

NEWS**OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN****SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES**

ISSN 2224-5278

Volume 6, Number 444 (2020), 145 – 153

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.141>

UDC004.6:681.121.8:006.91:622.034.822

S. G. Khan¹, L. K. Ibrayeva¹, N. V. Syabina¹, Z. M. Yuldashev²¹NJSC Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan;²Saint Petersburg State Electrotechnical University, ²Saint Petersburg, Russia.

E-mail: khan.sv2011@gmail.com, ibrayeva_lk@mail.ru, n.saybina@ues.kz, yuld@mail.ru

**RESEARCH AND APPLICATION OF METHODS
FOR CALCULATING THE MEASUREMENT UNCERTAINTY
OF INDUSTRIAL FLOWMETERS**

Abstract. To create conditions for the recognition of Kazakhstani certificates of conformity and the results of product tests, an assessment of measurement uncertainty is required. In this regard, there has been an increase in the practical application in Kazakhstan of the concept of measurement uncertainty. The authors developed a physical stand for a mobile complex designed to verify electromagnetic flowmeters at the place of operation. To obtain verification results, programs were developed to calculate the uncertainty of an electromagnetic flowmeters using the NI LabView software. In addition, a model for estimating the uncertainty of the relative error of flowmeters was proposed, and the measurement uncertainty was estimated using three methods: standard, Monte Carlo and Kragten. Finally, a comparative analysis was conducted on the results of the estimation of the uncertainty of the relative error of the industrial electromagnetic flowmeter. All methods give standard uncertainty values that do not exceed the acceptable range of relative error ($\pm 1\%$). However, Monte Carlo method gives better results for sufficiently large number of simulations. No significant differences between the results obtained using standard and Kragten methods were discovered. The Kragten method is preferable in the absence of the need to calculate the sensitivity coefficients when calculating the total standard uncertainty, which is important for complex measurement equations.

Key words: measurement uncertainty; standard GUM method; Monte Carlo method; Kragten matrix; verification; electromagnetic flowmeter.

Introduction. In the Republic of Kazakhstan, uranium mining is carried out by underground leaching – one of the most cost-effective and environmentally friendly mining methods. [1]. At the nodes of receiving and distributing the leach solutions, a large number of industrial electromagnetic flowmeters (EFM) are used to measure the quantities involved; they must be metrologically verified at the end of the calibration interval.

The generally accepted method for calibrating flowmeters using exemplary measuring instruments or calibration facilities accredited to ISO/IEC 17025-2017 can be costly and infeasible, mainly due to the staff and logistics costs associated with removing the flowmeters from the piping system. However, modern flowmeters are equipped with hardware and software that allow on-site verification that meets ISO 9001 requirements. Studies have already been conducted on the calibration of flow meters in the field of water supply and wastewater discharge [2].

The issues of the estimation of measurement uncertainty have been widely covered in terms of analytical measurements [3], the calibration of measuring instruments [3,4], and other studies [5-8]. International organizations have developed and prepared basic documentation for the international harmonization of approaches to solving metrological problems. These include the ISO/IEC 17025:2017 standard; the JCGM 100:2008 Joint Metrology Guidelines document, as the latest revision of GUM:1995, which provides guidance on measuring uncertainty in measurement; the International Dictionary of Metrology JCGM 200:2012, which presents the terms and concepts used in the field of metrology; and

JCGM 101:2008 (Supplement 1 to GUM:1995), which provides practical guidance on using Monte Carlo simulations to estimate uncertainty.

Methods. *Standard method* described in GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), has been applied worldwide for different measuring systems and is currently the standard procedure for estimating uncertainty in metrology [5, 9-11]. The GUM estimation of measurement uncertainty in analytical measurements has been widely reported in the literature [8, 12-14]. Examples of GUM estimation of the uncertainty of temperature, AC voltage, and pressure measurements are given in [13]. Meanwhile, [4] describes uncertainty assessment during the metrological certification of means of measuring the moment of inertia of electric motors.

Due to the complexity of calculations, the analytical estimation of the effective number of degrees of freedom using the Welsh-Satterthwaite formula remains an unsolved problem [3]. One approach to overcoming these limitations is to use a convolution of the probability distributions of input quantities, for example, using the Monte Carlo simulation method [15].

The essence of the *Monte Carlo method* is as follows: each time the measurement function is calculated, it generates randomly generated input values that vary around its nominal value within the uncertainty interval in accordance with the distribution law. In [16], examples of the application of the Monte Carlo simulation method for estimating the measurement uncertainty of various practical problems are given: evaluating the real efficiency of a fuel cell, measuring torque, preparing a standard cadmium solution, and measuring the Brinell hardness.

Kragten method (spreadsheet method) is recommended for complex expressions to simplify calculations. This procedure uses an approximate numerical method of differentiation and requires only the numerical values of the parameters, and their uncertainties [6]. It assumes either that the measurement model is linear in the input variables or that the uncertainty of the corresponding input quantity is small compared to its value. Kragten method advantage lies in the fact that the correlation between variables can be easily taken into account by adding the appropriate elements in the spreadsheet.

The analysis showed that in most cases, the GUM, Kragten and Monte Carlo methods give almost the same value for the standard uncertainty associated with the estimation of the measured value. The differences become apparent when the distributions are far from normal and the measurement result nonlinearly depends on one or more input quantities. Where there is significant non-linearity, the standard GUM method is not recommended. However, nonlinearity can be taken into account in the GUM by including higher order terms in the calculations [17]. Where the distributions differ significantly from normal, the Kragten and standard GUM methods give a distorted estimate of the standard uncertainty, while the Monte Carlo method allows a determination of the distribution law of the output quantity and, accordingly, displays the real “coverage interval” [18, 19].

The above methods have not yet been applied to the estimation of the uncertainty of flow measurement. This problem is the subject of research in this article. The aim of the work is to study methods for estimating uncertainty during the calibration of flowmeters *in situ* without removing them from their place of operation.

Application of methods. The uncertainty of the industrial flow meter relative error is estimated based on the Standard of the Republic of Kazakhstan ST RK 2.328-2015 “Electromagnetic flow meters: Verification Technique”. This standard proposes the following measurement model:

$$\delta_Q = \frac{Q_r - Q_p}{Q_p} \times 100, \quad (1)$$

where Q_r is the value of the flow according to the metering values of EFM, and Q_p is the flow rate according to the indications of the reference Coriolis flowmeter (CFM).

However, this Standard regulates the estimation of the uncertainty of the relative error of electromagnetic flowmeters using only type *B*.

The authors substantiate and propose calculating the uncertainty using not only type *B* but also type *A* [20]. The calculation of type *A* includes statistically processing the results of multiple measurements, namely the calculation of the mathematical expectation, variance, and standard deviation. An estimate of the flow rate Q is the arithmetic mean of $n = 11$ observations Q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) for each point being verified ($j = 4$): \bar{Q}_p - for the reference flow meter; \bar{Q}_r - for the verified EFM.

The standard measurement uncertainties of the electromagnetic and reference flowmeters using type A are calculated by the formulas:

$$u_{A_j}(Q_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ri} - \bar{Q}_r)^2}{n(n-1)}}; u_{A_j}(Q_p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

where Q_{ri} , Q_{pi} are the i -meter readings at the j point being verified.

The standard uncertainty of the relative error of type A at each verified point ($j = 1, 2, 3, 4$) is calculated by the formula:

$$u_{A_j}(\delta) = \sqrt{C_r^2 u_{A_j}(Q_r)^2 + C_p^2 u_{A_j}(Q_p)^2},$$

where C_r and C_p are sensitivity coefficients, which are defined as partial derivatives of equation (1) with respect to the corresponding variables.

The final value of the standard uncertainty of the relative error of EFM type A is:

$$u_A = (\sum_{j=1}^4 u_{A_j}(\delta))/4. \quad (3)$$

To calculate the total standard uncertainty of the EFM relative error, we have:

$$u_c(\delta) = \sqrt{u_A^2(\delta) + u_{B\Sigma}(\delta)}, \quad (4)$$

$u_{B\Sigma}(\delta)$ - the type B uncertainty calculation includes the relative error uncertainties of the EFM and the reference flow meter in accordance with ST RK 2.328-2015.

The calculation of the expanded uncertainty of the relative error of the EFM is performed according to the formula:

$$U(\delta) = k \cdot u_c(\delta). \quad (5)$$

The measurement result can be written as: $\delta \pm U(\delta)\%$; $p=0,95$.

Applying the Monte Carlo method requires selecting the quantities of model estimation to be performed and the confidence level p . It is best to choose a sufficiently large value of m in comparison with $1/(1-p)$ (for example, exceeding it by 10^6 times).

The simulation of the process of estimating the uncertainty of the EFM relative error is performed as follows:

- a) two arrays of random numbers are generated, obeying uniform distribution laws, with a volume of $m = 10^6$ for input quantities: Q_r is the result of measuring the flow rate with EFM; Q_p is the result of measuring the flow with a reference CFM;
- b) an array of an estimate of the output value is generated – the relative error of the EFM (δ);
- c) estimates of the following parameters of the resulting distribution are calculated:

- total standard uncertainty: $u_c(\delta) = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} (\delta_i - M(\delta))^2 / 10},$

where $M(\delta)$ is the mean of the relative error of the EFM;

- expanded uncertainty: $U(\delta) = \frac{1}{2} [\delta_{975000} - \delta_{25000}],$

- coverage coefficient: $k = U(\delta)/u_c(\delta);$

d) the obtained measurement result is written as: $\delta \pm U(\delta)\%$; $P=0,95$.

Kragten method. The spreadsheet method is recommended for complex expressions in order to simplify calculations.

In the expression for the uncertainty of the EFM relative error:

$$u(\delta(Q_r, Q_p)) = \sqrt{\sum_{i=r,p} (\frac{\partial \delta}{\partial Q_i} u(Q_i))^2}$$

the partial differentials $(\partial \delta / \partial Q_r)$, $(\partial \delta / \partial Q_p)$ are approximated by finite differences.

This method provides acceptable accuracy for practical purposes when it is considered taking into account the necessary approximations made when evaluating the values $u(Q_i)$. In [6], this question is discussed more fully.

The total standard uncertainty of the relative EFM error is calculated by the formula:

$$u(\delta) = \sqrt{u^2(\delta, Q_r) + u^2(\delta, Q_p)}.$$

Expanded uncertainty of the EFM relative error:

$$U(\delta) = k \cdot u(\delta).$$

The measurement result is written as: $\delta \pm U(\delta)\% ; P=0,95$.

Results of the experiments. The EFM calibration experiments were carried out on a physical model of the geo-technological information and metrological complex (GIMC) in the laboratory of the Department “Automation and Control” of the Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev.

The metrologist’s workstation interface for the verification developed in the software LabView (NI, USA) is shown in figure 1.

The operator manually enters the environmental conditions and the parameters of the fluid being verified (leaching solution). The verification process includes measurements at four verified points. At each point on the “forward” and “return” paths of the regulated valve, eleven flow values are measured using the calibrated EFM and the reference CFM. The experimental results are entered into the database of flowmeter readings, which are then used in the program to calculate the uncertainty of the relative error of the calibrated flowmeter, also developed in LabView [21]. Data from the database of flowmeter readings are used to calculate the uncertainty of the relative error of the calibrated flowmeter using three methods: GUM, Monte Carlo, and Kragten.

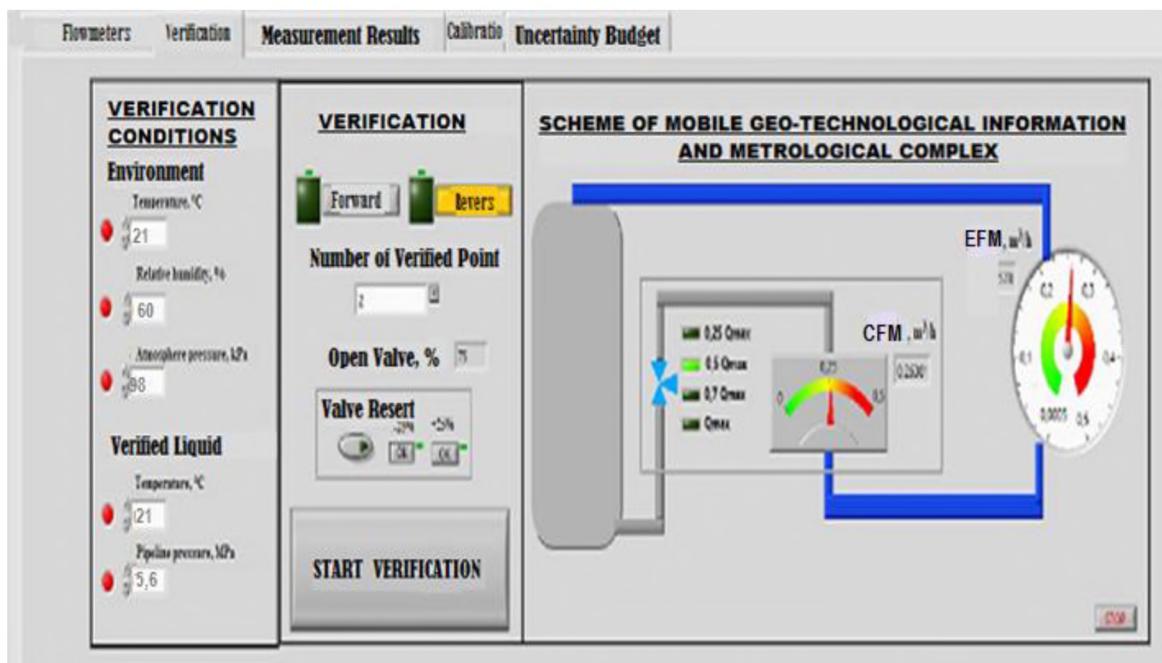


Figure 1 – The interface of the metrologist’s workstation for verification

The result of estimating the uncertainty of the relative error of the verified flow meter using the GUM method and the Monte Carlo method of the 4th verified point ($Q=5700 \text{ dm}^3/\text{h} = 95\% \text{ Q}_{\text{max}}$) is presented as an uncertainty budget [22].

The results of applying the GUM, Monte Carlo, and Kragten methods for four control points when calibrating an electromagnetic flow meter are shown in table 1 (estimates of relative error - δ , expanded uncertainty - U , repeatability limit (convergence) - u_r , coverage interval - CI).

Table 1 – Comparative table of the calculated values for the four control points using the GUM, Monte Carlo, and Kragten methods

Verified point	Estimated parameters, %	GUM method	Kragten method	Monte Carlo method	D1, %	D2, %
95% $of Q_{max}$	δ	0.007	0.007	0.007	0	0
	U	0.689	0.701	0.654	1,8	5,0
	u_r	0.352	0.358	0.337	1,6	
	CI	[-0.682; 0.696]	[-0.694; 0.708]	[-0.651; 0.665]		
75% $of Q_{max}$	δ	-0.003	-0.003	-0.003	0	0
	U	0.677	0.667	0.654	1,5	3,4
	u_r	0.345	0.340	0.333	1,4	4,2
	CI	[-0.680; 0.674]	[-0.670; 0.664]	[-0.654; 0.648]		
50% $of Q_{max}$	δ	0.015	0.015	0.01	0	33,3
	U	0.839	0.855	0.656	2	21,8
	u_r	0.428	0.437	0.335	2	21,7
	CI	[-0.734; 0.944]	[-0.750; 0.960]	[-0.645; 0.665]		
25% $of Q_{max}$	δ	0.011	0.0112	0.005	0,4	54,5
	U	0.768	0.783	0.655	1,9	14,7
	u_r	0.392	0.391	0.334	0,26	14,8
	CI	[-0.655; 0.881]	[-0.655; 0.881]	[-0.653; 0.658]		

According to table 1, graphs of the dependence of the uncertainty of the relative error on the experiment number (x – axis - experiment number), obtained by both methods were plotted (figure 2).

The graphs obtained using the Monte Carlo method (MC - solid white lines) show a constant value of the dispersion of the uncertainty of the relative error within $\pm 0.65\%$. The graphs obtained using the GUM method (GUM - dashed yellow lines) show the changing values of the spread of uncertainty of the relative error within $\pm 0.9\%$. In this case, the limit of the permissible relative error of the EFM is $\pm 1\%$. The graphs obtained using the Kragten method (MKr - solid blue lines) essentially repeat the GUM graphs.

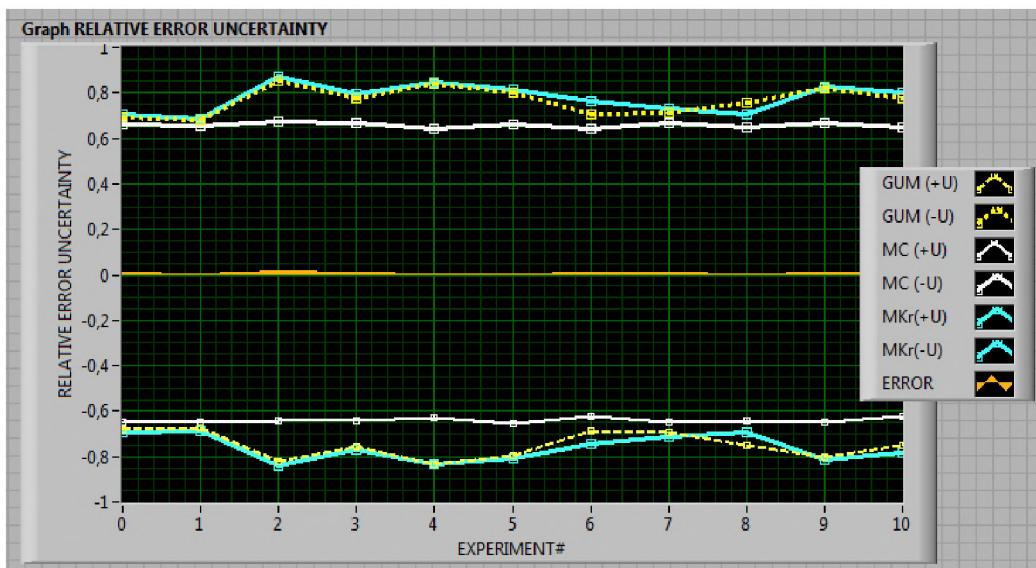


Figure 2 – Comparison of obtained relative error by three methods
(Uncertainty of the relative error vs the number of experiment)

Discussion. The authors performed a comparative analysis of the considered Monte Carlo and Kragten uncertainty estimation methods and the recommended standard GUM method. In a comparative analysis of the data from Table 1 and Figure 2, we can draw the following conclusions.

A comparison of the GUM and Kragten methods (data from column D1 in Table 1) showed that there are no differences between the estimates of the measured value (relative error), the differences between the expanded uncertainty and repeatability are less than 2%, and the coverage interval does not exceed $\pm 1\%$ for each verified point in both methods.

The comparison of the GUM and Monte Carlo methods (data of column D2 in Table 1) showed that the differences between the estimates of the measured value (relative error) reach 55%, the differences between the expanded uncertainty and repeatability are not more than 21.8%, and the coverage interval does not exceed $\pm 1\%$ for each verified point in both methods.

The large differences between the Kragten or GUM methods on the one hand and the Monte Carlo method on the other hand indicate significant deviations from the normality of the distribution of input quantities.

The calculations showed that all three methods (GUM, Kragten, and Monte Carlo) give values of standard uncertainty that do not exceed the permissible range of the relative error of EFM ($\pm 1\%$).

The Monte Carlo method with a sufficiently large number of simulations gives a better approximation. However, Monte Carlo calculations take longer (due to the sorting and processing of large arrays), although they can be performed by less qualified personnel (no in-depth knowledge of mathematics is required). The Monte Carlo method can be considered as a practical alternative to the GUM uncertainty estimation method.

The Kragten method gives results similar to the GUM method. No significant differences between the results obtained by the GUM and the Kragten methods were noted. The Kragten method is preferable in the absence of the need to calculate the sensitivity coefficients when calculating the total standard uncertainty, which is important for complex measurement equations. The Kragten method is recommended as a less time-consuming tool for calculations.

С. Г. Хан¹, Л. К. Ибраева¹, Н. В. Сибина¹, З. М. Юлдашев²

¹«Ф. Даукес атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАК, Алматы, Қазакстан;

²Санкт-Петербург мемлекеттік электротехника университеті, Санкт-Петербург, Ресей

ӨНЕРКӘСПТІК ШЫҒЫН ӨЛШЕГІШТЕР БЕЛГІСІЗДІГІН ЕСЕПТЕУ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ

Аннотация. Қазақстан Республикасында уран өндіру жерасты шаймалау әдісімен жүзеге асырылады әрі бұл өндірудің ең тиімді және экологиялық таза әдістерінің бірі. Бұл әдіске сәйкес шаймалау ерітіндісі айдау ұнғымалары арқылы беріледі, ал құрамында уран кездесетін ерітінді сору ұнғымасы арқылы сорылады. Жер қойнауы іс жүзінде бұзылмайды және тіпті бірнеше жыл ішінде толығымен қалпына келтіріледі. Сілтісіздендіру ерітіндісін қабылдау және тарату тораптарында мөлшерін өлшеу үшін көптеген өнеркәсптік электромагниттік шығын өлшегіштер колданылады, олар тексеру аяқталғаннан кейін метрологиялық тексеруден етуі керек. Үлгілі өлшеу құралдарын немесе ИСО/МЭК 17025-2017 стандарты бойынша аккредиттленген калибрлеу қондырығыларын қолданатын шығын өлшегіштерді калибрлеудің жалпы қабылданған әдісі қымбат және кейде қолжетімсіз болып жатады, негізінен қызмет көрсететін қызметкер жалақысы мен құбыр жүйесінен шығын өлшегішті алғып тастауға байланысты логистикалық шығындар болып келеді. Авторлар пайдалану орны бойынша өнеркәсптік шығын өлшегіштерді тексеру процедурасын жүргізуге арналған жылжыма-лы метрологиялық кешенниң физикалық стендін әзірледі.

Қазақстандық сәйкестік сертификаттарын және өнімге сынақ нәтижелерін тануға жағдай жасау үшін өлшеудің айқын еместігін бағалау талап етіледі. Осыған байланысты Қазақстанда өлшеудің белгісіздік тұжырымдамасын практикалық қолданудың жанданғаны байқалады. Метрологиялық есептерді шешу кезінде қолданылатын амалдарды халықаралық үйлестіру үшін халықаралық ұйымдар келесі негізгі құжаттарды әзірледі және дайындады: ИСО/МЭК 17025:2017 стандарты; соның толықтырылған редакциясы ретінде GUM:1995; өлшеудің айқын еместігін бағалау жөніндегі ұсынымдарды қамтитын метрология бойынша Біріккен комитеттің JCGM 100:2008 құжаты; метрология саласында пайдаланылатын барлық терминдер мен ұғымдар қамтылған метрология бойынша JCGM 200:2012 халықаралық сөздік; JCGM 101:2008 нұсқаулығы (GUM-ға толықтыру 1:1995).

Макалада халықаралық құжаттарда ұсынылған айқын еместікті бағалаудың келесі үш әдісіне шолу жасалды: стандартты GUM, Монте-Карло және Крагтен әдістері. Шығынды өлшеудің белгісіздігін бағалау әдістері бұған дейін қолданылмаған. Бұл мәселе макаланың зерттеу нысаны болып саналады. Өнеркәсптік электромагниттік шығын өлшегіштің салыстырмалы қатесінің белгісіздігін бағалау үшін осы әдістерді қолдану зерттеледі.

Авторлар техникалық шығын өлшегіштерді тексеру нәтижелерін алу үшін метрологиялық кешен құрамына «Метролог» автоматтандырылған жұмыс орнын (АЖО) қоскан, бұл АЖО құрамында NILabView графикалық бағдарламалау ортасында әзірленген электромагниттік шығын өлшегіштің анықталмағандығын есептеу бағдарламалары орнатылған. Сонымен қатар, зерттеулер жүргізу үшін өнеркәсіптік шығын өлшегіштердің салыстырмалы қатесінің белгісіздігін бағалау моделі ұсынылған. Электромагниттік шығын өлшегіштің белгісіздігін бағалау бойынша үш әдіс негізінде, атап айтқанда, стандартты GUM, Монте-Карло және Крагтенмен есептелді.

Метрологиялық кешендең тәжірибелік нәтижелері мен электромагниттік шығын өлшегіштің салыстырмалы қатесінің белгісіздігін бағалау нәтижелеріне салыстырмалы талдау келтірлген. Орындаған есептеу жұмыстары келесідей нәтиже көрсетті: барлық үш әдіс (GUM, Крагтен және Монте-Карло) электромагниттік шығын өлшегіштің салыстырмалы қате диапазонынан ($\pm 1\%$) аспайтын стандартты белгісіздік мәнін береді.

Монте-Карло әдісі имитация арқылы жақындауға мүмкіндік береді. Алайда Монте-Карло әдісімен есептеу көп уақытты алады (үлкен массивтерді сұрыптау және өндөу себебінен), бірақ оны квалификациясы төмен қызыметкерлер орындаі алады (математиканы терең білудің қажеті жок). Монте-Карло әдісін белгісіздікті бағалаудың GUM әдісіне практикалық балама ретінде қарастыруға болады [19].

Крагтен әдісі GUM әдісіне ұқсас нәтиже көрсетеді. GUM және Крагтен әдістері бойынша алынған нәтижелер арасындағы айтарлықтай айырмашылықтар байқалмады.

Жалпы стандартты белгісіздікті есептеуде сезімталдық коэффициентін есептеу қажеттілігінің жоқтығына байланысты күрделі өлшеу тендеуі колданылғанда Крагтен әдісі қолайлы келеді. Есептеуді орындау үшін Крагтен әдісі аз уақытты қажет ететін құрал ретінде ұсынылады.

Түйін сөздер: өлшеудің айқын еместігі, стандартты GUM әдісі, Монте-Карло әдісі, Крагтен кестесі, тексеру, электромагниттік шығын өлшегіш.

С. Г. Хан¹, Л. К. Ибраева¹, Н. В. Сибина¹, З. М. Юлдашев²

¹НАО «Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева», Алматы, Казахстан;

²Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Аннотация. В Республике Казахстан добыча урана осуществляется методом подземного выщелачивания - одним из самых рентабельных и экологически чистых способов добычи. Согласно этому методу выщелачивающий раствор подается через закачные скважины, а продуктивный раствор, содержащий уран, откачивается через откачную скважину. Недра практически не разрушаются и даже полностью восстанавливаются в течение нескольких лет. На узлах приема и распределения выщелачивающих растворов для измерения их количества используется большое количество промышленных электромагнитных расходомеров (ЭМР), которые по истечению межповерочного интервала должны проходить метрологическую поверку. Общепринятый метод калибровки расходомеров с применением образцовых средств измерений или с помощью калибровочных установок, аккредитованных по стандарту ИСО/МЭК 17025-2017, может быть дорогостоящим и иногда неосуществимым, главным образом из-за затрат на оплату труда обслуживающего персонала и затрат на логистику, связанных с удалением расходомера из системы трубопроводов. Авторами разработан физический стенд передвижного метрологического комплекса, предназначенного для проведения процедуры поверки промышленных расходомеров по месту эксплуатации.

Для создания условий признания казахстанских сертификатов соответствия и результатов испытаний на продукцию требуется оценка неопределенности измерений. В связи с этим наблюдается активизация практического применения в Казахстане концепции неопределенности измерений. Международными организациями разработаны и подготовлены основные документы по международной гармонизации подходов при решении метрологических задач: стандарт ИСО/МЭК 17025:2017; документ Объединенного комитета руководств по метрологии JCGM 100:2008, как последняя дополненная редакция GUM:1995, которая содержит рекомендации по оценке неопределенности в измерении; международный словарь по метрологии JCGM 200:2012, где представлены все термины и понятия, используемые в области метрологии; руководство JCGM 101:2008 (Дополнение 1 к GUM:1995).

В статье приведен обзор трех методов оценивания неопределенности, рекомендуемых международными документами: стандартным GUM, Монте-Карло и Крагтена. Приведенные методы не применялись к оценке неопределенности измерения расхода. Эта задача является предметом исследования настоящей статьи.

Исследовано применение этих методов для оценивания неопределенности относительной погрешности промышленного электромагнитного расходомера.

Для получения результатов проверки технических расходомеров авторами в состав метрологического комплекса включен АРМ «Метролог» с разработанными в среде графического программирования NI LabView программами расчета неопределенности электромагнитного расходомера.

Кроме того, предложена модель оценивания неопределенности относительной погрешности промышленных расходомеров для проведения исследований. Расчеты по оценке неопределенности измерений электромагнитного расходомера проведены тремя методами: стандартным GUM, Монте-Карло и Крагтена.

Приведены результаты экспериментов на метрологическом комплексе и сравнительный анализ результатов оценивания неопределенности относительной погрешности электромагнитного расходомера. Выполненные расчеты показали, что все три метода (GUM, Крагтена и Монте-Карло) дают значения стандартной неопределенности, не превышающие допустимый диапазон относительной погрешности ЭМР ($\pm 1\%$).

Метод Монте-Карло при достаточно большом числе имитаций дает лучшее приближение. Однако расчет по методу Монте-Карло занимает больше времени (за счет сортировки и обработки больших массивов), но может выполняться менее квалифицированным персоналом (не требуется глубокого знания математики). Метод Монте-Карло можно рассматривать как практическую альтернативу методу оценки неопределенности GUM [19].

Метод Крагтена дает результаты аналогичные методу GUM. Существенные различия между результатами, полученными по GUM и методу Крагтена, не отмечены.

Метод Крагтена предпочтителен ввиду отсутствия необходимости расчета коэффициентов чувствительности при вычислении суммарной стандартной неопределенности, что имеет значение при сложных уравнениях измерений. Метод Крагтена рекомендуется как менее трудоемкий инструмент для расчетов.

Ключевые слова: неопределенность измерения; стандартный метод GUM, метод Монте-Карло, таблица Крагтена, поверка; электромагнитный расходомер.

Information about authors:

Khan Svetlana Guryevna, PhD, Professor of Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; khan.sv2011@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7918-6690>

Ibrayeva Lida Kuandykovna, PhD, Professor of Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; ibrayeva_lk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8342-6685>

Syabina Natalya Valeryevna, PhD, Docent of Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan; n.syabina@aues.kz; <https://orcid.org/0000-0003-2308-5652>

Yuldashev Zafar Mukhamedovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia; yuld@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1075-3420>

REFERENCES

- [1] Oryngozhin Ye.S., Yeremin N.A., Metaxa G.P., Alisheva Zh.N. Underground uranium borehole leaching. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences. ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print). Vol. 4, N 442 (2020), 62-69. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.85>.
- [2] Possolo A. Statistical models and computation to evaluate measurement uncertainty. Metrologia. 2014; 51: 228-236.
- [3] Ellison S.L.R. Implementing measurement uncertainty for analytical chemistry: The Eurachem guide for measurement uncertainty. Metrologia. 2014; 51: 199-205.
- [4] Vasilevskyi O.M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. International Journal of Metrology and Quality Engineering (IJMQE). Int. J. Metrol. Qual. Eng. 5, 403 (2014).
- [5] Ehrlich C. Terminological aspects of the guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Metrologia. 2014; 51: 145-154.
- [6] Kragten J. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique, Analyst, 119, 2161-2166 (1994).
- [7] Lepekk A. A computer program for a general case evaluation of the expanded uncertainty. Accreditation and Quality Assurance. 2003; 8: 296-299.
- [8] Marcus Augusto Lyrio Trapé, Alessandro Morais Saviano, Fabiane Lacerda Francisco, Felipe Rebello Lourenço. Measurement uncertainty in pharmaceutical analysis and its application. Journal of pharmaceutical analysis, 2014.
- [9] Bich W., Cox M., Michotte C. Towards a new GUM. An update. Metrologia. 2016; 53: 149-159.
- [10] Bich W., Cox M.G., Dybkaer R., Elster C., Estler W.T., Hibbert B., Imai H., Kool W., Michotte C., Nielsen L., Pendrill L., Sidney S., Van der Veen A.M.H., Woger W. Revision of the ‘guide to the expression of uncertainty in measurement’. Metrologia. 2012; 49: 702-705.

-
- [11] Bich W. Revision of the ‘guide to the expression of uncertainty in measurement’. Why and how. *Metrologia*. 2014; 51: 155-158.
 - [12] Massart D.L., Vandeginste B.G.M., Buydens L.M.C., Jong S., Lewi P.J., Smeyers-Verbeke J. Data Handling in Science and Technology. Vol. 20. *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part A*. Amsterdam: Elsevier; 1997.
 - [13] Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. NASA-HDBK-8739. 19-3. Approved: 2010-07-13.
 - [14] Meyer V.R. Measurement uncertainty. *Journal of Chromatography A*. 2007; 1158: 15-24.
 - [15] Paulo R.G. Couto, Jailton C. Damasceno, Sergio P. de Olivera. Monte Carlo Simulations Applied to Uncertainty in Measurement. <http://dx.doi.org/10.5772/53014>.
 - [16] Sediva S. and Havlikova M. "Comparison of GUM and Monte Carlo method for evaluation measurement uncertainty of indirect measurements," Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC), Rytro, 2013. P. 325-329.
 - [17] EURACHEM/CITAC Guide CG4. Quantifying uncertainty in analytical measurement, 3rded./Ed.S.L.R. Ellison (LGC,UK), A.Williams (UK), 2012. 141p.
 - [18] Antonio Gustavo González, María Ángeles Herrador, Agustín García Asuero and Julia Martín A Practical Way to ISO/GUM Measurement Uncertainty for Analytical Assays Including In-House Validation Data. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.72048.
 - [19] Stant L.T., Aaen P.H., Ridler N.M. Comparing methods for evaluating measurement uncertainty given in the JCGM ‘Evaluation of Measurement Data’ documents // *Measurement*. December 2016. Vol. 94. P. 847-851. doi.org/10.1016/j.measurement.2016.08.015.
 - [20] Zhusupbekov S.S., Ibrayeva L.K., Khan S.G., Komada P. The Experience of Application of Measurement Uncertainty Evaluation Methods In Calibration // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technology sciences*. ISSN 2518-170X (Online), ISSN 2224-5278 (Print). Vol. 4, N 436 (2019), 79-85.
 - [21] Khan S., Tashibayeva A. Development of program for estimating the measurement uncertainty at the calibration of electromagnetic flowmeters: *Bulletin of AUPET* (ISSN 1999-9801), Almaty. 2017, 2 (37). P. 27-34.
 - [22] Zhusupbekov S.S., Khan S.G., Ibrayeva L.K. The analysis of approaches to measurement uncertainty evaluation for calibration. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce Ochronie Środowiska - IAPGOS* (Informatics, Control, Measurement in Economy and Environmental Protection). 2019. Vol. 9, N 3. P. 26-29. <https://doi.org/10.35784/iapgos.233>.