

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

А. С. Мелихов, В. И. Потякин, Е. В. Фланкин  
(Балашиха)

Исследование предельных условий горения полимерных материалов в разреженных средах представляет определенный научный и практический интерес. Процессы горения в указанных условиях изучены недостаточно не только теоретически, но и экспериментально.

В данной работе приведены результаты исследований горения ряда полимеров в условиях естественно-конвективного движения газовой среды при низких давлениях.

Экспериментальная установка состояла из вертикально расположенного цилиндрического сосуда диаметром 400 и высотой 500 мм, снабженного окнами для наблюдения и кино съемки и оборудованного системами вакуумирования и заполнения азотно-кислородной средой требуемого состава. Образец исследуемого материала устанавливался в центре сосуда и зажигался электроспиралью, которая затем отводилась за пределы зоны пламени. Процесс горения фиксировался на пленку КН-4С чувствительностью 250 ед. ГОСТ кинокамерой «Красногорск». В ходе экспериментов в сосуде протекала газовая смесь с объемным расходом около 300 см<sup>3</sup>/с, что позволяло удалять из сосуда продукты горения и поддерживать требуемую концентрацию кислорода. При этом газ перемещался вблизи стенок сосуда, что предотвращало действие потока на пламя и обеспечивало естественную его форму. Давление в объеме измерялось ртутным чашечным манометром М4Р-3, а объемная концентрация кислорода  $c_{ок}$  — газоанализатором ГХП-3М.

Предел по давлению  $p_{пр}$  при данной концентрации кислорода в смеси определялся в процессе плавного снижения давления в сосуде до величины, при которой прекращалось горение образца. Каждое его значение определялось как наименьшее по результатам шести экспериментов. При определении зависимости  $p_{пр}$  от концентрации кислорода исследовано несколько материалов различной структуры и физико-химических

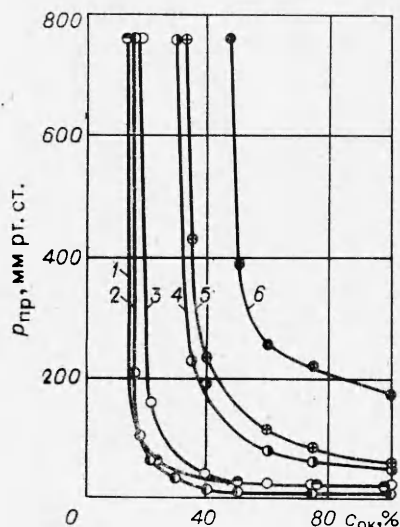


Рис. 1. Зависимость предельного для горения давления среды от концентрации кислорода.

1 — хлопчатобумажная ткань; 2 — полиметилметакрилат; 3 — полиапролактан; 4 — хлопчатобумажная ткань с огнезащитной пропиткой ОП ГОСТ 19196-73; 5 — лента из волокна ароматического полиимида; 6 — пленка из фторопласта Ф-4МБ.

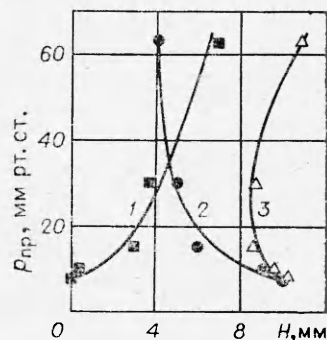


Рис. 2. Зависимость размеров пламени ( $H$ ) для сферического образца ПММА диаметром 7 мм от предельного давления.

1 — разность расстояний между границами пламени; 2, 3 — верхняя и нижняя видимые границы пламени.

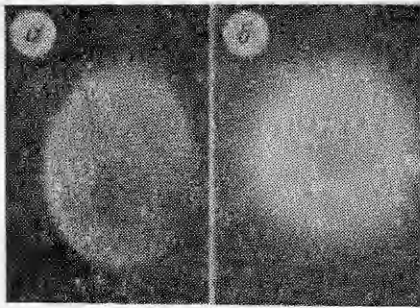


Рис. 3. Горение ПММА в околопредельных условиях при различных давлениях.  
а)  $p=63$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=21\%$ ; б)  $p=9$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=100\%$ .

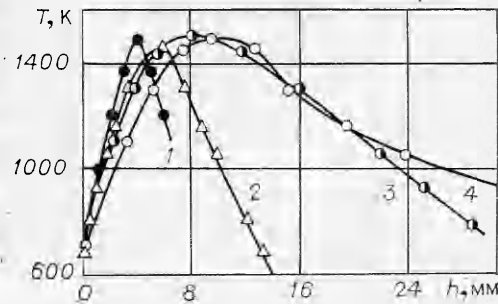


Рис. 4. Распределение температур в зоне пламени ( $h$  — расстояние от поверхности образца).  
1 —  $p=760$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=16\%$ ; 2 —  $p=77$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=21\%$ ; 3 —  $p=17$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=40\%$ ; 4 —  $p=9$  мм рт. ст.,  $c_{\text{OK}}=100\%$ .

свойств. Образцы тканей и пленок имели размеры  $100 \times 20$  мм, монолитных материалов —  $100 \times 5 \times 4$  мм. Образцы устанавливались вертикально и зажигались снизу. Материалы, горение которых сопровождалось скапыванием, армировались стеклонитями.

Из полученных данных, приведенных на рис. 1, следует, что для всех материалов с увеличением  $c_{\text{OK}}$  величина  $p_{\text{пр}}$  уменьшается и значительно зависит от вида материала. В чистом кислороде, например для фторопласта Ф-4МБ  $p_{\text{пр}} = 175$  мм рт. ст., а для ПММА — 7,5 мм рт. ст. Эксперименты показали, что горение полимеров в области низких давлений имеет ряд характерных особенностей. Внешне это проявляется в том, что пламя приобретает обтекаемые контуры и удаляется от поверхности горючего на значительные расстояния. Пламя имеет голубой цвет с тонким фиолетовым слоем на внешней границе.

Геометрические параметры пламени и скорость выгорания исследовались на сферических образцах ПММА с исходным диаметром 8 мм. Образцы закреплялись на керамической трубке наружным диаметром 1 мм. После зажигания и начала устойчивого горения проводилась киносъемка процесса. Геометрические параметры пламени и изменение размера образца во времени определялись по негативам киноплёнки с помощью микроскопа ММИ-2. Зависимость геометрических параметров пламени от величины предельного давления приведена на рис. 2. Фотографии горящих образцов при давлениях, близких к предельным, приведены на рис. 3. Из рис. 2, 1 и фотографий видно, что с уменьшением давления среды расстояние между верхней и нижней границами пламени уменьшается, а при давлении 7,5 мм рт. ст. ( $c_{\text{OK}} = 100\%$ ) образуется пламя в виде сферы с поверхностью, равноудаленной от поверхности образца.

Скорость выгорания определялась по изменению во времени диаметра образца в вертикальном направлении в диапазоне изменения последнего от 7,5 до 5 мм. При  $c_{\text{OK}} = 20 \div 100\%$  скорость выгорания практически не зависит от концентрации кислорода в среде и составляет  $\approx 2,9 \cdot 10^{-3}$  см/с. Экспериментальные данные по скорости выгорания хорошо объясняются результатами измерения температуры пламени и поверхности горючего. Для измерений использовались вольфрам-рениевые термопары диаметром 0,05 мм, П-образной формы с длиной плеча 4 мм [1]. Спай термопары перемещался через зону пламени до поверхности горящего образца двигателем РД-09 со скоростью 1 мм/с. Из результатов измерений, приведенных на рис. 4, следует, что на предельных режимах горения максимальная температура в зоне пламени и температура поверхности образцов практически не зависят от концентрации кислорода в среде.

В [2] показано, что скорость пиролиза полимеров при горении определяется температурой поверхности горящего полимера. Таким образом,

постоянство скорости выгорания на предельных режимах горения определяется постоянством температуры поверхности при разных значениях  $c_{ок}$ .

Постоянство температуры поверхности горючего на предельных режимах горения предполагает равенство плотностей теплового потока к поверхности от пламени в этих условиях. Теплообмен между пламенем и поверхностью в рассматриваемом случае осуществляется в основном теплопроводностью и излучением. Из рис. 4 следует, что с понижением давления и увеличением концентрации кислорода градиент температуры в области между поверхностью горючего и пламенем становится меньше. Так, при  $c_{ок} = 21\%$  и  $p = 760$  мм рт. ст. он составляет  $\sim 230$  град/мм, а при  $c_{ок} = 100\%$  и  $p = 9$  мм рт. ст.  $\sim 130$  град/мм. Полагая, что состав продуктов пиролиза ПММА и коэффициент теплопроводности среды между поверхностью и пламенем слабо зависят от давления [3], можно сделать вывод о снижении роли кондуктивной теплопередачи от пламени к поверхности горючего с уменьшением давления. Для поддержания температуры поверхности горючего, а следовательно, и скорости пиролиза на уровне, необходимом для устойчивого горения, указанное уменьшение теплового потока горючего компенсируется, по-видимому, увеличением интенсивности лучистого потока от пламени вследствие увеличения его толщины (см. рис. 4).

Рассмотрим вопрос о роли естественной конвекции в случае горения полимеров при пониженном давлении. Эксперименты показали (см. рис. 2), что при  $p > 10$  мм рт. ст. пламя асимметрично относительно образца в вертикальном направлении, что объясняется влиянием естественно-конвективного движения среды в зоне пламени [4]. В этой связи следует отметить одну из особенностей горения полимеров в разреженной среде. При горении в области  $c_{ок} = 21 \div 100\%$  и давлениях, превышающих предельные значения на  $6 \div 8$  мм рт. ст. и более, наблюдалась зона розового свечения вокруг пламени. На рис. 5 показаны контуры свечения. На расстоянии около 30 мм от образца при  $c_{ок} = 40\%$  и  $p = 30$  мм рт. ст.  $T \sim 1050$  К, при  $c_{ок} = 100\%$  и  $p = 15$  мм рт. ст.  $T > 2000$  К. Размеры зоны свечения и распределение в ней температуры зависели от давления среды и концентрации кислорода. Диаметр зоны при высоких значениях  $c_{ок}$  достигал 100—110 мм. Наблюдения показали, что зона свечения образуется мельчайшими светящимися частицами, вылетающими из пламени. Причина появления этих частиц заключается, по-видимому, в процессе диспергирования на поверхности горючего, интенсивность которого зависит от температуры поверхности [5]. На предельных режимах горения, когда температура поверхности близка к минимальной (см. рис. 4), интенсивность процесса диспергирования незначительна и розовое свечение отсутствует. При повышении давления температура пламени и поверхности горючего возрастает, степень диспергирования увеличивается — частицы пролетают зону пламени, не успевая сгореть, и образуют зону розового свечения. Траектории движения светящихся частиц указывали на наличие движения среды снизу вверх, что обусловлено естественной конвекцией.

В случае горения ПММА при  $c_{ок} = 100\%$  и  $p = 7,5$  мм рт. ст. образывалось сферическое пламя, равноудаленное от поверхности образца. Известно, что при атмосферном давлении этот фактор — основной признак отсутствия конвекции. Такая картина наблюдалась, например, при исследовании процесса горения капель жидких топлив в состоянии невесомости [4]. Зона розового свечения при  $p = 7,5$  мм рт. ст. отсутствовала, что не позволяло судить о наличии конвекции в этих условиях.

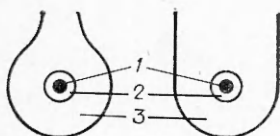


Рис. 5. Форма зоны розового свечения при  $p < 20$  мм рт. ст. (слева) и  $p > 20$  мм рт. ст. (справа).

1 — образец; 2 — голубое пламя; 3 — зона розового свечения.

В то же время можно утверждать, что в данном случае основная роль в процессе тепло- и массообмена зоны горения с окружающей средой принадлежит естественной конвекции, поскольку в данной области давлений длина свободного пробега молекул составляет около 0,007 мм, а ширина теплового пограничного слоя по нашим измерениям — около 50 мм, значение числа Кнудсена не превышает  $10^{-5}$ , т. е. газовую среду можно рассматривать как сплошную [6], в которой процесс молекулярного переноса не является определяющим. Сферическая форма пламени при давлении 7,5 мм рт. ст. объясняется низкой плотностью окислительного потока, не искажающего при взаимодействии с пламенем его естественную сферическую форму. О плотности потока, необходимой для горения на предельных режимах горения, можно судить по результатам работы [7].

Поступила в редакцию 19/V 1981

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР, 1962.
2. А. С. Штейнберг. Теплообмен в процессах горения. Черногоровка, 1980.
3. Р. Рид, Т. Шервуд. Свойства газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1964.
4. С. Кумагои. Горение. М.: Химия, 1979.
5. А. С. Штейнберг и др. — В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
6. В. П. Исаченко и др. Теплопередача. М.—Л.: Энергия, 1965.
7. А. С. Мелихов, В. И. Потякин. Матер. VI Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. Черногоровка, 1980.

УДК 536.46

### НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ С ФИКСИРОВАННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ

А. П. Алдушин  
(Черногоровка)

Элементарные модели горения (ЭМГ), используемые для описания распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной среде, можно разделить на две группы [1]. К одной из них (ЭМГ-1) относятся модели с полным превращением вещества во фронте горения. Модели второго рода (ЭМГ-2) предполагают незавершенность реакции к моменту прекращения тепловыделения в к-фазе. До недавнего времени ЭМГ-2 были известны лишь для горения взрывчатых веществ и порохов [2—4].

Развитие технологического направления в горении [5] выявило ряд новых моделей второго рода, реализующихся при распространении фронта реакции в негазофицирующихся системах. К их числу относятся модели высокотемпературного плавления и диссоциации продукта [6]. При разогреве смеси до температуры фазового перехода  $T_n$  реакция либо прекращается вообще (вследствие диссоциации), либо выделяющееся тепло полностью расходуется на фазовый переход (плавление). В обоих случаях температура продуктов является фиксированной величиной, а глубина реакции определяется начальной температурой  $T_0$  и калорийностью системы. Теория стационарного распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной среде для моделей горения второго рода построена в работе [6]. Настоящая заметка посвящена исследованию устойчивости стационарных режимов.