

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОЛИМЕРУ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ ГЕЛИЕВО- И АЗОТНО-КИСЛОРОДНОЙ СРЕДЫ

Экспериментально исследованы скорость распространения пламени сверху вниз по бумаге и распределение температуры перед фронтом пламени при повышенном давлении гелиево- и азотно-кислородной среды. Скорость распространения пламени возрастает с увеличением концентрации кислорода и при замене азота на гелий в окислительной атмосфере и слабо зависит от давления. Тепловой поток из зоны химической реакции на поверхность материала передается в основном теплопроводностью через газовую фазу, в $\sim 2,3$ раза больше в гелиево-кислородной среде по сравнению с азотно-кислородной и практически не зависит от давления.

Скорость распространения пламени по поверхности полимера — одна из основных количественных характеристик горения. Модели таких пламен требуют совместного решения сложной системы уравнений тепло- и массопереноса и химической кинетики [1, 2], что, как правило, связано с принятием различного рода допущений и приближений, достоверность которых далеко не всегда подтверждена экспериментально.

Проверить модели можно только путем сопоставления теоретической и экспериментально установленной структуры пламени при распространении волны горения по поверхности полимера. Для развития теории большое значение имеет выяснение доминирующего механизма переноса тепла от пламени к невоспламененному материалу. В случае мелкомасштабного горения обычно полагают, что тепло передается за счет теплопроводности по газовой либо по конденсированной фазе. Экспериментальные исследования влияния вида инертного газа, давления на скорость распространения и структуру пламен [3, 4] неполны и охватывают небольшой круг полимерных материалов.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по влиянию давления, концентрации кислорода, вида инертного газа на скорость распространения пламени сверху вниз по бумаге и температурные поля в области, примыкающей к фронту пламени.

Экспериментальные исследования проводились на образцах бумаги толщиной 0,8, шириной 50 и длиной 200 мм. Образцы закреплялись на рамке, помещенной в экспериментальную камеру диаметром 150 и высотой 400 мм. Независимо от величины давления p во время проведения экспериментов в камере создавался поток газовой смеси с объемным расходом 1,0 л/с, что соответствовало скорости газа $v = 5$ см/с при $p = 0,1$ МПа.

Скорость распространения пламени V определялась по записи температурного профиля двух термопар. Исследование температурного профиля перед фронтом пламени проводилось тремя термопарами. Расстояние между средней термопарой и образцом оставалось постоянным, а для двух крайних термопар изменялось в течение одной серии опытов на одну и ту же величину. Такое расположение термопар позволяло получать распределение температур в газовой фазе вдоль и нормально к поверхности образца перед фронтом пламени.

Для исследований использовали вольфрам-рениевые (ВР5/ВР20) термопары, имеющие П-образную форму, которые покрывали пленкой проплавленного диоксида кремния. Термопары из термопарной проволоки имели диаметр 20 мкм, диаметр головки термопары не превышал 30 мкм. Погрешность термопар определялась по методике [5]. Наибольшая погрешность измерения температурного градиента не превышала 10%. Расстояние от средней термопары до поверхности образца выбиралось экспериментально и принималось из условия, что максимальная погрешность определения температурного градиента не превышает 5%.

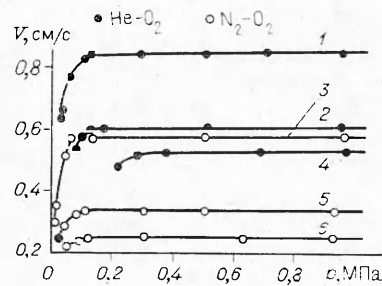


Рис. 1. Зависимость $V(p)$.
 Y_{O_2} : 1, 3 — 0,3, 2, 5 — 0,21, 4, 6 — 0,18.

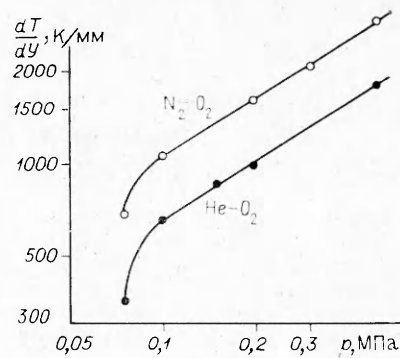


Рис. 2. Зависимость $\left(\frac{dT}{dy}\right)_{x=0}(p)$;
 $Y_{O_2} = 0,21$.

Результаты экспериментального исследования влияния давления, концентрации кислорода и вида инертного газа на распространение пламени сверху вниз по бумаге представлены на рис. 1. Скорость распространения пламени возрастает с увеличением концентрации кислорода Y_{O_2} : $V \sim f(p) Y_{O_2}^m$, где $m = 0,76$ и $0,82$ в гелиево- и азотно-кислородной среде.

Давление газовой среды влияет на V более сложным образом. В области предельных условий горения скорость распространения пламени возрастает с давлением. Так, например, при повышении давления с $0,05$ до $1,5$ МПа в гелиево-кислородной среде $V = 0,53 \div 0,6$ см/с. В дальнейшем p практически не влияет на V . Необходимо также отметить, что скорость распространения пламени на пределе горения возрастает со снижением давления.

Для определения теплового потока из зоны пламени на полимер за начало отсчета принимали положение максимального градиента температуры в газовой фазе нормально поверхности материала $\left(\frac{dT}{dy}\right)_{(x)\max} = -\left(\frac{dT}{dy}\right)_{x=0}$. Ось x направлена вдоль поверхности материала навстречу распространению пламени, ось y — нормально поверхности образца. Начало отсчета при всех исследованных величинах p практически совпадало с максимальной температурой поверхности полимера $T_s(x)_{\max} = T_s(x=0)$.

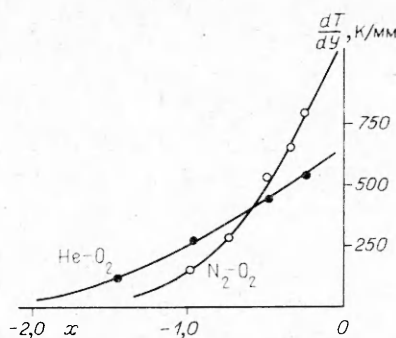
За размер прогретого слоя l принимали расстояние, на котором температура поверхности полимера снижалась от $T_s(x) = T_s(x=0)$ до $T_s(x) = 0,1T_s(x=0)$. Эксперименты показали, что значение l уменьшалось с ростом p и при замене гелия на азот.

Как видно из рис. 2, максимальный градиент температур возрастает с увеличением давления, что вызвано уменьшением расстояния от пламени до поверхности полимера. Изменение градиента температуры у поверхности материала перед фронтом пламени представлено на рис. 3.

Тепловой поток, передаваемый на поверхность материала теплопроводностью через газовую фазу $q\lambda$, определяли графическим интегрированием зависимости $\lambda \frac{dT}{dy}$ у поверхности образца от координаты x . При графическом интегрировании значения коэффициента λ принимали по средней температуре для значения x .

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при $p = 0,1 \div 0,5$ МПа для гелиево- и азотно-кислородной сред величина $q\lambda = 234$ и 94 Вт/м и практически не зависит от давления. Так как $V \sim q\lambda$, то скорость распространения пламени не должна зависеть от давления, что подтверждается данными непосредственных измерений V . С увеличением p возрастает градиент температуры, однако размер

Рис. 3. Распределение градиента температуры $\frac{dT}{dy}$; $p = 0,1$ МПа, $Y_0 = 0,21$.



прогретого слоя уменьшается, поэтому $q\lambda = \int_{-l}^0 \lambda \left(\frac{dT}{dy} \right) dx$ изменяется слабо. Например, при увеличении p с 0,1 до 0,5 МПа величина l изменяется в гелиево-кислородной среде с 2,3 до 1,1 мм и в азотно-кислородной с 1,5 до 0,7 мм. Разница в значениях $q\lambda$ объясняется тем, что коэффициент теплопроводности в гелиево-кислородной среде в $\sim 3,1$ раза больше, чем в азотно-кислородной.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что при распространении пламени по термически тонкому полимеру тепло из зоны химической реакции к несгоревшей поверхности материала переносится в основном теплопроводностью через газовую фазу и практически не зависит от изменения давления в диапазоне 0,1—0,5 МПа и при замене азота на гелий в окислительной атмосфере. Подобный вывод также сделан в работе [6] для азотно-кислородной среды и атмосферного давления.

В заключение авторы выражают благодарность С. С. Рыбанину за обсуждение работы и ряд критических замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feng C. C., Sirignano W. A. Further calculation based upon a theory of flame spread across solid fuels // Comb. Flame.— 1977.— 29, N 3.— P. 247—263.
2. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Структура и пределы распространения волны горения по тонкому слою горючего материала при гетерогенной реакции // Хим. физика.— 1986.— 5, № 5.— С. 680—688.
3. Бахман Н. Н. Распределение пламени вдоль поверхности контакта горючего и окислителя // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 41—48.
4. Колесников Б. Я., Ефремов В. Л. Распространение пламени по поверхности эпоксидного полимера. Процессы теплопереноса в предпламенной зоне // Там же.— С. 60—65.
5. Кузьменко К. П., Меркулов В. А., Николаев В. М. и др. Экспериментальное определение погрешности термоэлектрического термометра при исследовании температуры газовой среды // Измерительная техника.— 1988.— № 2.— С. 40—41.
6. Жевлаков А. Ф., Грошев Ю. М. Исследование прогрева полимерных пленок при распространении по ним пламени. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем.— Черногоровка, 1986.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 14/IX 1989