

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА ПРИ ТОРРЕФИКАЦИИ

М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
ermochenkova@mgul.ac.ru

Торрефикация — это процесс низкотемпературного пиролиза древесины, используемый для улучшения свойств древесного топлива. Торрефицированное топливо имеет ряд преимуществ по сравнению с исходным. Термическая деструкция вызывает изменение массы и состава древесины с увеличением процентного содержания углерода, что приводит к увеличению теплоты сгорания (Q). Термодеструкция является многостадийным процессом. Степень разложения материала зависит от температуры, времени и кинетических параметров каждой стадии процесса. В статье приведены результаты исследования теплоты сгорания торрефицированной древесной биомассы и ее зависимость от степени термического разложения. Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Проверка работоспособности установки показала, что погрешность определения теплоты сгорания составляет около 2 %. Для проведения экспериментальных исследований зависимости теплоты сгорания от степени термической деструкции были подготовлены образцы древесины при ее неглубоком разложении. Термическая обработка образцов осуществлялась в среде инертного газа — гелия. Получены значения теплоты сгорания образцов древесного топлива с различной степенью термодеструкции. Предложена модель зависимости теплоты сгорания от относительной массы древесного топлива (ω). Приведены кинетические параметры многостадийного процесса термодеструкции в гелиевой среде для древесины сосны и березы. Представлена математическая модель, позволяющая определять относительную массу древесины как функцию температуры и времени. Получена в явном виде зависимость теплоты сгорания от ω .

Ключевые слова: торрефикация, теплота сгорания, термическая деструкция, кинетические параметры

Ссылка для цитирования: Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Изменение теплоты сгорания древесного топлива при торрефикации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 64–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-64-68

Древесное биотопливо находит все более широкое применение при производстве тепловой энергии. К такому топливу можно отнести и торрефицированную древесину.

Торрефикация является видом термического модифицирования древесины. Это процесс низкотемпературного пиролиза древесных материалов, используемых для производства топливных пеллет. Тепловая обработка проводится для улучшения свойств получаемого биотоплива [1, 2].

К преимуществам модифицированных пеллет по сравнению с древесной биомассой можно отнести:

- более высокое содержание углерода в единице количества топлива;
- более высокую теплоту сгорания;
- возможность производства топлива с определенной теплотой сгорания;
- снижение выхода вредных веществ, в том числе оксида азота, тяжелых металлов, оксида серы и т. п.;
- высокую однородность получаемого топлива;
- снижение равновесной влажности;
- повышение стойкости к биологическому поражению;
- увеличение насыпной плотности и, как следствие, снижение логистических затрат на единицу количества получаемой теплоты;

— отсутствие проблемы спекания топлива в топках котлов.

В табл. 1 приведены данные по отдельным характеристикам древесной щепы, традиционных и торрефицированных пеллет [3].

Конкретные значения показателей свойств торрефицированного биотоплива зависят от породы древесины, интенсивности и времени термического воздействия, т. е., от степени термической деструкции. В связи с этим стоит задача определения зависимости степени термического разложения материала от температуры и времени нагрева, а также зависимости свойств торрефицированных пеллет от степени деструкции.

Результаты исследования

Результаты исследования кинетики термической деструкции различных пород древесины приведены в работах [4–7]. Термическое разложение рассматривается как многостадийный процесс. Кинетические параметры деструкции древесины сосны и березы приведены в табл. 2.

Относительная масса образца может быть определена из соотношения [8–10]

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \exp \left[-A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left(-\frac{E_{\gamma}}{RT} \right) dt \right], \quad (1)$$

где γ — номер стадии;

ω_0 — начальная масса стадии;

Т а б л и ц а 1

**Сравнение отдельных характеристик древесной щепы,
традиционных и торрефицированных пеллет**
The comparison of the individual characteristics of wood chips, traditional pellets and torrefied ones

Характеристики	Древесная щепа	Обычные древесные пеллеты	Торрефицированные древесные пеллеты
Низшая теплота сгорания (в зависимости от влажности и вида древесины), МДж/кг	7,4–11,4	17–18	21–22
Влажность, %	30–50	< 10	< 1
Плотность, кг/м ³	250–400	650	900
Энергетическая плотность, кВт/м ³	815	3150	5085

Т а б л и ц а 2

Кинетические параметры термической деструкции древесины в гелии
Kinetic parameters of thermal degradation of timber in helium

Номер стадии	Береза			Сосна		
	Начальная масса стадии ω_0	Энергия активации E/R , К	Частотный фактор A , с ⁻¹	Начальная масса стадии ω_0	Энергия активации E/R , К	Частотный фактор A , с ⁻¹
1	0,164	21 274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13 941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26 006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19 460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17 997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17 991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5 823	10,448	0,134	8 535	571
5	0,195	10 049	500,765	0,160	11 793	$3,005 \cdot 10^3$

A — предэкспоненциальный множитель (частотный фактор), с⁻¹;

E/R — энергия активации реакции, К;

T — температура, К;

τ — время воздействия, с.

Для исследования теплоты сгорания древесины и ее изменения при термической обработке разработана и изготовлена экспериментальная установка. Схема установки приведена на рис. 1. Она состоит из медного цилиндра 1, в верхней части цилиндра находится дросселирующая и экранирующая набивка 10 из медной проволоки. Проволока служит для уменьшения скорости конвективного переноса внутри цилиндра и интенсификации теплообмена с продуктами горения топлива. Образец топлива 3 подвешивается на выдвижной штанге 11. Поджиг древесины осуществляется вне установки, а затем штанга с образцом поднимается внутрь цилиндра, где и происходит горение. Теплота от продуктов горения передается стенкам и медной проволоке. Температура медного цилиндра измеряется хромель-копелевой термопарой 6 с выводом информации на записывающее устройство. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду медный цилиндр помещают внутри алюминиевого цилиндра 2. Равномерность зазора между цилиндрами обеспечивают фторопластовые кольца 9. Для интенсификации процесса горения

и уменьшения потерь от неполноты сгорания в зону горения подается небольшое количество кислорода через патрубок 4 от баллона 5, находящегося за внешней стеной 7 лаборатории.

Горение образца топлива приводит к изменению температуры установки. Масса установки

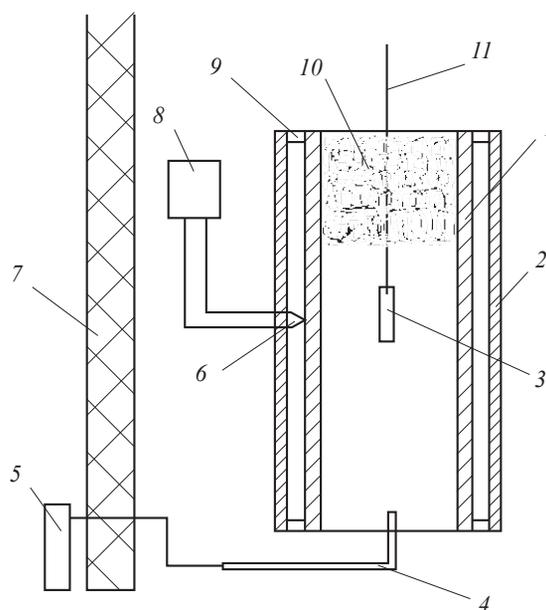


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты сгорания топлива

Fig. 1. Apparatus to determine combustion heat

Т а б л и ц а 3

Зависимость теплоты сгорания от степени термической деструкции
The results of studying the calorific value depending on the degree of thermal degradation

	Относительная масса летучих в древесине ω	Относительная влажность образца, %	Средняя теплота сгорания, МДж/кг
Исходная древесина	1	10	17,8
Выход стадии I-1	0,991	6	18,1
Выход стадии I-2	0,985	6	17,9
Выход стадии II-1	0,902	5	19,1
Выход стадии II-2	0,895	5	19,3
Выход стадии III	0,68	4	20,6
Выход 60 % летучих	0,40	–	23,1
Древесный уголь	0,0	–	28,9

составляет 233 г. Количество теплоты на нагрев установки определяется из соотношения

$$Q_y = m_y c_y \Delta T_y,$$

где m_y — масса экспериментальной установки, кг;
 c_y — теплоемкость материала установки, Дж/(кгК);

ΔT_y — изменение температуры установки.

Так как масса образца $m_o \approx 50$ мг, горение топлива не приводит к значительному увеличению температуры установки, $\Delta T_y \approx 10$ К. Время процесса горения $\Delta t \approx 10 \dots 15$ с. Все это способствует тому, что потери теплоты за счет излучения и конвекции с поверхности внешнего цилиндра не превышают 0,002 % от общего количества выде-

лившейся теплоты Q . Температура продуктов горения на выходе из путанки из медной проволоки в верхней части установки равна температуре внутреннего цилиндра потому, что потери теплоты с уходящими газами не превышают 2,5 % от Q . В этом случае, пренебрегая потерями, можно допустить, что $Q = Q_y$.

Была проведена экспериментальная проверка работоспособности изготовленной установки. Для этого вместо образца устанавливали спираль электрического нагревателя и определяли количество выделившейся теплоты. Экспериментально установлено, что относительная погрешность определения количества подведенной теплоты $\delta = 2$ %.

Для определения зависимости теплоты сгорания древесины от степени термической деструкции был проведен непродельный отжиг образцов древесины сосны. Нагрев проводили в среде инертного газа гелия до выхода различного количества летучих — от 0 до 100 %. После термической обработки определяли теплоту сгорания. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

На рис. 2 приведен график изменения теплоты сгорания древесного топлива (Q) от степени термической деструкции (относительной массы ω). Исходя из экспериментальных данных получено уравнение зависимости Q от ω :

$$Q = 28,26 - 10,45\omega, \text{ МДж/кг.} \quad (2)$$

На графике сплошная линия соответствует расчету по уравнению (2), точки — средние экспериментальные значения.

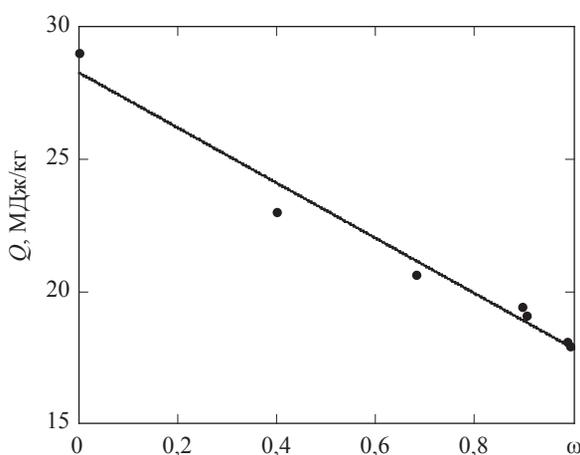


Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания от относительной массы летучих в древесине

Fig. 2. The dependence of the calorific value on the volatile substance relative weight in wood

Выводы

Таким образом, полученное соотношение удовлетворительно описывает зависимость теплоты сгорания древесного топлива от степени торрефикации. Для прогнозирования значения Q топлива после термообработки необходимо знать поле значений температуры. Если известны температура, время нагрева и кинетические параметры термической деструкции, по уравнению (1) может быть рассчитано изменение относительной массы древесины, а по уравнению (2) — ее теплота сгорания.

Список литературы

- [1] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 312 с.
- [2] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю., Оладьшкина Н.А. Термомодифицирование древесины в среде топочных газов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 115–119.
- [3] Передерий С. Какие pellets лучше: черные или белые? СПб.: ЛесПромИнформ, 2012. № 3 (85). С. 158–164.
- [4] Ермоченков М.Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. М.: МГУЛ, 2014. Вып. 370. С. 113–118.
- [5] Ермоченков М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 111–115.
- [6] Ермоченков М.Г. Внутренние источники теплоты и массы в древесине при термическом модифицировании // 14-й Минский Междунар. форум по теплообмену. Минск, 2012.
- [7] Кувик Т.Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термомодифицированной древесины // 4-я Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ». М.: МГАУ, 2011. Т. 2. С. 144–148.
- [8] Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.
- [9] Жигунов С.В. Теплообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУЛ, 1990. 184 с.
- [10] Венгер А.Е., Фрайман Ю.Е. Исследование кинетики процессов термического разложения полимерных материалов посредством термогравиметрического анализа // ИФЖ, 1981. Т. 40. № 2. С. 278–287.

Сведения об авторах

Ермоченков Михаил Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

Евстигнеев Алексей Георгиевич — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: evstigneev@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2016 г.

CHANGES OF THE CALORIFIC VALUE OF WOOD FUEL AFTER TORREFACTION

M.G. Ermochenkov, A.G. Evstigneev

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya,
141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

ermochenkov@mgul.ac.ru

Torrefaction is the process of low-temperature pyrolysis of wood, used to improve the properties of wood fuel. Torrefied fuel has a number of advantages as compared to the original one. Thermal degradation causes a change in wood mass and its composition with the carbon percentage increased which results in increasing a calorific value Q . Thermodestruction is a multistage process. The degree of the material decomposition depends on temperature, time and the kinetic parameters of each stage of the process. The results of studying the calorific value of torrefied wood biomass and its dependence on the degree of thermal expansion have been given in this article. To carry out the experimental studies, the experimental plant has been designed and built. The experimental verification of installation performance showed that the error in determining the calorific value of wood fuel is about 2 %. To carry out the experimental studies of the calorific value depending on the degree of thermal degradation, some wood samples were pre-processed under their limited deterioration conditions. The thermal treatment of the samples was carried out in an inert gas helium chamber. Different calorific values of the fuel wood samples depending on various degrees of thermal degradation have been determined. A model of the calorific value depending on the relative weight of wood fuel ω has been suggested. The kinetic parameters of multi-stage thermal degradation

process in helium environment for pine and birch are given. A mathematical model allowing to determine the relative weight of the timber as a function of temperature and time has been developed. There has been obtained the dependence of the calorific value on ω in an explicit form.

Keywords: torrefication, a calorific value, thermal degradation, kinetic parameters

Suggested citation: Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G. *Izmenenie teploty sgoraniya drevesnogo topliva pri torrefikatsii* [[Changes of the calorific value of wood fuel after torrefication]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 64–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-64-68

Reference

- [1] Kislitsin A.N. *Piroliz drevesiny: himizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of Wood: chemistry, kinetics, products, new processes], Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1990, 312 p. (in Russian)
- [2] Safin R.R. *Termomodifitsirovanie drevesiny v srede topochnykh gazov* [Thermal modification of wood in the flue gas environment], *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, no. 4 (73), 2010, pp. 115-119. (in Russian)
- [3] Perederiy S. *Kakie pellety luchshe: chernye ili belye?* [What better pellets: black or white?]. SPb.: Lesprominform Publ., 2012, pp. 158-164. (in Russian)
- [4] Ermochenkova M.G. *Kinetika termicheskoy destruktivnoy drevesiny v srede inertnykh gazov* [Kinetics of thermal degradation of wood in inert gases]. *Tehnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny* [Scientific works], 2014, no. 370, pp. 113-118. (in Russian)
- [5] Ermochenkova M.G. *Prognozirovanie svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Predicting the properties of thermally modified wood]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoi Vestnik*, 2010, № 4 (73), pp. 111-115. (in Russian)
- [6] Ermochenkova M.G. *Vnutrennie istochniki teploty i massy v drevesine pri termicheskom modifitsirovanii* [Internal sources of heat and mass in the wood during the thermal modification]. 14-th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer, Minsk, 2012. (in Russian)
- [7] Kuvik T.E. *Kinetika termicheskoy destruktivnoy drevesiny v prilozhenii k prognozirovaniyu svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny* [Kinetics of thermal degradation of wood in the annex to predict the properties of wood thermomodified]. *4 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennye energoberegayushye teplovye tehnologii (sushka u termovlazhnostnaya obrabotka materialov) SETT"* [The Fourth International scientific-practical conference «Modern energy-saving heat technology (drying and hydrothermal treatment of materials) SETT»], Moscow, 2011, t. 2, pp. 144-148. (in Russian)
- [8] Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovoy zashity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem* Diss. dokt. tekhn. nauk [Energy and mass transfer in thermal protection materials reusable space-rocket systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1990. (in Russian)
- [9] Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestruktivnoy pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov*. Diss. cand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation at high temperature composite materials. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1990. (in Russian)
- [10] Venger A.E., Frayman U.E. *Issledovanie kinetiki protsessov termicheskogo razlozheniya polimernykh materialov posredstvom termogravimetricheskogo analiza* [Investigation kinetics of thermal decomposition of polymeric materials by TGA]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1981, v. 40, no. 2, pp. 278-287. (in Russian)

Author's information

Ermochenkova Mikhail Gennad'evich — Cand. Sci. (Tech.) Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru

Evstigneev Aleksey Georgievich — Head. of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: evstigneev@mgul.ac.ru

Received 26.12.2016