

# Оценивание неопределенности измерений при проведении ситового анализа твердого минерального топлива

Е. Н. Подколзина

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, 61166, Харьков, Украина  
lena-sacheva@yandex.ru

## Аннотация

Целью статьи является разработка процедуры оценивания неопределенности измерений при определении гранулометрического состава твердого минерального топлива.

Гранулометрический состав твердого топлива определяется в испытательных углехимических лабораториях методом ситового анализа.

Рассмотрена сущность ситового анализа, пошагово описана методика проведения эксперимента. Приведена методика анализа, особенности его проведения, описана последовательность обработки экспериментальных данных.

Записано и проанализировано модельное уравнение для определения выхода классов крупности. Приведены формулы для вычисления стандартных неопределенностей входных величин, их вкладов в неопределенность измеряемой величины, суммарной стандартной неопределенности, а также расширенной неопределенности.

Разработана процедура оценивания неопределенности измерений классов крупности топлива с учетом вкладов неопределенности измерений, связанных с неточностью воспроизведения размеров отверстий сит.

Приведен типовой бюджет неопределенности измерений при проведении ситового анализа, являющийся основой автоматизации оценивания неопределенности измерений. Показаны особенности записи результатов измерений.

**Ключевые слова:** ситовый метод, гранулометрический состав, бюджет неопределенности, класс крупности, твердое топливо.

Получено: 20.02.2018

Отредактировано: 02.03.2018

Одобрено к печати: 13.03.2018

## Постановка проблемы

Твердое минеральное топливо (ТМТ) — самый распространенный в мире энергетический ресурс, используемый для получения электрической энергии, искусственного топлива, производства графита, в качестве сырья для металлургической и химической промышленности и основы для извлечения редких и рассеянных элементов.

Одной из важнейших характеристик ТМТ является его гранулометрический состав — количественное соотношение частиц (зерен) ТМТ по крупности в его сыпучей массе. От гранулометрического состава ТМТ зависит его насыпная плотность, продолжительность коксования и качество кокса, выход жидких нелетучих продуктов при термической деструкции ТМТ, производительность газогенераторов и т. д.

Гранулометрический состав твердого топлива определяется в испытательных углехимических ла-

бораториях методом ситового анализа. При этом, в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 [1], требуется оценивать неопределенность проводимых измерений.

*Цель* данной работы — разработка и исследование процедуры оценивания неопределенности измерений при проведении ситового анализа ТМТ.

## Основная часть

### 1. Особенности проведения ситового анализа

Порядок проведения ситового анализа установлен в ДСТУ 4082–2002 [2]. Сущность метода заключается в рассеивании пробы на контрольных ситах или грохотах, взвешивании полученного материала при рассеивании и вычислении выходов отдельных классов крупности.

Ситовому анализу подвергаются лабораторные пробы, отобранные в соответствии с ДСТУ

4096:2002 [3], а также эксплуатационные пробы, отобранные в соответствии с ГОСТ 16094–78 [4]. В пробу для ситового анализа отбирается не менее 30 порций, равномерно распределенных по всей партии.

Топливо с массовой долей влаги, препятствующей разделению частиц, перед рассевом сушат на воздухе или в сушильном шкафу при температуре не выше  $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ , а каменный уголь и антрацит — не выше  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$  до видимого отделения частиц топлива друг от друга. Подсушенную пробу топлива перед рассевом охлаждают до комнатной температуры. Сита выбирают в соответствии с основным рядом размера круглых и квадратных отверстий: 300, 200, 100, 50, 25, 13, 6, 3, 1 и 0,063 мм [2].

Типовая схема ситового анализа твердого топлива показана на рис. 1.

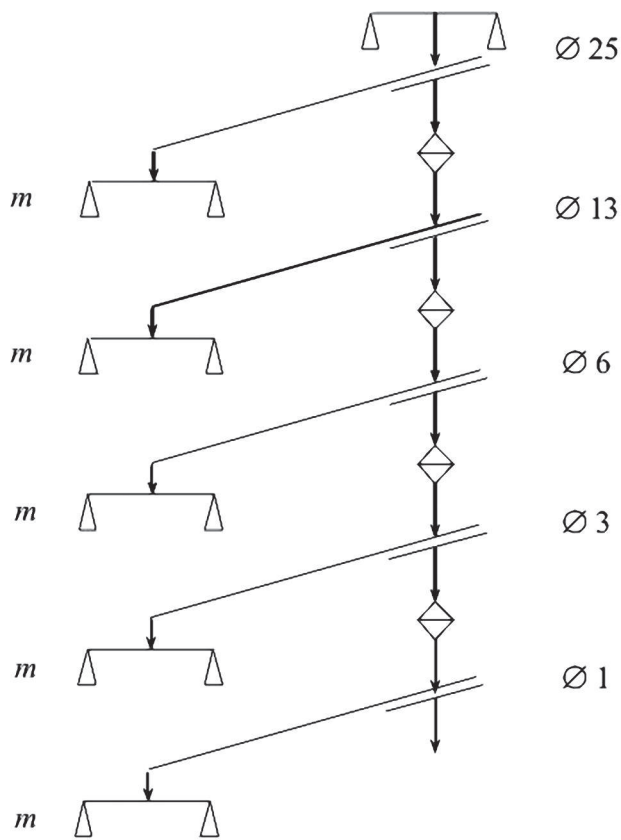


Рис. 1. Схема проведения ситового анализа твердого топлива крупностью 0...50 мм

Алгоритм выполнения эксперимента включает в себя следующие шаги.

**Шаг 1.** Рассев пробы начинается на сите с отверстиями размером, соответствующим максимальному размеру кусков испытуемого материала. Рассев считают законченным, когда в течение одной минуты через сито проходит менее 1 % массы топлива. После просеивания топлива через первое сито осуществляют определение массы (взвешивание) надрешетного продукта  $m_1$ .

**Шаг 2.** Образовавшийся после первого просеивания подрешетный продукт подвергают просеиванию через второе сито и осуществляют определение массы надрешетного продукта  $m_2$ .

.....

**Шаг N-1.** Осуществляют просеивание топлива через последнее  $(N-1)$ -е сито и осуществляют определение массы надрешетного продукта  $m_{N-1}$ .

**Шаг N.** Осуществляют взвешивание подрешетного продукта  $m_N$ .

Потери материала в процессе анализа, определяемые как разность между массой пробы, поступившей на испытание, и суммой массы классов, полученных при анализе  $\sum_{k=1}^N m_k$ ,

должны быть не более 2 % массы пробы, подвергнутой рассеву. В противном случае испытание считается недействительным. При потере материала в пределах указанной нормы ее прибавляют к самому мелкому из полученных классов крупности.

По результатам анализа вычисляют выход классов крупности в процентах по формуле

$$\gamma_i = \frac{m_i}{\sum_{k=1}^N m_k} \cdot 100\%.$$

Результаты ситового анализа часто представляют в виде графиков, называемых ситовыми характеристиками (кривые гранулометрического состава) в линейной или логарифмической системе координат.

Для этого, в соответствии с приложением В стандарта [2], на левой оси ординат снизу вверх откладывают суммарный выход надрешетных продуктов  $\sum_{k=1}^i \gamma_k$ ,

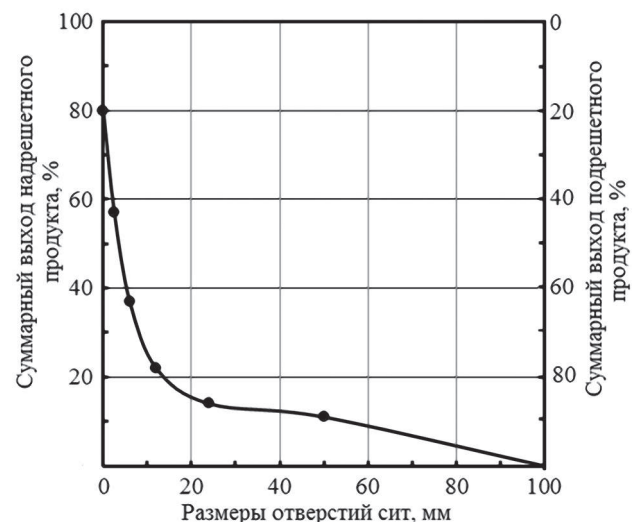


Рис. 2. Пример кривой гранулометрического состава из стандарта [2]

на правой оси ординат сверху вниз — суммарный выход подрешетных продуктов, а на оси абсцисс слева направо — значение нижних границ крупности классов в миллиметрах. Полученные на пересечении координат точки соединяют плавной кривой, которую заканчивают в точке, соответствующей максимальной крупности куска топлива (рис. 2).

## 2. Оценивание неопределенности измерений при определении гранулометрического состава топлива

### 2.1. Запись модельного уравнения

Модельное уравнение для определения выхода классов крупности в процентах будет иметь следующий вид:

$$\gamma_i = \frac{m_i}{\sum_{k=1}^N m_k} \cdot 100\% + \Delta_x(\gamma_i), \quad (1)$$

где  $m_i$  — масса топлива данного класса крупности;  $N$  — количество классов крупности испытываемого топлива;  $\sum_{k=1}^N m_k$  — общая сумма масс классов крупности;  $\Delta_x(\gamma_i)$  — поправка, обусловленная несоответствием размеров ячеек сит, используемых при просеивании ТМТ.

### 2.2. Оценивание входных величин

Оценками входных величин уравнения (1) являются значения масс  $m_k$ , полученные в результате взвешивания надрешетных продуктов, а также оценка поправки  $\Delta_x(\gamma_i)$ . Последняя принимается равной нулю с учетом приписываемого ей симметричного закона распределения с нулевым математическим ожиданием.

### 2.3. Вычисление числового значения выхода класса крупности

Числовое значение измеряемой величины вычисляется путем подстановки в модельное уравнение (1) оценок входных величин  $\hat{m}_k$ ,  $\hat{\Delta}_x(\gamma_i)$ :

$$\hat{\gamma}_i = \frac{\hat{m}_i}{\sum_{k=1}^N \hat{m}_k} \cdot 100\%. \quad (2)$$

### 2.4. Вычисление стандартных неопределенностей входных величин

Поскольку весы, с помощью которых должны взвешиваться массы надрешетных продуктов, должны быть откалиброваны [1], стандартная инструментальная неопределенность измерения  $m_k$  вычисляется по формуле

$$u(m_k) = \frac{U(m_k)}{k(m_k)}, \quad (3)$$

где  $U(m_k)$  и  $k(m_k)$  — соответственно расширенная неопределенность и коэффициент охвата, взятые из сертификата калибровки весов.

Поскольку сита, используемые при просеивании, также должны быть откалиброваны, стандартные инструментальные неопределенности воспроизведения размеров их отверстий можно определить по формуле

$$u(x_k) = \frac{U(x_k)}{k(x_k)},$$

где  $U(x_k)$  и  $k(x_k)$  — соответственно расширенная неопределенность и коэффициент охвата, взятые из сертификата калибровки сит.

### 2.5. Вычисление вкладов стандартных неопределенностей входных величин в неопределенность измеряемой величины

Общее выражение для вычисления вкладов неопределенности измерения масс надрешетных продуктов  $u(m_k)$  в неопределенность выхода  $i$ -го класса крупности будет иметь вид

$$u_{m_k}(\gamma_i) = c_{m_k} \cdot u(m_k),$$

где  $c_{m_k}$  — соответствующие коэффициенты чувствительности, равные

$$c_{m_k} = \frac{\partial \gamma_i}{\partial m_k} = \frac{m_i}{\left(\sum_{k=1}^n m_k\right)^2} \cdot 100\%, \quad \text{для } k \neq i; \quad (4)$$

$$c_{m_k} = \frac{\partial \gamma_i}{\partial m_k} = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n m_k}{\left(\sum_{k=1}^n m_k\right)^2} \cdot 100\%, \quad \text{для } k = i. \quad (5)$$

Сравнение выражений (4) и (5) показывает, что коэффициент чувствительности для  $k = i$  будет существенно превышать коэффициенты чувствительности для  $k \neq i$ , то есть вклад неопределенности  $u_{m_i}(\gamma_i)$  будет доминирующим по сравнению с остальными вкладами  $u_{m_k}(\gamma_i)$  (для  $k \neq i$ ).

Общее выражение для вычисления вкладов неопределенности измерения размеров отверстий сит  $u(x_i)$  в неопределенность выхода  $i$ -го класса крупности будет иметь вид

$$u_{x_i}(\gamma_i) = c_{x_i} \cdot u(x_i),$$

где  $c_{x_i}$  — соответствующие коэффициенты чувствительности, равные

$$c_{x_i} = \frac{\partial \gamma_i}{\partial x_i}.$$

Так как размеры отверстий сит  $x_i$  не входят непосредственно в модельное уравнение (1), вычисление коэффициентов чувствительности следу-

ет производить путем численного дифференцирования экспериментальной зависимости  $\gamma_i(x_i)$  [5]. Однако в данном случае такой подход затруднен в связи с отсутствием возможности воспроизведения малых приращений размеров отверстий сит в процессе эксперимента. Поэтому приходится ориентироваться только на результаты ситового

анализа, для которых характерно малое число  $N$  интервалов дискретности  $x_i - x_{i-1}$  и их неравномерность.

Для решения поставленной задачи предлагается предварительно аппроксимировать имеющуюся экспериментальную зависимость  $\gamma_i(x_i)$  полиномом Лагранжа [6] на каждом интервале  $[x_{i-1}; x_{i+1}]$ :

$$\gamma_i(x) = \frac{(x - x_i)(x - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i-1} - \frac{(x - x_{i-1})(x - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \gamma_i + \frac{(x - x_{i-1})(x - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i+1}$$

с последующим ее дифференцированием:

$$[\gamma_i(x)]' = \frac{(2x - x_i - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i-1} - \frac{(2x - x_{i-1} - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \gamma_i + \frac{(2x - x_{i-1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i+1}. \quad (6)$$

Для первого просеивания принимаем  $x = x_{i-1}$ , поэтому из (6) получаем

$$c_{x_{i-1}} = \frac{(2x_{i-1} - x_i - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i-1} - \frac{(x_{i-1} - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \gamma_i + \frac{(x_{i-1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i+1}.$$

Для второго и последующих (кроме последнего) просеиваний принимаем  $x = x_i$ , поэтому имеем

$$c_{x_i} = \frac{(x_i - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i-1} - \frac{(2x_i - x_{i-1} - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \gamma_i + \frac{(x_i - x_{i-1})}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i+1}.$$

Для последнего просеивания принимаем  $x = x_{i+1}$ , поэтому из (6) получаем

$$c_{x_{i+1}} = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i-1} - \frac{(x_{i+1} - x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)} \gamma_i + \frac{(2x_{i+1} - x_{i-1} - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)(x_{i+1} - x_{i-1})} \gamma_{i+1}.$$

При этом следует учитывать, что неопределенность измерения выхода  $i$ -го класса крупности будет зависеть как от неопределенности воспроизведения диаметров отверстий  $i$ -го сита, так и предыдущего,  $(i-1)$ -го сита. Поэтому вклад неопределенностей воспроизведения размеров отверстий сит в неопределенность измерения  $i$ -го класса крупности ТМТ будет равен

$$u_x(\Delta\gamma_i) = \sqrt{u_{x_i}^2(\gamma_i) + u_{x_{i-1}}^2(\gamma_i)}, \quad (7)$$

где  $u_{x_i}(\gamma_i) = c_{x_i}(\gamma_i) \cdot u(x_i)$ ,  $u_{x_{i-1}}(\gamma_i) = c_{x_{i-1}}(\gamma_i) \cdot u(x_{i-1})$  — стандартные неопределенности измерения выхода  $i$  класса крупности топлива, обусловленные неопределенностью воспроизведений размеров отверстий со-

ответственно  $i$ -го и  $(i-1)$ -го сит;  $c_{x_i}(\gamma_i)$  и  $c_{x_{i-1}}(\gamma_i)$  — соответствующие коэффициенты чувствительности.

### 2.6. Вычисление суммарной стандартной неопределенности

Модельному уравнению (1) соответствует следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности  $\gamma_i$ :

$$u_c(\gamma_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n u_{m_k}^2(\gamma_i) + u_{x_i}^2(\gamma_i) + u_{x_{i-1}}^2(\gamma_i)}. \quad (8)$$

### 2.7. Вычисление расширенной неопределенности

Расширенная неопределенность будет определяться из выражения

Бюджет неопределенности измерений выхода классов крупности ТМТ

Входная величина	Оценка входных величин	Стандартные неопределенности входных величин	Коэффициент чувствительности	Вклады неопределенности
$m_1$	$\hat{m}_1$ , г	$u(m_1)$ , г (3)	(4) или (5), %/г	$u_{m_1}(\gamma_i)$ , %
$m_2$	$\hat{m}_2$ , г	$u(m_2)$ , г (3)	(4) или (5), %/г	$u_{m_2}(\gamma_i)$ , %
...	...	...	...	...
$m_N$	$\hat{m}_n$ , г	$u(m_N)$ , г (3)	(4) или (5), %/г	$u_{m_N}(\gamma_i)$ , %
$\Delta_x(\gamma_i)$	0, %	(7), %	1	$u_x(\Delta\gamma_i)$ , %
Измеряемая величина	Оценка измеряемой величины	Суммарная стандартная неопределенность	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность
$\gamma_i$	(2), %	(8), %	$k$	(9), %

$$U(\gamma_i) = k \cdot u_c(\gamma_i), \quad (9)$$

где  $k$  — коэффициент охвата для уровня доверия 0,95. Поскольку все вклады неопределенности, входящие в выражение (8), оценены по типу В, то значение коэффициента охвата будет зависеть от законов распределения этих вкладов и соотношения их значений [7].

### 2.8. Бюджет неопределенности измерений выхода классов крупности ТМТ

Бюджет неопределенности измерений выхода классов крупности ТМТ приведен в таблице.

### 2.9. Запись результата измерения

Результат измерения выхода классов крупности в топливе представляется в следующем виде:

$$\gamma_i = \hat{\gamma}_i \pm U(\gamma_i), \quad p = 0,95.$$

При записи результата измерения значение расширенной неопределенности  $U(\gamma_i)$  округляется до двух значащих цифр, при этом числовое значение результата измерения  $\hat{\gamma}_i$  должно заканчиваться

ся цифрой того же разряда, что и ее округленная расширенная неопределенность.

### Выводы

1. Гранулометрический состав твердого минерального топлива является одной из важнейших его характеристик, которая определяет его качественные показатели: насыпную плотность, продолжительность и качество коксования, выход жидких нелетучих продуктов при проведении термической деструкции, производительность газогенераторов.

2. Разработку процедуры оценивания неопределенности измерения классов крупности топлива в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 следует производить с учетом вкладов неопределенности измерений, связанных с неточностью воспроизведения размеров отверстий сит.

3. Анализ разработанного бюджета неопределенности измерений позволит выявить доминирующие вклады неопределенности при проведении ситового анализа твердого минерального топлива.

## Оцінювання невизначеності вимірювань при проведенні ситового аналізу твердого мінерального палива

О. М. Подколзіна

Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна  
lena-sacheva@yandex.ru

### Анотація

Метою статті є розробка процедури оцінювання невизначеності вимірювань при визначенні гранулометричного складу твердого мінерального палива.

Гранулометричний склад твердого палива визначається у випробувальних вуглекімічних лабораторіях методом ситового аналізу.

Розглянуто сутність ситового аналізу, покроково описано методику проведення експерименту. Наведено методику аналізу, особливості його проведення, описано послідовність обробки експериментальних даних.

Записано і проаналізовано модельне рівняння для визначення виходу класів крупності. Наведено формули для обчислення стандартних невизначеностей вхідних величин, їхніх внесків у невизначеність вимірюваної величини, сумарної стандартної невизначеності, а також розширеної невизначеності.

Розроблено процедуру оцінювання невизначеності вимірювань класів крупності палива з урахуванням внесків невизначеності вимірювань, пов'язаних із неточністю відтворення розмірів отворів сит.

Наведено типовий бюджет невизначеності вимірювань при проведенні ситового аналізу, що є основою автоматизації оцінювання невизначеності вимірювань. Показано особливості запису результатів вимірювань.

**Ключові слова:** ситовий метод, гранулометричний склад, бюджет невизначеності, клас крупності, тверде паливо.

# Evaluation of measurement uncertainty during realization of sieve analysis of solid mineral fuel

Ye.N. Podkolzina

Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine  
lena-sacheva@yandex.ru

## Abstract

The purpose of the article is to develop a procedure for estimating the uncertainty of measurements in determining the granular composition of solid mineral fuels.

The granulometric composition of a solid fuel is determined in the testing coal-chemical laboratories by the method of sieve analysis. According to the requirements of the DSTU standard ISO/IEC17025:2006, it is required to estimate the uncertainty of the measurements during the sieve analysis.

The essence of the sieve analysis is considered in the article, the step-by-step method of conducting the experiment is described. The analysis technique, features of its carrying out, the sequence of experimental data processing is described. The documentation is provided in accordance with what samples are selected for carrying out the sieve analysis.

A model equation for determining the yield of size classes is recorded and analyzed. The formulas for calculating the standard uncertainties of the input quantities, their contributions to the uncertainty of the measured quantity, the total standard uncertainty and the expanded uncertainty are given.

The procedure for estimating the uncertainty in the measurement of the fuel size classes has been developed, taking into account the contributions of the measurement uncertainty associated with the inaccuracy in the reproduction of the sieve holes.

It is shown that if the dimensions of the sieve holes do not enter directly into the model equation, then the calculation of the sensitivity coefficients should be performed by numerically differentiating the experimental dependence. To solve the problem posed, it is suggested to approximate the existing experimental dependence by the Lagrange polynomial.

A typical budget of measurement uncertainty is presented for sieve analysis, which is the basis for automating the estimation of measurement uncertainty. The features of recording the measurement results are shown.

**Keywords:** sieve method, size distribution, uncertainty budget, size fraction, hard fuel.

## Список литературы

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT). Київ, 2007. 32 с.
2. ДСТУ 4082–2002. Паливо тверде. Ситовий метод визначення гранулометричного складу. Київ, 2002. 26 с.
3. ДСТУ 4096–2002. Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань (ISO 1988:1975, ISO 5069–1:1983, ISO 5069–2:1983, NEQ). Київ, 2002. 35 с.
4. ГОСТ 16094–78. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод отбора эксплуатационных проб. Москва, 2003. 3 с.
5. Прокопов А.В., Подколзина Е.Н. О возможности уточнения уравнения (модели) изменения на основе использования экспериментальных данных. *Неопределенность измерений: научные, законодательные, методические и прикладные основы*: Сб. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 13–14 апреля 2016). Минск, Беларусь, 2016. С. 108–110.
6. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.

7. Захаров И.П., Климова Е.А., Чунихина Т.В. Получение достоверной оценки коэффициента охвата при составлении бюджета неопределенности измерений. *Системы обработки информации*. 2013. Вып. 3 (110). С. 41–44.

## References

1. DSTU ISO/IEC 17025:2006. *Zahalni vymohy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibruvalnykh laboratorii* (ISO/IEC 17025:2005, IDT) [Ukrainian State Standard ISO/IEC 17025:2006. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart, 2007. 28 p. (in Ukrainian).
2. DSTU 4082–2002. *Palyvo tverde. Sytoviyi metod vyznachennia hranulometrychnoho skladu* [Solid fuel. Sieve method of determining the granulometric composition]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2002. 26 p. (in Ukrainian).
3. DSTU 4096–2002. *Vuhillia bure, kamiane, antratsyt, horiuchi slantsi ta vuhilni brykety. Metody vidboru ta pidhotovky prob do laboratornykh vyprobuvan* [Brown coal, stone coal, anthracite, shale coal and coal bricks. Methods for the selection and preparation of samples for laboratory

- tests] (ISO 1988:1975, ISO 5069–1:1983, ISO 5069–2:1983, NEQ). Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2002. 35 p. (in Ukrainian).
4. GOST 16094–78. *Ugli burye, kamennye, antratsit i goryuchie slantsy. Metod otbora ekspluatatsionnykh prob* [Brown coal, stone coal, anthracite and shale coal. Method of selection of operational samples]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2003. 3 p. (in Russian).
  5. Prokopov A. V., Podkolzina E. N. O vozmozhnosti utochneniya uravneniya (modeli) izmereniya na osnove ispol'zovaniya eksperimental'nykh dannykh [On the possibility of refinement the measurement equation (model) on the basis of using the experimental data]. *Neopredelennost' izmerenii: nauchnye, zakonodatel'nye, metodicheskie i prikladnye osnovy* [Uncertainty of measurements: scientific, legal, methodological and applied bases]. 13–14 April, 2016, Minsk, Belarus, pp. 108–110 (in Russian).
  6. Samarskii A. A., Gulin A. V. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. literatury, 1989. 432 p. (in Russian).
  7. Zakharov I. P., Klimova E. A., Chunikhina T. V. Poluchenie dostovernoi otsenki koeffitsienta okhvata pri sostavlenii byudzheta neopredelennosti izmerenii [Obtaining the reliable estimation of the coverage factor for the measurement uncertainty budget]. *Systemy obrobky informatsiyi*, 2013, no. 3 (110), pp. 41–44 (in Russian).