

13. Kashporov L.Ya., Sheludyak Yu.e., Marshakov V.N. et al. Generalized law of nitroglycerol powder burning // Internat. conferences on combustion. Book of Abstracts. — M.: St. Peterzsburg, 1993, p. 14—15.
14. Плясунов М.С. Исследование влияния начальной температуры на скорость горения взрывчатых веществ: Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1963. — 174 с.
15. Беляев А.Ф. Механизм горения взрывчатых веществ: Дис. ... докт. физ. мат. наук. — М.: ИХФ АН СССР, 1946. — 211 с.
16. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. Теория теплового распространения пламени // ЖФХ. — 1938. — 12, № 1. — С. 100—105.
17. Беляев А.Ф., Лукашеня Г.В. Об эффективной температуре горения некоторых взрывчатых веществ // ПМТФ. — 1963. — № 6. — С. 114—119.
18. Марголин А.Д., Нефедова О.И., Похил П.Ф. О зависимости скорости горения различных горючих систем от начальной температуры // Там же. — 1964. — № 3. — С. 149—153.
19. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. — М.: Наука, 1968. — 255 с.

141300, г. Загорск,
НИИ прикладной химии

Поступила в редакцию 15/1 1992,
после доработки — 21/X 1993

УДК 542.5:535.214.4

О.А. Алексеев, М.Э. Шамсутдинов, Х.З. Давлетшин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПОСРЕДСТВОМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ

Описан комплекс спектрометрической аппаратуры, позволяющей определить изменение излучения объектов по длинам волн, во времени и пространственным координатам. Приведены результаты определения линейной скорости горения древесины, температуры и концентрации в пламени сажи, а также некоторых других параметров горения древесины.

Горение древесины — многостадийный физико-химический процесс, протекающий как в твердой, так и в газовой фазах. Он включает газификацию, при которой наружный слой образца разлагается на летучие продукты и твердый углистый остаток, состоящий в основном из углерода, а также диффузионное горение, в результате которого на границе летучих продуктов газификации и воздуха образуется пламя [1, 2].

Параметры процесса горения обычно определяются с использованием контактных датчиков. В данной работе для этой цели применен комплекс спектрометрической аппаратуры.

В экспериментах сжигались образцы, изготовленные из высушенной древесины сосны, плотность которой $0,35 \text{ г/см}^3$. Образцы имели форму параллелограмма с нижней гранью $50 \times 5 \text{ мм}$, а высота менялась в пределах $4—20 \text{ мм}$. Образцы поджигались пламенем спички по нижней грани. В дальнейшем процесс протекал под действием нагрева образца от собственного пламени и был нестационарным. При этом менялись во времени площадь воспламененной поверхности образца F_d и массовый расход древесины

$$G_d(t) = (1 - \psi_{y0})\rho_d F_d(t)u_d, \quad (1)$$

где ψ_{y0} — массовый выход углистого остатка (отношение массы углистого остатка в конце газификации образца к начальной массе образца); ρ_d , u_d — плотность и линейная скорость горения древесины.

Образцы сжигали в неподвижном воздухе, поэтому образующееся при горении диффузионное пламя было плоским и направленным вертикально вверх. После разгорания большая часть пламени располагалась над образцом (рис. 1).

Спектральная плотность силы излучения I_λ и энергетической яркости L_λ в данном случае равны сумме двух составляющих, одна из которых

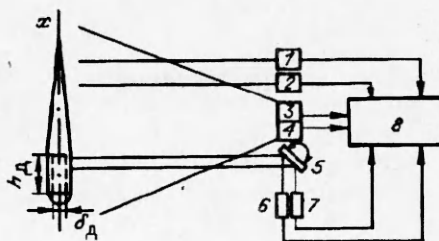
© О.А. Алексеев, М.Э. Шамсутдинов, Х.З. Давлетшин, 1994.

Рис. 1. Схема исследования параметров горения древесины.

обусловлена углистым остатком образца ($I_{\lambda_y}, L_{\lambda_y}$), а вторая — диффузионным пламенем ($I_{\lambda_{пл}}, L_{\lambda_{пл}}$):

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_y} + I_{\lambda_{пл}},$$

$$L_{\lambda} = L_{\lambda_y} + L_{\lambda_{пл}}.$$



Значения I_{λ} и L_{λ} определялись по схеме, показанной на рис. 1. Величина I_{λ} находилась с использованием широкопольных приборов, в поле зрения которых вписывался весь источник — спектрометра 3, работающего в спектральном диапазоне 2,0—5,0 мкм, и многоканального радиометра 4, центральная длина волны и ширина рабочего спектрального диапазона каналов которого имели значения 0,4 (0,02), 0,5 (0,02), 0,6 (0,02), 0,8 (0,02), 1,0 (0,04) и 1,6 (0,05) мкм.

Градуировка этих приборов производилась по облученности в соответствии с уравнением

$$N = E_{\lambda} W, \quad (2)$$

где N — выходной сигнал прибора; W — определяемый при градуировке коэффициент пропорциональности; E_{λ} — спектральная плотность облученности чувствительной площадки приемника, в окнах прозрачности атмосферы определяемая уравнением

$$E_{\lambda} = I_{\lambda} / l^2, \quad (3)$$

где l — расстояние между прибором и источником излучения. Величина I_{λ} вычислялась с помощью вытекающей из (2) и (3) формулы

$$I_{\lambda_{и}} = I_{\lambda_{г}} \frac{N_{и} l_{и}^2}{N_{г} l_{г}^2}, \quad (4)$$

где индексом и обозначены величины при измерении, а г — градуировке.

Поля яркости системы определялись с помощью четырех узкопольных радиометров, угол поля зрения которых был много меньше углового размера источника. Градуировка узкопольных радиометров (см. рис. 1, 1, 2, 6, 7) производилась по яркости в соответствии с уравнением

$$N = L_{\lambda} W, \quad (5)$$

а значения L_{λ} находим с помощью вытекающей из (5) формулы

$$L_{\lambda_{и}} = L_{\lambda_{г}} N_{и} / N_{г}. \quad (6)$$

Центральная длина волны и ширина спектрального диапазона радиометра 6 были равны 1,0 и 0,04 мкм, а радиометра 7 — 4,3 и 0,3 мкм соответственно. Благодаря угловому сканированию зеркала 5 поля зрения этих радиометров сканировали вдоль оси пламени источника x .

Радиометры 6 и 7, центральная длина волны и ширина спектрального диапазона которых были одинаковыми и равными 1,0 и 0,04 соответственно, наводились на различные участки пламени и фиксировались неподвижно.

Все приборы визировали источник излучения под углом 90° к плоскости, проходящей через фронтальную поверхность образца. Выходные сигналы приборов регистрировались с помощью светолучевого осциллографа 8.

В качестве градуировочного источника в области 0,4—2,0 мкм использовалась лампа СИ-10-300, а в области 2,0—5,0 мкм — черное тело при температуре 573 К. Относительная погрешность определения I_{λ} и L_{λ} с помощью (4) и (6) не превышала 0,15. Значения I_{λ} обугленного образца находились по уравнению

$$I_{\lambda y} = B_{\lambda y} \varepsilon_y(\lambda), \quad (7)$$

где $B_{\lambda y}$ — спектральная плотность энергетической яркости черного тела при температуре углистого остатка; $\varepsilon_y(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения углистого остатка, принимаемый равным 0,8 [1].

Для нахождения I_λ и L_λ в направлении нормали к фронтальной поверхности образца использовались уравнения, полученные при допущении, что пламя однородно:

$$I_{\lambda_{пл}} = B_{\lambda_{пл}} F_{пл} \varepsilon_{пл}(\lambda), \quad (8)$$

$$L_{\lambda_{пл}} = B_{\lambda_{пл}} \varepsilon_{пл}(\lambda). \quad (9)$$

Здесь $B_{\lambda_{пл}}$ — спектральная плотность энергетической яркости черного тела при температуре пламени; $F_{пл}$ — площадь фронтальной поверхности пламени; $\varepsilon_{пл}(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения пламени.

В общем случае для плоского пламени

$$\varepsilon_{пл}(\lambda) = 1 - \exp[2a_{пл}(\lambda)\delta_{пл}],$$

где $\delta_{пл}$ — нормальная толщина пламени; $a_{пл}(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения. Согласно закону Бэра

$$a_{пл}(\lambda) = \rho_{пл} \sum_j q_{j_{пл}}(\lambda) \psi_{j_{пл}}, \quad (10)$$

$\psi_{j_{пл}}$ — массовая доля в пламени j -го компонента; $q_{j_{пл}}(\lambda)$ — спектральный показатель поглощения на единицу массы j -го компонента [3]; $\rho_{пл} =$

$= \frac{M_{пл} p_{пл}}{RT_{пл}}$ — плотность пламени; $M_{пл}$ — молярная масса; $p_{пл}$ — давление;

$T_{пл}$ — температура; R — универсальная газовая постоянная. Спектральный показатель поглощения на единицу массы сажи, состоящей из атомов углерода и водорода [4], определялся по справочным таблицам [5].

Для газов, поглощательные свойства которых принято характеризовать коэффициентом поглощения [5], этот параметр определялся по выражению

$$q_{j_{пл}}(\lambda) = k_{j_{пл}}(\lambda) RT_{пл} / M_j, \quad (11)$$

где M_j — молярная масса j -го компонента пламени; $k_{j_{пл}}(\lambda)$ — коэффициент излучения при температуре пламени.

Массовая доля в пламени CO_2 (как и H_2O) определялась по составу древесины ($\psi_{\text{Cд}} = 0,51$, $\psi_{\text{Hд}} = 0,06$, $\psi_{\text{Oд}} = 0,425$ [2]) и эмпирическому значению массового выхода углистого состава (0,15):

$$\psi_{\text{CO}_2_{пл}} = \psi_{\text{Cгр}} \frac{1}{1 + \Pi_{\text{гр}}} \frac{M_{\text{CO}_2}}{A_{\text{C}}}.$$

Здесь A_{C} — относительная атомная масса углерода; M_{CO_2} — относительная

молекулярная масса CO_2 ; $\Pi_{\text{гр}} = \frac{1}{0.232} (\Pi_{\text{C}} \psi_{\text{Cгр}} + \Pi_{\text{H}} \psi_{\text{Hгр}} - \psi_{\text{Oгр}})$ — стехиометрический коэффициент сгорания летучих продуктов газификации древесины в воздухе; Π_{C} , Π_{H} — стехиометрические коэффициенты сгорания в кислороде С и Н соответственно; $\psi_{\text{Cгр}}$, $\psi_{\text{Hгр}}$, $\psi_{\text{Oгр}}$ — массовые доли в продуктах газификации древесины С, Н и О соответственно, определяемые с помощью соотношений

$$\psi_{\text{Cгр}} = \frac{\psi_{\text{Cд}} - \psi_{\text{Oд}}}{1 - \psi_{\text{Oд}}}, \quad \psi_{\text{Hгр}} = \frac{\psi_{\text{Hд}}}{1 - \psi_{\text{Oд}}}, \quad \psi_{\text{Oгр}} = \frac{\psi_{\text{Oд}}}{1 - \psi_{\text{Oд}}},$$

где $\psi_{\text{Cд}}$, $\psi_{\text{Hд}}$, $\psi_{\text{Oд}}$ — массовые доли в древесине С, Н и О соответственно.

Ниже приведены результаты определения параметров горения древесины, а также их среднеквадратического отклонения (в скобках), характеризую-

ющего погрешность определения параметров [6]: $u_p = 0,2 (0,11) \text{ см/с}$; $u_d = 0,01 (0,006) \text{ см/с}$; $T_{пл} = 1800 (120) \text{ К}$; $\psi_{спл}^* = 1,2 \cdot 10^{-2} (0,7 \cdot 10^{-2})$.

На рис. 2 показана временная характеристика силы излучения пламени в видимом диапазоне длин волн. Видно, что сначала сила излучения пламени растёт, что объясняется разгоранием образца (увеличением площади воспламенённой поверхности). Поскольку при этом длительность периода разгорания t_p меняется пропорционально высоте образца h_d , скорость разгорания древесины под действием нагрева от собственного пламени определялась по формуле

$$u_p = h_d / t_p.$$

После разгорания образца, когда площадь воспламенённой поверхности становится максимальной, среднее значение силы излучения пламени некоторый отрезок времени не меняется. Можно предположить, что при этом не меняется входящая в уравнение (1) и линейная скорость горения древесины, которая в общем случае горения непостоянна — зависит от мощности потока тепла, подводимого к образцу, и толщины углистого остатка [7]. Определим линейную скорость горения древесины

$$u_d = \frac{0,5\delta_d}{\frac{1}{I_\lambda^*} \int_0^\infty \bar{I}_\lambda(t) dt},$$

где δ_d — толщина образца; \bar{I}_λ^* — максимальное значение средней составляющей силы излучения пламени.

При малых расходах древесины пламя ламинарное — сила его излучения не меняется во времени (при $G_d = \text{const}$). При $G_d > 20 \text{ мг/с}$ пламя образца становится пульсирующим — сила его излучения периодически (с частотой 8—15 Гц) меняется и может быть представлена как сумма средней \bar{I}_λ и пульсационной I_λ' составляющих. Отношение $I_\lambda' / \bar{I}_\lambda$ растёт с увеличением G_d . В описываемых экспериментах, когда максимальное значение $G_d = 70 \text{ мг/с}$, это отношение достигало 0,4.

Исследование поля яркости пламени показало, что в состав пульсирующего пламени входит стационарный участок, яркость которого не меняется во времени, и нестационарный, яркость которого периодически, синхронно с силой излучения, меняется от нуля до амплитудного значения.

Яркость нестационарного участка пламени пульсирует вследствие изменения его продольного размера, амплитудное значение которого меняется пропорционально расходу древесины.

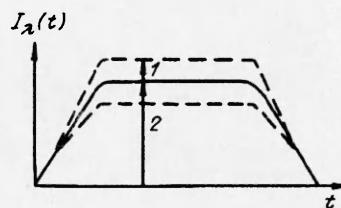
Скорость перемещения переднего фронта пульсирующего пламени $u_n = \Delta x / \Delta t = 1 \div 3 \text{ м/с}$, Δx — расстояние в направлении оси пламени между точками наведения радиометров 1 и 2 (см. рис. 1), а Δt — сдвиг по фазе между пульсационными составляющими выходных сигналов радиометров.

На рис. 3 приведены кажущиеся (искажённые поглощением атмосферы) спектры средней составляющей силы излучения системы и пламени. Видно, что оба спектра содержат полосовую составляющую, обусловленную газообразными продуктами горения (H_2O и CO_2), и непрерывную. Непрерывная составляющая спектра силы излучения обусловлена углистым остатком и сажой, а пламени — только сажой.

Изменение по длинам волн силы излучения пламени, как видно из (8), является следствием изменения его коэффициента излучения, который максимален и близок к еди-

Рис. 2. Временная характеристика силы излучения пламени древесины.

1 — пульсационная составляющая; 2 — среднее значение силы излучения пламени.



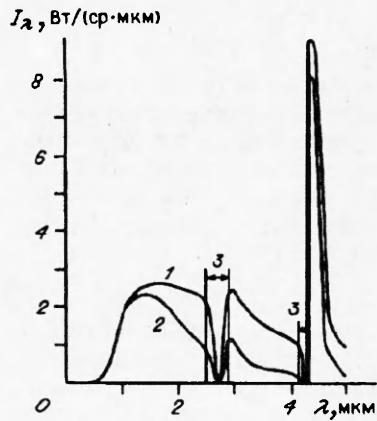


Рис. 3. Спектры силы излучения системы (1) и пламени (2); 3 — полосы поглощения атмосферы.

нице в центре полосы излучения CO_2 (4,3 мкм). В остальных спектральных диапазонах его значение не превышает 0,2.

Коэффициент излучения таких (оптически тонких) пламен практически равен их оптической плотности:

$$\varepsilon_{\text{пл}}(\lambda) \approx a_{\text{пл}} \delta_{\text{пл}}$$

Отличие этих величин не превышает 0,1. С учетом этого уравнения (8) и (9) для оптически тонких пламен можно записать в виде

$$I_{\lambda_{\text{пл}}} = B_{\lambda_{\text{пл}}} \delta_{\text{пл}} F_{\text{пл}} a_{\text{пл}}(\lambda), \quad (12)$$

$$L_{\lambda_{\text{пл}}} = 2B_{\lambda_{\text{пл}}} \delta_{\text{пл}} a_{\text{пл}}(\lambda). \quad (13)$$

С помощью вытекающего из (10) и (12) соотношения

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{B_{\lambda_1} q_c(\lambda_1)}{B_{\lambda_2} q_c(\lambda_2)}$$

(λ_1 и λ_2 — длины волн, лежащие в видимом диапазоне, на которых излучение пламени обусловлено сажей) определялась излучательная температура пламени. Она находилась методом последовательных приближений с использованием таблиц $B_{\lambda}(T)$ и $q_c(T, \lambda)$. Затем по (11) и (12) получали выражение

$$\delta_{\text{пл}} = \frac{I_{\lambda_2} M_{\text{CO}_2}}{B_{\lambda_2} F_{\text{пл}} \rho_{\text{пл}} M_{\text{пл}} K_{\text{CO}_2} (\lambda_2)^{1/2} \gamma_{\text{CO}_2, \text{пл}}}$$

(λ_3 — длина волны, расположенная на правом склоне полосы излучения CO_2), по которому находим нормальную толщину пламени. Необходимое при этом значение площади фронтальной поверхности пламени определяли визуально.

На рис. 4 показаны профили яркости системы, образованной при горении образца высотой $h_d = 5$ мм ($\lambda = 1,0$ мкм), где яркость углистого остатка пренебрежимо мала по сравнению с яркостью пламени, а при $\lambda = 4,3$ мкм эти значения соизмеримы. Анализ рис. 4 позволяет сделать вывод о неравномерности распределения в пламени сажи. Яркость пламени при $\lambda = 4,3$ мкм практически не меняется там, где яркость на длине волны $\lambda = 1,0$ мкм изменяется более чем на порядок. Причем характер изменения

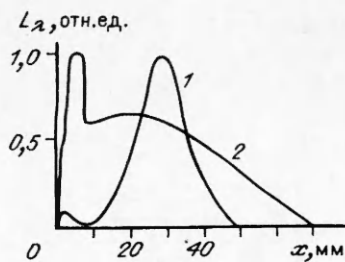


Рис. 4. Вертикальные профили яркости системы на длинах волн $\lambda = 1,0$ (1) и 4,3 мкм (2).

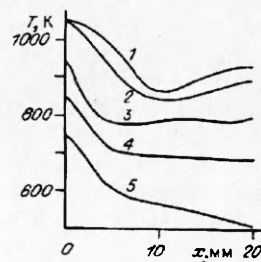


Рис. 5. Вертикальные профили температуры боковой поверхности образца.
t, с: 1 — 60, 2 — 40, 3 — 20, 4 — 10, 5 — 1.

концентрации сажи по высоте пламени подобен изменению концентрации сажи в ацетиленовом пламени [4].

Максимальное значение массовой доли сажи в пламени определено с помощью вытекающего из (10) и (13) соотношения

$$\psi_{\text{Спл}}^* = \frac{L_{\lambda}^*}{2B_{\lambda_1 \text{пл}} \delta_{\text{пл}} \rho_{\text{пл}} q_{\text{С}}(\lambda_1)},$$

где L_{λ}^* — максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости пламени на длине волны $\lambda = 1,0$ мкм.

Боковая поверхность углистого остатка неоднородна по температуре, если $h_{\text{д}} < 5$ мм. При горении более крупных образцов температура боковой поверхности углистого остатка неоднородна.

Распределение температуры по высоте углистого остатка (вдоль координаты x) в различные моменты времени горения при $h_{\text{д}} = 20$ мм показано на рис. 5. Кривые получены с помощью соотношения (7) по профилям яркости системы в предположении, что составляющая яркости, обусловленная пламенем, пренебрежимо мала.

Таким образом, описан комплекс спектрометрической аппаратуры, позволяющей определить изменение излучения системы, образующейся при горении, во времени, по длинам волн и пространственным координатам. Использование такой информации о системе в сочетании с разработанной методикой позволяет получить целый ряд параметров горения, определить которые с помощью контактных датчиков не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, 1977.
2. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. — М.: Энергия, 1976.
3. Международный светотехнический словарь / Под ред. Д.Н. Лазарева. — М.: Русский язык, 1979.
4. Бакиров Ф.Г. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. — М.: Машиностроение, 1989.
5. Handbook of infrared radiation from combustion gases / Ludwig C.B., Malnmuss W., Reardon B.E., Thomson A.L. — Washington, 1973.
6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972.
7. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Батрак М. Воспламенение и горение древесины под влиянием тепловых потоков // ФГВ. — 1986. — 22, № 1.

420075 г. Казань,
Государственный институт
прикладной оптики

Поступила в редакцию 29/V 1991,
после доработки — 12/VIII 1993

УДК 536.46

Л.К. Гусаченко

ВАРИАНТ ЭСТАФЕТНОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ СМЕСИ НЕСАМОГОРЯЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Приведена простейшая модель, использующая для описания выгорания прослоек связующего закономерности, известные для слоевых систем.

Известно, что скорость горения смеси с окислителем и горючим, не способными по отдельности к самостоятельному горению, отличается от таковой для упорядоченной слоевой системы из этих же компонентов [1]. Различие должно проявляться для достаточно крупных

© Л.К. Гусаченко, 1994.