

распространение горения по целлюлозным горизонтальным образцам в неподвижной атмосфере оказывают физико-химические процессы, протекающие на их нижней поверхности. В случае изоляции последней от горения распространение пламени на воздухе при нормальной температуре окружающей среды становится невозможным вплоть до очень тонких (0,05 мм) образцов.

Поступила в редакцию  
18/VII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Magee, F. McAleer. *J. Fire and Flammabil*, 1971, 2, 10, 271.
2. Н. Н. Бахман, Л. И. Алдаваев.— В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. М., ИХФ АН СССР, 1977.
3. И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Е. В. Крылов. *Тр. ВИПТШ МВД СССР*. Вып. 3. М., 1978.
4. А. И. Сухинин, Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛНД СО АН СССР, 1972.
5. W. A. Sirignano. *Combustion Science and Technology*, 1972, 6, 2, 95.
6. А. Д. Марголин, В. Д. Крупкин. *ФГВ*, 1978, 14, 2, 56.
7. Я. Б. Зельдович. *ЖТФ*, 1949, XIX, 10, 1199.
8. M. Sibulkin, W. Kettelhut, S. Feldman. *Combustion Science and Technology*, 1974, 9, 2, 75.
9. Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛНД СО АН СССР, 1970.
10. A. C. Fernandez-Pello. *Combustion Science and Technology*, 1977, 17, 1—2.

### О ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ

*И. А. Болодьян, Э. И. Долгов, А. Ф. Жевлаков,  
А. С. Мелихов, В. И. Потякин*

(Балашиха)

Исследование предельных условий горения полимеров представляет научный и практический интерес. В связи со сложностью процессов, протекающих при горении, строгой модели для расчета этих условий в настоящее время не существует. При приближенном решении задачи можно рассмотреть процесс горения в диффузионном режиме, когда переход к кинетическому режиму есть предельное условие существования пламени у поверхности полимера.

Для этого воспользуемся представлениями о «приведенной пленке» [1] как некоем аналоге пограничного слоя, когда существует только нормальная к поверхности полимера составляющая скорости потока. Тепло, выделяющееся при горении, отводится в окружающую среду через внешнюю часть приведенной пленки. Полагая, что стефановский поток в пленке определяется массовой скоростью выгорания полимера, и проводя отсчет температуры от температуры окружающей среды, уравнение теплового баланса для внешней части приведенной пленки и уравнение сохранения окислителя можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} (\rho v)_k [Q_{эфф} - c_p (T - T_e)] &= -\lambda \cdot dT/dy, \\ (\rho v)_k (\varphi + C_0) &= \rho D \cdot dC_0/dy, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $(\rho v)_k$  — массовая скорость выгорания;  $C_0$  — концентрация окислителя;  $\varphi$  — стехиометрический коэффициент;  $Q_{эфф}$  — теплота сгорания полимера;  $c_p$  — теплоемкость газовой фазы;  $T_e$  — температура в набегающем потоке;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газовой фазы;  $\rho$ ,  $D$  — плотность и коэффициент диффузии.

Из уравнений (1) при  $Le=1$  можно получить выражение для предельной концентрации кислорода

$$C_{0пр} = \frac{\Phi}{Q_{эфф}/c_p (T_{пр} - T_e)^{-1}}, \quad (2)$$

где  $T_{пр}$  — предельная температура.

В последние годы разработан ряд полимерных текстильных материалов (например, ткань «Лолоа»), характерной особенностью которых является гетерогенное горение. При вычислении предельной концентрации кислорода для этих материалов следует учитывать теплотери излучением. В этом случае интегральное уравнение теплового баланса для предельных условий горения можно записать в виде:

$$\beta \rho C_{0пр} Q_{эфф} = \alpha (T_{пр} - T_e) + \varepsilon \sigma (T_{пр}^4 - T_e^4). \quad (3)$$

Здесь  $\beta$  — коэффициент массообмена;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена;  $\varepsilon$  — приведенная степень черноты пламени;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана.

Из уравнения (3), если пренебречь вдувом и положить  $Pr=1$ ,  $Sc=1$ , получим выражение для предельной концентрации

$$C_{0пр} = \frac{\Phi c_p (T_{пр} - T_e)}{Q_{эфф}} + \frac{\Phi \varepsilon \sigma (T_{пр}^4 - T_e^4) d^{1-n} \mu^n}{k \rho Q_{эфф} (\rho u)^n}, \quad (4)$$

где  $d$  — размер образца;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $u$  — скорость набегающего потока;  $k, n$  — коэффициент пропорциональности и показатель степени в выражении

$$Nu = k Re^n Pr^m, \quad n < 1.$$

Таким образом, для вычисления  $C_{0пр}$  по формуле (2) и (4) необходимо определить величину  $T_{пр}$ .

Экспериментально значения  $C_{0пр}$  и  $T_{пр}$  находились в цилиндрическом сосуде диаметром 80 и высотой 300 мм, в котором устанавливался образец полимера и подавалась азотно-кислородная смесь с определенной концентрацией кислорода. После достижения необходимого давления образец зажигался и велось наблюдение за горением. При плавном изменении концентрации кислорода в потоке определялось минимальное значение  $C_{0пр}$ , поддерживающее горение. В этом режиме горения  $T_{пр}$  измерялась П-образными вольфрам-рениевыми термопарами [2] диаметром 50 мкм. За  $T_{пр}$  принималось максимальное значение температуры в пламени. Относительная погрешность при измерении  $C_{0пр}$  и  $T_{пр}$  не превышала 3%.

На рис. 1 приведены результаты измерений  $T_{пр}$  в зависимости от скорости газового потока  $u$  и давления  $p$ . Видно, что  $u$  практически не влияет на  $T_{пр}$ . С повышением давления  $T_{пр}$  несколько понижается, хотя это изменение невелико. В таблице приведены результаты измерения

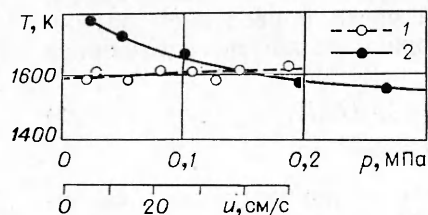


Рис. 1. Зависимость предельной температуры от скорости газового потока для ПММА (1) и от давления для ткани «Терлон» (2).

Материал	$C_{0пр}$ , %	$T_{пр}$ , К
Полиэтилен	16	1650
Эпоксидная смола	20	1620
Фторопласт-4	40	1670
Углеродная ткань	78	1700
Фторопласт-2М	80	1680

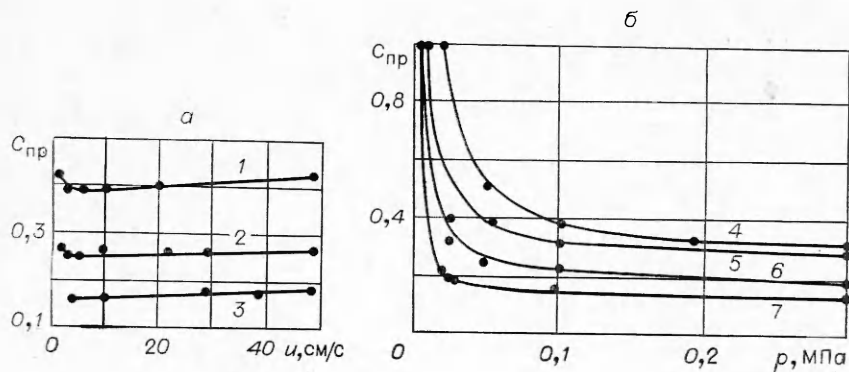


Рис. 2. Зависимость предельной концентрации от скорости газового потока (а) и от давления (б).  
1, 4 — фторопласт-4; 2 — ткань «Аримид»; 3, 7 — ПММА; 5 — ПВХ; 6 — ткань «Терлон».

$T_{пр}$  и  $C_{пр}$  для ряда полимерных материалов. Интересно, что, несмотря на значительные различия в химическом составе и  $C_{0 пр}$ , предельная температура для всех исследованных полимеров составляет  $\sim 1650$  К. Эта величина близка к температуре пламени углеводородов на нижнем пределе [3]. Как следует из рис. 2, зависимости  $C_{0 пр}$  от скорости потока и давления носят также слабый характер и только при достаточно низких давлениях  $C_{0 пр}$  резко повышается.

Полученные экспериментальные данные согласуются с выражениями (2) и (4), что свидетельствует о возможности их использования для расчета  $C_{0 пр}$ . Например, для ПММА, если воспользоваться данными работы [4], выражение (2) дает значение  $C_{0 пр} = 15\%$ , что согласуется с экспериментом. Из выражения (2) следует, что  $C_{0 пр}$  для полимеров, горящих в газовой фазе, должна слабо зависеть от давления и скорости газового потока. Это подтверждается рис. 2. Небольшое снижение предельной концентрации с давлением для некоторых полимеров может быть вызвано снижением  $T_{пр}$  в этом случае. Резкое повышение  $C_{0 пр}$  при низких давлениях связано с наличием предельного значения давления, когда полимер не горит и в чистом кислороде.

Возрастание предельной концентрации при малых скоростях потока, вероятно, обуславливается существенной долей лучистых теплопотерь в этом случае. Для полимеров, горящих гетерогенно, это имеет место и при больших значениях скорости потока. Например, для углеродной ткани  $C_{0 пр}$  снижается с 78 до 70% при увеличении скорости потока от 0,5 до 1,0 м/с. Для таких материалов в большей степени проявляется зависимость предельной концентрации от давления, поскольку второе слагаемое в выражении (4) при возрастании давления уменьшается. Поэтому  $C_{0 пр}$  для ткани «Аримид-Т», например, понижается с 43 до 26% при изменении давления от 0,1 до 0,8 МПа.

Поступила в редакцию  
27/VII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Б. Сполдинг. Основы теории горения. М.—Л., ГЭИ, 1959.
2. А. А. Зенин. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР, 1962.
3. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя, детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
4. А. С. Штейнберг и др.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.