

Полученные в работе экспериментальные результаты находят объяснение в рамках теоретической модели нестационарного конвективного горения с квазистационарными зонами горения и прогрева [4, 5]. Согласно этой модели, динамическое поведение конвективного горения определяется взаимодействием двух факторов: релаксации зоны фильтрации, которая стремится сгладить градиенты и понизить скорость конвективного горения, и повышения давления во фронте пламени, которое способствует ускорению конвективного горения. Из-за существования обратной связи между  $w$  и  $p_f$ , которая приводит к увеличению  $p_f$  при ускорении пламени за счет расширения зоны горения, конвективное горение прогрессивно ускоряется (возрастают  $w$  и  $p_f$ ) во всех тех случаях, когда характерное время фильтрации  $t_\phi$  больше характерного времени изменения давления во фронте пламени  $t_*$ . Именно такая ситуация реализуется при горении зарядов насыпной плотности в отсутствие влияния закрытого торца и эффективного уплотнения.

При выходе волны фильтрации на закрытый торец заряда действие фильтрационного фактора возрастает из-за торможения газов у торца, одновременно падает  $t_\phi$ , и в условиях горения в полузамкнутом объеме оказывается возможным равновесие, которое проявляется в постоянстве  $w$  при увеличении  $p_f$ . Численное моделирование этой ситуации [4] воспроизводит основные особенности, наблюдаемые на эксперименте.

При горении в замкнутом объеме  $t_*$  гораздо меньше, и поэтому влияние закрытого торца оказывается несущественным. Стабилизация скорости конвективного горения при быстро возрастающем давлении во фронте пламени оказывается возможной лишь вследствие эффективного уплотнения заряда ВВ перед фронтом пламени, когда давление в волне приближается к пределу текучести ВВ (порядка 1 кбар).

Поступила в редакцию 20/VIII 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
2. Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов и др.— В сб.: Горение конденсированных систем. Черноголовка: ОИХФ, 1977.
3. В. Г. Коростелев, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1979, 15, 2, 88.
4. Б. С. Ермолаев. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1978.
5. Б. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов и др. ФГВ, 1975, 11, 5, 720.

УДК 536.46 : 541.7

#### О ВЛИЯНИИ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВИДА ИНЕРТНОГО ГАЗА В СОСТАВЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ГОРЕНИЕ ПОЛИМЕРОВ

А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин  
(Москва)

Теория пределов горения полимеров [1] устанавливает соотношение между внешними условиями (давлением, составом и скоростью потока окислителя, уровнем инверсионных перегрузок, наличием теплоотводящих стенок) и характерной скоростью процесса горения. Теория позволяет количественно рассчитывать зависимость кислородного индекса полимеров от этих параметров. С целью дальнейшего, более детального выяснения механизма горения полимеров и сопоставления опытных результатов с теорией в настоящей работе проведено исследование влияния начальной температуры и замены инертного газа в составе окислительной атмосферы на параметры горения полимеров (предельные размеры и скорость распространения пламени). Такие исследования имеют и самостоятельное значение в связи с необходимостью эксплуатации полимерных материалов в ряде случаев в условиях искусственной атмосферы.

**Влияние начальной температуры.** Целлюлоза (полоски бумаги толщиной  $6,5 \cdot 10^{-3}$  см) или полиэтиленовая пленка (толщиной  $1,4 \cdot 10^{-3}$  см) сжигались в вакуумируемой термокамере объемом 50 л. Образцы горели в направлении сверху вниз. При определении предельных размеров горения образец помещался между двумя металлическими рамками с V-образными вырезами [2]. В термокамере устанавливалась температура в диапазоне  $25 \div 200^\circ\text{C}$ . Перед опытом камера вакуумировалась, а затем заполнялась смесью кислорода и азота в необходимых соотношениях и до необходимого уровня давления. Камера термостатировалась при температуре опыта  $T_0$  и затем сжигался образец. Предельный размер горения<sup>1</sup> уменьшается с ростом

<sup>1</sup> Расстояние между боковыми поверхностями V-образных рамок, где образец затухает.

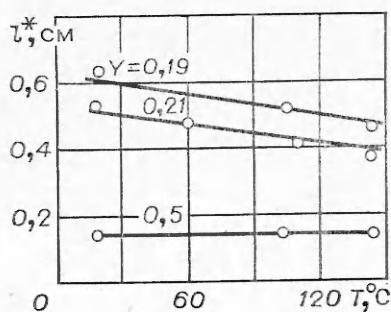


Рис. 1.

1,17 см/с при 25°C до 1,95 см/с при 150°C ( $Y=0,5$ ). Скорости распространения пламени измерялись на полосках бумаги шириной 2 см, когда скорость уже не зависит от размера [2].

**Влияние вида инертного газа.** Предельный размер горения  $l^*$  целлюлозы в воздухе (0,5 см) увеличивается вдвое (до 1,0 см) при замене азота в составе атмосферы на равное количество гелия и несколько уменьшается (до 0,37 см) при замене азота на аргон. Влияние вида инертного газа уменьшается по мере увеличения содержания кислорода в смеси (рис. 2: 1 —  $O_2 + He$ , 2 —  $O_2 + N_2$ , 3 —  $O_2 + Ar$ ). Аналогичные закономерности получены при исследовании горения полиэтиленовой пленки. Скорость распространения пламени по поверхности полимера в смеси кислорода с инертным газом возрастает в ряду: двуокись углерода — азот — аргон — гелий (рис. 3: целлюлоза,  $p = 1$  атм, 1 —  $O_2 + He$ , 2 —  $O_2 + Ar$ , 3 —  $O_2 + N_2$ , 4 —  $O_2 + CO_2$ ).

**Обсуждение результатов.** Критический размер горения полимера связан с максимальной скоростью его выгорания  $(\rho u)_0$  на передней кромке пламени критерием [1, 2]

$$k_3 \cdot \lambda / c(\rho u)_0 l^* = 1, \quad (1)$$

где  $k_3$  — константа. В работе [1] показано, что характерная скорость, определяющая устойчивость горения полимера, совпадает с максимальной скоростью горения перемешанной стехиометрической смеси продуктов деструкции полимера с окислительной атмосферой. Эту скорость можно вычислить из соотношения

$$(\rho u)_0 = \rho_0 z \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{0,5} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\omega/2} \left( \frac{T_r}{T_r - T_0} \right)^{\omega/2+1} \left( \frac{Y}{Y+v} \right)^{\omega/2} \exp \left( - \frac{E}{2RT_r} \right), \quad (2)$$

где  $z$  — постоянный для каждого полимера коэффициент с размерностью скорости;  $\omega$  — суммарный порядок реакции;  $E$  — эффективная энергия активации;  $v$  — весовой стехиометрический коэффициент;  $\lambda_0$ ,  $\rho_0$  — теплопроводность и плотность продуктов сгорания в воздухе при  $p_0 = 1$  атм;  $T_r$  — адиабатическая температура горения. Численные значения  $k_3$  и  $z$  определены в [1].

Критерий (1) совместно с выражением для массовой скорости горения (2) удовлетворительно описывает полученные в настоящей работе результаты. Влияние вида инертного газа в составе атмосферы на предельные размеры горения объясняется изменением коэффициентов теплопроводности газовой фазы при замене одного газа на другой. Увеличение теплопроводности смеси приводит к возрастанию кондуктивных теплопотерь в стенке из газовой зоны пламени и к более быстрому

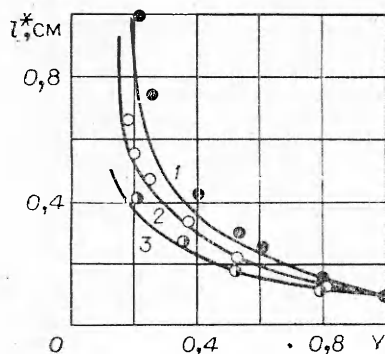


Рис. 2.

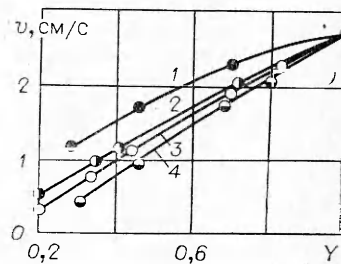


Рис. 3.

<sup>2</sup> Для целлюлозы  $k_3/z = 2 \cdot 10^{-2}$  с/см.

Влияние  $Y$  и  $T_0$  (в °C) на адиабатическую температуру горения целлюлозы при  $p=1$  атм, смесь кислород — азот

Y	$T_r$ (°C) при $T_0$				Y	$T_r$ (°C) при $T_0$			
	20	100	200	300		20	100	200	300
1,0	2901	2913	2924	2936	0,310	2401	2436	2468	2500
0,754	2819	2833	2847	2861	0,220	2158	2209	2257	2303
0,620	2752	2769	2785	2801	0,188	1983	2047	2106	2163
0,500	2668	2688	2707	2727					

срыву горения. Расчет коэффициентов теплопроводности смесей кислорода с инертными газами в зависимости от  $Y$  проводился по известной формуле Брокау [3]. Адиабатическая температура горения полимеров в смеси кислорода с инертным газом в зависимости от  $Y$  определялась термодинамическим расчетом. Отметим, что замена гелия в составе атмосферы на равное количество аргона не приводит к изменению адиабатической температуры горения. Теоретические зависимости  $l^*(Y)$  для различных инертных газов в составе атмосферы определены с помощью формул (1) и (2) и результатов расчетов  $\lambda(Y)$  и  $T_r(Y)$  при  $E = 20$  ккал/моль и  $\omega = 1,5$  в соответствии с данными работы [4]. Теоретические кривые на рис. 2 удовлетворительно согласуются с экспериментом (точки).

Для сопоставления критерия (1) с опытными результатами по зависимости  $l^*$  от начальной температуры найдем выражение для температурного коэффициента предельного размера горения

$$\frac{d \ln l^*}{dT_0} = - \left( \frac{\omega}{2} + 1 \right) \frac{T_r - T_0}{T_r (T_r - T_0)} \frac{dT_r}{dT_0} - \frac{E}{2RT_r^2} \frac{dT_r}{dT_0}. \quad (3)$$

Наблюдаемое в опытах уменьшение температурного коэффициента с увеличением  $Y$  объясняется, согласно (3), соответствующим уменьшением производной  $dT_r/dT_0$ . Уменьшение  $dT_r/dT_0$  при возрастании  $Y$ , в свою очередь, является следствием увеличения степени диссоциации продуктов реакции при повышении температуры. Производная  $dT_r/dT_0$  определялась термодинамическим расчетом (см. таблицу). Для целлюлозы при  $p_0 = 1$  атм она уменьшается от 0,52 при  $Y = 0,21$  до 0,125 при  $Y = 1$ . Теоретические зависимости  $l^*(T_0)$ , рассчитанные по формулам (1), (2), удовлетворительно согласуются с опытными данными (см. рис. 1).

Поступила в редакцию 21/IV 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. Докл. АН СССР, 1981, 257, 6, 1369.
2. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1978, 14, 2, 56.
3. Физический энциклопедический словарь. Т. 5. М.: Советская энциклопедия, 1966.

УДК 541.126+662.612+546.621+546.47

#### ТЕМПЕРАТУРА ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В МОМЕНТ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ

В. А. Ермаков, А. А. Раздобрев, А. И. Скорик, В. В. Поздеев, С. С. Смоляков

(Томск)

Температура частиц — важная характеристика процесса воспламенения и горения. В ряде работ [1—4] для ее определения предполагалось, что воспламенение частиц алюминия происходит при температуре плавления оксида. В [5] для расчета размеров зон горения сделано предположение о постоянстве температуры частицы в процессе ее горения. Имеющиеся данные по прямому измерению температуры частиц алюминия при воспламенении немногочисленны и противоречивы [5, 6]. Так, в [7] при измерении яркостной температуры алюминиевых проволочек, нагреваемых в атмосфере кислорода, обнаружено, что независимо от давления кислорода и толщины окисного слоя воспламенение наступает при  $T = 2025$  К,  $T = 2050$  К установлена в [6] при индуктивном нагреве частиц алюминия с исходным диаметром  $d_0 = 3 \div 4$  мм со