

УДК 53.08 : 656.56

О.А. Новоселов

*Публичное акционерное общество «АрселорМиттал Кривой Рог», Кривой Рог*

## ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ СУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

*В статье рассмотрен вопрос оценки неопределенности измерения диаметра отверстия сужающего устройства измерительного трубопровода согласно требованиям стандарта ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.*

**Ключевые слова:** сужающее устройство, диаметр отверстия диафрагмы, нутромер микрометрический, неопределенность измерений, относительная стандартная неопределенность измерений.

### Введение

**Постановка проблемы.** Сбережение энергоресурсов в настоящее время имеет особое значение. Полезные ископаемые нашей планеты, используемые для получения энергии, в конечном итоге исчерпаемы.

Одним из путей повышения эффективности использования энергии является ее точный и достоверный учет, в основе которого лежат точные и достоверные измерения. Недаром девиз Всемирного дня метрологии-2014 гласил: «Измерения и глобальный энергетический вызов» и как заявил директор Международного Бюро мер и весов Мартин Милтон в своем приветственном послании: «Нынешний прогресс возможен только благодаря тому, что поставщики и пользователи энергии могут иметь доступ к базе международно признанных результатов измерений различных видов энергии».

Средства измерений расхода энергоносителей делятся на две группы – счетчики расходомеры и сужающие устройства (СУ).

СУ – техническое устройство, устанавливаемое в измерительном трубопроводе, со сквозным отверстием для создания перепада давления среды путем уменьшения площади сечения трубопровода.

Метод измерения СУ расхода среды, протекающей в измерительном трубопроводе, основан на создании с помощью диафрагмы местного сужения потока, часть потенциальной энергии которого переходит в кинетическую энергию. Средняя скорость потока в месте его сужения повышается, а статическое давление становится менее статического давления до диафрагмы. Разность давления (перепад давления) тем больше, чем больше расход среды и, следовательно, она может служить мерой расхода.

Расчет расхода среды методом переменного перепада давления базируется на результатах измерения геометрических характеристик измерительного трубопровода и стандартной диафрагмы, технические требования к которым регламентированы ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003) [1]

Диафрагма – тип стандартного сужающего устройства, выполненного в виде тонкого диска с отверстием, имеющим со стороны входа потока острую прямоугольную кромку.

Основным геометрическим параметром диафрагмы, входящим в формулу расчета массового расхода среды, есть диаметр отверстия СУ – диаметр части отверстия СУ, имеющей минимальную площадь поперечного сечения.

К результату измерения диаметра отверстия диафрагмы стандарт [1] предъявляет следующее требование: «относительная неопределенность результата измерения диаметра, обусловленная измерительным инструментом, не должна превышать 0,02 %». Относительная стандартная неопределенность – отношение стандартной неопределенности к значению оценки измеряемой величины, выраженное в процентах.

Наиболее распространенным средством измерительной техники (СИТ) для измерений диаметров отверстий изделий является нутромер микрометрический, выполненный по техническим условиям, прописанным в стандарте ДСТУ ГОСТ 10:2009 [2].

**Анализ последних достижений и публикаций.** Проблеме измерения расхода энергоносителей методом переменного перепада давления посвящено достаточное количество публикаций в метрологических изданиях Украины. Но в основном в этих публикациях анализируются точность, достоверность, правильность измерения расхода газов и жидкостей стандартными СУ, как например, в статье [3], а также оценивается неопределенность поправочных коэффициентов, входящих в расчетную формулу массового расхода, как в статье [4].

Однако практический опыт проведения метрологических работ по измерению внутреннего диаметра СУ в процессе её эксплуатации дает основание сделать вывод о необходимости анализа и учета влияющих факторов, определяющих значение неопределенности измерения диаметра отверстия СУ.

**Формулирование цели статьи.** Цель данной статьи – определить и оценить источники неопреде-

ленности измерения нутромером микрометрическим внутреннего диаметра СУ.

### Изложение основного материала

Измерения внутренних линейных размеров и диаметров отверстий в метрологической практике процедура более сложная, чем измерение наружных размеров.

В нутромере микрометрическом отсчетным устройством является микрометрическая пара с отсчетом по нониусу 0,01 мм.

Метод измерения внутреннего диаметра СУ нутромером основан на прямом измерении контактным способом отверстия диафрагмы. За значение диаметра отверстия СУ принимается среднее значение результатов измерений диаметра не менее чем в четырех направлениях, расположенных под приблизительно равными (визуально контролируемыми) углами друг к другу.

Модельное уравнение в этом случае имеет вид:

$$D_{20} = d_{\text{нм}} + c_i, \quad (1)$$

где  $D_{20}$  – измеряемый диаметр отверстия СУ при нормальной температуре 20° С;  $d_{\text{нм}}$  – показания нутромера микрометрического;  $c_i$  – аддитивная поправка на известную (неисключенную) систематическую погрешность.

Оценку неопределенности измерения диаметра отверстия СУ будем производить по стандарту ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006 [5]. Этот стандарт устанавливает рекомендации по применению «Руководства по оценке неопределенности измерений» GUM [6] в промышленности при измерении геометрических размеров изделий.

Источниками неопределенности измерения диаметра отверстия СУ нутромером микрометрическим будут: наблюдаемое рассеивание показаний нутромера микрометрического (обуславливающие стандартные неопределенности типа А) и поправки на неисключенные систематические погрешности (НСП) нутромера микрометрического (обуславливающие стандартные неопределенности типа В).

Составляющая неопределенности измерения типа А оценивается как стандартная неопределенность  $u_A$ , равная среднеквадратическому отклонению среднего арифметического результата измерений диаметра отверстия СУ и находится по формуле:

$$u_A = h \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_{\text{нми}} - \bar{d}_{\text{нм}})^2}, \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент надежности, вводимый при небольшом числе измерений ( $n < 10$ ), при  $n = 4$ ,  $h = 1,7$  (табл. 1).

Составляющая стандартной неопределенности типа В ( $u_B$ ) определяется через известные границы

НСП и коэффициент распределения, характеризующий закон распределения погрешности внутри этих границ. Если закон распределения НСП неизвестен, то по стандарту [5] следует выбирать U-образное (арксинусное) распределения (с наибольшим коэффициентом).

Таблица 1

Значение коэффициент надежности

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

Стандартная неопределенность измерения  $u_B$  получается при этом с помощью метрологически обоснованной оценки изменчивости входной величины, учитывая всю имеющуюся в распоряжении информацию.

К этой категории принадлежат следующие значения: данные производителя СИТ; значения из других, ранее проведенных измерений; значения, полученные в результате опыта или общих знаний о свойствах применяемых материалах или СИТ; значения, содержащиеся в свидетельствах о калибровках; неопределенности измерения, связанные со справочными значениями из технической литературы.

В качестве справочной литературы в данной работе использована книга [7], в которой приведены составляющие погрешности измерений СИТ геометрических величин.

Поправки на НСП нутромера микрометрического будут складываться из следующих составляющих:

- погрешности собственно нутромера микрометрического;
- погрешности настройки;
- погрешности центрирования;
- погрешности из-за деформации при свинчивании;
- погрешности неточного отсчета;
- температурной погрешности.

Оценим составляющие суммарной стандартной неопределенности по типу В при измерении нутромером микрометрическим диаметром отверстия СУ для интервала диаметров от 50 мм до 125 мм.

#### 1. Неопределенность погрешности собственно нутромера микрометрического.

Погрешность нутромера микрометрического в диапазоне измерения от 50 мм до 125 мм, согласно требованиям стандарта [2], составляет  $\pm 0,006$  мм.

Неопределенность погрешности нутромера микрометрического в диапазоне измерения от 50 мм до 125 мм, в предположении U-образного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_1) = \frac{0,006}{\sqrt{2}} = 0,0042 \text{ мм.} \quad (2)$$

## 2. Неопределенность погрешности настройки нутромера микрометрического.

Микрометрическая головка нутромера настраивается на нулевое деление по установочной мере. Поэтому погрешность настройки нутромера микрометрического по установочной мере складывается из погрешности самой меры и погрешности, связанной с установкой по этой мере.

Погрешность настройки нутромера микрометрического в диапазоне измерения 50 мм – 125 мм составляет  $\pm 0,005$  мм.

Неопределенность погрешности настройки нутромера, в предположении U-образного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_2) = \frac{0,005}{\sqrt{2}} = 0,0035 \text{ мм.} \quad (3)$$

## 3. Неопределенность погрешности центрирования.

Микрометрические нутромеры не снабжены специальными устройствами для центрирования, и поэтому требуется «поиск» размера в диаметральной плоскости.

В осевой же плоскости, из-за малой длины цилиндрической части отверстия диафрагмы, которая должна по стандарту [1] находиться в пределах от  $0,005D$  до  $0,2D$ , где  $D$  – внутренний диаметр измерительного трубопровода, погрешностью перекоса можно пренебречь.

Погрешность центрирования для диапазона измерения 50 мм - 125 мм составляет 0,01 мм.

Неопределенность погрешности центрирования, в предположении U-образного распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_3) = \frac{0,01}{\sqrt{2}} = 0,0071 \text{ мм.} \quad (4)$$

## 4. Неопределенность погрешности из-за деформации при свинчивании.

Микрометрический нутромер для установки на размер собирается свинчиванием отдельных звеньев.

В местах соприкосновения происходят деформации.

Погрешность от деформации при свинчивании для диапазона измерения 50 мм - 125 мм составляет  $\pm 0,004$  мм.

Неопределенность погрешности из-за деформации при свинчивании, в предположении U-образного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_4) = \frac{0,004}{\sqrt{2}} = 0,0028 \text{ мм.} \quad (5)$$

## 5. Неопределенность погрешности неточного отсчета.

Для цены деления нутромера микрометрического 0,01 мм, ширины штрихов шкалы барабана

0,08 мм и длины деления шкалы барабана 0,8 мм погрешность неточного отсчета составит  $\pm 0,001$  мм.

Неопределенность погрешности неточного отсчета, в предположении U-образного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_5) = \frac{0,001}{\sqrt{2}} = 0,0007 \text{ мм.} \quad (6)$$

## 6. Неопределенность температурных погрешностей.

Измерение диаметра отверстия СУ производится при нормальной температуре  $20^\circ \text{C}$ .

Для сокращения температурной погрешности необходимо произвести выравнивание температур СУ и нутромера до такого уровня, чтобы остающийся перепад температур вызвал только такие температурные деформации, какими можно было бы пренебречь.

Влияние тепла рук оператора значительно сказывается на погрешности нутромера микрометрического. Величина этой составляющей погрешности непостоянна во времени и потому не может быть исключена из результата измерений.

Температурная погрешность измерения нутромером для диапазона измерения от 50 мм до 125 мм, составляет 0,005 мм.

Неопределенность температурных погрешностей нутромера микрометрического, в предположении U-образного распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_6) = \frac{0,005}{\sqrt{2}} = 0,0035 \text{ мм.} \quad (7)$$

Суммарная стандартная неопределенность по типу В составит:

$$u_B = \sqrt{\sum_i u_B^2(\delta_i)} = 0,010 \text{ мм.} \quad (8)$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения будет определяться через стандартные неопределенности входных величин по формуле:

$$u_C(D_{20}) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

Если предположить, что  $u_A = 0$ , то суммарная стандартная неопределенность  $u_C(D_{20}) = u_B$ .

Расширенная неопределенность измерения диаметра отверстия СУ нутромером микрометрическим будет определяться из выражения:

$$U(D_{20}) = k \cdot u_C(D_{20}), \quad (10)$$

$k = 2$  – коэффициент охвата для вероятности 0,95.

Расширенная неопределенность, вычисленная по формуле (10), составит:  $U(D_{20}) = 0,02$  мм.

Бюджет неопределенности измерений диаметра отверстия СУ нутромером микрометрическим для интервала диаметров 50 мм - 125 мм приведен в табл. 1.

Таблиця 1

Бюджет неопределенности измерений диаметра отверстия СУ для интервала диаметров 50 мм - 125 мм

Входная величина	Оценка входной величины, мм	Стандартная неопределенность, мм	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности, мм
$\delta_1$	0,006	0,0042	1	0,0042
$\delta_2$	0,005	0,0035	1	0,0035
$\delta_3$	0,01	0,0071	1	0,0071
$\delta_4$	0,004	0,0028	1	0,0028
$\delta_5$	0,001	0,0007	1	0,0007
$\delta_6$	0,005	0,0035	1	0,0035
Выходная величина	Оценка выходной величины, мм	Суммарная стандартная неопределенность, мм	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, мм
$D_{20}$	$\bar{d}_{\text{нм}}$	0,01	2	0,02

Ни одна из входных величин не рассматривается коррелированной с другими величинами в какой-нибудь значительной степени.

Все коэффициенты чувствительности при прямых измерениях длины геометрических объектов равны 1.

Относительная неопределенность результата измерения диаметра отверстия СУ, обусловленная измерительным инструментом, в частности нутромером микрометрическим, например, для результата  $D_{20} = 100,00 \text{ мм} \pm 0,02 \text{ мм}$  при  $p = 0,95$ , будет равна:

$$u_{\text{отн}}(D_{20}) = \frac{u_c(D_{20})}{D_{20}} \times 100\% = 0,01\%. \quad (11)$$

Таким образом, относительная неопределенность результата измерения диаметра отверстия диафрагмы, обусловленная нутромером микрометрическим, не превышает значения, предусмотренного требованием стандарта [1] - 0,02 %.

## Выводы

1 Рассмотрена процедура оценивания неопределенности измерения нутромером микрометрическим диаметра отверстия СУ, определены и оценены источники неопределенности, составлен бюджет неопределенности.

2 Относительная неопределенность результата измерения диаметра отверстия диафрагмы нутромером микрометрическим, соответствующим стандарту [2], удовлетворяет требованиям стандарта [1].

## Список литературы

1. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003) Метрология. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги.
2. ДСТУ ГОСТ 10:2009 Нутромеры микрометрические. Технические условия.
3. Ільницький В. Заходи підвищення точності вимірювання витрати та об'єму газу для методу змінного перепаду тиску із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв / В. Ільницький // Метрологія та прилади. – 2012. – № 2. – С. 33-36.
4. Лесовой Л. Розрахунок невизначеності поправкового коефіцієнту, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми / Л. Лесовой // Метрологія та прилади. – 2011. – № 2. – С. 32-34.
5. ДСТУ ISO/TS 14253-2:2006 Вимоги до геометричних розмірів виробів. Перевірка вимірюванням робочих зразків та засобів вимірювальної техніки. Частина 2. Рекомендації з оцінювання невизначеності вимірів геометричних розмірів виробів, калібрування засобів вимірювальної техніки та контролю виробів.
6. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).
7. Марков Н.Н. Погрешности и выбор средств линейных измерений / Н.Н. Марков, Г.Б. Кайнер, А.В. Сацердотов. — М.: Машиностроение, 1967. — 392 с.

Поступила в редколлегию 16.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ДІАМЕТРУ ОТВОРУ ЗВУЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

О.А. Новосолов

У статті розглянуто питання оцінювання невизначеності вимірювань діаметра отвору звужувального пристрою вимірювального трубопроводу згідно вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009.

**Ключові слова:** звужувальний пристрій, діаметр отвору діафрагми, нутромір мікрометричний, невизначеність вимірювань, відносна стандартна невизначеність вимірювань.

## MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION OF NARROWING DEVICE DIAMETER HOLE

O. A. Novoselov

In the article the questions measurement uncertainty evaluation of narrow device diameter hole in obedience to the requirements of standard DSTU GOST 8.586.2:2009 is considered.

**Keywords:** narrowing device, diameter of the diaphragm opening, inside calipers, measurement uncertainty, relative standard uncertainty of measuring.