

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВ И СПОСОБЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В.С. СТЕПАНОВ, Т.Б. СТЕПАНОВА, Н.В. СТАРИКОВА

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Значения химической энергии и эксергии позволяют более правильно определять энергетический потенциал топлив по сравнению с теплотой сгорания, которая обычно используется в практических расчетах. Выполнен анализ существующих методик определения химической энергии и эксергии технических топлив, выбрана наиболее пригодная, рекомендуемая, после некоторого усовершенствования, для практического использования. Приведены результаты расчетов этих характеристик для углей месторождений Восточной Сибири.*

*Ключевые слова: топливо, энергетические характеристики, теплота сгорания, химическая энергия, химическая эксергия, методы определения.*

### Введение

Правильное определение количества энергии, вносимого в процесс топливом, чрезвычайно важно, поскольку ее доля в приходной части энергобаланса большинства производственных процессов велика. Это относится не только к энергетическим установкам, но и ко многим энергопотребляющим процессам.

Калориметрические (энергетические) характеристики топлив, закладываемые в теплотехнические расчеты, существенно сказываются на оценке энергетической эффективности теплотехнического оборудования при выборе оптимальных его параметров. Отсюда понятно, насколько важно правильно выбрать исходную (базовую) энергетическую характеристику топлив, используемую в нормативных методах всех теплотехнических расчетов.

Исторически сложилось так, что во многих странах, в том числе и в нашей стране, в качестве такой характеристики топлив выбрана низшая теплота сгорания –  $Q_H^P$ . Расчет по этой величине означает, что мы искусственно снижаем затраты энергии на осуществление производственных процессов, тем самым завышая их КПД.

В настоящее время появились более универсальные характеристики топлив, которые позволяют оценивать не только их энергию, но и ее работоспособность. Они получили названия – химическая энергия и эксергия. Таким образом, на данный момент времени существует четыре показателя, характеризующих энергетический потенциал топлив: теплота сгорания 1 кг ( $1 \text{ м}^3$ ) топлива (высшая  $Q_B$ , низшая  $Q_H$ ), а также его удельная химическая энергия  $i_x$  и удельная химическая эксергия  $e_x$ . Рассмотрим кратко последовательность их расчета.

### Методы расчёта энергетических характеристик топлив

#### *Топлива с известной структурой*

В зависимости от сложности состава рассматриваемого топлива указанные характеристики устанавливаются разными способами. Например, для топлив с известной структурой (химическая формула, компонентный состав газообразных видов топлива) могут быть определены все вышеназванные термодинамические характеристики.

Рассмотрим процедуру нахождения теплоты сгорания на примере метана, реакция горения которого имеет вид



Изменение энтальпии  $\Delta H_r$  в реакции находится по выражению

$$\Delta H_r = \sum_k \Delta H_k^0 - \sum_n \Delta H_n^0, \quad (2)$$

где  $\Delta H_n^0, \Delta H_k^0$  – стандартные теплоты образования, соответственно, исходных и результирующих веществ реакции.

Для реакции (1) можно найти два значения  $\Delta H_r$ . Большую величину, определяемую по выражению (2), при условии, что продукт ( $\text{H}_2\text{O}$ ) жидкость, в термодинамике называют высшей  $\Delta H_r^B$ . Меньшую величину, определяемую при условии, что ( $\text{H}_2\text{O}$ ) – газ, называют низшей энтальпией реакции сгорания вещества  $\Delta H_r^H$ . Используя значения теплот образования веществ [1–3], участвующих в рассматриваемой реакции, нетрудно определить величин  $\Delta H_r^B$  и  $\Delta H_r^H$ .

Для реакции (1) имеем:

$$\begin{aligned} \Delta H_r^B &= (\Delta H_{\text{CO}_2}^0 + 2\Delta H_{(\text{H}_2\text{O})_{\text{ж}}}^0) - (\Delta H_{\text{CH}_4}^0 + 2\Delta H_{\text{O}_2}^0) = \\ &= [(-393,51) + 2(-285,83)] - [(-74,65) + 0,0] = -890,32 \text{ кДж/моль}; \\ \Delta H_r^H &= (\Delta H_{\text{CO}_2}^0 + 2\Delta H_{(\text{H}_2\text{O})_{\text{г}}}^0) - (\Delta H_{\text{CH}_4}^0 + 2\Delta H_{\text{O}_2}^0) = \\ &= [(-393,51) + 2(-241,81)] - [(-74,65) + 0,0] = -802,28 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

В теплотехнике величину  $Q_B = -\Delta H_r^B$ , найденную по выражению (2) при условии, что продуктом окисления водорода топлива является  $(\text{H}_2\text{O})_{\text{ж}}$ , принято называть высшей теплотой сгорания, в величину  $Q_H = -\Delta H_r^H$ , полученную с использованием стандартной теплоты образования продукта реакции  $(\text{H}_2\text{O})_{\text{г}}$ , называют низшей теплотой сгорания.

Из приведенного выше расчёта этих показателей для метана видно, что величина  $Q_H$  примерно на 10% меньше величины  $Q_B$ . Это соотношение для различных топлив составляет обычно 7–10 %. Таким образом, для одного и того же топлива имеется два значения его энергетической характеристики, и каким из них необходимо пользоваться при решении различных прикладных задач, неясно.

В нашей стране при оценке энергетического потенциала топлив законодательно предписано использовать значение низшей теплоты их сгорания. Условное топливо, которое используется для определения суммарных затрат энергии в регионе, стране, определяется также по этой характеристике.<sup>1</sup> Это приводит к существенным ошибкам при оценке КПД как отдельных топливосжигающих установок, так и эффективности

<sup>1</sup> Условное топливо – это топливо, низшая теплота сгорания которого  $Q_H = 7000$  ккал/кг (29,31 МДж/кг).

использования энергоресурсов в регионах и стране в целом. Уже в течение 50 лет в публикациях, решениях многочисленных научных конференций отмечалось, что необходимо изменить наше законодательство и перейти на новые характеристики топлив при определении их энергетического потенциала. Однако до сих пор это не сделано, поэтому все наши статистические данные по эффективности использования энергоресурсов отдельными потребителями, системами, регионами являются недостоверными, завышенными, поскольку потенциал используемых топлив принят искусственно заниженным относительно его реальных значений.

Кроме того, использование предписанных характеристик не позволяет учитывать работоспособность выделяемой в реакциях горения топлива теплоты, что и не делается на практике при выполнении всего многообразия теплотехнических расчётов.

За указанный период времени учёными были предложены новые более совершенные характеристики для оценки энергетического потенциала топлив – химическая энергия и эксергия топлив и разработаны методы их определения [4–7].

Новые характеристики позволяют при решении различных практических задач учитывать 2-ой закон термодинамики, который гласит: разные формы энергии неодинаковы по способности преобразования их в работу. Согласно этому закону, вся совокупность видов энергии может быть разделена на три класса. Первый включает неограниченно превратимые в работу формы энергии (механическую и электрическую); 2-ой объединяет формы энергии, преобразуемые в другие формы, включая работу, в ограниченной мере (теплота, энергия химических реакций); 3-ий состоит из форм энергии, преобразование которых в работу согласно второму закону термодинамики невозможно. Сюда можно отнести теплоту с температурой, равной температуре окружающей среды  $T_0$ , механическую энергию машины, давление рабочего тела которой равно давлению окружающей среды  $p_0$ .

В то же время в термодинамике широко используется такая характеристика реакции, которая показывает изменение в ней свободной энтальпии (потенциала Гиббса). Она определяется по выражению

$$\Delta G_r = \sum_k \Delta G_k^0 - \sum_n \Delta G_n^0, \quad (3)$$

где  $\Delta G_n^0$  и  $\Delta G_k^0$  – свободная энтальпия (потенциал Гиббса) образования исходных и конечных компонентов реакции при стандартных условиях.

Используя табличные значения потенциала Гиббса образования веществ [1–3], можно определить величины  $\Delta G_r^B$  и  $\Delta G_r^H$  реакции (1):

$$\begin{aligned} \Delta G_r^B &= (\Delta G_{CO_2}^0 + 2\Delta G_{(H_2O)_ж}^0) - (\Delta G_{CH_4}^0 + 2\Delta G_{O_2}^0) = [(-394,37) + 2(-237,29)] - \\ &\quad - [(-50,85) + 0,0] = -817,98 \text{ кДж/моль}; \\ \Delta G_r^H &= (\Delta G_{CO_2}^0 + 2\Delta G_{(H_2O)_г}^0) - (\Delta G_{CH_4}^0 + 2\Delta G_{O_2}^0) = [(-394,37) + 2(-228,61)] - \\ &\quad - [(-50,85) + 0,0] = -800,74 \text{ кДж/моль}. \end{aligned}$$

Изменение потенциала Гиббса в реакции может быть найдено и по выражению

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T_0 \cdot \Delta S_r. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta S_r$  – изменение энтропии в реакции;  $T_0$  – стандартная температура, как правило, равна  $T_0 = 298,15^\circ\text{C}$ .

Соотношение (4) позволяет определить изменение потенциала Гиббса в реакции горения таких топлив, для которых неизвестна величина свободной энтальпии их образования.

Для рассматриваемого примера имеем:

Изменение энтропии в реакции горения метана (1)

$$\Delta S_r^0 = (S_{\text{CO}_2}^0 + 2S_{\text{H}_2\text{O}}^0) - (S_{\text{CH}_4}^0 + 2S_{\text{O}_2}^0) = (213,66 + 2 \cdot 69,95) - (186,27 + 2 \cdot 205,04) = -242,79 \text{ Дж/моль метана,}$$

тогда изменение потенциала Гиббса в этой реакции

$$\Delta G_r^B = \Delta H_r - T_0 \cdot \Delta S_r^0 = -890,32 - (-242,79 \cdot 298,15 \cdot 10^{-3}) = -817,53 \text{ кДж/моль.}$$

Изменение потенциала Гиббса в реакции характеризует работоспособную часть теплоты, выделяемой в ней. Отношение этих величин  $\omega_e = \frac{\Delta G_r}{\Delta H_r}$  называют

коэффициентом работоспособности соответствующей теплоты реакции. Для реакции (1) значения этого коэффициента равны

$$\omega_e^B = \frac{\Delta G_r^B}{\Delta H_r^B} = -\frac{-817,98}{-890,32} = 0,919;$$

$$\omega_e^H = \frac{\Delta G_r^H}{\Delta H_r^H} = -\frac{-800,74}{-802,28} = 0,998.$$

В соответствии с определением понятий химической энергии и эксергии веществ при расчёте этих характеристик для топлив можно сделать следующий вывод. Если рассматриваемое топливо является чистым углеводородом, то продуктами его сгорания являются только полностью обесцененные вещества –  $\text{CO}_2$  и  $(\text{H}_2\text{O})_{\text{ж}}$ . В этом случае его химическая энергия принимается равной

$$i_{x_T} = Q_B = -\Delta H_r^B.$$

Если же топливо содержит кроме С и Н другие элементы, в частности серу, в продуктах его сгорания будет  $\text{SO}_2$ , и тогда химическая энергия топлива должна находиться с учётом энергии, которой этот газ обладает, т. е.

$$i_{x_T} = Q_B + m_{\text{SO}_2} \cdot i_{x_{\text{SO}_2}}, \quad (5)$$

где  $m_{\text{SO}_2}$  – масса продукта окисления серы топлива;  $i_{x_{\text{SO}_2}}$  – удельная химическая энергия этого продукта [7].

Соответственно для химической эксергии топлив имеем:

$$- \text{ для чистых углеводородов } e_{x_T} = -\Delta G_r^B;$$

– в других более общих случаях, когда в продуктах сгорания топлив оказываются вещества  $z$ , обладающие эксергией,

$$e_{x_T} = -\Delta G_r^B + m_z \cdot e_{x_z}, \quad (6)$$

где  $m_z$  – масса вещества  $z$ ;  $e_{x_z}$  – его удельная химическая эксергия [7].

По описанному алгоритму были выполнены расчёты значений теплоты сгорания, химической энергии и эксергии некоторых горючих веществ, химическая формула и необходимые термодинамические характеристики которых известны и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Термодинамические характеристики веществ [1–3] и удельные значения их химической энергии и эксергии [7]

№ п/п	Вещества	$\Delta H_{298}^0$ , кДж/моль	$S_{298}^0$ , Дж/моль·К	$\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль	$i_x$ , МДж/кг	$e_x$ , МДж/кг
1.	CO <sub>2</sub> (г)	-393,15	213,66	-394,37	0,0	0,0
2.	(H <sub>2</sub> O) <sub>ж</sub>	-285,83	69,95	-237,23	0,0	0,0
3.	H <sub>2</sub> (г)	0,0	130,52	0,0	143,00	118,50
4.	H <sub>2</sub> S (г)	-20,6	205,7	-33,50	26,126	21,344
5.	SO <sub>2</sub> (г)	-296,9	248,07	-300,21	5,104	3,475
6.	S (ромб.)	0,0	31,92	0,0	19,464	16,313
7.	FeS <sub>2</sub> (кр.)	-171,40	52,93	-166,05	12,899	10,540
8.	N <sub>2</sub> (г)	0,0	191,5	0,0	0,0	0,0
9.	O <sub>2</sub> (г)	0,0	285,04	0,0	0,0	0,0

В табл. 2 приведены результаты расчёта этих характеристик для некоторых горючих веществ с известной структурой. Величины, приведенные в таблице, убедительно показывают, что оценивать энергетический потенциал топлив на основе низшей теплоты сгорания недопустимо, поскольку такая оценка приводит к существенному его занижению. В частности, по сравнению с его оценкой по величине высшей теплоты сгорания потенциал занижается на 7–10 %. Если же энергетический потенциал топлив оценивать по величине химической энергии, то его занижение может достигать свыше 35 %.

Например, низшая теплота сгорания метантиола  $Q_H^P = 23,58$  МДж/кг, а химическая эксергия

$$i_{x_T} = Q_H^P + m_{SO_2} \cdot i_{x_{SO_2}} = 23,58 + \frac{64}{48} \cdot 5,104 = 32,62 \text{ МДж/кг.}$$

Отсюда следует, что энергетический потенциал метантиола, оцениваемый по низшей теплоте сгорания, в 1,36 раза меньше его величины, определяемой по значению удельной химической энергии этого вещества.

#### *Топлива с неизвестной структурой*

Для большого числа материалов, используемых в качестве топлив (бурый и каменные угли, торф, сланцы, нефть и продукты её переработки, древесина и различные древесные отходы) химическая структура неизвестна. Поэтому отсутствуют справочные данные, которые позволили бы рассчитать для них значения химической энергии и эксергии, используя формулы, аналогичные (2) – (6).

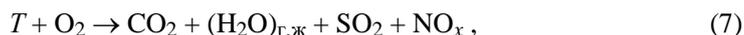
В этом случае алгоритм определения указанных выше характеристик может строиться с разной степенью приближения к алгоритму, показанному выше на примере метана.

Полагая, что топливо  $T$ , которое содержит углерод, водород, кислород, азот и серу, подвергается полному сгоранию по реакции

Таблица 2

Энергетические характеристики горючих веществ известной структуры и их соотношения

№	Вещество, его химическая формула	Энтальпия реакции горения, $\Delta H_r$		Потенциал Гиббса реакции горения $\Delta G_r$		Коэффициент работоспособности теплоты реакции		Теплота сгорания		$Q_H/Q_B$	$i_x$	$e_x$	$\omega_e = e_x/i_x$
		высшая	низшая	высшая	низшая	высшая	низшая	высшая	низшая				
1.	Метан, $CH_4$ (г)	-55,704	-50,199	-51,124	-50,046	0,918	0,997	55,704	50,199	0,901	55,704	51,124	0,918
2.	Этан, $C_2H_6$ (г)	-52,032	-47,633	-48,917	-48,055	0,94	1,009	52,032	47,633	0,915	52,032	48,917	0,94
3.	Пропан, $C_3H_8$ (г)	-50,49	-46,487	-48,328	-47,136	0,957	1,014	50,49	46,487	0,921	50,49	48,328	0,957
4.	Бутан, $C_4H_{10}$ (г)	-49,638	-45,843	-47,578	-46,835	0,958	1,022	49,638	45,843	0,923	49,638	47,578	0,958
5.	Пентан, $C_5H_{12}$ (г)	-49,147	-45,477	-47,04	-46,321	0,957	1,018	49,147	45,477	0,925	49,147	47,04	0,957
6.	Гексан, $C_6H_{14}$ (г)	-48,811	-45,227	-46,82	-46,118	0,959	1,02	48,811	45,227	0,927	48,811	46,82	0,959
7.	Гептан, $C_7H_{16}$ (г)	-48,57	-45,047	-46,505	-45,815	0,957	1,017	48,57	45,047	0,927	48,57	46,505	0,957
8.	Сероводород, $H_2S$ (г)	-16,533	-15,104	-14,822	-14,568	0,897	0,965	16,533	15,104	0,914	26,139	21,362	0,817
9.	Метантиол, $CH_4S$ (г)	-25,815	-23,98	-24,148	-23,809	0,935	0,993	25,815	23,98	0,929	32,62	28,78	0,882
10.	Этантиол, $C_2H_6S$ (г)	-30,569	-28,439	-28,967	-28,549	0,948	1,004	30,569	28,439	0,93	35,838	32,553	0,908

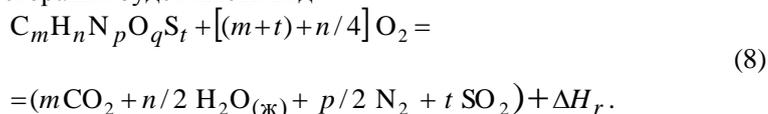


можно принять допущение, что органическая (горючая) масса топлива может быть представлена в виде



где индексы  $m, n, p, q$  и  $t$  – число атомов элементов С, Н, N, О и S соответственно в одном моле горючей массы топлива.

Тогда реакция его сгорания будет иметь вид



Для этой реакции по выражению (2) можно определить  $\Delta H_r$  лишь в том случае, когда известна величина стандартной теплоты образования рассматриваемого топлива  $\Delta H_T^0$ . В этом случае

$$\Delta H_r = (m \Delta H_{CO_2}^0 + n/2 \Delta H_{H_2O}^0 + p/2 \Delta H_{N_2}^0 + t \Delta H_{SO_2}^0) - \\ - \{ \Delta H_T^0 - [(m+t)+n/4] \Delta H_{O_2}^0 \}. \quad (9)$$

Если  $\Delta H_T^0$  топлива неизвестна, её значение может быть установлено на основе величин его теплоты сгорания  $Q_B$ ,  $Q_H$ , которые могут быть определены экспериментально путём сжигания в калориметрической бомбе. Значения  $Q_B$  и  $Q_H$  топлив с неизвестной структурой могут быть также рассчитаны по эмпирическим формулам, предложенным авторами П. Дюлонгом, Ф. Шустером, Д.И. Менделеевым [8, 9]. Тогда, в соответствии с выражениями (5) и (9), можно найти значение их химической энергии.

Сложнее обстоит дело с определением величины эксергии таких топлив, поскольку в справочной литературе отсутствуют значения стандартной энергии Гиббса их образования  $\Delta G_T^0$ . Помимо этого величину изменения энергии Гиббса в реакции их сгорания установить экспериментально не представляется возможным. Следовательно, нельзя рассчитать значение  $\Delta G_r$  реакции (8) по выражению

$$\Delta G_r = (m \Delta G_{CO_2}^0 + n/2 \Delta G_{H_2O}^0 + p/2 \Delta G_{N_2}^0 + t \Delta G_{SO_2}^0) - \\ - [\Delta G_T^0 - (m+n/4+t) \Delta G_{O_2}^0]. \quad (10)$$

Поиску путей решения задачи по определению эксергии топлив неизвестной структуры были посвящены работы отечественных и зарубежных авторов [10–13]. На основе анализа методов расчёта эксергии таких топлив нами разработан комбинированный метод, который в значительной мере строится на подходах авторов [13] в сочетании с методом определения энтропии топлив неизвестной структуры, предложенным в работе [14]. Суть этого комбинированного метода состоит в следующем.

Как было сказано выше, если величина изменения энтальпии в реакции горения таких топлив может быть рассчитана или установлена экспериментально, то в таком

случае величина изменения энергии Гиббса в реакции (8) можно рассчитать по выражению

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T_0 \cdot \Delta S_r = \Delta H_r - T_0 [\sum S_{\text{прод}}^0 - (S_r^0 + S_{\text{O}_2}^0)]. \quad (11)$$

Здесь  $\sum S_{\text{прод}}^0$  – сумма энтропий продуктов реакции горения топлива;  $S_r^0$  – энтропия топлива, представленного в виде смеси органической массы, золы и влаги –

$$C_m H_n N_p O_q S_t \cdot x A^P \cdot y W^P,$$

где  $A^P, W^P$  – содержание золы и влаги в рабочей массе;  $x, y$  – массовые коэффициенты типов компонентов в молекуле топлива.

Величину энтропии топлива предлагается определять как сумму энтропий органической массы, золы и влаги, а также энтропии смешения этих компонентов, т. е.

$$S_r^0 = S_{\text{орг}}^0 + S_{\text{зол}}^0 + S_{\text{вл}}^0 + \Delta S_{\text{см}}.$$

Для определения величины энтропии органической массы твёрдых топлив авторы [14] предложили следующую формулу:

$$S_{\text{орг}}^0 = 5,69 + 13,12(H_n/C_n) + 14,19(O_n/C_n) + 8,79(N_n/C_n), \text{ Дж/моль С К},$$

где  $(H_n/C_n), (O_n/C_n), (N_n/C_n)$  – отношения содержания водорода, кислорода, азота, соответственно, к числу атомов углерода в этой массе топлива.

Энтропия смешения рассчитывается следующим образом:

$$\Delta S_{\text{см}} = -R \sum_i \mu_i \ln z_i,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/моль К;  $\mu_i$  – массовый коэффициент групп (типов);  $z_i$  – мольная доля компонентов топлива.

Тогда можно определить изменение энтропии в реакции его горения (8):

$$\begin{aligned} \Delta S_r = & (m S_{\text{CO}_2}^0 + n/2 S_{\text{H}_2\text{O}}^0 + p/2 S_{\text{N}_2}^0 + t S_{\text{SO}_2}^0) - \\ & - [S_r^0 + (m + n/4 + t) S_{\text{O}_2}^0], \end{aligned}$$

а также изменение энергии Гиббса в ней по формуле (11).

Используя формулу (6), нетрудно найти величину химической эксергии рассматриваемого топлива.

Для проведения расчётов по определению значений энтропии, химической энергии и эксергии топлив с неизвестной структурой был разработан комплекс вычислительных программ, с помощью которых были установлены эти характеристики для углей Восточной Сибири. Некоторые результаты этой работы представлены в табл. 3. Они показывают, что энергетические характеристики, рассчитанные по предложенной методике, и их соотношения не противоречат соотношениям, полученным для горючих веществ известной структуры (табл. 2).

Энергетические характеристики углей Восточной Сибири

Бассейн, месторождение, шахта, разрез	Марка топлива	Состав на сухое беззольное состояние, %					W <sup>P</sup> , %	A <sup>c</sup> , %	Теплота сгорания, МДж/кг		S <sub>T</sub> , кДж/(кг·К)	Химическая энергия и эксергия, МДж/кг	
		C	H	O	N	S			Q <sup>P</sup> <sub>H</sub>	Q <sup>P</sup> <sub>B</sub>		i <sub>x</sub>	e <sub>x</sub>
<i>Иркутский бассейн</i>													
Месторождения:													
Черемховское	ДР, ДСШ	77	5,6	14,2	1,6	1,6	15	34	16,410	17,462	1,575	17,626	17,309
Забитуйское	ДР	76	5,7	10,2	1,7	6,4	8	25	20,850	21,904	1,438	22,558	22,063
Ишлейское	ДР	75,3	5,2	15,9	1,4	2,2	15	15	20,970	22,157	1,610	22,381	22,081
<i>Минусинский бассейн</i>													
Месторождения:													
Черногорское:													
- Разрез Черногорский	ДР	75,5	5,1	16,6	2	0,8	14	20	19,760	20,8682	1,556	20,950	20,736
- Шахта Енисейская	ДСШ	81	4,9	11,4	2	0,7	13	19	21,390	22,461	1,496	22,533	22,262
Бейское	ДР	79,5	5,5	12,3	2,1	0,6	14	15	22,400	23,620	1,593	23,681	23,371
Жеронское	Д – Г	80,3	4,7	12,9	1,6	0,5	18	24	18,550	19,629	1,613	19,680	19,409
Азейское:													
- Разрез Азейский	БЗР	73	5,3	19,4	1,5	0,8	25	22	15,990	17,277	1,880	17,359	17,078
Мугунское	БЗР	73,7	5,8	17,5	1,5	1,5	22	20	17,290	18,617	1,842	18,771	18,422
<i>Бурятия</i>													
Месторождения:													
Никольское	Д–ДГ	78,5	5,5	14,1	1,4	0,5	6	21	22,440	23,478	1,340	23,529	23,316
Гусинозерская													
- Разрез Холбольджинский	БЗР	71	5	22,2	1,1	0,7	26	25			1,882	15,632	15,408
- Шахта Гусинозерская	БЗР	75,5	5,3	16,8	1,4	1	22	27	15,990	17,277	1,778	17,128	16,825
Баянголское	БЗР	77	5,5	15,1	1,5	0,9	23	20	17,290	18,617	1,835	19,433	19,079

## Выводы

Исследования, проведенные с использованием разработанной комбинированной методики расчета значений энтропии, химической энергии и эксергии топлив с неизвестной структурой, показали возможность определения этих характеристик при наличии значений низшей или высшей теплоты их сгорания. Это позволяет широко применять их для более правильной оценки энергетического потенциала таких топлив, а также эффективности их сжигания в установках различного рода и назначения.

При этом важно отметить, что появление этих новых характеристик дает возможность определить два показателя термодинамической эффективности топлива сжигающих установок – энергетический и эксергетический КПД. Авторы полагают, что ставить вопрос о том, какому из них следует отдавать предпочтение, нецелесообразно, поскольку только совокупность этих показателей для большинства энергоустановок позволяет объективно оценивать эффективность использования энергии в них с учетом законов термодинамики.

## Summary

*Chemical energies and exergies reflect more correctly and completely the energy potentials of fuels than the calorimetric values that generally used in practical calculations. Using chemical energies and exergies for analysis of energy efficiencies in energetic and technological processes may greatly change the estimated levels of efficiencies for different technical systems.*

*Available methods for estimating chemical energies and exergies are described and the results compared. One of the procedures is recommended for practical application in improved form. The results of calculations for coals of Eastern Siberia give as an example.*

*Key words: fuels, energy characteristics, calorimetric values, chemical energy, chemical exergy, methods of calculation.*

## Литература

1. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. Л.: Химия, 1972. 200 с.
2. Карапетьянц М.Х. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ / М.Х. Карапетьянц, М.Л. Карапетьянц. М.: Химия, 1968. 470 с.
3. Стал Д. Химическая термодинамика органических соединений / Д. Стал, Э. Вестрем, Г. Зинке. М.: Мир, 1971. 943 с.
4. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 272 с.
5. Yamauchi S. New thermodynamic functions theta function and reference exergy of elements / S. Yamauchi, K. Fueki // Data for science and technology: Proc. 7<sup>th</sup> CODATA conf., Kyoto, 1980. Oxford, 1981. P. 242–245. (131).
6. Степанов В.С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. 280 с.
7. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 163 с.
8. Менделеев Д.И. Основы фабрично-заводской промышленности / Сочинения, т. VI. С. Петербург: изд-во АН СССР, 1949.
9. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. М.: Наука, 1971. 358 с.
10. Rant Z. Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Brennstoffen // Allg. Warmetechn. 1961. Bd. 10, No 9. S. 172-176.
11. Szargut J. Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen / J. Szargut, T. Styrylska // ВВК. 1964. Bd. 16, No 12. S. 589-596.

© Проблемы энергетики, 2016, № 7-8

12. Захаров Н.Д. Эксергия органических топлив // Изв. вузов. Энергетика. 1970. № 9. С. 63–67.

13. Shie J.H. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials / J.H. Shie , L.T. Fan // Energy Sources. 1982. Vol. 6, No 1 / 2. P. 1-46.

14. Ikumi S. A method of estimating entropies of coals and coal liquids/ S. Ikumi, C.D. Luo, C.Y. Wen // Can. J. Chem. Engng. 1982. Vol. 60. P. 551-555.

15. Энергетическое топливо СССР: Справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. М.: Энергоатомиздат, 1991. 184 с.

*Поступила в редакцию*

*15 июня 2016 г.*

**Степанов Владимир Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета. Тел.: 8(3952)51-00-17, 8(3952)40-54-46. E-mail: stepanov@istu.edu.

**Степанова Татьяна Борисовна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета. Тел.: 8(3952)51-00-17, 8(3952)40-54-46. E-mail: stepanov@istu.edu.

**Старикова Наталья Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета. Тел.: 8(3952)56-59-35, 8(3952)40-54-46. E-mail: natalia-starikova@yandex.ru.