

тате увеличение  $u_T$  при возрастании среднеквадратичной пульсационной скорости  $\bar{u}$  становится для вязких смесей с большими коэффициентами молекулярного переноса относительно меньшим, и наоборот.

Таким образом, можно сделать заключение, что развиваемый подход для описания турбулентного горения оправдывается в основных зависимостях и в детальных специфических особенностях процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 48.
2. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. ФГВ, 1980, 16, 4, 7.
3. В. Я. Басевич, В. П. Володин, С. М. Когарко и др. Химическая физика, 1982, 1, 8, 1150.
4. А. Н. Колмогоров. Докл. АН СССР, 1941, 30, 4, 299.
5. В. Fine. Combust. Flame, 1958, 2, 109.
6. В. П. Карпов, Е. С. Северин. ФГВ, 1980, 16, 1, 45.

УДК 536.46

### О ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В ОТСУТСТВИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

А. С. Мелихов, В. И. Потякин, А. М. Рыжов, Б. А. Иванов  
(Балашиха)

В настоящей работе продолжено начатое ранее [1] экспериментальное изучение предельных режимов газофазного горения полимеров в отсутствие свободной конвекции. Исследование проводилось на модельном материале — полиметилметакрилате (ПММА) при давлениях азотно-кислородной среды  $p$  от 30 до 760 мм рт. ст., концентрациях кислорода  $C_{ок}$  от 16 до 100% и скоростях газового потока  $v$  от 0,2 до 150 см/с. Использование двойного свободно падающего контейнера позволяло проводить эксперименты при остаточном ускорении, не превышающем  $2 \cdot 10^{-4}g_0$  ( $g_0 = 981$  см/с). Во внутреннем контейнере размещалась система, позволяющая в процессе свободного падения перемещать горящий образец относительно покоящейся газовой среды с заданной постоянной скоростью, что значительно повышало точность измерений в области малых значений скорости потока ( $v < 20$  см/с). При  $v > 20$  см/с применялась система [1], обеспечивающая равномерное движение газовой среды относительно горящего, неподвижно закрепленного образца. Ось симметрии плоских образцов совпадала с направлением потока.

В работе исследовались предельные режимы горения, при которых возможно существование пламени со стороны натекающего потока в «лобовой» части пластины. Представляется, что такое расположение зоны химической реакции относительно образца и натекающего потока окислителя наиболее удобно для теоретического и экспериментального выяснения деталей механизма возникновения пределов горения.

Большой интерес представляет зависимость  $v_{пр}$  от  $C_{ок}$ , в которой проявляется ряд характерных особенностей предельного режима горения полимеров в отсутствие свободной конвекции. На рис. 1 приведена зависимость, определенная при  $p = 750$  мм рт. ст. на образцах, выполненных в виде пластины размером  $1 \times 8 \times 50$  мм. При значениях параметров среды выше кривой наблюдается устойчивое горение. График имеет минимум и определяет наличие нижнего и верхнего предела по скорости потока.

Нижний предел  $v_{пр}^*$  соответствует условиям, когда пламя существует только в лобовой части образца и не может распространяться вниз по потоку. При  $C_{ок} = \text{const}$ , когда с уменьшением  $v$  достигается значение  $v_{пр}^*$ , пламя максимально удаляется от поверхности полимера

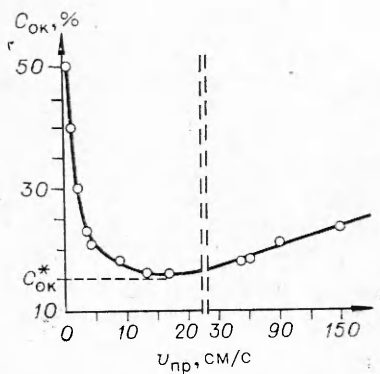


Рис. 1. Зависимость предельной скорости потока от  $C_{ок}$  при горении ПММА в отсутствие свободной конвекции.

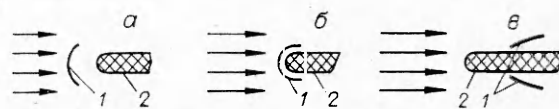


Рис. 2. Форма пламени (1) и его положение относительно поверхности образца (2) на предельных режимах горения в отсутствие свободной конвекции. а, б) нижний и верхний предел по скорости соответственно; в) положение пламени после срыва.

и б приведены фотографии пламени на предельном режиме горения шарового образца диаметром 8 мм и пластины толщиной 3 мм. Пламя имеет характерную для горения в невесомости на нижнем пределе форму — расположено впереди движущегося образца симметрично относительно направления движения.

Характер зависимости слева от минимума обусловлен тем, что определяющим фактором, посредством которого достигается нижний предельный режим горения, является скорость подвода реагентов в зону реакции. Пламя удалено от поверхности образца, и тепловые потери из зоны реакции в данном случае малы. Поэтому при  $C_{ок} = \text{const}$  некоторое увеличение скорости вдува приводит к повышению температуры пламени и интенсификации процесса горения. Следовательно, возврат к предельному режиму горения, когда скорость химической реакции становится минимальной, может быть осуществлен посредством снижения величины  $C_{ок}$ .

Ветвь графика, расположенная справа от минимума (см. рис. 1), соответствует верхнему пределу по скорости  $v_{пр}^{**}$ . В данном случае  $C_{ок}$  растет с увеличением  $v_{пр}^{**}$ . Здесь определяющим фактором являются тепловые потери со стороны натекающего потока. При значениях скорости потока, близких к  $v_{пр}^{**}$ , пламя максимально приближается к поверхности полимера (см. рис. 2, б). Когда  $v$  становится больше  $v_{пр}^{**}$ , происходит срыв пламени в лобовой части образца — кромка пламени смещается по потоку на его боковую поверхность (см. рис. 2, в), где  $v < v_{пр}^{***}$  в силу известного распределения скоростей в пограничном слое.

Следует отметить (см. рис. 1), что минимальная предельная концентрация кислорода в отсутствие свободной конвекции составляет  $16 \pm 0,2\%$ , тогда как аналогичная величина при действии силы тяжести ( $C_{ок}^*$ ) для тех же образцов равна  $15 \pm 0,2\%$  (горение снизу вверх). Различие объясняется структурой естественно-конвективного движения среды, способствующего более эффективному прогреву твердой фазы.

Результаты теоретического исследования предельных режимов горения материалов, приведенные в работе [2], соответствуют описанной выше экспериментальной зависимости  $C_{ок}(v_{пр})$ . В то же время при вы-

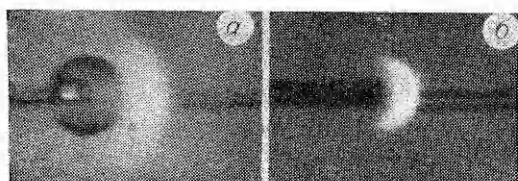


Рис. 3. Предельный режим горения шара и пластины (ПММА) на нижнем пределе по скорости в отсутствие свободной конвекции при  $p = 33$  мм рт. ст.,  $C_{ок} = 100\%$  и  $v_{пр}^* = 3$  см/с.

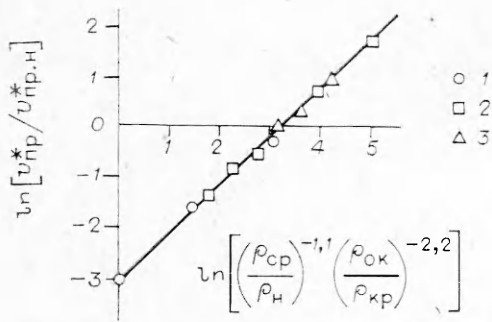


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных по определению  $v_{пр}^*$  в отсутствие свободной конвекции.

1 —  $p=30, 200, 750$  мм рт. ст.,  $C_{ок}=100\%$ ; 2 —  $p=40, 100, 300, 500, 750$  мм рт. ст.,  $C_{ок}=40\%$ ; 3 —  $p=300, 500, 750$  мм рт. ст.,  $C_{ок}=21\%$ .

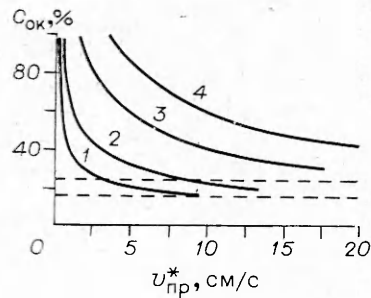


Рис. 5. Зависимости  $v_{пр}^*$  от  $C_{ок}$ , рассчитанные по формуле (1).

$p$ , мм рт. ст.: 1 — 750, 2 — 300, 3 — 100, 4 — 50.

яснении различных аспектов, связанных с механизмом возникновения предельных режимов горения полимеров, по нашему мнению, необходимо учитывать следующие экспериментально установленные особенности процесса. В работе [3] показано, что минимальная температура пламени, при которой еще возможен стационарный режим горения, практически не меняется в широком диапазоне параметров внешней среды и составляет  $\sim 1500$  К. По-видимому, и в отсутствие свободной конвекции на предельных режимах горения температура пламени будет оставаться такой же по величине. Это накладывает определенные ограничения на режим тепловыделения в зоне реакции. Постоянство температуры пламени указывает на то, что форма, размеры пламени и его положение относительно горючего являются одним из важных факторов, определяющих предельный режим горения. Представляется, что на пределе горения пламя занимает положение, которое является наиболее энергетически выгодным.

На рис. 4 приведены результаты измерения  $v_{пр}^*$  для ПММА в зависимости от внешних условий. Полученные данные хорошо аппроксимируются соотношением

$$\frac{v_{пр}^*}{v_{пр.н}^*} = 0,043 \left( \frac{\rho_{ср}}{\rho_{н}} \right)^{-1,1} \left( \frac{\rho_{ок}}{\rho_{ср}} \right)^{-2,2} \quad (1)$$

при  $0,04 \leq \rho_{ср}/\rho_{н} \leq 1$  и  $0,24 \leq \rho_{ок}/\rho_{ср} \leq 1$ .

Здесь  $v_{пр.н}^* = 4,2$  см/с — предельная для горения пластины ПММА скорость движения газовой среды при  $p=750$  мм рт. ст.,  $C_{ок}=21\%$  и температуре среды  $T_{ср}=293$  К;  $\rho_{н}$  — плотность среды при  $p=750$  мм рт. ст. и  $T_{ср}=293$  К;  $\rho_{ср}$  и  $\rho_{ок}$  — плотность среды и окислителя при заданном давлении. Влияние геометрических размеров горючей системы на  $v_{пр}^*$  в приведенном соотношении не учтено, поскольку исследования удалось провести в узком диапазоне размеров образца. Установлено, что изменение ширины пластины от 5 до 30 мм и толщины от 0,5 до 3 мм не оказывает заметного влияния на величину  $v_{пр}^*$ .

На рис. 5 приведены зависимости  $v_{пр}^*$  от  $C_{ок}$ . Штриховые линии обозначают предельные для горения ПММА концентрации кислорода, определенные при наличии естественной конвекции и равные 15% при  $p=750$  мм рт. ст. и 24% при  $p=50$  мм рт. ст. [3]. По ходу кривых видно, что с понижением давления минимум кривых  $C_{ок}(v_{пр}^*)$  смещается вверх и вправо. Обращают на себя внимание весьма низкие величины  $v_{пр}^*$  при высоких концентрациях кислорода в среде и давлениях, близких к нормальному. Так, при  $p=750$  мм рт. ст. и  $C_{ок}=100\%$   $v_{пр}^* \simeq 0,25$  см/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Мелихов, В. И. Потякин.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка, 1980.
2. С. С. Рыбанин, Докл. АН СССР, 1982, 266, 4, 915.
3. А. С. Мелихов, В. И. Потякин, Е. В. Фланкин. ФГВ, 1982, 18, 3, 44.

УДК 582.574

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ГОРЮЧИХ СРЕД

*И. К. Федосеева*

*(Москва)*

Способ визуализации движения газа, возникающего и развивающегося в процессе сгорания газообразного топлива, описанный в работе [1], оказался весьма информативным при исследованиях процессов горения. Сущность его заключается в искусственном создании в исследуемой среде тепловых меток, визуализации их методом Теплера и регистрации их движения фотографическим путем. Меткой служил небольшой объем нагретого газа, образующийся в покоящейся среде около нихромовой проволочки через некоторое время после импульсного разряда конденсатора через нее. По мере развития процесса горения метка приходила в движение вместе с окружающей средой.

Выбор оптимальных параметров разрядного контура обеспечил такую разность плотностей метки и окружающей среды, при которой метка хорошо визуализировалась методом Теплера, была пригодна для исследования потоков, способных к воспламенению, и следовала за нестационарным потоком даже при наличии в нем больших ускорений с погрешностью не более чем 2%. Последнее обстоятельство позволило перейти от визуализации движения газа к измерению его скорости.

Этот способ использован при исследованиях формирования ударных волн перед фронтом пламени, взаимодействия между ударной волной и фронтом пламени, изменения характера движения газа перед фронтом пламени при наложении на зону горения электрического поля, а также при измерениях нормальной скорости горения. Во всех указанных выше случаях созданная метка имела непрерывную линейную форму. Область применения таких меток в качестве измерительных ограничена одномерными потоками. В неоднородных потоках, поскольку в силу значительной протяженности меток исключается возможность слежения за перемещением строго фиксированного малого объема, они могут быть использованы в основном лишь для визуализации движения газа.

Значительно большую информацию о движении газа, например в двумерных потоках, можно получить с помощью дискретных тепловых меток — «точек», обладающих теми же достоинствами, что и непрерывные метки. Для создания «точечных» тепловых меток следовало обеспечить дискретное выделение тепла на проволочке, создающей метки.

Одним из путей организации дискретного теплоотвода может служить использование для создания меток проволочки, выполненной в виде последовательно соединенных отрезков, сопротивления которых резко различаются между собой [2]. Соотношение между сопротивлениями соседних участков должно быть таково, чтобы при пропускании через проволочку электрического тока теплоотвод в окружающую среду с одних ее участков значительно превосходил бы теплоотвод с других. При этом размеры тепловых меток будут определяться длиной участка проволочки с большим сопротивлением (рабочего участка), а размеры про-