

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, М. Бартак
(Москва)

Древесина — самый распространенный горючий материал, наиболее сложный для исследования механизма горения. Это твердое пористое вещество с различным строением и термической стойкостью входящих в него компонентов. Поэтому при горении древесины превращение твердой фазы в газообразные продукты протекает на значительной глубине прогретого слоя от $\sim 200^\circ\text{C}$ до температуры поверхности ($600\text{--}700^\circ\text{C}$) с образованием углистого остатка. Вопросам термического разложения и горения древесины посвящено большое количество работ (см., например, [1, 2]), однако ее горение под влиянием тепловых потоков практически не изучено, хотя этот режим представляет определенный интерес.

Исследование закономерностей воспламенения и горения материалов под влиянием тепловых потоков позволяет в лабораторных условиях имитировать различные реальные условия. Действительно, для материалов, не содержащих в своем составе активный кислород, основная доля тепла, необходимая для разложения твердой фазы, поступает к поверхности горящего образца от высокотемпературной зоны пламени в виде теплового потока определенной мощности. Выгорание же образца может быть представлено как термическое разложение твердой фазы под влиянием двух составляющих теплового потока: от собственного пламени и от внешних или дополнительных источников тепла. В зависимости от условий горения их мощность будет различной. Такая схема представляется особенно полезной при описании горения на пожаре, когда, как известно, этот процесс является неорганизованным и условия горения неизвестны или, в лучшем случае, могут быть оценены лишь с большой степенью приближения.

Образец древесины бука размером $100 \times 100 \times 30$ мм устанавливали на платформу весов ВЛК-500, по шкале которых определяли кинетику выгорания. Внешний (дополнительный) тепловой поток создавали с помощью двух газовых радиационных панелей, размещенных над поверхностью горения образца под углом друг к другу. Мощность потока изменяли, помещая панели на различные расстояния от образца, предварительно определив ее зависимость от расстояния. Выделяющиеся летучие продукты пиролиза древесины воспламеняли с помощью спутного диффузионного пламени пропан-бутановой смеси, расположенного по центру образца на расстоянии 10 мм от его поверхности. Размеры источника поджигания подбирали таким образом, чтобы его тепловое влияние на образец было незначительным. Температурно-временные параметры воспламенения определяли установленными на поверхности образца хромель-алюмелевыми термопарами толщиной 0,02 мм.

На рис. 1 представлено изменение температуры поверхности T_n при воздействии на образец тепловых потоков различной интенсивности от инфракрасной панели. Величины T_n и τ_n определяли по резкому изменению кривой $T_n(\tau)$, которое соответствовало зажиганию парогазовой смеси от спутного пламени. Из данных рис. 2 видно, что с увеличением мощ-

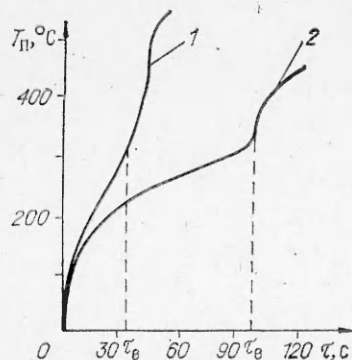


Рис. 1. Изменение температуры поверхности при воздействии тепловых потоков.
1 — 20 кВт/м²; 2 — 30 кВт/м² ($\tau_{в}$ — время воспламенения).

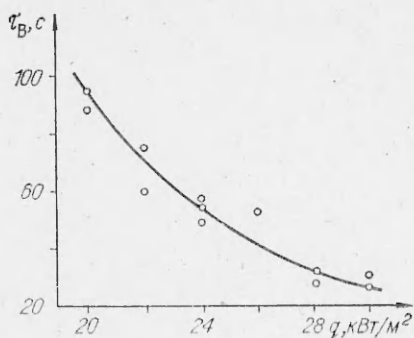


Рис. 2. Зависимость $\tau_b(q)$.

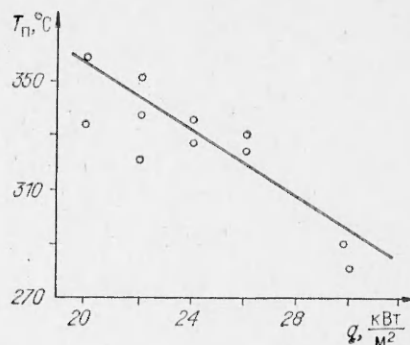


Рис. 3. Влияние q на $T_{п}$ в момент воспламенения.

пости теплового потока q время воспламенения снижается. Эта зависимость удовлетворительно описывается уравнением

$$\tau_b = 2,4 \cdot 10^5 / q_{вп}^{2,6}, \quad (1)$$

где $q_{вп}$ — мощность потока, поступающего к поверхности образца, кВт/м².

В момент воспламенения с увеличением интенсивности внешнего потока $T_{п}$ снижается (рис. 3), что несколько неожиданно. Как известно, воспламенение образца производят в тот момент, когда над его поверхностью в зоне влияния источника зажигания (спутного пламени) создается горючая концентрация парогазовой смеси продуктов разложения твердой фазы с воздухом. С уменьшением интенсивности нагрева материала возрастают толщина прогретого слоя и глубина разложения твердой фазы. Это должно было бы приводить к понижению температуры поверхности в момент воспламенения. Однако в открытом объеме происходят аэродинамический конвективный унос и молекулярная диффузия продуктов пиролиза, в составе которых значительное количество водорода [3], за пределы области влияния источника зажигания, и для создания горючей концентрации необходимо, чтобы скорость выделения летучих была не ниже некоторого предельного значения. Заметное разложение древесины начинается при 220°C и с увеличением температуры экспоненциально растет.

Таким образом, чем меньше темп нарастания температуры (ниже интенсивность теплового потока), тем более полно будет протекать пиролиз со скоростью, которая мала для создания горючей концентрации. Поскольку древесина представляет собой многокомпонентную смесь веществ с различной термической устойчивостью, то скорость выделения летучих продуктов, необходимая для создания горючей концентрации в области влияния источника зажигания, при относительно медленном нагреве образца будет достигаться при более высокой температуре поверхностного слоя древесины, так как к этому времени завершится распад менее термостойких составляющих — гемицеллюлозы и, возможно, частично целлюлозы. Очевидно, что при некоторой мощности теплового потока вообще станет невозможным воспламенение образца, хотя температура поверхностного слоя может быть значительной. Так, при $q_{вп} = 13$ кВт/м² не удалось воспламенить образец древесины от источника зажигания, хотя через 16 мин воздействия потока начиналось гетерогенное горение углистого слоя, а температура на поверхности возрастала до 375°C [4].

Величина $T_{п}$ в момент воспламенения будет зависеть не только от q , но и, по-видимому, от других факторов, например общей величины поверхности образца, его геометрических размеров (соотношения длины и ширины), ориентации образца и источника зажигания в пространстве, т. е. в тех случаях, когда меняются условия развития свободной конвекции продуктов пиролиза твердой фазы и, следовательно, условия созда-

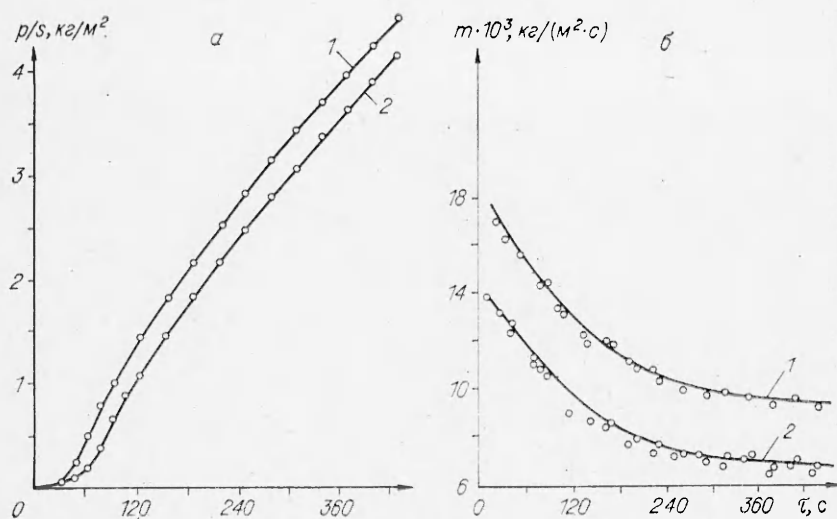


Рис. 4. Зависимость степени (а) и массовой скорости выгорания (б) древесины от времени.

ния горючей концентрации парогазовой смеси. С увеличением поверхности образца температура должна понижаться, а затем, когда величина поверхности пиролиза станет больше зоны влияния источника зажигания, не изменяться.

На рис. 4, а представлены кривые изменения степени выгорания древесины во времени, по которым рассчитывали массовую скорость (рис. 4, б). Как следует из полученных результатов, скорость выгорания m в момент воспламенения достигает максимального значения, а по мере выгорания снижается. Непостоянство скорости горения удовлетворительно объясняется увеличением термического сопротивления углеродного слоя, образующегося по мере выгорания образца, и снижением скорости теплоподвода кондукцией от поверхности горения в глубь твердой фазы. Теплосодержание прогретого слоя возрастает и, следовательно, уменьшается скорость горения [5].

На рис. 5 приведена зависимость $m(q_{вн})$. Поскольку величина m непостоянна во времени, зависимости $m(q_{вн})$ получены для некоторых фиксированных значений p/s . Как следует из экспериментальных данных, m линейно зависит от $q_{вн}$, при этом чем выше p/s , тем ниже скорость.

Из уравнения теплового баланса для поверхностного слоя твердой фазы при горении (аналогично [4, 6, 7]) следует, что

$$m = m_0 + q_{вн}/Q, \quad (2)$$

$$m_0 = (q_{пл} - q_n)/Q, \quad (3)$$

где $q_{пл}$ — мощность теплового потока от собственного пламени; кВт/м²; q_n — интенсивность теряемого потока, кВт/м²; Q — теплота пиролиза материала, кДж/кг; m_0 — скорость выгорания за счет «собственного» пламени, кг/(м²·с).

Таким образом, зависимость $m(q_{вн})$, полученная экспериментально (см. рис. 5), соответствует аналитической (2), вытекающей из теплового баланса. Это позволяет по экспериментальным результатам

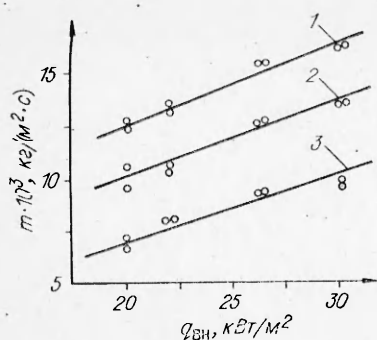


Рис. 5. Зависимость $m(q_{вн})$. Степень выгорания, кг/м²: 1 — 0,5; 2 — 1,5; 3 — 4.

с помощью (1) и (2) определить теплоту пиролиза древесины, значение m_0 и разность между интенсивностями потоков от пламени и теряемого:

p/s , кг/м ²	Q , кДж/кг	$m_0 \cdot 10^{-3}$, кг/(м ² ·с)	Δq , кВт/м ²	$q_{\text{вн}}^*$, кВт/м ²
0,5	2450	4,7	11,5	1,2
1,5	2440	1,6	3,9	8,5
4,0	2650	-0,4	-1,1	12,0

Приведенные данные показывают, что эффективная теплота пиролиза древесины с изменением степени выгорания материала практически не изменяется и составляет ~ 2500 кДж/кг. По мере выгорания древесины снижается Δq , и при больших степенях превращения (~ 4 кг/м²) интенсивность теряемого потока становится выше мощности потока от пламени ($\Delta q < 0$).

Как отмечалось выше, по мере выгорания материала происходит увеличение толщины углистого слоя на его поверхности, вследствие чего, во-первых, растет $q_{\text{вн}}$, во-вторых, снижается тепловой $q_{\text{пл}}$, поскольку из-за повышения теплопотерь падает скорость выделения летучих (см. рис. 4, б) и уменьшаются размеры пламени. По значению m_0 можно оценить критические условия горения древесины. Из [8] следует, что минимальная (критическая) скорость пламенного горения древесины $m^* \approx 5 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с). Из приведенных данных, следовательно, можно заключить, что одиночный образец древесины исследованной толщины не способен к самостоятельному горению, так как $m_0 < m^*$.

Критическую мощность внешнего теплового потока можно определить по соотношению

$$q_{\text{вн}}^* = (m^* - m_0)Q. \quad (4)$$

С увеличением степени выгорания древесины от 0,5 до 4 кг/м², когда толщина углистого слоя возрастает с ~ 1 до ~ 8 мм, мощность критического потока растет с 1,2 до 12,0 кВт/м². Из практики известно, что толстые деревянные конструкции достаточно долго сохраняют на пожаре несущую способность, при достижении толщины углистого слоя 15—20 мм (степень выгорания 7—10 кг/м²) пламенное горение древесины практически прекращается [9]. По-видимому, в этом случае мощность внешнего критического теплового потока выше выделяющегося при горении на пожаре, и пламенное горение постепенно переходит в беспламенное (гетерогенное) окисление углистого слоя кислородом воздуха или продуктами разложения твердой фазы, например CO₂ [4].

Поступила в редакцию 24/IV 1984,
после доработки — 18/XII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Конев. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
2. A. Roberts. Comb. Flame, 1970, 20, 14.
3. В. Н. Козлов. Пиролиз древесины. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
4. И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Б. В. Танченко. ФГВ, 1980, 16, 6.
5. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
6. A. Tewarson, R. Pion. Comb. Flame, 1976, 26, 1.
7. K. Petrella. Fire and Flammability, 1980, 11, 1.
8. D. Rasbach. Intern. Symp.: Fire Safety Combustible Mater. Edinburg, 1975.
9. П. Г. Демидов, В. С. Саушев. Горение и свойства горючих веществ. М., 1975.