delta_{CO_2}(N)$; $\delta_2(P_a) = \delta_{y_{01}}(P_a)$;

$$\delta_2(X_2) = \sqrt{(\delta_{y_{01}}(X_2))^2 + (\delta_{z_{01}}(X_2))^2}.$$

Похибка програмного забезпечення визначається як

$$\delta_{2ПЗ} = S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + \frac{\Theta^2}{3}},$$

де S_{Σ} – середньоквадратичне відхилення суми невиключених систематичних і випадкових похибок програмного забезпечення.

На основі сформованого бюджету похибок доцільним буде розроблення методики визначення метрологічних характеристик програмного забезпечення еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу, що буде предметом подальших наукових досліджень.

Список літератури

1. Середюк О.Є. Метрологічне забезпечення відтворення і передавання одиниць об'єму та об'ємної витрати природного газу: дис. ... д.т.н. / О.Є. Середюк. – Львів, 2009. – 384 с.
2. Метрологія. Установки повірочні дзвоногого типу. Типова програма та методика державної метрологічної атестації: МДУ 025/03-2006. – [Чинний від 2006-05-18]. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськстандартметрологія, 2006. – 47 с. – (Методичний документ з метрології).
3. Метрологія. Робочі еталони об'єму газу типу PVT. Програма і методика державної метрологічної атестації. – [Чинний від 2004-04-27]. – Івано-Франківськ: Івано-Франківськстандартметрологія, 2004. – 13 с. – (Методичний документ з метрології).

УДК 681.121

К ВОПРОСУ О ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ПОВЕРОЧНЫХ УСТАНОВОК В ОБЛАСТИ РАСХОДОМЕТРИИ ДО НАЦИОНАЛЬНОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА

Ю.В. Кузьменко, заместитель генерального директора ГП “Укрметртестстандарт”, г. Киев

Е.А. Зайцева, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела ГП “Укрметртестстандарт”, г. Киев



Ю.В. Кузьменко



Е.А. Зайцева

Рассмотрен вопрос прослеживаемости рабочих эталонов до национального первичного эталона. Предложены методика калибровки эталонов различных уровней в области расходомерии с помощью компаратора и анализ источников неопределённости измерений при калибровке.

There was considered the problem of traceability of working standards to the national primary standard. There was proposed the methodology of calibration of the standards of different levels in the field of flowmetry using the comparator, and the analysis of sources of measurement uncertainty during the calibration.

В области расходомерии выделяют несколько физических величин, характеризующих поток

жидкости, в частности, воды, в трубопроводе [1]: объёмный и массовый расход; объём и масса воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода (далее – физические величины).

Соблюдение единства измерений в стране требует обеспечения прослеживаемости результатов измерений указанных физических величин от рабочих средств через рабочие эталоны до национального эталона единицы соответствующей величины.

Особенностью эталонов в области расходомерии является то, что они по своему принципу действия не могут воспроизводить с требуемой точностью повторяемое целевое значение физической величины.

Значение физической величины в каждой реализации измеряется с помощью средств измерений, входящих в состав эталона. Измерение точного значения воспроизводимой физической величины выполняется косвенным методом с помощью различных наборов средств измерений [2]. Например, при гравиметрическом методе уравнения измерения имеют вид:

для объёмного расхода воды q_v , м³/ч:

$$q_v = \frac{m}{t \cdot \rho};$$

для массового расхода воды q_m , кг/ч:

$$q_m = \frac{m}{t};$$

для объёма воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода, V , м³:

$$V = \frac{m}{\rho};$$

для массы воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода, m , кг:

$$m = \rho V,$$

где t – время измерения, ч; ρ – плотность воды, кг/м³.

То есть измерив массу воды, её плотность и время пролива, можно определить значение физической величины, воспроизводимое эталоном.

Таким образом, для национального и рабочих эталонов может быть обеспечена прослеживаемость результатов измерений указанных физических величин посредством демонстрации прослеживаемости физических величин, входящих в уравнения измерений, к основным и производным единицам физических величин Международной системы SI (масса, время, плотность), которые воспроизводятся соответствующими национальными первичными эталонами (далее – поэлементная прослеживаемость).

Неопределённость, вносимая в результат измерений на каждом этапе передачи единицы физической величины, оценивается с учётом всех источников неопределённости, оказывающих влияние на результат измерений в соответствии с [3]. Анализ источников неопределённости результата измерений при гравиметрическом методе определения расхода воды, приведенный в [4], показывает, что при самом тщательном учёте источников при обеспечении поэлементной прослеживаемости не представляется возможным оценить и учесть неопределённости, связанные с влияющими факторами, математическое описание которых затруднительно, например: установка калибруемых приборов, искажение эпюры скоростей в разных сечениях измерительного трубопровода, пульсации потока воды и т.п.

Поэтому необходимым элементом обеспечения единства измерений в области расходомерии является так называемая динамическая прослеживаемость. Для национальных эталонов динамическая прослеживаемость обеспечивается через процедуру международных сличений.

В соответствии с [5], при проведении калибровки рабочего эталона устанавливается соотношение, например, между прошедшим через поперечное сечение трубопровода объёмом воды, полученным с помощью рабочего эталона, и соответствующим объёмом воды, определённым с помощью национального эталона, с целью определения действительных метрологических характеристик рабочего эталона.

Результаты калибровки позволяют оценить это соотношение с присущей ему неопределённостью.

Как в национальном, так и в рабочем эталоне передача единицы физической величины калибруемым расходомерам (счётчикам) осуществляется с помощью специально создаваемой среды, а

именно, потока воды, свойства которого характеризуются количественно через соответствующие физические величины: объёмный и массовый расход, объём и массу воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода.

Однако передать единицу физической величины от национального эталона калибруемому рабочему эталону с помощью специальной среды – потока воды, протекающей последовательно через измерительные участки национального и рабочего эталонов, – в силу конструктивных особенностей эталонов и их территориальной разнесённости невозможно. В таких случаях для калибровки применяют компаратор с одним входом, на который физические величины, воспроизводимые национальным и рабочим эталонами, должны воздействовать поочередно.

Компаратор – это средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин. Средство сравнения – это техническое средство или специальная среда, посредством которых возможно выполнять сравнения друг с другом мер однородных величин, предназначенных для воспроизведения и хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров. Техническое средство может снабжаться средством измерений, обеспечивающим функцию сравнения [5].

В качестве компаратора для сравнения значения физической величины, воспроизводимой рабочим эталоном, со значением физической величины, воспроизводимой национальным эталоном, необходимо применить техническое средство, одинаково реагирующее на входной сигнал от национального и рабочего эталонов, то есть на поток воды, свойство которого пропорционально физической величине. Таким средством является расходомер (счётчик) воды.

Например, для калибровки эталонов, воспроизводящих единицу объёма воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода, в качестве компараторов можно применить счётчики воды, а для калибровки эталонов, воспроизводящих единицу расхода, – расходомеры.

Однако компаратор – это техническое средство, характеризующееся такими параметрами, как диапазон разности сравниваемых сигналов, и средним квадратическим отклонением (СКО) выходного сигнала компаратора. Поэтому для расходомеров (счётчиков) воды, используемых в качестве компараторов, их основная характеристика – погрешность измерения в диапазоне расхода – становится дополнительной, а основными характеристиками становятся диапазон разности сравниваемых физических величин и СКО выходного сигнала этого компаратора [6]. При этом характеристики компаратора должны быть определены на национальном эталоне или на эталоне, стоящем по иерархической схеме выше калибруемого эталона и уже калиброванном на национальном эталоне.

Как правило, при использовании расходомера (счётчика) в качестве компаратора используют такую его характеристику, как K -фактор, равный отношению выходного сигнала компаратора к входной физической величине и определяемый по формулам:

для объёмного расхода воды:

$$K_{q_v} = \frac{f}{q_v};$$

для массового расхода воды:

$$K_{q_m} = \frac{f}{q_m};$$

для объёма воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода:

$$K_v = \frac{N}{V};$$

для массы воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода:

$$K_m = \frac{N}{m};$$

где f – частота выходного сигнала компаратора, Гц; N – число импульсов выходного сигнала компаратора.

В [7] показано, что если K -фактор компаратора определять экспериментальным путём в точках, распределённых по диапазону измеряемой величины, а при промежуточных значениях расхода K -фактор определять путём интерполяции, например, линейной, систематическая погрешность расходомеров (счётчиков), используемых в качестве компараторов, исключается и неопределённость, вносимая компаратором при передаче единицы физической величины, значительно уменьшается.

На рис. 1 приведен пример определения значений K -фактора счётчика воды при его калибровке.

Калибровка выполняется следующим образом.

При проведении калибровки разность показаний калибруемого рабочего и национального эталонов Δ определяется по формуле [8]

$$\Delta = X_{к/р} - X_{к/н},$$

где $X_{к/р}$, $X_{к/н}$ – показания компаратора при установке на рабочем и национальном эталонах соответственно, м³/с (кг/с, м³, кг).

Как указывалось выше, эталоны в области расходомерии по своему физическому принципу не могут воспроизводить с требуемой точностью повторяемое целевое значение физической величины. Поэтому для обеспечения сравнимости результатов измерений эталонами необходимо определить величину выходного сигнала компаратора, пропорционального единице физической величины, воспроизведённой на национальном $Y_{к/н}^*$ и калибруемом $Y_{к/р}^*$ рабочем эталонах, по формулам

$$Y_{к/н}^* = \frac{Y_{к/н}}{X_n}; \quad Y_{к/р}^* = \frac{Y_{к/р}}{X_p},$$

где X_n , X_p – показания национального и калибруемого рабочего эталонов при измерении физической величины соответственно, м³/с (кг/с, м³, кг); $Y_{к/н}$, $Y_{к/р}$ – выходной сигнал компаратора при установке на национальном и калибруемом рабочем эталонах соответственно, Гц (имп).

Компаратор устанавливают на национальный эталон, производят n проливов при определённом значении расхода q_1 , по результатам каждого пролива фиксируют значение физической величины, измеренной национальным эталоном X_{ni} , и соответствующий ей выходной сигнал компаратора $Y_{к/ni}$.

После этого определяют выходной сигнал компаратора, пропорциональный единице физической величины, воспроизведённой на национальном эталоне, $Y_{к/н}^*$ в данной точке диапазона при i -м проливе, по формуле

$$Y_{к/ni}^* = \frac{Y_{к/ni}}{X_{ni}}.$$

Выходной сигнал компаратора, пропорциональный единице физической величины, воспроизведённой на национальном эталоне, $X_{к/ni}^*$, в единицах физической величины, в данной точке диапазона при i -м проливе, определяют по формуле

$$X_{к/ni}^* = \frac{Y_{к/ni}^*}{K_{к/н}},$$

где $K_{к/н}$ – значение K -фактора компаратора в данной точке диапазона расхода, определённое на национальном эталоне.

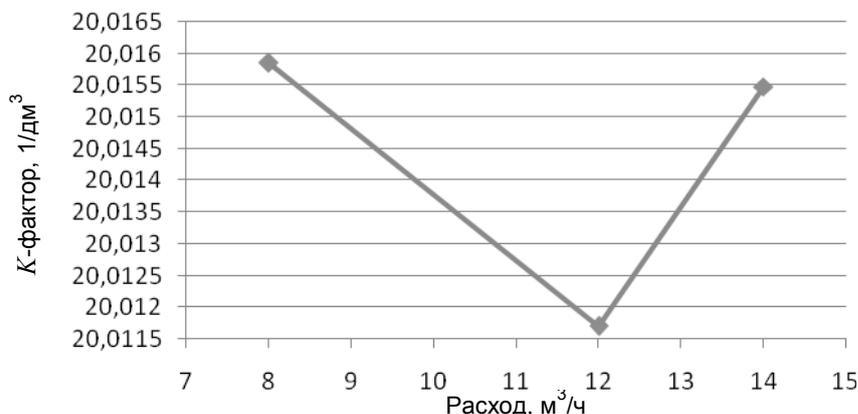


Рис. 1. K -фактор

Выполняют эту операцию n раз и по известным формулам [9] определяют среднее значение выходного сигнала компаратора, пропорционального единице измеряемой величины, воспроизведённой на национальном эталоне, $\bar{X}_{к/н}^*$ и СКО выходного сигнала компаратора $S(\bar{X}_{к/н}^*)$.

Затем компаратор устанавливают на калибруемый рабочий эталон, производят n проливов при значении расхода q_1 , по результатам каждого пролива фиксируют значение физической величины, измеренной калибруемым рабочим эталоном, $X_{рi}$ и соответствующий ей выходной сигнал компаратора $Y_{к/рi}$. После этого определяют выходной сигнал компаратора, пропорциональный единице физической величины, воспроизведённой на калибруемом рабочем эталоне, $Y_{к/р}^*$ в данной точке диапазона при i -м проливе, по формуле

$$Y_{к/рi}^* = \frac{Y_{к/рi}}{X_{к/р}}$$

Выходной сигнал компаратора, пропорциональный единице измеряемой величины, воспроизведённой на калибруемом рабочем эталоне, $X_{к/рi}^*$, в единицах физической величины, в данной точке диапазона при i -м проливе, определяется по формуле:

$$X_{к/рi}^* = \frac{Y_{к/рi}^*}{K_{к/н}}$$

Выполняют эту операцию n раз и определяют среднее значение выходного сигнала компаратора, пропорционального единице измеряемой величины, воспроизведённой на калибруемом рабочем эталоне, $\bar{X}_{к/р}^*$ и СКО выходного сигнала компаратора $S(\bar{X}_{к/р}^*)$.

На рис. 2 приведен пример значений выходного сигнала компаратора, пропорционального единице объёма воды, прошедшей через поперечное

сечение трубопровода, воспроизведённой на национальном и калибруемом рабочем эталонах.

Разность значений единицы физической величины, воспроизведённой на национальном и калибруемом рабочем эталонах в относительной форме δ_x , в процентах, определяется по формуле

$$\delta_x = 100 \cdot \left(\frac{X_{к/р}^* - X_{к/н}^*}{X_{к/н}^*} \right)$$

В соответствии с [10], необходимо оценить вклад, вносимый выполненной калибровкой в неопределённость измерений.

Основными источниками неопределённости при калибровке рабочего эталона являются:

- разброс выходного сигнала компаратора при его установке на национальном и калибруемом рабочем эталонах $S(\bar{X}_{к/н}^*)$ и $S(\bar{X}_{к/р}^*)$;
- расширенная неопределённость национального эталона U_n ;
- дискретность K -фактора компаратора при его установке на национальном и калибруемом рабочем эталонах $d_{V_{к/н}}$ и $d_{V_{к/р}}$.

С учётом коэффициентов влияния расширенная неопределённость $U^*(\delta_{кз})$ вычисляется по формуле

$$U^*(\delta_{кз}) = k \cdot \frac{1}{\bar{X}_{к/н}^*} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_{к/нi}^* - \bar{X}_{к/н}^*)^2}{n \cdot (n-1)} + \frac{\sum_{i=1}^n (X_{к/рi}^* - \bar{X}_{к/н}^*)^2}{n \cdot (n-1)} + \left(\frac{Y_{к/р}^*}{Y_{к/н}^*} \cdot \frac{U_n}{2} \right)^2 + \left(\frac{X_{к/н}^*}{Y_{к/н}^*} \cdot \frac{d_{V_{к/н}}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(- \frac{X_{к/н}^* \times Y_{к/р}^*}{(Y_{к/н}^*)^2} \cdot \frac{d_{V_{к/р}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

На рис. 3 приведен пример значений относительного отклонения показаний калибруемого эталона

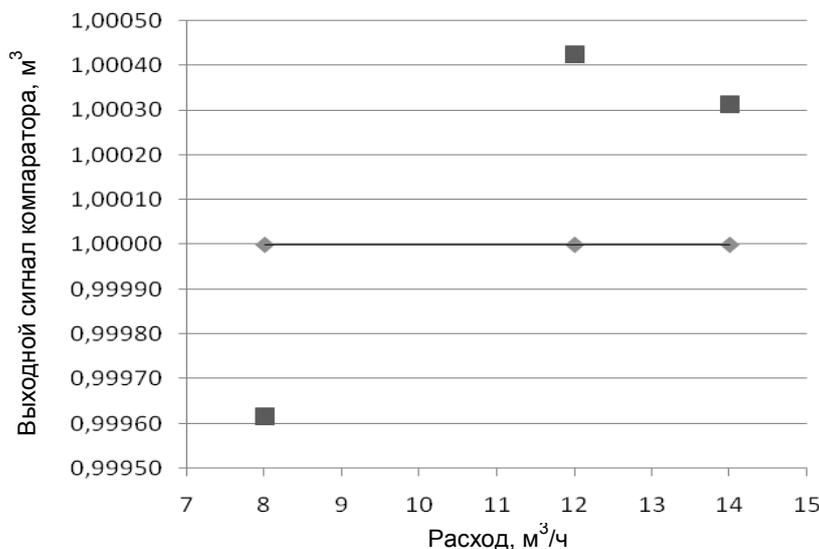


Рис. 2. Выходной сигнал компаратора, пропорциональный единице объёма:

- ◆ – компаратор на национальном эталоне; ■ – компаратор на рабочем эталоне

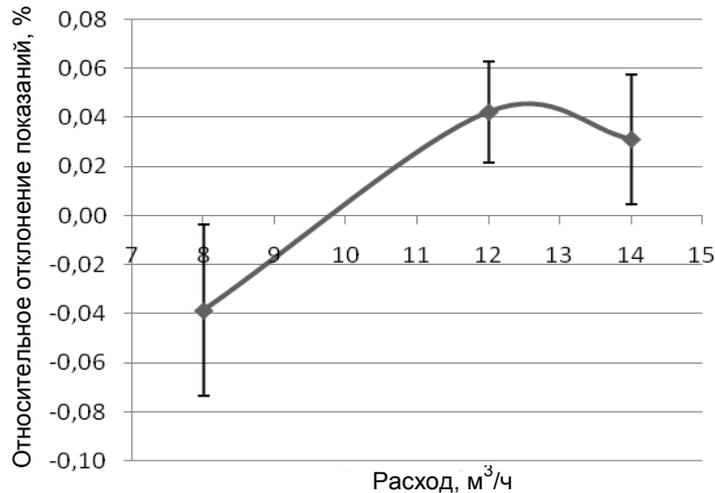


Рис. 3. Относительные отклонения показаний калибруемого рабочего эталона

от показаний национального эталона при воспроизведении единицы объёма воды, прошедшей через поперечное сечение трубопровода, с соответствующими расширенными неопределённостями.

Как видно из графика, в приведенном примере относительное значение отклонения показаний калибруемого рабочего эталона от показаний национального эталона, с учётом расширенной неопределённости, не выходит за пределы $\pm 0,08\%$. Полученный результат позволяет пользователям сделать вывод о пригодности данного эталона к использованию в соответствии с условиями применения.

Выводы

1. Продемонстрированы преимущества оценки результатов передачи единиц физической величины с учётом влияния динамических характеристик измеряемой среды.
2. Предложенный метод передачи единицы физической величины в области расходомерии от национального первичного эталона вторичным и рабочим эталонам с помощью компаратора обеспечивает динамическую прослеживаемость результатов измерений.
3. Проведенный анализ выявил основные источники неопределённости при калибровке и позволил разработать способы её снижения.
4. Результаты проведенных практических исследований показывают, что калибровка рабочих эталонов с помощью компараторов позволяет пользователям сделать вывод о пригодности эталона к использованию в соответствии с условиями применения.

Список литературы

1. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и опре-

деления: ГОСТ 15528-86. – [Введ. 1988-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 39 с.

2. Кузьменко Ю.В. К вопросу о классификации поверочных проливных установок / Ю.В. Кузьменко // Украинський метрологічний журнал. – 2011. – № 1. – С. 39–42.
3. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).
4. Кузьменко Ю.В. Анализ погрешностей поверочных проливных установок / Ю.В. Кузьменко, Е.А. Зайцева // Промышленная теплотехника. – 2011. – № 8. – С. 39–42.
5. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29–99 ГСИ.
6. Вайсбанд М.Д. Техника выполнения метрологических работ / М.Д. Вайсбанд, В.И. Проненко. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
7. Кузьменко Ю.В. Методы калибровки расходомеров воды, используемых в качестве компараторов / Ю.В. Кузьменко // Вестник НТТУ “КПИ”. – 2011. – Вып. 42. – С. 13–19. (Сер. Приборостроение).
8. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник: у 2 т. Т. 2: Вимірювальна техніка / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник [та ін.]; за ред. Б. Стадника. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2005. – 656 с.
9. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207:2008. – [Введ. 1997-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
10. ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM) (Международный словарь по метрологии. – Основные и общие понятия и соответствующие термины).