



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 662.63

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

Ю.В. Максимук¹, канд. хим. наук, доц.

Д.А. Пономарев², д-р хим. наук, проф.

В.Н. Курсевич¹, науч. сотр.

В.В. Фесько¹, мл. науч. сотр.

¹ НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета, ул. Ленинградская, д. 14, Минск, Беларусь, 220030; e-mail: maksimuk@bsu.by

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: dpronomarev1@mail.ru

Древесная биомасса является природным ресурсом многоцелевого назначения. Наиболее востребованы в качестве твердого биотоплива древесные гранулы и брикеты, изготавливаемые из отходов переработки древесины и характеризующиеся высокой энергоемкостью. Теплота сгорания является нормированным показателем качества топлива и основным критерием оценки его энергоэффективности. В работе представлены результаты испытаний 57 различных образцов древесного топлива из хвойных и лиственных пород из всех шести областей Беларуси и Калининградской области России, в том числе 18 образцов гранул и 13 брикетов. Для образцов определены влажность, зольность (при температуре 800 °С) и теплота сгорания, измеренная в бомбовых изопериболических калориметрах. Экспериментальные значения высшей теплоты сгорания в пересчете на абсолютно сухое состояние составили, МДж/кг: 19,4...21,2 – для древесины с естественным содержанием коры; 18,9...23,6 – для коры (в том числе для коры березы – 23,6); 20,8±0,5 – для хвойных пород (в том числе для сосны – 20,9±0,3); 20,0±0,7 – для лиственных пород (в том числе для ольхи и осины – 19,9±1,0). Анализ литературных и экспериментальных данных позволяет рекомендовать к использованию значения высшей теплоты сгорания, МДж/кг: для древесного топлива неустановленного происхождения – 19,8 (с погрешностью ±10,0 % и вероятностью 95 %); для топлив из лиственных и хвойных пород – соответственно 19,6 и 20,5 (с погрешностью ±5,0 %). Наиболее оправдано использование рекомендованных значений для оценки энергоэффективности необлагороженных видов древесного топлива (дрова, щепа) с содержанием воды 30 % и более. Погрешность такой оценки для топлива в рабочем состоянии по сравнению с погрешностью рекомендованных значений на абсолютно сухое состояние пропорционально снижается с увели-

Для цитирования: Максимук Ю.В., Пономарев Д.А., Курсевич В.Н., Фесько В.В. Теплота сгорания древесного топлива // Лесн. журн. 2017. № 4. С. 116–129. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116

чением содержания воды в топливе. Максимальная погрешность экспериментального определения теплоты сгорания древесного топлива составляет $\pm 1,5$ % при вероятности 95 %. Целесообразность применения расчетных процедур для оценки теплоты сгорания по составу (элементному, компонентному и т. д.) определяется расхождением между расчетными и экспериментальными значениями, величина которого для древесного топлива не должна превышать 2,5 % при вероятности 90 %.

Ключевые слова: высшая теплота сгорания, древесное топливо, оценка энергоэффективности, древесные гранулы и брикеты, необлагороженные виды топлива.

Введение

Возобновление в XXI в. широкого применения древесной биомассы в качестве топлива связано с ужесточением требований к охране окружающей среды, комплексным использованием региональных топливных ресурсов и развитием новых технологий их переработки. Повсеместное распространение получили новые технологичные виды древесного топлива (гранулы и брикеты из отходов переработки древесины), которые имеют высокую плотность ($800 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$), низкую влажность (не более 10 %) и, как следствие, высокую низшую удельную теплоту сгорания (НТС) в рабочем состоянии (примерно $17,5 \text{ МДж/кг}$ (или МДж/м^3)). Теплота сгорания является основным показателем качества котельного топлива. Знание этого параметра также необходимо для расчета пожароопасных характеристик древесины [1] и моделирования пожаров [34].

Приоритетное использование в СССР высокоэнергетических топлив привело к резкому снижению научных исследований, посвященных изучению теплоты сгорания твердых биотоплив. Монографии, затрагивающие эту тему [2, 5, 10] базируются на значениях, приведенных в [6, 9]. Поэтому представляется актуальным проведение сравнительного анализа результатов новых исследований теплоты сгорания древесных топлив. Наличие в литературе несогласующихся значений при недостатке достоверных и научно обоснованных данных четко обозначено в работе [13].

Цель данной работы – экспериментальное определение и проверка литературных данных по высшей теплоте сгорания (ВТС) различных видов древесной биомассы и древесного топлива для разработки рекомендаций по использованию достоверных значений ВТС.

Объекты и методы исследования

В качестве исходных образцов использовали пробы, отобранные из промышленных партий древесного топлива. Для измерений готовили аналитические пробы с размерами частиц не более 1 мм. Перед измельчением влажные пробы (щепа, дрова) подсушивали до воздушно-сухого состояния. Для аналитических проб зольность (A) и ВТС измеряли параллельно с измерениями влажности (W).

Влажность определяли путем высушивания до постоянной массы навески 1,0...2,0 г при температуре 105 °С в открытых алюминиевых бюксах вместимостью 100 мл. Перед извлечением из сушильного шкафа горячие бюксы плотно закрывали крышками, помещали в эксикатор с хлористым кальцием и через 15 мин взвешивали. Перед взвешиванием бюксы открывали на несколько секунд.

Зольность определяли путем прокаливания в фарфоровых тиглях при температуре 800 °С в течение 60 мин предварительно обугленной навески массой около 1 г. Горячие тигли после извлечения из печи выдерживали на воздухе в течение 5 мин, затем помещали в эксикатор без осушителя и взвешивали через 15 мин.

При определении влажности использовали сушильные шкафы SNOOL 24/200 и Binder FD 53, зольности – муфельную печь МИМП-3П. Точность поддержания температур в рабочих камерах испытательного оборудования составляла ± 2 °С. Выполняли по три параллельных определения, при этом повторяемость (сходимость) результатов не превышала 0,2 %.

Высшую теплоту сгорания при постоянном объеме аналитических проб топлива ($ВТС^a$) определяли с использованием двух бомбовых изопериболических калориметров с водяной оболочкой: В-08 МА [4] и БИК 100 [8]. Калибровку калориметров осуществляли по стандартному образцу бензойной кислоты марки К-3 (ГСО 5504–90). Образцы массой 1,0...1,2 г сжигали в виде спрессованных на воздухе таблеток в жаропрочных тиглях из нержавеющей стали. В качестве запала использовали медную проволоку диаметром 0,5 мм. Расчет $ВТС^a$ проводили в соответствии с ГОСТ 147–2013. Средняя сходимость результатов измерений – 45 кДж/кг, максимальная – 150 кДж/кг. Содержание серы в исследованных образцах не превышало 0,10 % (в среднем 0,04 %).

Значения, полученные для аналитических проб (a), были пересчитаны на другие состояния: абсолютно сухое (d) – $ВТС^d$ и A^d , абсолютно сухое обеззоленное (daf) – $ВТС^{daf}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В работах по определению теплот сгорания древесной биомассы данные ранжируют по породам деревьев, частям дерева и регионам (странам). Например, для Республики Коми (Россия) [18], Канады [37], Саудовской Аравии (акация) [31], Узбекистана [30], Индии [29], юго-востока Нигерии [23], Южной Африки [22], Южного Китая (сосна) [40], Японии [15] и т. д. Географический регион, скорость роста и возраст дерева не оказывают значительного влияния на теплоту сгорания [27]. Тем не менее, по данным [31], максимальное различие в значениях теплоты сгорания для одного вида по регионам составляет 0,70 МДж/кг (в среднем 0,30 МДж/кг), а для различных видов – 2,50 МДж/кг, причем самые высокие значения отмечены у видов с наибольшим содержанием лигнина и экстрактивных веществ.

Результаты наших экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Область	Древесное топливо	Сырье	Характеристики образцов древесного топлива				
				ВТС ^с , кДж/кг	И ^с , %	ВТС ^д , кДж/кг	А ^д , %	ВТС ^{диф} , кДж/кг
1	Витебская	Щепа	Кора осины	17 483	7,5	18 890	5,8	20 070
2	«	«	« березы	22 010	6,6	23 568	1,6	23 959
3	«	«	« ольхи	19 920	8,6	21 782	3,4	22 532
4	Минская	Гранулы	« сосны	20 343	5,7	21 568	1,8	21 968
5	«	Щепа	« сосны	19 447	9,5	21 488	1,0	21 708
6	Калининградская	«	« лиственницы	18 835	9,3	20 775	2,3	21 267
7	Могилевская	Дрова	« тополя	17 889	7,5	19 342	7,5	20 916
8	«	«	Тополь без коры	18 520	6,4	19 791	1,3	20 052
9	«	«	Береза «	17 780	9,3	19 599	1,1	19 821
10	Минская	Гранулы	«	19 800	3,9	20 610	1,2	20 862
11	«	Опилки	«	18 470	8,2	20 124	1,0	20 317
12	Гомельская	Брикеты из пыли	«	18 717	4,7	19 640	0,3	19 699
13	«	«	«	18 780	3,9	19 550	0,4	19 636
14	«	«	«	18 730	5,1	19 737	0,4	19 814
15	Минская	Гранулы	Осина «	19 370	3,9	20 154	0,4	20 227
16	«	Дрова	« с гнилью	19 520	7,0	20 994	0,8	21 168
17	«	«	« без коры	18 524	6,2	19 749	0,6	19 871
18	«	Гранулы	Сосна без коры	19 790	6,6	21 198	0,3	21 255
19	«	Брикеты из пыли	«	19 900	5,3	21 007	0,2	21 051
20	«	«	«	20 192	4,1	21 055	0,3	21 115
21	«	«	«	19 865	6,2	21 183	0,3	21 244
22	«	«	«	18 900	7,3	20 395	0,9	20 582
23	«	Опилки	Дуб	18 165	9,0	19 966	0,2	20 008
24	Брестская	«	Древесина «	19 557	3,6	20 287	0,5	20 383
25	«	Пыль	«	17 388	12,6	19 904	1,2	20 148
26	«	Щепа	«	20 066	2,6	20 604	0,5	20 705
27	«	Опилки	«	16 964	18,0	20 695	0,5	20 800
28	«	Щепа	«	20 408	1,9	20 812	1,4	21 092

№ образца	Область	Древесное топливо	Сырье	Окончание табл. 1				
				ВТС ^с , кДж/кг	И ^с , %	ВТС ^д , кДж/кг	A ^д , %	ВТС ^{д/с} , кДж/кг
29	Гродненская	Дрова	Сосна	19 240	7,2	20 735	0,7	20 875
30	«	«	« с гнилью	19 307	6,9	20 747	1,1	20 980
31	«	«	Ель	18 811	6,7	20 158	0,8	20 324
32	Минская	«	«	17 335	11,6	19 608	0,8	19 760
33	«	«	Тополь	18 602	5,5	19 685	0,8	19 833
34	«	«	Сосна	19 153	7,0	20 595	0,4	20 684
35	«	Гранулы	«	19 442	5,5	20 582	0,4	20 661
36	Могилевская	«	«	19 135	5,4	20 221	0,5	20 327
37	«	Щепа	«	18 550	6,3	19 793	2,0	20 196
38	«	Пыль	«	19 359	3,2	20 007	0,7	20 148
39	Брестская	Щепа	«	19 210	5,3	20 289	0,9	20 474
40	Гомельская	Гранулы	«	19 520	4,9	20 534	1,2	20 775
41	«	«	«	18 712	4,4	19 567	4,8	20 555
42	«	«	«	19 869	3,3	20 543	1,4	20 890
43	«	«	«	18 351	7,0	19 722	2,4	20 211
44	Минская	«	«	19 009	7,6	20 561	0,5	20 673
45	«	«	«	18 172	8,9	19 953	3,5	20 684
46	«	Гранулы	«	18 979	7,7	20 565	1,3	20 827
47	«	«	«	19 435	6,2	20 709	0,4	20 786
48	«	Брикеты	«	19 113	8,6	20 918	1,1	21 163
49	Брестская	Гранулы	«	18 038	7,1	19 418	0,2	19 465
50	Витебская	Брикеты	«	19 230	6,2	20 495	0,6	20 647
51	«	Гранулы	«	18 628	7,0	20 037	1,9	20 435
52	Гомельская	«	«	18 908	6,0	20 124	0,7	20 274
53	Брестская	Брикеты	«	18 883	7,3	20 379	1,5	20 679
54	Могилевская	«	«	18 585	4,2	19 406	0,9	19 590
55	Брестская	Гранулы	«	18 184	8,8	19 940	1,4	20 220
56	Калининградская	Щепа	«	18 216	7,3	19 659	1,0	19 866
57	Гомельская	Гранулы	«	18 738	5,8	19 898	0,6	20 009
	«	Брикеты	Ольха					

Анализ данных табл. 1 показывает, что значения $ВТС^d$ для всех изученных образцов древесины находятся в достаточно узком интервале шириной 1,80 МДж/кг. Это значение совпадает с литературными данными (табл. 2), приведенными в справочниках [6], – 1,50 МДж/кг, [3] – 1,80 МДж/кг, [14] – 2,00 МДж/кг. Для окоренной или стволовой древесины данный интервал меньше: для 12 образцов древесины из Новой Зеландии [35] он составил 0,90 МДж/кг. Для совокупности образцов, включающих не только древесину, но и кору, указанный интервал увеличивается примерно в 2 раза, МДж/кг: 2,70 [37]; 3,20 [19, 35]; 3,50 [33]; 3,70 [29]; 4,00 [14]; 4,20 – для 108 образцов [22]; 4,70 – в данной работе. Это связано с тем, что кора неоднородна по своему составу и состоит из внутреннего (луб) и наружного (корка) слоев, которые отличаются по строению, химическому составу и функциям, поэтому свойства коры колеблются в широких пределах. Например, верхний белый слой коры березы (береста) имеет аномально высокое значение ВТС, которое и обуславливает самое большое значение и самый широкий интервал $ВТС^d$ в данной работе. Без учета коры березы интервал $ВТС^d$ составляет 2,90 МДж/кг. Если учитывать биомассу не только деревьев, но и кустарников, то интервал изменения $ВТС^d$ становится еще шире. Например, для 26 образцов, произраставших в северо-западных Гималаях, он достигает 5,10 [17] (от 17,90 до 22,90 МДж/кг). Если учитывать, что кора имеет значительно большую зольность (4,0...5,0 %), чем окоренная древесина (0,3 %), то для $ВТС^{daf}$ диапазон варьирования может уменьшиться на 1,00 МДж/кг по сравнению с диапазоном $ВТС^d$.

В среднем для древесного топлива можно ориентироваться на интервал $ВТС^d$ в 3,00 МДж/кг, предложенный [27], когда 90 % значений (~700 исследованных образцов) находятся в диапазоне 18,00...21,00 МДж/кг и древесина содержит около 10 % коры. Более полные данные о диапазонах [27] приведены в табл. 2. Среднее значение для всех образцов составляет 20,80 МДж/кг.

Таблица 2

Интервалы изменений $ВТС^d$ (МДж/кг) древесной биомассы

Хвойные породы	Лиственные породы	Кора	Древесина	Источник	
18,60...28,40	15,60...23,70	18,00...22,70	19,00...21,00	[26] [14]	
19,12...21,10	18,40...20,10		19,60...21,40	[37] [3]	
19,66...20,36	17,63...20,81		17,40...20,60 19,60...20,50		[38]
18,39...20,51	17,38...23,05				Phyllis Database из [38]
19,68...21,14	19,68...20,81				[6]
				18,34...22,49	[35]
				19,70...23,40	[22]
				17,30...20,80	[29]
20,98...23,00				[33]	
20,93...22,57	19,31...20,24			[40]	
19,61...21,57	18,89...23,57	18,89...23,57 19,40...21,20		[19] Данная работа	

Значения теплоты сгорания других частей дерева (ветки, корни, верхушки, листья и др.), как правило, входят в уже рассмотренные диапазоны, занимая промежуточные значения между древесиной и корой [37], за исключением листьев (хвои), которые чаще всего имеют более высокие значения ВТС^d. Например, по данным [35], ВТС^d листьев варьирует в интервале 19,50...24,10 МДж/кг, с учетом остальных частей дерева ширина интервала увеличивается до 6,70 МДж/кг. ВТС^d хвои сосны часто выше, чем древесины и коры, и составляет, МДж/кг: 21,00 – по данным [26], 21,40 – [37], 23,00 – [40]; для сосны ладанной – 20,70 [28], для сосны закрытой (*Pinus clausa*) – 22,36 [28], но по данным [11] – 18,17...19,64. Авторы [32, 35] для листьев получили значение ВТС^d = 21,80 МДж/кг; в [35] эта величина объясняется большим (33 %) содержанием экстрактивных веществ. В работе [11] предлагается использовать тепловой потенциал не только хвои, но и шишек, теплота сгорания которых для сосны Веймутова (*Pinus strobus*) составляет 21,25 МДж/кг.

Данные по ВТС^d древесины разделены по лиственным и хвойным породам (табл. 2). В среднем хвойные породы обладают более высокой теплотой сгорания по сравнению с лиственными, что связано с большим содержанием лигнина и экстрактивных (в первую очередь смолистых) веществ, имеющих теплотворную способность 34,90...37,20 МДж/кг [26]. Качественный состав этих веществ [7] приблизительно постоянный [14]. В то же время варьирование содержания экстрактивных веществ и их многообразие значительно затрудняют возможность прогнозирования теплоты сгорания древесной биомассы по химическому составу. Так, коэффициент корреляции зависимости ВТС^d от содержания лигнина для древесины составляет 0,76, после удаления из нее экстрактивных веществ он повышается до 0,97 [39]. По данным [31], коэффициент корреляции по лигнину равен 0,70, по экстрактивным веществам – только 0,56. Более высокое значение коэффициента корреляции по лигнину (0,86) приведено в работе [12], причем наибольшие отклонения отмечены для образцов древесины, содержащих наибольшее количество экстрактивных веществ. По данным [20], теплота сгорания коры хвойных деревьев на 7 % больше, чем лиственных, а по обобщенным в [16] данным – на 10 %, что свидетельствует об отсутствии коры березы в изученных образцах.

По нашим экспериментальным данным, ВТС^d для древесного топлива из сосны имеет значение 20,90±0,30, для ольхи и осины – (19,90±1,00) МДж/кг, что близко к справочным значениям, МДж/кг [3]: сосна – 20,59, ольха – 20,05, осина – 19,64. В табл. 3 представлены данные по ВТС^d биомассы сосны со ссылками на оригинальные источники или на работу [20]. По стволу древесине данные разных исследователей практически совпадают, МДж/кг: 20,90±0,30 (данная работа); 21,30 [37]; 21,30±0,10 [40]; 21,55±0,25 [18]. Для коры наблюдаются отличия, МДж/кг: 18,49±0,26 [18]; 19,13...19,77 – для сосен пяти видов [12]; 19,44 [37]; 21,3±0,3 (данная работа); 21,40±0,14 [40].

Таблица 3

Значения ВТС^d (МДж/кг) биомассы сосны

Сосна	ВТС ^d	Регион, страна	Источник	Примечание
Массон (<i>Pinus massoniana</i>)	21,54±0,19	Южный Китай	[40]	Все части дерева
Приморская (<i>Pinus pinaster</i>)	20,10	Португалия	[38]	
Ладанная (<i>Pinus taeda</i>)	20,00±1,20		[26]	Ствол
Эллиота (<i>Pinus Elliotii</i>)	22,37	Северная Америка	[20]	
Банкса (<i>Pinus banksiana</i>)	20,79±0,86 21,82 20,77	Канада Северная Америка	[37] [20] [20]	Все части дерева Кора «
Обыкновенная (<i>Pinus silvestris</i>)	20,00 19,74 19,96±1,40	Украина Коми, Россия	[20] [11] [18]	« « Все части дерева
Виргинская (<i>Pinus virginiana</i>)	19,59		[20]	Кора

В табл. 3 не включены значения ВТС^d из работы [12] для стволовой древесины сосны Банкса и сосны обыкновенной (соответственно 18,42...18,52 и 18,49...19,22 МДж/кг). Данные значения представляются заниженными, что вероятно связано с остаточным содержанием влаги в образцах, использовавшихся при определении ВТС «в абсолютно сухом состоянии». В среднем для сосны, независимо от вида, региона произрастания и части дерева, значение ВТС^d = (20,6±0,9) МДж/кг.

В табл. 4 суммированы значения ВТС^d по всем видам древесной биомассы, приведенные в разных исследованиях. В целом значения одинаковы в пределах погрешности их определения. Различия между хвойными и лиственными породами составляют, МДж/кг: 1,09 [16]; 1,03 [37]; 0,82 (данная работа);

Таблица 4

Средние значения ВТС^d (МДж/кг) древесной биомассы

Хвойные породы	Лиственные породы	Все породы	Количество образцов	Источник
20,30	19,90	20,10		[9, 10]
20,82 ±1,48	19,73 ±0,98	20,28±1,78 19,26±0,91 19,58 20,04	338 17 18 42	[16] [38] [24] [25]
20,81±0,67			19	[15]
20,18 ±0,55	19,15 ± 0,72	19,66 ± 0,91	20	[37]
20,82±0,53	20,00± 0,70	20,34±0,75	57	Данная работа

0,42 [10]. Для образцов лиственных и хвойных пород рекомендуемые нами значения $ВТС^d$ соответственно 19,6 и 20,5 МДж/кг (погрешность $\pm 5\%$), предлагаемые в [13] – 19,70 и 19,60 МДж/кг. Значение $ВТС^d$ для хвойной древесины из [13] представляется заниженным. Для древесного топлива неустановленного происхождения рекомендуются: $ВТС^d = 19,80$ и $ВТС^{daf} = 20,10$ МДж/кг (погрешность $\pm 10\%$, вероятность – 95 %). Сравнение этих значений с видом уравнений по расчету $ВТС^d$ на основе данных по зольности A^d ($ВТС^d = 19,914 - 0,2324A^d$ [36] и $ВТС^d = 20,060 - 0,352A^d$ [21]) косвенно свидетельствует о надежности рекомендованных величин.

Наиболее оправдано использование рекомендованных значений $ВТС^d$ для оценки энергоэффективности необлагороженных видов древесного топлива (дрова, щепа с содержанием воды 30 % и выше). Погрешность такой оценки для топлива в рабочем состоянии по сравнению с погрешностью рекомендованных значений на абсолютно сухое состояние будет пропорционально снижаться с увеличением содержания воды в топливе. Практика работы топливных лабораторий показывает, что значения $ВТС^d$ и особенно $ВТС^{daf}$ (в которой исключаются расхождения, связанные с внешними загрязнениями) для однотипной древесной биомассы из одного и того же региона будут постоянными в интервале 0,50 МДж/кг ($\sim 2,5\%$). Максимальная погрешность экспериментального определения $ВТС^d$ древесного топлива составляет $\pm 1,5\%$ при вероятности 95 %. Эта величина оценена исходя из нормируемого в стандартах допустимого расхождения в 0,30 МДж/кг между результатами определений теплоты сгорания одного и того же образца твердого биотоплива, полученными в разных лабораториях. Целесообразность применения расчетных процедур для оценки $ВТС^d$ по составу (элементному, компонентному и т. д.) определяется расхождением между расчетными и экспериментальными значениями, величина которого для древесного топлива, на наш взгляд, не должна превышать 2,5 % при вероятности 90 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства: моногр. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2010. 262 с.
2. Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива: особенности подготовки и сжигания. М.: Энергоатомиздат, 1989. 136 с.
3. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.
4. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инж.-физ. журн. 1997. Т. 70, № 5. С. 828–839.
5. Головков С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 224 с.
6. Добрынин Ф.Д., Карелин А.И., Кострикин Ю.М. и др. Котельные установки Т. 1. Рабочие тела и процессы котельной установки. Топочные устройства / под ред. М.В. Кирпичева, Э.И. Ромма, Т.Т. Усенко. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1941. 280 с.

7. Кузьмина Р.И., Штыков С.Н., Иванова Ю.В., Панкин К.Е. Оценка теплоты сгорания биотоплива на основе экстрактивных веществ из древесных отходов // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 6. С. 40–42.
8. Максимук Ю.В., Фесько В.В., Васаренко И.В., Дубовик В.Г. Метрологическое обеспечение измерений теплоты сгорания твердых и жидких топлив // Приборы и методы измерений. 2014. № 2(9). С. 67–74.
9. Нормы теплового расчета котельного агрегата. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. 176 с.
10. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.
11. Рябчук В.П., Юскевич Т.В., Гриб В.М. Физические свойства древесины видов рода сосна // Лесн. журн. 2013. № 5. С. 160–169. (Изв. высш. учеб. заведений).
12. Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Тхань Б.Д., Асеева Р.М. Тепловыделение при горении древесины // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2003. № 5(30). С. 74–79.
13. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Оценка теплотехнических характеристик древесного топлива // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 117–123.
14. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). М.: Лесн. пром-сть, 1988. 512 с.
15. Abe F. Calorific Value of Japanese Coniferous Wood // Forest Products Chemistry. 1986. Vol. 36. Pp. 91–100.
16. Baldwin S.F. Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination. Arlington, USA, 1987. 382 p.
17. Bhatt B.P., Tomar J.M.S. Firewood Properties of Some Indian Mountain Tree and Shrub Species // Biomass and Bioenergy. 2002. Vol. 23, no. 4. Pp. 257–260.
18. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon Concentrations and Caloric Value of Organic Matter in Northern Forest Ecosystems // Russian Journal of Ecology. 2001. Vol. 32, no. 1. Pp. 63–65.
19. Brown H.P., Panshin A.J., Forsaith C.C. Textbook of Wood Technology. Vol. 2. New York, USA, 1952. 783 p.
20. Corder S.E. Properties and Uses of Bark as an Energy Source. Corvallis, Oregon, USA, 1976. 21 p.
21. Ebeling J.M., Jenkins B.M. Physical and Chemical Properties of Biomass Fuels // Trans. ASAE. 1985. Vol. 28(3). Pp. 898–902.
22. Eberhard A.A. Firewood Calorific Value in South Africa // South African Forestry Journal. 1990. Vol. 152. Pp. 17–20.
23. Erakhrumen A.A. Estimating the Extent of Influence of Two Intrinsic Fuelwood Properties on Acceptance / Retention of Some Wood Species in Agroforestry Practices in Southwest Nigeria // Drvna Industrija. 2009. Vol. 60(4). Pp. 209–218.
24. Friedl A., Padouvas E., Rotter H., Varmuza K. Prediction of Heating Values of Biomass Fuel from Elemental Composition // Analytica Chimica Acta. 2005. No. 544. Pp. 191–198.
25. Gaur S., Reed T.B. Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels. New York, USA, 1998. 280 p.
26. Harker A.P., Sandels A., Burley J. Calorific Values for Wood and Bark and a Bibliography for Fuelwood. Report No. G162. Tropical Products Institute. London, UK, 1982. 20 p.
27. Hough W.A. Caloric Value of Some Forest Fuels of the Southern United States // USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station. Research Note SE-120. Asheville, NC, USA, 1969. 6 p.
28. Howard E.T. Heat of Combustion of Various Southern Pine Materials // Wood Science. 1973. Vol. 5, no. 3. Pp. 194–197.

29. Kumar N.J.I., Kumar R.N., Patel K., Kumar Bhoi R. An Assessment of Indian Fuel Wood with Regards to Properties and Environmental Impact // *Asian J. Energy and Environment*. 2009. Vol. 10(2). Pp. 99–107.
30. Lamers J.P.A., Khamzina A. Fuelwood Production in the Degraded Agricultural Areas of the Aral Sea Basin, Uzbekistan // *Bois et Forêts des Tropiques*. 2008. No. 297(3). Pp. 47–57.
31. Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014. no. 9(1). Pp. 1212–1214.
32. Nunez-Requeira L., Rodrguez-Anon J.A., Proupn-Castineiras J., Vilanova-Diz A., Montero-Santovenia N. Determination of Calorific Values of Forest Waste Biomass by Static Bomb Calorimetry // *Thermochimica Acta*. 2001. Vol. 371(1). Pp. 23–31.
33. Puri S., Singh S., Bhushan B. Evaluation of Fuelwood Quality of Indigenous and Exotic Tree Species of India's Semiarid Region // *Agroforestry Systems*. 1994. Vol. 26(2). Pp. 123–130.
34. Reid A.M., Robertson K.M. Energy Content of Common Fuels in Upland Pine Savannas of the South-Eastern US and Their Application to Fire Behaviour Modelling // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21(5). Pp. 591–595.
35. Senelwa K., Sims R.E.H. Fuel Characteristics of Short Rotation Forest Biomass // *Biomass and Bioenergy*. 1999. Vol. 17(2). Pp. 127–140.
36. Sheng Ch., Azevedo J.L.T. Estimating the Higher Heating Value of Biomass Fuels from Basic Analysis Data // *Biomass and Bioenergy*. 2005. Vol. 28(5). Pp. 499–507.
37. Singh T., Kosticky M.M. Calorific Value Variations in Components of 10 Canadian Tree Species // *Can. J. For. Res.* 1986. Vol. 16(6). Pp. 1378–1381.
38. Telmo C., Lousada J. Heating Values of Wood Pellets from Different Species // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35(7). Pp. 2634–2639.
39. White R.H. Effect of Lignin Content and Extractives on the Higher Heating Value of Wood // *Wood and Fiber Science*. 1987. Vol. 19(4). Pp. 446–452.
40. Zeng W., Tang S., Xiao Q. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China // *Journal of Forestry Research*. 2014. Vol. 25(4). Pp. 779–786.

Поступила 09.09.16

UDC 662.63

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116

Calorific Value of Wood Fuel

Yu.V. Maksimuk¹, *Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor*

D.A. Ponomarev², *Doctor of Chemical Sciences, Professor*

V.N. Kursevich¹, *Research Officer*

V.V. Fes'ko¹, *Research Assistant*

¹Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, ul. Leningradskaya, 14, Minsk, 220030, Belarus; e-mail: maksimuk@bsu.by

²Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, e-mail: dponomarev1@mail.ru

For citation: Maksimuk Yu.V., Ponomarev D.A., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Calorific Value of Wood Fuel. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 4, pp. 116–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.116

Wood biomass is a natural resource of the multi-purpose use. Wood pellets and briquettes produced from waste products of wood processing are characterized by high energy intensity and are most demanded as solid biofuel. The calorific value is a control parameter of fuel quality and a basic criterion for assessing its energy efficiency. The paper presents the test results for 57 various samples (including 18 samples of pellets and 13 samples of briquettes) of wood fuel from coniferous and deciduous species from 6 areas of Belarus and the Kaliningrad region of Russia. For all samples the moisture content, ash content (at a temperature of 800 °C) and calorific value measured in bomb isoperibolic calorimeters are determined. The experimental values of the highest calorific value in terms of BDH are (mJ/kg): 19.40...21.20 – for wood with natural bark content; 18.9...23.6 – for bark; 20.8±0,5 – for coniferous species (including pine – 20.90±0.30); 20.0±0.7 – for hardwood (including alder and aspen – 19.90±1.00; for birch bark – 23.6). The analysis of literature and experimental data allows us to recommend the gross CV values for wood fuel of unknown origin – 19.8 (with an accuracy of ±10 % and probability of 95 %); for fuels from deciduous and coniferous species – 19.6 and 20.5, respectively (with an accuracy of ±5 %). The use of the recommended values for the energy efficiency assessment of non-purified types of wood fuel (firewood, chips) with a water content of 30 % and more is most justified. The error of such estimate for fuel in operating condition compared with the error of the BDH recommended values is proportionally reduced with the increasing of water content in fuel. The maximum error of the experimental determination of calorific value for wood fuel is ±1,5 % at probability of 95 %. The expediency of calculation procedures for calorific value estimating by composition (ultimate, blend, etc.) is defined by the discrepancy between the calculated and experimental values, which, in our opinion, for wood fuel should not exceed 2.5 %, with a probability of 90 %.

Keywords: higher calorific value, wood fuel, energy efficiency assessment, wood pellet and briquette, non-purified fuel type.

REFERENCES

1. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Gorenie drevesiny i ee pozharoopasnye svoystva: monogr.* [Combustion of Wood and Its Fire-Hazardous Properties]. Moscow, 2010. 262 p.
2. Belosel'skiy B.S., Baryshev V.I. *Nizkosortnye energeticheskie topliva: osobennosti podgotovki i szhiganiya* [Low-Grade Energy Fuels: Features of Preparation and Combustion]. Moscow, 1989. 136 p.
3. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Spravochnik po drevesine* [Handbook of Wood]. Moscow, 1989. 296 p.
4. Vorob'ev L.I., Grishchenko T.G., Dekusha L.V. Bombovye kalorimetry dlya opredeleniya teploty sgoraniya topliva [Review Bomb Calorimeters for Determination of the Specific Combustion Heat of Fuels]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1997, vol. 70, no. 5, pp. 828–839.
5. Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnykh otkhodov* [Energy Use of Wood Waste]. Moscow, 1987. 224 p.
6. Dobrynin F.D., Karelin A.I., Kostrikin Yu.M. et al. *Kotel'nye ustanovki. T. 1. Rabochie tela i protsessy kotel'noy ustanovki. Topochnye ustroystva* [Boiler Installations. Vol. 1. Working Bodies and Boiler Plant Processes. Burning Installations]. Ed. by M.V. Kirpichev, E.I. Romm, T.T. Usenko. Moscow; Leningrad, 1941. 280 p.

7. Kuz'mina R.I., Shtykov S.N., Ivanova Yu.V., Pankin K.E. Otsenka teploty sgoraniya biotopliva na osnove ekstraktivnykh veshchestv iz drevesnykh otkhodov [Estimating the Bio-fuel Combustion Heat on the Basis of Extracted Substances from Wooden Wastes]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and Technology of Fuels and Oils], 2009, vol. 45, no. 6, pp. 40–42.
8. Maksimuk Yu.V., Fes'ko V.V., Vasarenko I.V., Dubovik V.G. Metrologicheskoe obespechenie izmereniy teploty sgoraniya tverdykh i zhidkikh topliv [Metrological Provision for Measurements of Calorific Value of Solid and Liquid Fuels]. *Pribory i metody izmereniy* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 2(9), pp. 67–74.
9. *Normy teplovogo rascheta kotel'nogo agregata* [Norms of Thermal Calculation of the Boiler Unit]. Moscow; Leningrad, 1952. 176 p.
10. Ravich M.B. *Effektivnost' ispol'zovaniya topliva* [Fuel Efficiency]. Moscow, 1977. 344 p.
11. Ryabchuk V.P., Yuskevich T.V., Grib V.M. Fizicheskie svoystva drevesiny vidov roda sosna [Physical Properties of Pine Wood]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2013, no. 5, pp. 160–169.
12. Serkov B.B., Sivenkov A.B., Tkhan' B.D., Aseeva R.M. Teplovydelenie pri gorenii drevesiny [Heat Emission at Wood Combustion]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik], 2003, no. 5(30), pp. 74–79.
13. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Otsenka teplotekhnicheskikh kharakteristik drevesnogo topliva [Evaluating Burning Characteristics of Wood Fuels]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 1(25), pp. 117–123.
14. Fengel D., Wagener G. *Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin; New York, 1984. 613 p.
15. Abe F. Calorific Value of Japanese Coniferous Wood. *Forest Products Chemistry*, 1986, vol. 36, pp. 91–100.
16. Baldwin S.F. *Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination*. Arlington, USA, 1987. 382 p.
17. Bhatt B.P., Tomar J.M.S. Firewood Properties of Some Indian Mountain Tree and Shrub Species. *Biomass and Bioenergy*, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 257–260.
18. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon Concentrations and Caloric Value of Organic Matter in Northern Forest Ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 2001, vol. 32, no. 1, pp. 63–65.
19. Brown H.P., Panshin A.J., Forsaith C.C. *Textbook of Wood Technology. Vol. 2*. New York, USA, 1952. 783 p.
20. Corder S.E. *Properties and Uses of Bark as an Energy Source*. Corvallis, Oregon, USA, 1976. 21 p.
21. Ebeling J.M., Jenkins B.M. Physical and Chemical Properties of Biomass Fuels. *Trans. ASAE*, 1985, vol. 28(3), pp. 898–902.
22. Eberhard A.A. Firewood Calorific Value in South Africa. *South African Forestry Journal*, 1990, vol. 152, pp. 17–20.
23. Erakhrumen A.A. Estimating the Extent of Influence of Two Intrinsic Fuelwood Properties on Acceptance / Retention of Some Wood Species in Agroforestry Practices in Southwest Nigeria. *Drvna Industrija*, 2009, vol. 60(4), pp. 209–218.
24. Friedl A., Padouvas E., Rotter H., Varmuza K. Prediction of Heating Values of Biomass Fuel from Elemental Composition. *Analytica Chimica Acta*, 2005, no. 544, pp. 191–198.
25. Gaur S., Reed T.B. *Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels*. New York, USA, 1998. 280 p.

26. Harker A.P., Sandels A., Burley J. Calorific Values for Wood and Bark and a Bibliography for Fuelwood. *Report No. G162. Tropical Products Institute*. London. UK, 1982. 20 p.
27. Hough W.A. Caloric Value of Some Forest Fuels of the Southern United States. *USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station. Research Note SE-120*. Asheville, NC, USA, 1969. 6 p.
28. Howard E.T. Heat of Combustion of Various Southern Pine Materials. *Wood Science*, 1973, vol. 5, no. 3, pp. 194–197.
29. Kumar N.J.I., Kumar R.N., Patel K., Kumar Bhoi R. An Assessment of Indian Fuel Wood with Regards to Properties and Environmental Impact. *Asian J. Energy and Environment*, 2009, vol. 10(2), pp. 99–107.
30. Lamers J.P.A., Khamzina A. Fuelwood Production in the Degraded Agricultural Areas of the Aral Sea Basin, Uzbekistan. *Bois et Forêts des Tropiques*, 2008, no. 297(3), pp. 47–57.
31. Nasser R.A., Aref I.M. Fuelwood Characteristics of Six Acacia Species Growing Wild in the Southwest of Saudi Arabia as Affected by Geographical Location. *BioResources*, 2014, no. 9(1), pp. 1212–1214.
32. Nunez-Requeira L., Rodriguez-Anon J.A., Proupn-Castineiras J., Vilanova-Diz A., Montero-Santovenia N. Determination of Calorific Values of Forest Waste Biomass by Static Bomb Calorimetry. *Thermochimica Acta*, 2001, vol. 371(1), pp. 23–31.
33. Puri S., Singh S., Bhushan B. Evaluation of Fuelwood Quality of Indigenous and Exotic Tree Species of India's Semiarid Region. *Agroforestry Systems*, 1994, vol. 26(2), pp. 123–130.
34. Reid A.M., Robertson K.M. Energy Content of Common Fuels in Upland Pine Savannas of the South-Eastern US and Their Application to Fire Behaviour Modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, vol. 21(5), pp. 591–595.
35. Senelwa K., Sims R.E.H. Fuel Characteristics of Short Rotation Forest Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 1999, vol. 17(2), pp. 127–140.
36. Sheng Ch., Azevedo J.L.T. Estimating the Higher Heating Value of Biomass Fuels from Basic Analysis Data. *Biomass and Bioenergy*, 2005, vol. 28(5), pp. 499–507.
37. Singh T., Kostecy M.M. Calorific Value Variations in Components of 10 Canadian Tree Species. *Can. J. For. Res.*, 1986, vol. 16(6), pp. 1378–1381.
38. Telmo C., Lousada J. Heating Values of Wood Pellets from Different Species. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35(7), pp. 2634–2639.
39. White R.H. Effect of Lignin Content and Extractives on the Higher Heating Value of Wood. *Wood and Fiber Science*, 1987, vol. 19(4), pp. 446–452.
40. Zeng W., Tang S., Xiao Q. Calorific Values and Ash Contents of Different Parts of Masson Pine Trees in Southern China. *Journal of Forestry Research*, 2014, vol. 25(4), pp. 779–786.

Received on September 09, 2016