

ГОРЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИГНИНОСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ

О. А. Алексеев, М. Э. Шамсутдинов, Ф. Х. Кутышев*, А. В. Косточко*

Федеральный НПЦ «Государственный институт прикладной оптики», 420075 Казань

*Казанский государственный технологический университет, 420015 Казань

Приведены результаты исследований процесса горения брикетных топлив, созданных на основе использования устаревшего артиллерийского пороха и лигнина. Определены температуры диффузионного пламени факела и кокса брикетных топлив, а также линейные скорости факельной и бесфакельной стадий горения. Предложена модель и приведены результаты расчета лучистой составляющей в общем балансе теплоты сгорания лигниносодержащих топлив.

Лигнин является углеводом, образующимся в процессе жизнедеятельности клетки зеленого растения [1]. Природным лигниносодержащим топливом является древесина. Содержание лигнина в древесине лиственных пород достигает 15 %, а в древесине хвойных пород оно колеблется от 26 до 29 % [2].

В настоящей работе описана методика и представлены результаты исследования процесса горения древесины и искусственных (брикетных) лигниносодержащих топлив, представляющих собой прессованную смесь лигнина (являющегося отходом производства целлюлозы из древесины), устаревшего артиллерийского пороха и технологических добавок. Эти топлива разработаны Казанским государственным технологическим университетом в рамках программ конверсии и экологии (отвалы лигнина отрицательно влияют на экологическую обстановку прилегающих территорий целлюлозных комбинатов). В работе рассмотрена также модель лучистой составляющей в общем балансе теплоты сгорания лигниносодержащих топлив.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЛИГНИНОСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ

В экспериментах использовались образцы, изготовленные из сухой древесины сосны (основные результаты исследований процесса ее горения изложены в [3]) и трех марок брикетных топлив (их компонентный состав и плотность см. в табл. 1). Образцы брикетных топлив имели форму таблеток диаметром 30 мм и высотой 10 мм. Образцы сжигали в неподвижном воздухе при давлении, равном 1 атм. Поджигали их пламенем спички. Горящие образцы

фиксируют в воздухе с помощью проволочного держателя.

Для исследований использовалась следующая аппаратура: сканирующий по длинам волн спектрометр, чувствительный в области $1 \div 5,5$ мкм; не сканирующий по длинам волн многоканальный спектрорадиометр, чувствительный в области $0,4 \div 5,5$ мкм, рабочие спектральные диапазоны каналов которого лежали в окнах прозрачности атмосферы, а ширина каналов увеличивалась с длиной волны излучения [4]; сигналы спектральных приборов регистрировались светолучевым осциллографом.

Спектрометр использовался для определения спектров силы излучения образцов при стационарном режиме горения, а многоканальный спектрорадиометр — также для определения временной характеристики силы излучения. Приборы располагались относительно горящего образца на таком расстоянии, при котором образец и его факел полностью вписывались в их поле зрения.

Выходные сигналы спектрометра и спектрорадиометра градуировались в единицах спектральной плотности энергетической облученности [5]. В качестве градуировочного источника в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра использовалась лампа СИ-10-300, а в среднем ИК-диапазоне — черное тело при температуре 573 К.

По выходным сигналам приборов определяли значение спектральной плотности силы излучения горящего образца топлива I_λ на длине волны λ по формуле

$$I_\lambda = L_{\lambda,r} F_r N b^2 / N_r b_r^2, \quad (1)$$

где $L_{\lambda,r}$ — спектральная плотность энергетиче-

Таблица 1

Состав и плотность брикетных топлив

Марка топлива	Плотность, г/см ³	Компонентный состав, %	Элементный состав	
1084-T	1,29	Лигнин	50,74	
		Порох НДТ-3	40,94	$\varphi_C = 0,504$
		Дибутилфталат	4,95	$\varphi_H = 0,054$
		Индустриальное масло	0,97	$\varphi_O = 0,38$
		Парафин	1,43	$\varphi_N = 0,052$
		Стиральный порошок	0,97	
1088-T	1,22	Лигнин	58,5	
		Порох НДТ-3	33,2	$\varphi_C = 0,53$
		Дибутилфталат	4,95	$\varphi_H = 0,055$
		Индустриальное масло	1,43	$\varphi_O = 0,36$
		Парафин	0,97	$\varphi_N = 0,045$
		Стиральный порошок	0,97	
1125-T	1,21	Лигнин	50	
		Порох НДТ-3	17,9	$\varphi_C = 0,53$
		Дибутилфталат	15	$\varphi_H = 0,056$
		Колоксилиновый лак	15	$\varphi_O = 0,362$
		Парафин	1	$\varphi_N = 0,042$
		Стиральный порошок	1	

ческой яркости градуировочного источника на длине волны λ ; F_r — площадь излучающей поверхности градуировочного источника; N — выходной сигнал прибора, визирующего горящий образец топлива, а N_r — прибора, визирующего градуировочный источник; b — расстояние между прибором и горящим образцом топлива, а b_r — между прибором и градуировочным источником излучения. Относительная погрешность определения I_λ по формуле (1), как показал расчет [6], не превышала 0,2.

Анализ результатов настоящих исследований показал, что процесс горения брикетных топлив подобен процессу горения древесины [3] и состоит из двух стадий — факельной и бесфакельной. В течение факельной стадии горения протекают следующие физико-химические процессы:

- газификация брикетного топлива или разложение его на летучие продукты газификации (ЛПГ) и кокс, представляющий собой твердое пористое вещество, состоящее из углерода и зольных элементов [7];
- воспламенение ЛПГ и превращение их в пламя ЛПГ, где протекают химические реакции, окислителем в которых является кислород ЛПГ;
- смешение компонентов пламени ЛПГ и воздуха с образованием диффузионного

пламени, где протекают химические реакции, окислителем в которых служит кислород воздуха.

Газификация брикетных топлив (в отличие от древесины) происходит нестационарно из-за неоднородности их состава. Эта нестационарность процесса выражается в образовании отдельных языков пламени, направленных в разные стороны, и в низкочастотных пульсациях излучения факела.

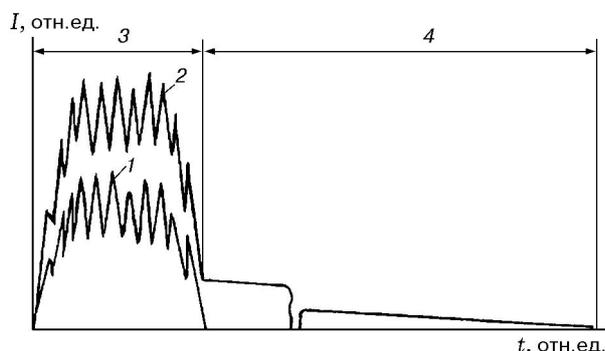
Бесфакельная стадия горения брикетных топлив, как и древесины, протекает без видимых эффектов и заключается в окислении углерода, расположенного на поверхности кокса, кислородом воздуха. При этом масса и линейные размеры кокса монотонно уменьшаются при сохранении конфигурации кокса, которая аналогична конфигурации сжигаемого образца топлива. Бесфакельная стадия горения топлива завершается распадом кокса — превращением его в золу.

Масса кокса образца m_c равна

$$m_c = m\varphi_c, \quad (2)$$

где m — масса образца топлива; φ_c — массовая доля выхода кокса.

Значение φ_c определялось методом взвешивания образца топлива до начала его горения (m) и в момент исчезновения пламени (m_c), регистрируемого визуально.



Временные характеристики спектральной плотности силы излучения горящего образца брикетного топлива в видимом (1) и в ИК-диапазонах (2) спектра:

3, 4 — длительности стадий факельного и бесфакельного горения образца топлива

В течение факельной стадии горения образца топлива значение его СПСИ равно сумме двух составляющих:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,f} + I_{\lambda,c}. \quad (3)$$

Значение $I_{\lambda,f}$ обусловлено факелом, а $I_{\lambda,c}$ — коксом образца.

На рисунке показаны зависимости $I(t)$ горящего образца брикетного топлива в видимом диапазоне спектра ($\lambda = 0,5$ мкм, $\Delta\lambda = 0,02$ мкм) и ИК-диапазоне ($\lambda = 4,6$ мкм, $\Delta\lambda = 0,2$ мкм). Из рисунка видно, что зависимости $I(t)$ факела и кокса различаются качественно и количественно, причем в видимом диапазоне спектра значение $I_{\lambda,c}$ меньше порога чувствительности аппаратуры.

По временной характеристике СПСИ горящего образца в ИК-диапазоне спектра определялись значения длительностей стадий факельного (t_f) и бесфакельного (t_c) горения, которые затем использовались для определения средних значений скоростей газификации топлив U_g и горения кокса U_c с помощью формул

$$U_g = 0,5\delta/t_f, \quad (4)$$

$$U_c = 0,5\delta_c/t_c, \quad (5)$$

где δ — высота сжигаемого образца топлива; δ_c — высота кокса образца в момент завершения факельной стадии горения.

Температура поверхности кокса T_c определяли по значениям $I_{\lambda,c}$ в бесфакельной стадии горения образца. Для этого использовалось соотношение

$$I_{\lambda,c} = L_{\lambda,c}\varepsilon_c(\lambda)F_c, \quad (6)$$

где $L_{\lambda,c}$ — спектральная плотность энергетической яркости черного тела при температуре поверхности кокса; $\varepsilon_c(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения кокса (принятый равным 0,8 [7]); F_c — площадь проекции кокса на плоскость, нормальную линии его визирования (для точного определения значения F_c использовался экран с калиброванным отверстием).

Температуру диффузионного пламени T_f определяли по измеренным в один и тот же момент времени значениям $I_{\lambda,f}(\lambda_1)$ и $I_{\lambda,f}(\lambda_2)$ факела на двух длинах волн λ_1 и λ_2 видимого диапазона спектра в предположении, что излучение факела обусловлено сажей диффузионного пламени, частицы которой состоят из углерода и водорода [8]. При этом использовалось приближение оптически тонкого диффузионного пламени $I_{\lambda,f}$ (поглощение в котором пренебрежимо мало [9]) в виде

$$I_{\lambda,f} = L_{\lambda,f}m_fq_f(\lambda). \quad (7)$$

Значение $L_{\lambda,f}$ соответствует черному телу при температуре диффузионного пламени; m_f — масса диффузионного пламени; $q_f(\lambda)$ — удельный спектральный показатель поглощения диффузионного пламени, равный [3]

$$q_f(\lambda) = \sum_i q_i(\lambda)\varphi_f(i), \quad (8)$$

где $q_i(\lambda)$ — удельный спектральный показатель поглощения i -го компонента при температуре диффузионного пламени; $\varphi_f(i)$ — массовая доля i -го компонента в диффузионном пламени.

Определение T_f проводилось с помощью табличной функции $L_{\lambda,f}(\lambda_1)q_c(\lambda_1)/L_{\lambda,f}(\lambda_2)q_c(\lambda_2)$ и вытекающего из уравнения (7) соотношения

$$\frac{I_{\lambda}(\lambda_1)}{I_{\lambda}(\lambda_2)} = \frac{L_{\lambda,f}(\lambda_1)q_c(\lambda_1)}{L_{\lambda,f}(\lambda_2)q_c(\lambda_2)}, \quad (9)$$

где $L_{\lambda,f}(\lambda_1)$, $L_{\lambda,f}(\lambda_2)$ — спектральная плотность энергетической яркости черного тела при температуре диффузионного пламени на длинах волн λ_1 и λ_2 ; $q_c(\lambda_1)$, $q_c(\lambda_2)$ — удельный спектральный показатель поглощения сажи на длинах волн λ_1 и λ_2 .

Результаты определения температуры и средних значений скоростей горения исследованных марок брикетных топлив приведены

Таблица 2
 Параметры горения брикетных топлив

Марка топлива	U_g , см/с	U_c , см/с	T_f , К	T_c , К
1084-Т	0,05	0,0011	1900	960
1088-Т	0,04	0,0012	1880	960
1125-Т	0,048	0,0011	1750	940

в табл. 2. Сравнение данных табл. 2 с результатами исследования горения древесины [3] показывает, что температуры диффузионного пламени, а также поверхности кокса брикетных топлив и древесины практически одинаковы. Для брикетных топлив характерны большие значения скорости газификации и меньшие значения скорости горения кокса.

При сжигании образцов древесины исследовалась зависимость длительности пребывания элементов лигниносодержащего топлива в диффузионном пламени факела (D) от массового расхода ЛПГ. Значение этого параметра определяли при стационарном режиме газификации образца по уравнению

$$D = m_{\text{CO}_2} / \varphi_{\text{C}} \Pi_{\text{C}} G. \quad (10)$$

Здесь m_{CO_2} — масса диоксида углерода в диффузионном пламени; φ_{C} — массовая доля углерода в ЛПГ; Π_{C} — стехиометрический коэффициент окисления углерода; G — массовый расход ЛПГ древесины, равный

$$G = \rho S_g U_g (1 - \varphi_c), \quad (11)$$

где ρ — плотность древесины; S_g — площадь поверхности фронта газификации древесины; U_g — скорость газификации древесины.

Значение m_{CO_2} находили по измеренному значению спектральной плотности силы излучения факела образца на длине волны λ_2 , лежащей на длинноволновом склоне полосы излучения диоксида углерода $I_{\lambda}(\lambda_3)$, где факел и входящие в его состав пламена ЛПГ и диффузионное являются оптически тонкими:

$$m_{\text{CO}_2} = I_{\lambda}(\lambda_3) / L_{\lambda,f}(\lambda_3) q_{\text{CO}_2}(\lambda_3). \quad (12)$$

Здесь значение $L_{\lambda,f}(\lambda_3)$ соответствует черному телу при температуре диффузионного пламени на длине волны λ_3 ; $q_{\text{CO}_2}(\lambda_3)$ — удельный спектральный показатель поглощения диоксида углерода на длине волны λ_3 .

Исследования показали, что $D = 0,05$ с при $G < 30$ мг/с, когда излучение факела не пульсирует [3]. При больших значениях G , когда излучение факела пульсирует, а сам факел состоит из двух участков — стационарного и нестационарного, длительность пребывания элементов лигниносодержащего топлива в диффузионном пламени факела уменьшается. Когда вклад от нестационарного участка в силу излучения факела становится определяющим, значение D составляет 0,03 с.

РАСЧЕТ ЛУЧИСТОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ЛИГНИНОСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВ

В соответствии с результатами экспериментальных исследований значение лучистой составляющей удельной теплоты сгорания лигниносодержащих топлив Q можно представить как сумму двух составляющих:

$$Q = Q_f + Q_c, \quad (13)$$

где значение Q_f обусловлено излучением факела, а Q_c — излучением кокса.

Для определения Q_f и Q_c воспользуемся следующими допущениями:

- горящий образец топлива имеет форму шара радиусом r ;
- излучение пламени ЛПГ факела горящего образца топлива пренебрежимо мало по сравнению с излучением диффузионного пламени, который является оптически тонким;
- экранирование факела коксом пренебрежимо мало.

Спектральная плотность силы излучения оптически тонкой однородной по составу термодинамической системы практически не меняется при изменении угла ее визирования. Поэтому при принятых допущениях значение Q_f в общем случае описывается уравнением

$$Q_f = \frac{4\pi}{m(1 - \varphi_c)} \int_0^{t_f} \int_0^{\infty} I_{\lambda,f}(t) dt d\lambda, \quad (14)$$

где значение $I_{\lambda,f}(t)$ соответствует диффузионного пламени факела.

При стационарном режиме газификации, когда массовый расход ЛПГ топлива равен произведению $(1 - \varphi_c)$ на один грамм в секунду, уравнение (14) (с учетом (8)) принимает вид

$$Q_f = \frac{4\pi}{m(1 - \varphi_c)} D \int_0^{\infty} I_{\lambda,f} q_{\lambda,f} d\lambda. \quad (15)$$

Значение спектральной плотности силы излучения твердого тела, имеющего форму шара, не меняется при изменении угла его визирования. Поэтому при принятых допущениях для образца топлива массой 1 г выражение для Q_c имеет вид

$$Q_c = 4\pi^2 \varepsilon_c \int_0^t r_c^2(t) dt \int_0^{\infty} L_{\lambda,c} d\lambda, \quad (16)$$

где t — длительность горения топлива, равная сумме t_f и t_c . Подобно t значение Q_c равно сумме двух составляющих:

$$Q_c = Q_{c,1} + Q_{c,2}, \quad (17)$$

где $Q_{c,1}$ — составляющая Q_c , образующаяся в течение факельной стадии горения топлива; $Q_{c,2}$ — составляющая Q_c , образующаяся в течение бесфакельной стадии горения топлива.

Выражение для $Q_{c,1}$ получим с использованием среднего за период факельного горения радиуса образца кокса, равного $0,9r$.

Значение радиуса топлива, масса которого равна 1 г, определяется выражением

$$r = \left(\frac{4\pi\rho}{3} \right)^{-1/3}, \quad (18)$$

а длительность факельной стадии горения такого образца равна

$$t_f = \left(\frac{4\pi\rho}{3} \right)^{-1/3} \frac{1}{U_g}. \quad (19)$$

Из уравнений (16)–(19) получаем

$$Q_{c,1} = \frac{2,7\pi\varepsilon_c}{U_g\rho} \int_0^{\infty} L_{\lambda,c} d\lambda. \quad (20)$$

Аналогично выводится выражение

$$Q_{c,2} = \frac{\pi\varepsilon_c}{U_c\rho_c} \int_0^{\infty} L_{\lambda,c} d\lambda, \quad (21)$$

где $\rho_c = \rho\varphi_c/\beta^3$ — плотность кокса, $\beta \approx 0,8$ — эмпирический коэффициент.

Расчет Q для древесины сосны дал следующие результаты: $Q_f = 0,6$ кДж/кг, $Q_{c,1} = 0,8$ кДж/кг, $Q_{c,2} = 1,8$ кДж/кг, $Q = 3,2$ кДж/кг. Отметим, что вклад факела в лучистую составляющую удельной теплоты сгорания древесины не превышает 20 %. Полное значение лучистой составляющей удельной теплоты сгорания древесины составляет 16 % от удельной теплоты сгорания древесины, найденного калориметрическим методом (19,8 кДж/г [2]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гэнстон А., Девис П., Сэттер Р. Жизнь зеленого растения. М.: Мир, 1983.
2. **Справочник химика**. Л.: Химия, 1967. Т. 6.
3. Алексеев О. А., Шамсутдинов М. Э., Давлетшин Х. З. Определение параметров горения древесины посредством спектрометрических // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 28–33.
4. Шамсутдинов М. Э., Алексеев О. А. Аппаратура и методика определения спектральных параметров пульсирующих источников излучения // Опт. журн. 1998. Т. 65, № 1. С. 88–90.
5. **Международный светотехнический словарь** / Под ред. Д. Н. Лазарева. 3-е изд. М.: Русский язык, 1979.
6. Зайдель А. Н. Погрешность измерений физических величин. Л.: Наука, 1985.
7. Конев Э. Ф. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 75.
8. **Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив** / Ф. Г. Бакиров и др. М.: Машиностроение, 1989. С. 10.
9. Шорин С. Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1964.

Поступила в редакцию 24/IV 1995 г.,
в окончательном варианте — 4/IV 2000 г.