

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.9:662.6

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-91-96

Определение химической энергии и эксергии древесных топлив

В.С. Степанов^a, Т.Б. Степанова^b, Н.В. Старикова^c

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^{a,b}stepanov@istu.edu, ^cnatalia-starikova@yandex.ru

Статья поступила 25.10.2016, принята 7.12.2016

В настоящее время древесина не является важным источником для получения тепловой энергии, однако в Российской Федерации, где большая часть территории покрыта лесами, древесное топливо может стать существенной статьёй энергетического баланса отдельных регионов, а значит, и страны в целом. Для оценки этого вклада необходима разработка современных энергетических показателей данного вида горючих материалов. От энергетических характеристик топлив, закладываемых в теплотехнические расчеты, существенно зависят оценка энергетической эффективности теплотехнического оборудования и выбор его оптимальных параметров. Сегодня энергетический потенциал всех горючих веществ, как правило, оценивается величиной низшей теплоты сгорания. Более полувека назад ученые предложили использовать для оценки более совершенные характеристики — химическую энергию и эксергию веществ и разработали методы их определения. Эти характеристики позволяют при решении различных практических задач учитывать 2-й закон термодинамики, т. е. неодинаковую способность преобразования в работу. Целью статьи авторы определили разработку методики расчета химической энергии и эксергии для топлив с неопределенной структурой, к которым относится древесина, и расчет этих характеристик для различных пород лиственных и хвойных деревьев и отдельно для их коры. Для сравнения в статье приведены величины теплоты сгорания — высшей и низшей. Впервые были рассчитаны для древесины значения энтропии. Все это позволяет определить реальный энергетический потенциал важного возобновляемого источника энергии, а значит, более корректно оценить эффективность сжигания древесного топлива в установках различного рода и назначения.

Ключевые слова: древесное топливо; теплота сгорания; химическая энергия; химическая эксергия; энтропия топлива.

Evaluation of chemical energy and exergy of wood fuel

V.S. Stepanov^a, T.B. Stepanova^b, N.V. Starikova^c

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^{a,b}stepanov@istu.edu, ^cnatalia-starikova@yandex.ru

Received 25.10.2016, accepted 7.12.2016

At present wood is not an important source of producing heat energy. However, in Russia, most part of which is covered with forests, wood can be a substantial item of energy balance in different regions and the whole country. To evaluate its contribution, it is necessary to elaborate current energy rates of given combustible materials. The evaluation of energy efficiency of heat engineering equipment and the choice of its optimal parameters considerably depend on energy characteristics of fuel used in the calculations. Nowadays, as a rule, the energy potential of all combustible substances is estimated by their low combustion value. To estimate the energy potential, more than 50 years ago the scientists proposed more perfect energy characteristics – chemical energy, exergy of substances and methods for their calculation. The second law of thermodynamics, in other words, unequal energy conversion into work, has to be taken into account while calculating the characteristics. The aim of the article is to develop the method of calculation of chemical energy and exergy of substances for fuel with unknown structure, such as wood, and determine the values for some types of wood fuel. The calculations are carried out for wood and bark of broadleaved and coniferous trees which are most widely spread in the country. The low and high heat values are compared in the article. The entropies of different wood fuel are determined for the first time. All the above-mentioned information allows to estimate the real energy potential of wood fuel and correctly determine the efficiency of its use in different plants.

Key words: wood fuel; combustion heat; chemical energy; chemical exergy; fuel entropy.

Введение

В силу разных причин древесина потеряла за предыдущие столетия свое значение как источник тепловой энергии, однако ее не следует сбрасывать со счетов. Лесные массивы в нашей стране огромны, и при внедрении комплексной технологии заготовки и перера-

ботки древесины, учитывающей решение экологических и противопожарных задач, запасы отходов будут возрастать. Следовательно, необходимо учитывать вклад древесного топлива в энергетический баланс регионов, а значит, и страны в целом. Это требует разра-

ботки современных энергетических показателей данного вида горючих материалов.

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

В настоящее время энергетический потенциал всех горючих веществ оценивается величиной теплоты сгорания. Способ определения этой характеристики топлива зависит от наличия или отсутствия необходимой информации о его химическом составе и структуре. Например, для топлива с известной структурой (химическая формула, компонентный состав) теплота сгорания может быть найдена на основе реакции его сгорания по правилам определения ее теплового эффекта.

Для топлив с известной структурой определения теплового эффекта реакции записывают уравнение реакции горения. Изменение энтальпии ΔH_r в реакции находится по формуле:

$$\Delta H_r = \sum_k \Delta H_k^0 - \sum_n \Delta H_n^0. \quad (1)$$

Здесь ΔH_n^0 , ΔH_k^0 — значения стандартной теплоты образования соответственно начальных (исходных) и конечных (результатирующих) веществ реакции.

Эту величину, найденную по выражению (1) при условии, что получаемый продукт реакции H_2O — жидкость, в теплотехнике используют с обратным знаком и называют высшей теплотой сгорания рассматриваемого вещества $Q_{cr}^B = -\Delta H_r^B$. Величину, определяемую при условии, что H_2O — газ, используют также с обратным знаком и называют низшей теплотой сгорания $Q_{cr}^H = -\Delta H_r^H$. Таким образом, для одного и того же топлива имеются два значения его энергетической характеристики, и каким из них следует 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, также определяется по этой характеристике. Это приводит к существенным ошибкам при оценке КПД как отдельных топливосжигающих установок, так и при определении эффективности использования энергоресурсов в регионах и стране в целом. Специалисты давно обращали внимание на это обстоятельство, предлагая изменить нашу нормативную базу и перейти на новые характеристики топлив для определения их энергетического потенциала. Однако это до сих пор не сделано, и все наши статистические данные по эффективности использования энергоресурсов отдельными потребителями, системами, регионами являются недостоверными, завышенными, а потенциал используемых топлив искусственно занижен относительно его реальных значений.

Кроме того, эти характеристики не позволяют учитывать работоспособность теплоты, выделяемой в реакциях горения топлива, а значит, теплотехнические расчеты, выполняемые на их основе, являются некорректными.

Постановка задачи и методы ее решения. В течение предшествующих 60 лет учеными были предложены новые, более совершенные характеристики для оценки энергетического потенциала горючих веществ, в том числе топлив — химическая энергия и эксергия вещества — и разработаны методы их определения [4–7].

Новые характеристики позволяют при решении различных практических задач учитывать 2-й закон термодинамики, который гласит: разные формы энергии неодинаковы по способности преобразования их в работу. Согласно этому закону, всю совокупность видов энергии можно разделить на три класса: 1-й включает неограниченно превратимые в работу формы энергии (механическую, электрическую); 2-й объединяет формы энергии, преобразуемые в другие формы, включая работу, в ограниченной мере (теплота, энергия химических реакций); 3-й 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 , и механическую энергию машины, давление рабочего тела которой равно давлению окружающей среды p_0 .

Следовательно, теплота и энергия химических реакций относятся к классу ограниченно преобразуемых форм энергии, и этот факт необходимо учитывать при решении различных практических задач.

С этой целью в термодинамике, помимо теплоты сгорания, широко используется другая характеристика реакции, которая показывает изменение свободной энтальпии (потенциала Гиббса) и определяется по выражению:

$$\Delta G_r = \sum_k \Delta G_k^0 - \sum_n \Delta G_n^0, \quad (2)$$

где ΔG_n^0 и ΔG_k^0 — свободная энтальпия (потенциал Гиббса) образования исходных и конечных компонентов реакции при стандартных условиях.

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 соответствующего количества теплоты рассматриваемой реакции.

Изменение потенциала Гиббса в реакции может быть найдено и по другому выражению:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T_0 \cdot \Delta S_r. \quad (3)$$

Здесь ΔS_r — изменение энтропии в реакции; T_0 — стандартная температура, как правило, равная $T_0 = 298,15$ °С.

Для любой рассматриваемой реакции горения имеем: — изменение энтропии:

$$\Delta S_r^B = \sum_k \Delta S_k^0 - \sum_n \Delta S_n^0 \quad \text{Дж/моль}; \quad (4)$$

$$\Delta S_r^H = \sum_k \Delta S_k^0 - \sum_n \Delta S_n^0 \quad \text{Дж/моль};$$

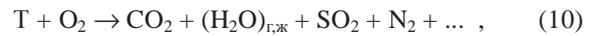
$$e_{x_T} = -\Delta G_r^B + \sum_k m_j \cdot e_{x_j}, \quad (9)$$

где e_{x_j} — удельная химическая эксергия вещества j [7].

Однако для большого числа материалов, используемых в качестве топлив (бурые и каменные угли, торф, сланцы, нефть и продукты ее переработки, а также 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) – (9).

В этом случае алгоритм определения указанных выше характеристик может строиться с разной степенью приближения к описанному выше алгоритму.

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

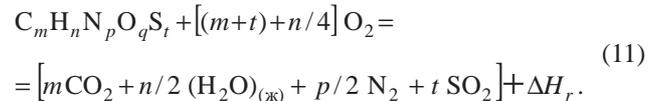


можно принять допущение, что органическая (горючая) масса топлива может быть представлена в виде:



где индексы m, n, p, q и t — число атомов элементов C, H, N, O и S соответственно в 1 моле горючей массы топлива.

Тогда реакция его сгорания будет иметь вид:



Для этой реакции по выражению (1) можно определить ΔH_r лишь в том случае, когда известна величина стандартной теплоты образования рассматриваемого топлива ΔH_T^0 .

Если ΔH_T^0 топлива неизвестна, ее значение может быть установлено на основе величин его теплоты сгорания Q_B, Q_H , которые могут быть определены экспериментально, путем 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 (6) и (7), можно найти значение их химической энергии i_x .

Сложнее обстоит дело с определением величины эксергии таких топлив, поскольку в справочной литературе отсутствуют значения стандартной энергии Гиббса их образования ΔG_T^0 . Кроме того, величину изменения энергии Гиббса в реакции их сгорания установить экспериментально не представляется возможным. Следовательно, нельзя рассчитать значение ΔG_r реакции (11) по выражению:

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

– изменение потенциала Гиббса:

$$\Delta G_r^B = \Delta H_r^B - T_0 \cdot \Delta S_r^B \quad \text{МДж/кг}; \quad (5)$$

$$\Delta G_r^H = \Delta H_r^H - T_0 \cdot \Delta S_r^H \quad \text{МДж/кг}.$$

Найденные характеристики реакции горения вещества ΔH_r и ΔG_r позволяют определить значения его химической энергии i_x и эксергии e_x . Согласно определению этих понятий, для любого вещества [4–6] необходимо учитывать, что за его химическую энергию принимается изменение энтальпии ΔH_{rd} , а за химическую эксергию — изменение потенциала Гиббса ΔG_{rd} в реакции девальвации. В такой реакции, кроме рассматриваемого вещества, участвуют только полностью обесцененные вещества. Очевидно, что не всякая реакция горения топлива является реакцией девальвации, т. е. не всегда все продукты его сгорания являются энергетически полностью обесцененными.

С учетом этого при определении химической энергии и эксергии топлив следует принимать во внимание следующие обстоятельства.

Если рассматриваемое топливо является чистым углеводородом, то продукты его сгорания — только полностью обесцененные вещества, CO_2 и $(H_2O)_{ж}$. В этом случае его химическая энергия принимается равной:

$$i_{x_T} = Q_B = -\Delta H_{rd}^B. \quad (6)$$

Если же топливо содержит, кроме C и H , другие элементы, в частности серу, — в продуктах его сгорания будет присутствовать SO_2 , и тогда химическая энергия топлива должна находиться с учетом энергии, которой этот газ обладает, т. е.:

$$i_{x_T} = Q_B + m_{SO_2} \cdot i_{x_{SO_2}},$$

где m_{SO_2} — масса продукта окисления серы топлива; $i_{x_{SO_2}}$ — удельная химическая энергия этого продукта [7].

В более общем случае, когда в продуктах сгорания топлива оказывается k веществ, обладающих энергией:

$$i_{x_T} = Q_B + \sum_k m_j \cdot i_{x_j}, \quad (7)$$

где m_j — масса вещества j ; i_{x_j} — его удельная химическая энергия.

Соответственно, для химической эксергии топлив имеем:

– для чистых углеводородов:

$$e_{x_T} = -\Delta G_{rd}^B; \quad (8)$$

– в других, более общих случаях, когда в продуктах сгорания топлив оказываются вещества k , обладающие эксергией:

Поискам путей решения задачи по определению эксергии топлив неизвестной структуры были посвящены работы отечественных и зарубежных авторов [10–13]. На основе анализа методов расчета 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 [14]. Суть этого комбинированного метода состоит в следующем.

Как было сказано выше, величина изменения энтальпии в реакции горения таких топлив может быть рассчитана или установлена экспериментально. В таком случае величину изменения энергии Гиббса в реакции (10) можно рассчитать по выражению:

$$\Delta G_r = \Delta H_r - T_0 \cdot \Delta S_r = \Delta H_r - T_0 \left[\sum S_{\text{прод}}^0 - (S_{\text{т}}^0 + S_{\text{O}_2}^0) \right]. \quad (12)$$

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

$$C_m H_n N_p O_q S_t \cdot x A^P \cdot y W^P, \quad (13)$$

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 с учетом энтропии смешения этих компонентов, т. е.:

$$S_{\text{т}}^0 = S_{\text{орг}}^0 + S_{\text{зол}}^0 + S_{\text{вл}}^0 + \Delta S_{\text{см}}. \quad (14)$$

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

$$S_{\text{орг}}^0 = 5,69 + 13,12(H_n/C_n) + 14,19(O_n/C_n) + 8,79(N_n/C_n), \text{ Дж/моль углерода К}, \quad (15)$$

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:

$$\Delta S_{\text{см}} = -R \sum_i \mu_i \ln z_i, \quad (16)$$

где R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/моль; K ; μ_i — массовый коэффициент групп (типов); z_i — мольная доля компонентов топлива.

Тогда можно рассчитать изменение энтропии в реакции его горения (10) по выражению:

$$\Delta S_r = (m S_{\text{CO}_2}^0 + n/2 S_{\text{H}_2\text{O}}^0 + p/2 S_{\text{N}_2}^0 + t S_{\text{SO}_2}^0) - [S_{\text{т}}^0 + (m + n/4 + t) S_{\text{O}_2}^0], \quad (17)$$

а также изменение энергии Гиббса в ней по формуле (12).

Используя формулу (9), нетрудно найти величину химической эксергии рассматриваемого топлива.

Полученные результаты

Нами были проведены расчеты всех четырех показателей, определяющих энергетический потенциал (теплота сгорания высшая и низшая, химическая энергия и эксергия) для древесины и коры некоторых лиственных и хвойных пород древесного топлива при разной их влажности. Принятый в расчетах элементарный состав органической массы древесины и коры разных пород деревьев приведен в табл. 1 и 2.

Значения химической энергии и эксергии определялись по алгоритму, изложенному в настоящей статье. Полученные результаты приведены в табл. 3. Там же для сравнения приводятся значения полученных ранее высшей и низшей теплоты сгорания [16].

Таблица 1

Элементарный состав древесины различных пород дерева на органическую (горючую) массу и зольность сухой массы, %

Порода дерева	Химический состав, %					
	C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^c
Береза	49,3	6,1	44,05	0,5	0,05	1,0
Ольха	49,0	6,25	44,20	0,5	0,05	1,3
Осина	48,8	6,1	44,55	0,5	0,05	1,5
Лиственные (средний состав)	49,03	6,15	44,27	0,5	0,05	1,2
Сосна	50,2	6,0	43,25	0,5	0,05	1,0
Ель	50,1	5,8	43,50	0,5	0,10	1,5
Пихта	50,0	5,8	43,65	0,5	0,05	1,1
Хвойные (средний состав)	50,1	5,87	43,46	0,5	0,07	1,2

Таблица 2

*Элементарный состав коры различных пород деревьев
на органическую (горючую) массу и зольность сухой массы, %*

Порода дерева	Химический состав, %					
	C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^c
Береза	57,70	6,84	34,69	0,61	0,16	2,0
Ольха	53,44	6,77	39,07	0,62	0,10	2,5
Осина	53,14	6,68	39,46	0,62	0,10	2,7
Лиственные (средний состав)	54,76	6,76	37,74	0,62	0,12	2,4
Сосна	54,42	6,19	38,68	0,61	0,10	1,5
Ель	53,55	6,06	39,57	0,61	0,21	2,7
Пихта	54,33	6,01	38,94	0,62	0,10	1,9
Хвойные (средний состав)	54,10	6,09	39,06	0,61	0,14	2,03

Таблица 3

Энергетические характеристики древесных пород

Вид древесины	W ^p , %	S _T , кДж/кг	Теплота сгорания, МДж/кг		Химическая энергия и эксергия, МДж/кг	
			Q _H ^p	Q _B ^p	i _x	e _x
Лиственные породы						
Береза	20	1,285	14,420	15,963	16,092	15,510
Береза	40	1,423	10,815	12,583	12,680	12,106
Береза	60	1,254	7,210	9,203	9,267	8,794
Ольха	20	1,285	14,406	15,972	16,101	15,513
Ольха	40	1,421	10,805	12,590	12,686	12,109
Ольха	60	1,252	7,203	9,207	9,272	8,796
Осина	20	1,285	14,156	15,694	15,822	15,240
Осина	40	1,420	10,617	12,381	12,477	11,905
Осина	60	1,250	7,078	9,068	9,132	8,660
Лиственные (средний состав)	20	1,285	14,473	16,022	16,152	15,567
Хвойные породы						
Сосна	20	1,284	14,648	16,174	16,303	15,727
Сосна	40	1,424	10,986	12,741	12,838	12,268
Сосна	60	1,256	7,324	9,308	9,373	8,901
Ель	20	1,278	14,358	15,845	16,102	15,495
Ель	40	1,415	10,769	12,494	12,687	12,096
Ель	60	1,247	7,179	9,143	9,272	8,787
Пихта	20	1,281	14,382	15,872	16,001	15,433
Пихта	40	1,419	10,786	12,514	12,611	12,048
Пихта	60	1,251	7,191	9,157	9,162	8,859
Хвойные (средний состав)	20	1,280	14,470	15,972	16,152	15,566
Кора лиственных пород						
Береза	20	1,231	16,310	17,969	18,378	17,711
Береза	40	1,376	12,232	14,087	14,394	13,758
Береза	60	1,219	8,155	10,205	10,410	9,896
Ольха	20	1,252	16,260	17,901	18,156	17,526
Ольха	40	1,389	12,195	14,036	14,228	13,621
Ольха	60	1,225	8,130	10,172	10,299	9,805
Осина	20	1,252	16,042	17,665	17,919	17,293
Осина	40	1,388	12,031	13,859	14,050	13,446
Осина	60	1,224	8,021	10,054	10,181	9,689

Вид древесины	W^P , %	S_T , кДж/кг	Теплота сгорания, МДж/кг		Химическая энергия и эксергия, МДж/кг	
			Q_H^P	Q_B^P	i_x	e_x
Лиственные (средний состав)	20	1,245	16,728	18,369	18,675	18,034
Кора хвойных пород						
Сосна	20	1,255	16,254	17,812	18,07	17,460
Сосна	40	1,398	12,190	13,968	14,16	13,568
Сосна	60	1,236	8,127	10,126	10,26	9,768
Ель	20	1,259	15,655	17,189	17,73	17,035
Ель	40	1,401	11,741	13,502	13,91	13,250
Ель	60	1,239	7,828	9,816	10,09	9,557
Пихта	20	1,255	15,998	17,524	17,78	17,179
Пихта	40	1,398	11,999	13,753	13,95	13,358
Пихта	60	1,237	7,999	9,983	10,11	9,628
Хвойные (средний состав)	20	1,256	15,972	17,511	17,873	17,233

Выводы

Исследования, проведенные с использованием самых современных методов, разработанных для источников энергии с неизвестной структурой, позволили рассчитать все четыре характеристики, определяющие энергетический потенциал древесного сырья, в том числе его химическую энергию и эксергию. Впервые были рассчитаны для древесины значения энтропии. Все это позволяет определить реальный энергетический потенциал важного возобновляемого источника энергии, а значит, более корректно оценить эффективность сжигания древесного топлива в установках различного рода и назначения.

Литература

1. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. Л.: Химия, 1972. 200 с.
2. Карапетьянц М.Х., Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М.: Химия, 1968. 470 с.
3. Стал Д., Вестрем Э., Зинке Г. Химическая термодинамика органических соединений. М.: Мир, 1971. 943 с.
4. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М.: Энергия, 1968. 272 с.
5. Yamauchi S., Fueki K. New thermodynamic functions theta function and reference exergy of elements // Data for science and technology: Proc. 7th CODATA conf. Kyoto, 1980. Oxford, 1981. P. 242-245.
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: соч. Т. 6. СПб.: 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. Vol. 10, № 9. P. 172-176.
11. Szargut J., Styrylska T. Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen // BWK. 1964. Bd. 16, № 12. P. 589-596.
12. Захаров Н.Д. Эксергия органических топлив // Изв. вузов. Энергетика. 1970. № 9. С. 63-67.
13. Shie J.H., Fan L.T. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials // Energy Sources. 1982. Vol. 6, № 1/2. P. 1-46.
14. Ikumi S., Luo C.D., Wen C.Y. A method of estimating entropies of coals and coal liquids // Can. J. Chem. Engng. 1982. Vol. 60. P. 551-555.

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

16. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Оценка теплотехнических характеристик древесного топлива // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (24). С. 64-70.

References

1. Quick Reference physico-chemical quantities / pod red. K.P. Mishchenko, A.A. Ravdelya. L.: Khimiya, 1972. 200 p.
2. Karapet'yants M.Kh., Karapet'yants M.L. Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances. M.: Khimiya, 1968. 470 p.
3. Stal D., Vestrem E., Zinke G. Chemical Thermodynamics of Organic Compounds Khimicheskaya termodinamika organicheskikh soedinenii. M.: Mir, 1971. 943 p.
4. Shargut Ya., Petela R. Exergy. M.: Energiya, 1968. 272 p.
5. Yamauchi S., Fueki K. New thermodynamic functions theta function and reference exergy of elements // Data for science and technology: Proc. 7th CODATA conf. Kyoto, 1980. Oxford, 1981. P. 242-245.
6. Stepanov V.S. Analysis of the energy perfection of technological processes. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1984. 280 p.
7. Stepanov V.S. Chemical energy and exergy of substances. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1990. 163 p.
8. Mendeleev D.I. Bases of the factory industry: soch. T. 6. SPb.: Izd-vo AN SSSR, 1949.
9. Ravich M.B. Fuel and efficiency of its use. M.: Nauka, 1971. 358 p.
10. Rant Z. Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Brennstoffen // Allg. Warmetechn. 1961. Vol. 10, № 9. P. 172-176.
11. Szargut J., Styrylska T. Angenäherte Bestimmung der Exergie von Brennstoffen // BWK. 1964. Bd. 16, № 12. P. 589-596.
12. Zakharov N.D. Exergy of organic fuels // Izv. vuzov. Energetika. 1970. № 9. P. 63-67.
13. Shie J.H., Fan L.T. Estimation of energy (enthalpy) and exergy (availability) contents in structurally complicated materials // Energy Sources. 1982. Vol. 6, № 1/2. P. 1-46.
14. Ikumi S., Luo S.D., Wen C.Y. A method of estimating entropies of coals and coal liquids // Can. J. Chem. Engng. 1982. Vol. 60. P. 551-555.
15. Vdovchenko V.S., Martynova M.I., Novitskii N.V., G.D. Yushina G. Energy fuel of the USSR: spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1991. 184 p.
16. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Evaluating burning characteristics of wood fuels // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 1 (24). P. 64-70.