

УДК681.31

**И.П.Захаров**, д-р техн. наук,  
**Е.Н.Шевченко, А. В. Коленко**

### **ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЫСШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ, ВЫЧИСЛЕНИЕ НИЗШЕЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ТВЕРДОГО МИНЕРАЛЬНОГО ТОПЛИВА**

*Рассмотрена теплота сгорания твердого минерального топлива как его основной энергетический показатель. Приведены алгоритмы оценки неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на аналитическое, сухое и на рабочее состояние топлива, а также оценивание неопределенности измерений низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива. Приведены схемы выполнения измерения, модель измерения и составлены бюджеты неопределенности.*

**Ключевые слова:** теплота сгорания, неопределенность измерений, коэффициент охвата, бюджет неопределенности, навеска топлива.

**I.P. Zakharov, ScD.,**  
**E. N. Shevchenko, A.V. Kolenko**

### **MEASUREMENTS UNCERTAINTY EVALUATION AT DETERMINATION OF HIGHER COMBUSTION HEAT AND CALCULATION LOWER HEATING VALUE IN SOLID MINERAL FUEL**

*In the article the warmth of combustion of solid mineral fuels as the main energy index are considered. The estimation algorithm measurement uncertainty of higher combustion heat to research the condition of the fuel, in the dry state of the fuel and the operating condition of fuel, as well as the evaluation of measurement uncertainties lowest heat of combustion on a working condition of fuel are given. The scheme of the measurement, the measurement model and budgets of uncertainty are presented.*

**Keywords:** heat of combustion, uncertainty of measurements, factor of scope, uncertainty budget, fuel linkage.

**І. П. Захаров**, д-р техн. наук,  
**О. М. Шевченко, Г.В. Коленко**

### **ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ НАЙВИЩОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ТА ОБЧИСЛЕННЯ НАЙНИЖЧОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ТВЕРДОГО МІНЕРАЛЬНОГО ПАЛИВА**

*Розглянуто теплоту згоряння твердого мінерального палива як його основний енергетичний показник. Наведено алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань найвищої теплоти згоряння на аналітичний стан палива, на сухий стан палива та на робочий стан палива, а також оцінювання невизначеності вимірювань найнижчої теплоти згоряння на робочий стан палива. Приведено схему виконання вимірювання, модель вимірювання та складено бюджети невизначеності.*

**Ключові слова:** теплота згоряння, невизначеність вимірювань, коефіцієнт покриття, бюджет невизначеності, наважка палива.

**Введение.** Теплота сгорания – основной энергетический показатель угля. Значение теплоты сгорания угля (теплотворная способность) угля может изменяться в достаточно широких пределах в зависимости от колебаний содержания влаги и зольности.

По этой причине для характеристики угля теплоту сгорания пересчитывают на горючую массу.

Количество тепла, выделяемое при

полном сгорании единицы массы данного топлива, зависит от состояния влаги (жидкость, пар) в продуктах сгорания. Если водяной пар сконденсируется и вода в продуктах сгорания будет находиться в жидком состоянии, то тепло–парообразование освободится и тогда количество тепла, выделяемого при сгорании единицы массы топлива, получается больше.

Определение происходит путем полного сжигания навески топлива в атмосфере кислорода в бомбе, находящейся в калориметре. При повышении температуры воды, окружающей бомбу, зная водное число кало-

© Захаров И.П., Шевченко Е.Н.,  
Коленко А.В.,2012

риметра, вычисляют теплоту сгорания угля, отнесенную к взятой навеске. Найденная таким образом величина, несколько превышает максимально возможную тепло-производительность топлива в условиях сгорания на воздухе. Это явление объясняется тем, что при горании в бомбе сера окисляется в серную кислоту, а азот — частично в азотную, а при горении на воздухе азот удаляется вместе с продуктами горения, не вступая в реакцию. Сера же окисляется в сернистый газ.

Различают истинную теплоту сгорания и теплоту сгорания по бомбе. Первая характеристика принята как стандартная при теплотехнической оценке топлива, вторая, как элементарный состав, что позволяет судить о составе и степени углеродизации органической массы угля. Действительно, по мере обогащения органической массы углеродом, ее теплота сгорания возрастает до определенного предела. Дальнейшие изменения состава органической массы сопровождаются небольшим снижением теплоты сгорания вследствие снижения содержания в ней кислорода.

Влага, содержащаяся в угле, образуется в процессе его сгорания из водорода, выделяется в виде пара, выделяя при этом тепло. Поэтому различают высшую  $Q_v$  и  $Q_n$  низшую теплоту сгорания

$$Q_n = Q_v - 6(9H + W), \quad (1)$$

где  $W$  – массовая доля влаги в веществе, а  $H$  – массовая доля водорода в веществе.

**Целью статьи** является описание процедуры обработки результатов измерений и оценки неопределенности измерений при определении высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания в соответствии с отечественным нормативным документом ДСТУ ISO1928:2006 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания методом сжигания в калориметрической бомбе и вычисление низшей теплоты сгорания».

**Оценивание неопределенности при определении высшей теплоты сгорания и вычислении низшей теплоты сгорания**

Метод основан на сжигании взвешенной аналитической пробы топлива в атмосфере кислорода под высоким давлением в калориметрической бомбе, с целью определения

высшей теплоты сгорания и вычислении низшей теплоты сгорания топлива. Схема выполнения измерений показана на рис. 1.

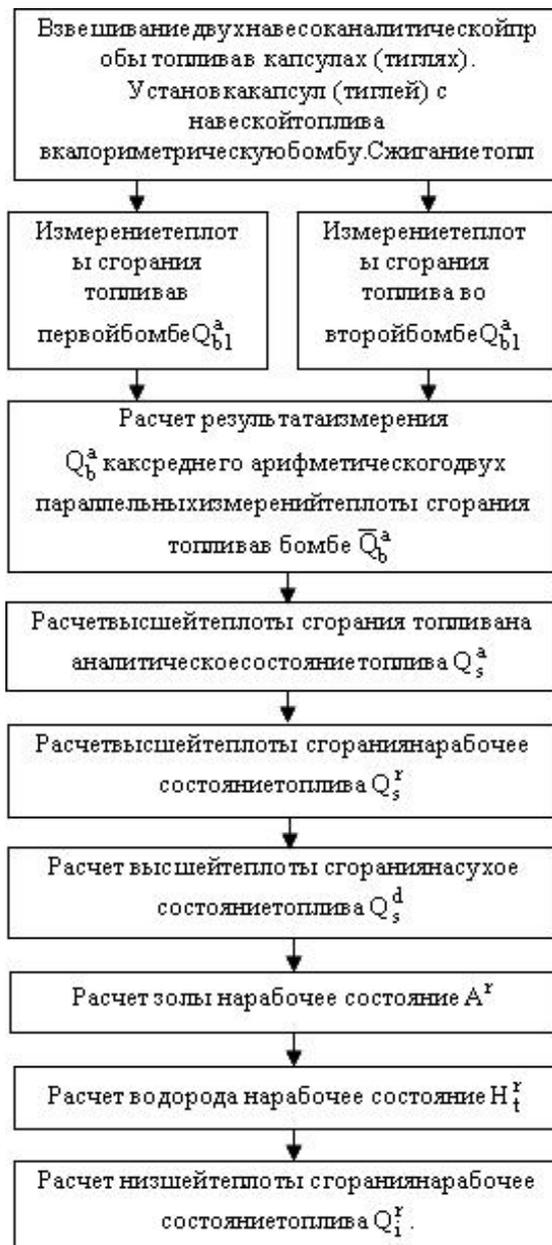


Рис. 1. Схема выполнения измерений

*Модель измерения теплоты сгорания топлива.*

Высшая теплота сгорания  $Q_s^a$  пробы топлива определяется

$$Q_s^a = \bar{Q}_b^a (1 - \alpha) - 94 \cdot S_t^a, \quad \text{кДж/кг} \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_b^a$  – теплота сгорания топлива в бомбе, которая рассчитывается как среднее арифметическое результатов двух параллельных измерений  $Q_{b1}^a$  и  $Q_{b2}^a$ :

$$\bar{Q}_b^a = \frac{Q_{b1}^a + Q_{b2}^a}{2}, \text{ кДж/кг} \quad (3)$$

где  $S_t^a$  – значение массовой доли общей серы на аналитическое состояние топлива [4];  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде азотной кислоты, равной 0,001 – для антрацитов; 0,0015 – для другого угля, горючих сланцев и торфа; 94 – коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты в воде на 1 % серы, которая перешла при сжигании топлива в серную кислоту, Дж /кг.

Высшая теплота сгорания на сухое состояние топлива, согласно ГОСТ27314-91 [3] рассчитывается

$$Q_s^d = Q_s^a \cdot \frac{100}{100 - W^a}, \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

где  $W^a$  – влага аналитической пробы [5].

Высшая теплота сгорания на рабочее состояние топлива согласно ГОСТ27314-91 [3] рассчитывается

$$Q_s^r = Q_s^a \cdot \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}, \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

где  $W_t^r$  – общая влага на рабочее состояние топлива [5].

Низшая теплота сгорания на рабочее состояние топлива рассчитывают

$$Q_t^r = Q_s^r - 24,42 \cdot (8,94 \cdot H_t^r + W_t^r), \text{ кДж/кг} \quad (6)$$

где  $H_t^r$  – водород на рабочее состояние, согласно ГОСТ27314-91 [3] рассчитывается по формуле:

$$H_t^r = H_{\text{табл}}^{\text{daf}} \cdot \frac{100 - W_t^r - A^r}{100}, \% \quad (7)$$

где  $H_{\text{табл}}^{\text{daf}}$  – табличное значение водорода на сухое беззольное состояние топлива;  $A^r$  – зольность на рабочее состояние топлива, которая рассчитывается согласно ГОСТ27314-91 [3] через зольность на аналитическое состояние топлива [6].

### Оценивание неопределенности измерений

*Оценивание неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на аналитическое состояние топлива.*

Модельному уравнению (2) соответствует следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности  $Q_s^a$ , в соот-

ветствии с ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [7]:

$$u_c(Q_s^a) = \sqrt{(1-\alpha)^2 \cdot u_A^2(\bar{Q}_b^a) + \frac{(1-\alpha)^2}{4} \times \times [u_{B1}^2(Q_b^a) + u_{B2}^2(Q_b^a)] + 94^2 \cdot u_c^2(S_t^a)}, \quad (8)$$

где  $u_A(\bar{Q}_b^a) = r/2,77$  (9) – неопределенность результатов двух параллельных измерений теплоты сгорания, вычисленная по пределу сходимости  $r$ ;

$$u_{B1}(Q_b^a) = \delta \cdot Q_{b1}^a / [100 \cdot t_{0,95}], \quad (9)$$

$$u_{B2}(Q_b^a) = \delta \cdot Q_{b2}^a / [100 \cdot t_{0,95}(9)] \quad (10)$$

В двух параллельных измерениях теплоты сгорания топлива в бомбе, рассчитанных через границы относительной погрешности  $\delta$  аттестации кислородного бомбового калориметра, причем  $\delta = 0,15 \%$ ;  $t_{0,95}(9) = 2,26$ , коэффициент Стьюдента для вероятности 0,95 и числа степеней свободы  $\nu = 9$ .

Расширенная неопределенность будет определяться из выражения [7]:

$$U(Q_s^a) = t2 \cdot u_c(Q_s^a). \quad (11)$$

Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на аналитическое состояние пробы топлива приведен табл. 1.

*Оценивание неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на сухое состояние топлива.*

Модельному уравнению (4) соответствует следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности  $Q_s^d$ , в соответствии с ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [7]:

$$u_c(Q_s^d) = \sqrt{c_{Q_s^a}^2(Q_s^d) \cdot u_c^2(Q_s^a) + c_{W^a}^2(Q_s^d) \cdot u_c^2(W^a)}, \quad (12)$$

где  $c_{Q_s^a}(Q_s^d) = \left| \frac{\partial Q_s^d}{\partial Q_s^a} \right| = \frac{100}{100 - W^a}, \quad (13);$

$$c_{W^a}(Q_s^d) = \left| \frac{\partial Q_s^d}{\partial W^a} \right| = Q_s^a \cdot \frac{100}{(100 - W^a)^2}. \quad (14)$$

Расширенная неопределенность определяется [7]

$$U(Q_s^d) = 2 \cdot u_c(Q_s^d). \quad (15)$$

Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на сухое состояние топлива приведено в табл. 2.

Оценивание неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива.

Модельному уравнению (5) соответствует следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности  $Q_s^r$  в соответствии с ДСТУ-Н РМГ 43:2006 [5]:

$$u_c(Q_s^r) = \sqrt{c_{Q_s^a}^2(Q_s^r) \cdot u_c^2(Q_s^a) + c_{W^a}^2(Q_s^r) \cdot u_c^2(W^a) + c_{W_t^r}^2(Q_s^r) \cdot u_c^2(W_t^r)}, \quad (16)$$

где  $c_{Q_s^a}(Q_s^r) = \left| \frac{\partial Q_s^r}{\partial Q_s^a} \right| = \frac{100 - W_t^r}{100 - W^a}, \quad (17)$

$$c_{W^a}(Q_s^r) = \left| \frac{\partial Q_s^r}{\partial W^a} \right| = Q_s^a \cdot \frac{100 - W_t^r}{(100 - W^a)^2}, \quad (18)$$

$$c_{W_t^r}(Q_s^r) = \left| \frac{\partial Q_s^r}{\partial W_t^r} \right| = \frac{Q_s^a}{100 - W^a}. \quad (19)$$

Расширенная неопределенность определяется [5]:

$$U(Q_s^r) = 2u_c(Q_s^r). \quad (20)$$

Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива приведено в табл. 3.

1. Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания аналитической пробы топлива

<b>Входная величина</b>	<b>Оценки входных величин</b>	<b>Стандартные неопределенности входных величин</b>	<b>Коэффициент чувствительности</b>	<b>Вклады неопределенности, кДж/кг</b>
$Q_{b1}^a$	$\hat{Q}_{b1}^a$ , кДж/кг	(10), кДж/кг	$(1 - \alpha)/2$	$\frac{(1 - \alpha)}{2} \cdot u_{B1}(Q_b^a)$
$Q_{b2}^a$	$\hat{Q}_{b2}^a$ , кДж/кг	(10), кДж/кг	$(1 - \alpha)/2$	$\frac{(1 - \alpha)}{2} \cdot u_{B2}(Q_b^a)$
$\bar{Q}_b^a$	(3), кДж/кг	(9), кДж/кг	$1 - \alpha$	$(1 - \alpha) \cdot u_A(Q_b^a)$
$S_t^a$	$\hat{S}_t^a$ , %	$u_c(S_t^a)$ , %	94 кДж/кг %	$94 \cdot u_c(S_t^a)$
<b>Выходная величина</b>	<b>Оценка выходной величины</b>	<b>Суммарная стандартная неопределенность</b>	<b>Коэффициент охвата</b>	<b>Расширенная неопределенность</b>
$Q_s^a$	(2), кДж/кг	(8), кДж/кг	2	(11), кДж/кг

2. Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на сухое состояние топлива

<b>Входная величина</b>	<b>Оценки входных величин</b>	<b>Стандартные неопределенности входных величин</b>	<b>Коэффициент чувствительности</b>	<b>Вклады неопределенности, кДж/кг</b>
$Q_s^a$	(2), кДж/кг	(8), кДж/кг	(13)	$c_{Q_s^a}(Q_s^d) \cdot u_c(Q_s^a)$
$W^a$	$\hat{W}^a$ %, %	$u_c(W^a)$ , %	(14), кДж/кг%	$c_{W^a}(Q_s^d) \cdot u_c(W^a)$
<b>Выходная величина</b>	<b>Оценка выходной величины</b>	<b>Суммарная стандартная неопределенность</b>	<b>Коэффициент охвата</b>	<b>Расширенная неопределенность, кДж/кг</b>
$Q_s^d$	(4), кДж/кг	(12), кДж/кг	2	(15), кДж/кг

3. Бюджет неопределенности измерений высшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива

<i>Входная величина</i>	<i>Оценки входных величин</i>	<i>Стандартные неопределенности входных величин</i>	<i>Коэффициент чувствительности</i>	<i>Вклады неопределенности, кДж/кг</i>
$Q_s^a$	(2), кДж/кг	(8), кДж/кг	(17)	$c_{Q_s^a}(Q_s^r) \cdot u_c(Q_s^a)$
$W^a$	$\hat{W}^a$ , %	$u_c(W^a)$ , %	(18)	$c_{W^a}(Q_s^r) \cdot u_c(W^a)$
$W_t^r$	$\hat{W}_t^r$ , %	$u_c(W_t^r)$ , %	(19)	$c_{W_t^r}(Q_s^r) \cdot u_c(W_t^r)$
<i>Выходная величина</i>	<i>Оценка выходной величины</i>	<i>Суммарная стандартная неопределенность</i>	<i>Коэффициент охвата</i>	<i>Расширенная неопределенность, кДж/кг</i>
$Q_s^r$	(5), кДж/кг	(16), кДж/кг	2	(20)

Оценка неопределенности измерений низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива.

Модельному уравнению (5, 6) соответствует следующее выражение для суммарной стандартной неопределенности  $Q_i^r$  [5]:

$$u_c(Q_i^r) = \sqrt{u_c^2(Q_s^r) + c_{W_t^r}^2(Q_i^r) \times \times u_c^2(W_t^r) + c_{A^r}^2(Q_i^r) \cdot u_c^2(A^r)}, \quad (21)$$

где  $c_{W_t^r}(Q_i^r) = \left| \frac{\partial Q_i^r}{\partial W_t^r} \right| = 24,42 \cdot \left| 0,0894 \cdot H_{\text{табл}}^{\text{daf}} - 1 \right|$ ; (22)

$$c_{A^r}(Q_i^r) = \left| \frac{\partial Q_i^r}{\partial A^r} \right| = 2,183148 \cdot H_{\text{табл}}^{\text{daf}}. \quad (23)$$

Расширенная неопределенность определяется

$$U(Q_i^r) = 2 \cdot u_c(Q_i^r). \quad (24)$$

Бюджет неопределенности измерений низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива приведен в табл.4.

4. Бюджет неопределенности измерений низшей теплоты сгорания на рабочее состояние топлива

<i>Входная величина</i>	<i>Оценки входных величин</i>	<i>Стандартные неопределенности входных величин</i>	<i>Коэффициент чувствительности</i>	<i>Вклады неопределенности, кДж/кг</i>
$Q_s^r$	(4), кДж/кг	(16), кДж/кг	1	$u_c(Q_s^r)$
$W_t^r$	$\hat{W}_t^r$ , %	$u_c(W_t^r)$ , %	(22)	$c_{W_t^r}(Q_i^r) \cdot u_c(W_t^r)$
$A^r$	$\hat{A}^r$ , %	$u_c(A^r)$ , %	(23)	$c_{A^r}(Q_i^r) \cdot u_c(A^r)$
<i>Выходная величина</i>	<i>Оценка выходной величины</i>	<i>Суммарная стандартная неопределенность</i>	<i>Коэффициент охвата</i>	<i>Расширенная неопределенность, кДж/кг</i>
$Q_i^r$	(5,6), кДж/кг	(26), кДж/кг	2	(24)

## Выводы

1. Рассмотрены методы определения высшей и низшей теплоты сгорания твердого минерального топлива, составлены модельные уравнения, бюджеты неопределенности для аналитического, сухого и рабочего состояния пробы угля.

2. Разработана процедура обработки результатов измерений и оценки их неопределенности согласно ДСТУ ISO1928:2006 «Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания методом сжигания в калориметрической бомбе и вычисление низшей теплоты сгорания» (ISO1928:2006, IDT).

## Список использованной литературы

1. Агроскін А. А. Хімія та технологія вугілля [Текст] / А. А. Агроскін . – М.: Недра, 1969. – 240 с.

2. ДСТУ ISO 1928:2006 «Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчисленні найнижчої теплоти згорання» (ISO 1928:2006, IDT).

3. ГОСТ 27314-91(ИСО 1170-77) «Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива».

4. ДСТУ 3528-97 (ГОСТ 8606-93) (ISO 334-92) «Паливо тверде мінеральне. Визначення загальної сірки. Метод Ешка».

5. ГОСТ 11014-81 «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренный метод определения влаги».

6. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) «Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности».

7. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений».

Получено 28.05.2012

## References

1. Agroskin A. A. Himiya that tehnologiya vugillya [Text] / A. A. Agroskin. – Moscow: – Nedra, 1969. – 240 p. [in Russian].

2. EN ISO 1928:2006 «Fuel solid mineral. Determination of high calorific value by combustion in calorimetric bomb and calculating the lowest heat of combustion»(ISO 1928:2006, IDT) [in Ukrainian].

3. GOST 27314-91 (ISO 1170-77) "Solid mineral fuels. The designation of quality indicators and formulas restated, that the analysis results for various fuels of states" [in Russian].

4. ISO 3528-97 (GOST 8606-93) (ISO 334-92) «solid mineral fuel. Determination of total sulfur. Method Eshka"[in Ukrainian].

5. GOST 11014-81, "Coal and peat, coal and oil shale. Accelerated method for determining the moisture " [in Russian].

6. GOST 11022-95 (ISO 1171-97), "The Pliva-solid mineral. Methods for the determination of the ash." [in Russian].

7. LST-N RMG 43:2006 Metrology. The application of "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"[in Ukrainian].



Захаров Игорь Петрович,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
метрологии и измерительной  
техники Харьковского нац.  
ун-та радиоэлектроники,  
E-mail: [newzip@ukr.net](mailto:newzip@ukr.net)



Шевченко Е. Н.,  
аспирантка каф. метрологии  
и измерительной техники  
Харьковского нац. ун-та  
радиоэлектроники,  
E-mail:  
[lena-sacheva@yandex.ru](mailto:lena-sacheva@yandex.ru)



Коленко А. В.,  
студентка каф. метрологии и  
измерительной техники  
Харьковского нац. ун-та ра-  
диоэлектроники,  
E-mail:  
[kolenko-anna@yandex.ua](mailto:kolenko-anna@yandex.ua)