

УДК 681.121

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЫБОРА СРЕДСТВ КАЛИБРОВКИ СЧЕТЧИКА РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ ПУТЕМ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Федорович Н.Н., Студеникина О.Д.

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»,
Краснодар, e-mail: fedorovichn@mail.ru*

В статье рассмотрены проблемы выбора средств калибровки путем оценки метрологических характеристик средств измерений и неопределенности результатов измерений, полученных при калибровке средств измерений расхода жидкости. Было проведено две серии измерений расхода воды калибруемым счетчиком СВК-15 в одинаковых условиях с использованием одинаковых средств калибровки и применением в одной серии опытов поверочной установки УПСЖ-50/В, в другой – поверочной установки ВПУ-Энерго ТС. Калибровка счётчика воды СВК-15 проводилась методом прямого измерения калибруемым измерительным прибором величины, воспроизводимой эталонной материальной мерой – соответствующей установкой поверочной расходомерной. Неопределённость результатов измерений рассчитывали по типам А и В, в соответствии с методами их оценки. Выполненные расчёты неопределённости результатов полученных измерений в обеих сериях опытов показали, что установка ВПУ-Энерго ТС позволяет получать более точные результаты калибровки приборов в заданных точках расхода, чем поверочная установка УПСЖ-50/В. Таким образом, установлено, что по результатам калибровки можно выбирать предпочтительные калибровочные эталонные средства измерений, обеспечивающие с наибольшей точностью определение метрологических характеристик калибруемых средств измерений, что важно при оценке прослеживаемости результатов измерений в лабораториях и на производстве.

Ключевые слова: измерения, неопределенность результатов измерений, калибровка средств измерений, эталонные средства калибровки, счетчик расхода жидкостей

CONTROL OF THE PROCESS OF SELECTING THE MEANS OF CALIBRATION OF THE LIQUID FLOW METER BY ASSESSING THE UNCERTAINTIES OF THE MEASUREMENT RESULTS

Fedorovich N.N., Studenikina O.D.

Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: fedorovichn@mail.ru

The article discusses the problems of choosing calibration tools by evaluating the metrological characteristics of measuring instruments and the uncertainty of measurement results obtained during calibration of liquid flow measuring instruments. Two series of measurements of water flow with a calibrated meter SVK-15 were carried out under the same conditions using the same calibration tools and using the UPSZH-50/V calibration unit in one series of experiments, and the VPU-Energo TC calibration unit in the other. The calibration of the SVK-15 water meter was carried out by the method of direct measurement with a calibrated measuring device of the value reproduced by the reference material measure – the corresponding calibration flow meter installation. The uncertainty of the measurement results was calculated by types A and B, in accordance with the methods of their assessment. The performed calculations of the uncertainty of the results of the measurements obtained in both series of experiments showed that the installation of the VPU-Energo TS allows to obtain more accurate results of calibration of devices at specified flow points than the UPSZH-50/V calibration installation. Thus, it has been established that, based on the calibration results, it is possible to choose preferred calibration reference measuring instruments that provide the most accurate determination of the metrological characteristics of the calibrated measuring instruments, which is important when assessing the traceability of measurement results in laboratories and in production.

Keywords: measurements, uncertainty of measurement results, calibration of measuring instruments, reference calibration tools, liquid flow meter

В связи с возрастающей необходимостью измерения быстроменяющихся расходов жидкостей, увеличением скорости протекания важнейших технологических процессов в различных отраслях промышленности и широким применением расходомеров в системах автоматического управления возникают требования к увеличению их быстродействия и точности [1]. Эти показатели средств измерений являются определяющими и при оценке состояния измерений в лабораториях [2, 3]. От точности показаний расходомеров зависит правиль-

ное определение значения измеряемой величины в процессе измерений, что должно подтверждаться их калибровкой.

Основной целью калибровки средств измерений является передача единицы величины, воспроизводимой и хранимой эталоном, менее точному средству измерений [4]. При калибровке определяют индивидуальные метрологические характеристики средств измерений различными методами измерений [5]. Результатом калибровки является выражение метрологической характеристики средств измерений в форме ка-

либровочной характеристики с указанием соответствующей неопределённости [6]. Рекомендуется осуществлять ежегодную калибровку измерительного оборудования организации в компетентных специализированных организациях. При этом возрастает значение качества применяемых для калибровки измерительного оборудования и методик калибровки.

Целью исследования является выявление возможности использования неопределённости результатов калибровки расходомеров для выбора средств измерений, обеспечивающих более точные результаты калибровки данных приборов, а также требуемую метрологическую прослеживаемость измерений.

Материалы и методы исследования

Из всех типов наиболее распространены и удобны в обращении вихревые расходомеры, они калибруются на заводе, отличаются простотой монтажа, требуют небольших затрат на техническое обслуживание [7]. Нами выполнены измерения и расчёты неопределённости результатов измерений при калибровке счётчика воды СВК-15 (крыльчатый счетчик тахометрического типа – внесен в Федеральный информационный фонд обеспечения единства измерений под номером 16078-05).

Было проведено две серии измерений расхода воды калибруемым счетчиком СВК-15 в одинаковых условиях с использованием одинаковых вспомогательных средств измерений. В одной серии измерений применяли поверочную установку УПСЖ-50/В, в другой – поверочную установку – ВПУ-Энерго ТС.

Установка поверочная типа УПСЖ-50/В предназначена для поверки/калибровки расходомеров-счетчиков жидкости класса точности 0,5 и ниже в диапазоне расходов от 0,02 до 50 м³/ч. Установка ВПУ-Энерго ТС может применяться для поверки, калибровки и определения погрешностей теплосчетчиков, преобразователей расхода-объема (массы), расходомеров и счетчиков жидкости различного типа с диапазоном воспроизводимых расходов от 0,01 до 4000 м³/ч и пределами допускаемой относительной погрешности установки при применении расходомеров-счетчиков объемных при измерении объемного расхода и объема, которые не должны превышать $\pm 0,2\%$.

Средства измерений, которые применялись в процессе калибровки счётчика воды СВК-15, в том числе вспомогательные средства измерений (термогигрометр; барометр; термометр лабораторный электронный),

влияющие на точность и достоверность результатов, имели метрологические характеристики, подтвержденные свидетельствами о поверке или сертификатами калибровки. Условия калибровки: температура окружающего воздуха – 21,9 °С; барометрическое давление – 101,2 кПа; относительная влажность воздуха – 45%; температура воды в счётчике – 22,0 °С.

Калибровка счётчика воды СВК-15 проводилась методом прямого измерения калибруемым измерительным прибором величины, воспроизводимой эталонной материальной мерой – соответствующей установкой поверочной расходомерной. Измерения объёмного расхода и объёма поверочной среды выполняли на проливной установке по трём точкам в применяемом диапазоне измерений расходомера. Число измерений в каждой точке составило не менее 10.

При оценке неопределённости измерения во время калибровки прибора, должны быть приняты во внимание все компоненты неопределённости, которые имеют существенное отношение к ситуации: эталоны и стандартные образцы; методы измерения; вспомогательное оборудование; окружающая среда; оператор и другие требования. Неопределённость измерений группируют в две категории А и В, в соответствии с методами их оценки. Суть оценки неопределённости по типу А заключается в том, что неопределённость оценивается путём проведения анализа данных, полученных при многократных измерениях величины. При оценке неопределённости по типу В происходит анализ данных, в том числе полученных из свидетельств о поверке или сертификатов о калибровке [5].

Порядок оценивания метрологических характеристик и вычисления неопределённости измерений при калибровке путем составления бюджета неопределённости изложен в [6]:

- составление модельного уравнения измерений, которое выражает зависимость между выходной величиной и входными величинами;
 - оценивание входных величин и их неопределённости;
 - оценивание выходных величин и их неопределённости;
 - составление бюджета неопределённости;
 - представление результатов калибровки.
- Значения входных величин находят путём их измерения с однократными (единичными) или многократными (повторными) наблюдениями или берут из внешних источников.

Таблица 1

Бюджет неопределенности

Входная величина	Значение (оценка) входной величины	Стандартные неопределенности входных величин	Тип оценки	Коэффициенты чувствительности, c_j	Вклады неопределенностей
V_c	\bar{V}_c	$u_A(V_c)^{1)}$	A	c_{vc}	$c_{vc} \cdot u_A(V_c)$
Δ_c		$u_B(\Delta_c)^{3)}$	B	$c_{\Delta c}$	$c_{\Delta c} \cdot u_B(\Delta_c)$
V_s	\bar{V}_s	$u_A(V_s)^{2)}$	A	c_{Vs}	$c_{VsA} \cdot u_A(V_s)$
		$u_B(V_s)^{4)}$	A	c_{Vs}	$c_{VsB} \cdot u_B(V_s)$
$\theta_{\Sigma 0}^{5)}$		$u_B(\theta_{\Sigma 0})^{6)}$	B	$c\theta_{\Sigma 0}$	$c\theta_{\Sigma 0} \cdot u_B(\theta_{\Sigma 0})$
Выходная величина	Оценка результата измерения	Стандартная суммарная неопределенность		Коэффициент охвата, k	Расширенная неопределенность $U, \%$
Δ	$\bar{V}_c - \bar{V}_s$	$u(\Delta)$		2	$k \cdot u(\Delta)$
Исходные данные калибровки					
$V_c, \text{ м}^3$	$V_s, \text{ м}^3$	$D^7), \text{ м}^3$	$\delta_s^8), \%$	$\theta_{\Sigma 0}, \%$	
<p>Условные обозначения:</p> <p>1), 2) – соответственно стандартная неопределенность, вносимая калибруемым расходомером при измерении объема и эталонной установкой при задании объема;</p> <p>3) – дискретность отсчета расходомера (закон распределения плотности вероятности считается равномерным), м^3;</p> <p>4) – погрешность эталонной установки (из свидетельства о калибровке установки), %;</p> <p>5) – граница суммарной не исключенной систематической погрешности установки (из свидетельства о поверке установки), %;</p> <p>6) – суммарная не исключенная систематическая погрешность установки, %;</p> <p>7) – номинальный диаметр счетчика, м^3;</p> <p>8) – относительная погрешность эталонной установки, %;</p>					

Различают следующие выходные величины:

– калибровочный коэффициент измерительного прибора и его расширенная неопределенность с указанием коэффициента охвата;

– калибровочная функция и расширенная неопределенность в каждой точке диапазона измерений или параметры калибровочной функции и соответствующие им неопределенности;

– метрологические характеристики средств измерений; отклонение показаний измерительного прибора от номинальной метрологической характеристики;

– и др. характеристики [8].

Для расчета неопределенности результатов измерений счетчиком воды, составляли модельное уравнение

$$\Delta = (V_c + \Delta_c) - V_s,$$

где V_c – объем воды, измеренный калибруемым счетчиком, м^3 ;

Δ_c – поправка на погрешность дискретности отсчета калибруемого счетчика;

V_s – объем воды, воспроизводимый эталонной установкой, м^3 .

Бюджет неопределенности по форме, представленной в табл. 1, составляют в соответствии с [6]. Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Результаты исследования и их обсуждение

При каждом i -м измерении на i -м расходе регистрировали:

- время измерения;
- объемный расход, воспроизведенный эталоном;
- объемный расход по показаниям расходомера на начало измерения;
- объемный расход по показаниям расходомера на конец измерения.

Метрологические характеристики в виде относительной погрешности счетчика воды определили на трёх расходах: наи-

меньшем ($Q_{наим}$), $1,1$ от переходного ($1,1 \cdot Q_n$) и номинальном ($Q_{ном}$). В каждой точке расхода воды измерения калибруемым счетчиком провели в соответствии с данными табл. 2.

Исходные данные для расчета основной относительной погрешности и неопределенности калибруемого счетчика представлены в табл. 3.

Рассчитали относительную погрешность измерений при каждом расходе воды на калибруемом счетчике:

$$\delta_{Q_{наим}} = 2,55\%; \delta_{1,1 \cdot Q_n} = 2,24\%; \delta_{Q_{ном}} = 1,06\%$$

Расчет бюджета неопределенности при калибровке счетчика воды СВК-15 с применением поверочной установки УПСЖ-50/В для точки $Q_{ном}$ представлен в табл. 4.

Аналогичный расчет бюджетов неопределенности для точки $1,1 \cdot Q_n$ позволил определить расширенную неопределенность, равную $0,000088$ м³/ч, для точки $Q_{наим}$ – расширенную неопределенность, равную

$0,000067$ м³/ч. Результаты калибровки счетчика воды СВК-15 представлены в табл. 5.

Показания счетчика на начало калибровки составили $431,26$ м³, показания счетчика на конец калибровки – $431,39$ м³.

В соответствии с описанием типа калибруемого прибора предел допускаемой погрешности счетчика в диапазоне расхода ($Q_{наим}$) и в диапазоне расхода ($1,1 \cdot Q_n$) составляет $\pm 5,0\%$, в номинальном диапазоне расхода ($Q_{ном}$) – $\pm 2,0\%$.

Сравнение расширенной неопределенности счетчика воды с одной четвертой части максимально допустимой погрешности показывает, что $0,33 < \pm 0,5$; $0,42 < \pm 1,2$; $0,65 < \pm 1,2$.

Следовательно, расширенная неопределенность при определении действительного объема, проходящего через счетчик воды, не превышает одной четвертой соответствующей максимально допускаемой погрешности счетчика, что удовлетворяет требования пункта 7.1.1 [9].

Таблица 2

Значения минимального времени измерений в каждой точке расхода

Номинальный диаметр счетчика	Значение минимального времени измерения		
	На номинальном расходе, с, не менее	На расходе $1,1$ от переходного, с, не менее	На наименьшем расходе, с, не менее
от DN 10 до DN 50	120	360	720

Таблица 3

Исходные результаты измерения расхода воды

Расход воды, при котором проводят калибровку, Q	Объем воды, измеренный счетчиком, м ³					
	V_c	\bar{V}_c	V_s	\bar{V}_s		
$Q_{наим} = 0,03$	0,0103	0,0104	0,0103	0,01005	0,01003	0,01004
	0,0104	0,0103		0,01005	0,01003	
	0,0103	0,0104		0,01003	0,01003	
	0,0103	0,0102		0,01003	0,01004	
	0,0102	0,0102		0,01004	0,01004	
$1,1 \cdot Q_n = 0,12$	0,0206	0,0206	0,0205	0,02005	0,02006	0,02005
	0,0206	0,0203		0,02005	0,02005	
	0,0206	0,0205		0,02005	0,02006	
	0,0206	0,0203		0,02005	0,02006	
	0,0205	0,0205		0,02005	0,02006	
$Q_{ном} = 1,5$	0,1009	0,1012	0,1011	0,10005	0,10003	0,10004
	0,1009	0,1012		0,10005	0,10003	
	0,1009	0,1013		0,10005	0,10004	
	0,1009	0,1013		0,10003	0,10004	
	0,1012	0,1013		0,10003	0,10004	

Таблица 4

Бюджет неопределённости для точки $Q_{ном}$

Входная величина	Значение (оценка) входной величины	Стандартные неопределённости входных величин	Тип оценки	Коэффициенты чувствительности, c_j	Вклады неопределённости
V_c	0,1011	$1,1 \times 10^{-8}$	A	1	$1,1 \times 10^{-8}$
Δ_c	0	$2,89 \times 10^{-5}$	B	1	$2,89 \times 10^{-5}$
V_s	0,10004	$2,79 \times 10^{-6}$	A	-1	$-2,79 \times 10^{-6}$
		$1,67 \times 10^{-4}$	B	-1	$-1,67 \times 10^{-4}$
Выходная величина	Оценка результата измерения	Стандартная суммарная неопределённость, $u(\Delta)$		Коэффициент охвата k	Расширенная неопределённость U^* , м ³ /ч
Δ	0,00106	0,000169505145		2	0,00033
Исходные данные калибровки для $D = 0,0001$ м ³ , $\delta = 0,5\%$					
V_c	V_s	V_c	V_s	V_c	V_s
0,1009	0,10005	0,1009	0,10003	0,1013	0,10004
0,1009	0,10005	0,1012	0,10003	0,1013	0,10004
0,1009	0,10005	0,1012	0,10003	0,1013	0,10004
0,1009	0,10003				
*Указанная расширенная неопределённость измерения установлена как стандартная неопределённость измерения, умноженная на коэффициент охвата $k = 2$, который соответствует вероятности $P = 0,95$.					

Таблица 5

Результаты калибровки счётчика воды СВК-15 с применением поверочной установки УПСЖ-50/В

№	Расход воды, при котором проводилась калибровка, м ³ /ч	Коэффициент охвата k (при $P = 0,95$)	Результат измерений калибруемого расхода воды, $X_{cp} \pm U$, м ³ /ч
$Q_{ном}$	1,5	2	0,01011±0,00033
$1,1 \cdot Q_n$	0,12	2	0,0205±0,000088
$Q_{наим}$	0,03	2	0,0103±0,000067

Соответственно, калибровка счётчика воды СВК-15 с применением поверочной установки УПСЖ-50/В показала, что калибруемый прибор будет обеспечивать требуемую точность измерений при последующей его эксплуатации и в условиях прослеживаемости результатов испытаний.

Далее провели измерения и расчёт неопределённости результатов измерений при калибровке счётчика воды СВК-15 с применением поверочной установки ВПУ-Энерго ТС.

Результаты вычисления стандартной неопределённости по типу А приняли условно такими же, как и для установки УПСЖ-50/В. Вычисления стандартной не-

определённости входных величин по типу В (нормальное распределение) и выходных величин выполнили в форме бюджета неопределённости, представленного в табл. 1. Результаты калибровки счётчика воды представлены в табл. 6.

По результатам табл. 6 видно, что счётчик воды СВК-15 также прошел калибровку с применением поверочной установки ВПУ-Энерго ТС с положительным результатом. Использование счётчика воды с установленной неопределённостью результатов измерений в лабораторном и производственном контроле обеспечивает достоверность полученных данных [10].

Таблица 6

Результаты калибровки счётчика воды СВК-15
с применением поверочной установки ВПУ-Энерго ТС

№	Расход воды, при котором проводилась калибровка, м ³ /ч	Коэффициент охвата k (при $P = 0,95$)	Результат измерений калибруемого расхода воды, $X_{cp} \pm U$, м ³ /ч
$Q_{ном}$	1,5	2	0,01011±0,00014
$1,1 \cdot Q_n$	0,12	2	0,0205±0,000064
$Q_{наим}$	0,03	2	0,0103±0,000059

Проанализировав результаты калибровки счётчика воды СВК-15, представленные в табл. 5 и 6, можно сказать, что расширенная неопределённость результатов измерений, полученная при калибровке счётчика СВК-15 на установке ВПУ-Энерго ТС меньше, чем расширенная неопределённость результатов измерений, рассчитанная при калибровке этого же счётчика воды на установке УПСЖ-50/В. Сравнение полученных результатов неопределённости позволило сделать вывод, что с применением установки ВПУ-Энерго ТС получены более точные результаты калибровки приборов в заданных точках расхода, чем с применением поверочной установки УПСЖ-50/В.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что установка ВПУ-Энерго ТС позволяет получать более точные результаты калибровки приборов в заданных точках расхода, чем поверочная установка УПСЖ-50/В, из чего следует, что по результатам калибровки можно выбирать предпочтительные калибровочные средства измерений, обеспечивающие с наибольшей точностью определение метрологических характеристик калибруемых средств измерений, которые являются важными при оценке прослеживаемости результатов измерений.

Список литературы

1. Чухарева Н.В. Определение количественных характеристик нефти и газа в системе магистральных трубопроводов: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 311 с.
2. Федорович Н.Н., Горшкова Н.В., Федорович А.Н. Проведение оценки состояния измерений в лаборатории для оценки её компетентности // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 12 (114). С. 116–119.
3. Федорович Н.Н., Федорович А.Н., Светловская А.Ю., Молчанова Я.М. Оптимизация внутрилабораторного контроля качества результатов испытаний // Фундаментальные исследования. 2015. № 11–3. С. 511–515.
4. ПР 50.2.016-94 ГСИ. Требования к выполнению калибровочных работ. М.: Стандартинформ, 1994. 8 с.
5. Захаров И.П. Методы, модели и бюджеты оценивания неопределённости измерений при проведении калибровок // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 20–26.
6. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. М.: Стандартинформ, 2018. 112 с.
7. Вихревые расходомеры: принцип работы, применение // АО «Пергам-Инжиниринг». 2017. URL: <https://www.pergam.ru/articles/vihrevye-rashodomery.htm> (дата обращения: 20.01.2022).
8. РМГ 115-2019 ГСИ. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределённости. М.: Стандартинформ, 2019. 36 с.
9. МОЗМ МР 49-1 Счетчики воды, предназначенные для измерения холодной питьевой и горячей воды. Ч. 1: Метрологические и технические требования. Перевод ВНИИМС, 2006. 56 с.
10. Федорович Н.Н. Контроль процесса испытаний для подтверждения компетентности лабораторий // Известия учебных вузов. Пищевая технология. 2010. № 1 (313). С. 66.