

скорость движения газа u уже не определяется только величиной u_n , а задана внешними обстоятельствами, например, скоростью подачи газа. Тогда к системе (2), (3) необходимо добавить параметр u/u_n , величина которого должна быть сохранена.

Масштабно-барическая эквивалентность может быть применена также к некоторым характеристикам горения неперемешанных систем.

При диффузионном горении предельная величина потока реагентов, сгорающих в пламени,— одна из важнейших характеристик, превышение которой вызывает потухание. Как известно, указанная величина пропорциональна u_n в гомогенной стехиометрической смеси этих реагентов [4]. Поэтому свойства горения неперемешанных систем, связанных со срывом диффузионного пламени, могут быть рассмотрены так же, как это выполнено в данной работе для горения смесей.

Таким образом, при изучении горения газовых смесей и некоторых характеристик горения неперемешанных систем можно считать обоснованным применение закона подобия, при котором пространственно-временной масштаб явления изменяется обратно пропорционально давлению. Для реализации закона подобия не должны зависеть от давления скорость пламени, отношение температуры горения к начальной и степень расширения газа при горении. Масштабно-барическая эквивалентность может быть использована при анализе различных ситуаций, связанных с горением, и в случае заметной зависимости скорости пламени от давления. Показана ее применимость при изучении образования ячеек на фронте ламинарного пламени, процессов перехода горения в детонацию и перехода детонации через отверстие в объем, а также минимальной энергии зажигания в зависимости от расстояния между электродами.

Авторы благодарны Б. Е. Гельфанду, В. П. Карпову, А. С. Бетеву и С. В. Хомику за плодотворное обсуждение вопросов, затронутых в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hayami R. A., Primich R. I. // Fluid Physics of Hypersonic Wakes: AGARD Conf. Proc., 2, 19.— London, 1967.
2. Пилюгин Н. Н., Тихомиров С. Г., Чернявский С. Ю. Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, 6, 166.
3. Седов Л. Н. Метод подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1977.
4. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
5. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах.— М.: Мир, 1968.
6. Matsui H., Lee J. H. // 17th Symp. (Intern.) on Combustion.— Leeds, 1978.

г. Москва

Поступила в редакцию 26/VII 1988

УДК 536.46 + 543.51

Б. Я. Колесников, В. Л. Ефремов

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА. ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРЕДПЛАМЕННОЙ ЗОНЕ

Исследование распространения пламени по поверхности полимерных материалов представляет значительный интерес как для развития теории горения полимеров, так и для решения задач, связанных с пожаробезопасностью. Однако механизм распространения пламени известен только в самых общих чертах. Он включает два наиболее важных процесса: теплоперенос к невоспламененному материалу и газофазные химические реакции [1]. В зависимости от условий горения и типа полимера преобладают различные каналы теплопереноса: теплопровод-

© 1990 Колесников Б. Я., Ефремов В. Л.

ность по газовой и конденсированной фазам, излучение от пламени [2—5]. Возможно также протекание экзотермических реакций с участием кислорода, способного диффундировать в поверхностный слой полимера впереди пламени [6—7].

Важное значение для установления процессов, контролирующих распространение пламени, имеют исследования его структуры, т. е. локальных составов в газовой фазе, температур и т. д. Между тем температурные поля изучены только в пламенах, распространяющихся по термопластичным полимерам, а данные по газофазному составу вообще отсутствуют. В настоящей работе приводятся результаты исследований структуры пламени, распространяющегося в противопотоке окислителя по плоской поверхности эпоксидного полимера.

Эксперименты проводили на установке, описанной в [7]. Образцы полимера, приготовленные в виде пластин размерами $170 \times 20 \times 3$ мм, сжигали в горизонтальном положении в потоке окислительной смеси $80\% \text{O}_2 + 20\% \text{N}_2$, имеющем линейную скорость 3 см/с. В таких условиях пламя наиболее стабильно.

Пробы газов из различных точек пламени собирали кварцевым микрозондом. Чтобы обеспечить отбор проб из движущегося пламени в заданной точке относительно его фронта неподвижным зондом, рамку с горящим образцом перемещали со скоростью, равной по величине и противоположной по направлению скорости распространения пламени.

Особое внимание уделялось возможно более точной локализации точки отбора пробы. Поскольку исследуемое пламя не одномерно, необходимо определить две координаты: расстояние от плоскости входного отверстия зонда до поверхности полимера h (по вертикали) и расстояние от оси зонда до точки присоединения пламени к поверхности l (по горизонтали). Расстояния измеряли отсчетными микроскопами МИР-2 с ценой деления 0,05 мм. Основным источником ошибок при определении h — неоднородность толщины образца по его длине, вследствие чего при движении образца расстояние от входного отверстия зонда до поверхности может изменяться. Эти изменения устранялись плотным прижимом образцов к рамке с помощью пружин, расположенных в держателе. Погрешность определения вертикальных расстояний составила менее 0,05 мм.

Погрешности измерений l обусловлены расхождением скоростей движения пламени и перемещения образца, искажением линий тока за счет введения микрозонда (т. е. искривлением фронта пламени), нечеткостью границы пламени. Стабильность положения зонда относительно фронта пламени контролировалась визуально через микроскоп все время эксперимента и корректировалась плавной регулировкой скорости перемещения образца.

Влияние пробоотборного зонда на пламя носит сложный характер и в значительной степени зависит от диаметра входного отверстия. В предварительных экспериментах выяснилось, что оптимальный диаметр входного отверстия зонда лежит в пределах 50—60 мкм, когда искажения фронта пламени становятся незначительными. (Анализ погрешностей зондового отбора проб в пламенах приведен в работах [8, 9].) В целом, погрешность в определении горизонтальных расстояний не превышала 0,1 мм. Газообразные пробы из пламени анализировались на масс-спектрометре МИ-1305, снабженным системой молекулярного натекания. Предварительно проводилась калибровка прибора по всем компонентам, обнаруженным в пламени.

Скорость распространения пламени по поверхности эпоксидного полимера в описанных условиях составила $1,12 \pm 0,05$ мм/с. Фономологическая картина пламени и структура поверхности полимера вблизи ведущей кромки пламени описаны в [7]. В данной работе под фронтом пламени понимается граница, отделяющая область видимого пламени, имеющего желтый цвет, от остального пространства. Вдали от передней кромки пламени над желтой зоной наблюдается еще и зона

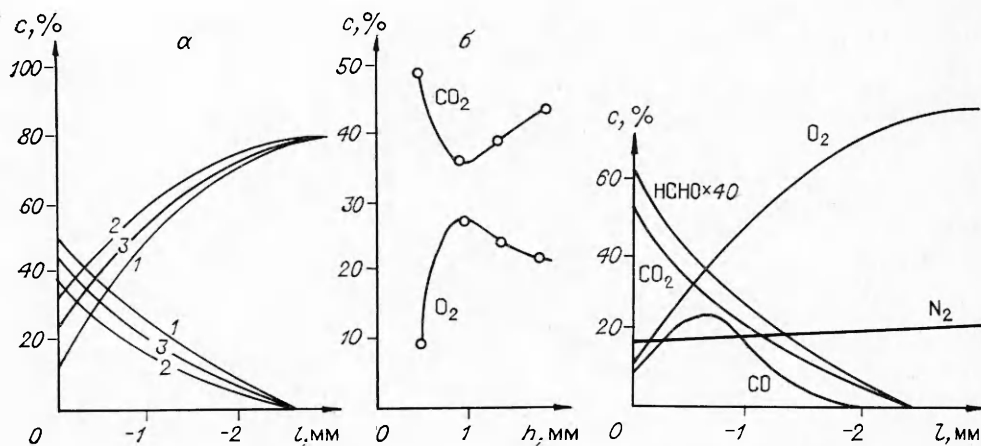


Рис. 1. Распределение концентраций O_2 и CO_2 в предпламенной зоне.

а) h , мм: 1 — 0,5, 2 — 0,9, 3 — 1,7; б) $l = 0$.

Рис. 2. Распределение стабильных продуктов в предпламенной зоне.

голубого пламени (зона догорания), где достигается максимальная температура 1820—1870 К. Более подробно результаты исследований распределения температуры в таком пламени описаны в [7].

Очевидно, что газификация полимера непосредственно вблизи ведущей кромки пламени поставляет основное количество топлива, необходимого для поддержания горения в газовой фазе. Поэтому наибольший интерес для определения газофазных составов представляют области, примыкающие к передней кромке пламени и расположенные как впереди нее (предпламенная зона), так и внутри факела. В основном исследовалась предпламенная область, поскольку внутри факела сажа налипает на поверхность зонда и мешает отбору пробы.

По данным масс-спектрального анализа, в газовой фазе предпламенной области присутствуют следующие вещества: кислород, оксид и диоксид углерода, азот, вода, формальдегид. В небольших количествах (суммарно 0,01 %) обнаружены также углеводороды C_3H_8 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4 . Обращают на себя внимание сравнительно бедный состав газовой фазы и преобладание конечных продуктов окисления.

Профили концентраций $[O_2]$ и $[CO_2]$ в предпламенной области для некоторых сечений изображены на рис. 1 (где положительные значения h отвечают газовой фазе; положительные значения l соответствуют направлению внутрь факела; начало координат — точка присоединения пламени к поверхности). Появление CO_2 и расходование O_2 отмечаются уже на расстоянии около 2,5 мм впереди пламени. У передней кромки пламени ($l = 0$) наибольшая концентрация O_2 и наименьшая $[CO_2]$ наблюдаются на высоте 0,9 мм от поверхности. Относительно этой точки концентрация кислорода довольно резко падает по мере приближения к поверхности, но слабо с удалением от нее. Аналогичное поведение отмечено для $[CO_2]$.

Падение $[O_2]$ по мере приближения к поверхности полимера позволяет предположить, что кислород расходуется на окисление продуктов газификации вблизи поверхности и на гетерогенное окисление самой поверхности. Уменьшение же $[O_2]$ на высотах более 0,9 мм объясняется его более глубоким проникновением в сторону пламени и участием в реакциях в высокотемпературной зоне. Однако поскольку на достаточно большой высоте концентрация O_2 должна возрасти и стать равной исходной (80 %), где-то в промежутке обязан находиться минимум. Полученную форму профиля $[O_2]$ нельзя объяснить, исходя из предположения о пограничном слое у поверхности, ламинарном характере течения и чисто диффузионном поперечном массопереносе. В этом случае, если кислород расходуется как в газовой фазе, так и гетерогенно, то даже с учетом разбавления окислительной смеси продуктами сго-

Состав (%) газовой фазы внутри пламени, распространяющегося по поверхности эпоксидного полимера

l , мм	h , мм	O ₂	CO ₂	CO	N ₂	CH ₃ CHO	C ₃ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	НСНО
+1—2	0,15	14	41	21	21	0,8	1,4	1,3	—	1,1
+1,0	0,40	3,0	32	37	13	4,0	1,7	6,0	1,0	1,5
+1—2	1,24	0,9	50	8	34	—	—	—	0,2	1,3
+3,0	0,40	3,6	45	25	20	3,0	1,4	2,0	—	1,1
+3,0	0,80	—	31	56	12	—	—	—	—	—

вания и газификации профиль [O₂] должен носить монотонный характер. Если же кислород расходуется только газофазно в диффузионном пламени, то профиль [O₂] должен на некотором расстоянии от поверхности пройти через минимум. Но одновременное существование на профиле максимума и минимума может быть объяснено лишь существованием конвективного потока продуктов сгорания из высокотемпературной зоны, т. е. довольно стабильных рециркуляционных течений, препятствующих массопереносу O₂ к пламени.

К аналогичным выводам можно прийти, рассматривая профиль концентрации CO₂. Масштабы возникающих вихрей с учетом профилей составов, а также данных по температуре [7] оцениваются величинами менее 1 мм. Существование подобных вихрей показано экспериментально при исследовании распространения пламени по поверхности ПММА в смеси с перхлоратом аммония [10], а также по тонким пленкам [11].

На рис. 2 показаны профили концентраций основных веществ, найденных в предпламенной области на высоте 0,5 мм. Интересно, что СО появляется ближе к фронту пламени по сравнению с CO₂, и его концентрация проходит через максимум. На больших высотах в предпламенной зоне СО в пределах погрешности измерений практически не наблюдается. Над границей фронта пламени содержание СО достигало около 6 % по объему. Максимум на профиле [СО], скорее всего, свидетельствует в пользу его образования за счет термоокисления поверхности, а не за счет конвективного или диффузионного выноса из пламени. Приближенная одномерная оценка величины диффузионной поправки к профилю [O₂] указывает на начало его потребления в химических реакциях примерно в точке $l = -1$ мм вблизи границы зоны расплава [7], но с учетом реальной двумерности диффузии потребление кислорода должно начаться еще намного раньше.

Что касается составов газовой фазы внутри факела пламени, то результаты, приведенные в таблице, характеризуются значительным разбросом, обусловленным, скорее всего, турбулизацией газовых течений внутри факела (как в случае свечеподобного горения [12]). В целом же качественный состав близок к найденному внутри факела свечеподобного пламени [12]. В таблице можно отметить общие тенденции уменьшения концентрации O₂ и роста [CO₂] с увеличением высоты над поверхностью образца. Присутствие O₂ у поверхности указывает на возможность выгорания карбонизованного остатка и протекания окислительного пиролиза полимера внутри факела. Концентрация СО растет лишь внутри видимого пламени, а ближе к голубому — падает (точка с $h = +1,24$ мм лежит вне видимого желтого пламени в высокотемпературной зоне).

Совокупность полученных сведений о локальных газофазных составах в различных точках пламени, распространяющегося по поверхности эпоксидного полимера, в сочетании с результатами определения температурных полей в этом пламени [7], свидетельствует о довольно сложной его структуре. Помимо возможного конвективного заноса нагретых продуктов сгорания в предпламенную зону в ней также протекает гетерогенное окисление невоспламененного полимера. Роль этого процесса в общем механизме распространения пламени пока еще не выяснена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fernandez-Pello A. C., Hirano T. Comb. Sci. Technol., 1983, 32, 1—4, 1—31.
2. Hirano T., Noreikis S., Waterman T. Comb. Flames, 1972, 23, 1, 83—96.
3. Лалаян В. М., Халтуринский П. А., Берлин Ал. Ал. Высокомолекулярные соединения, 1979, А21, 5, 1139—1142.
4. Fernandez-Pello A. C., Williams F. A. // 15th Symp. (Intern.) on Combustion.— Pittsburgh, Pa, 1974.
5. Ohki I., Tsuge S. Comb. Sci. Technol., 1974, 9, 1, 1—31.
6. Jakes K. A., Drews M. J. J. Polym. Sci., 1981, 19, 8, 1921—1936.
7. Колесников Б. Я., Ефремов В. Л. ФГВ, 1987, 23, 2, 60—65.
8. Фристром Р. М., Вестенберг А. А. Структура пламени.— М.: Metallurgy, 1969.
9. Кеандопуло Г. И. Химия пламени.— М.: Химия, 1980.
10. Алексеев М. В., Аверсон А. Э. ФГВ, 1979, 15, 5, 46—53.
11. Самсонов В. П. ФГВ, 1984, 20, 5, 45—50.
12. Ефремов В. Л., Колесников Б. Я., Кеандопуло Г. И. Высокомолекулярные соединения, 1978, А20, 11, 2587—2591.

г. Алма-Ата

Поступила в редакцию 30/V 1988,
после доработки — 29/IX 1988

УДК 536.46

*В. В. Калинин, А. И. Стручаев, С. Г. Орловская,
М. И. Чабанов*

ИНЕРЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАМЕНИ КАПЕЛЬ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ЕГО ГИСТЕРЕЗИСЕ

Известно, что при обдуве горячей капли потоком окислителя теплофизические характеристики горения, форма и размеры пламени тесно связаны со скоростью потока. Гистерезисное поведение пламени, окружающего каплю углеводорода, обнаруженное при изменении скорости обдувающего потока, связано с существованием двух критических скоростей: первая из них определяется максимальным значением скорости потока, при которой пламя еще удерживается на лобовой точке капли; вторая же характеризует восстановление пламени на лобовой точке при его движении из следа капли [1].

Срыв пламени с горящих капель детально изучен при стационарных скоростях потока [2—7]. Менее исследовано восстановление пламени из следа капли на ее лобовой точке [8] и практически отсутствуют экспериментальные работы по кинетике затухания (срыва) при нестационарных скоростях обдува. Теоретический анализ срыва пламени в [2, 4, 6—9] основан на диффузионной модели, которая не раскрывает полного механизма затухания, являющегося тепловым процессом [5]. В данной работе скорость срыва находится как максимальная скорость потока окислителя, при которой пламя существует на лобовой точке капли.

Перемещение и затухание пламени исследовали по методу пористой сферы (рис. 1) в потоке воздуха комнатной температуры при атмосферном давлении с каплями горючих веществ, удельные теплоты парообразования которых сильно различаются.

«Стационарная капля» представляла собой пористый шарик 12, на поверхность которого при помощи поршня 9, приводимого в движение электродвигателем 2 через редуктор 3 и передачу 4, подавалось горючее 11. Плавная подача поршня обеспечивалась системой стабилизации питания 1 электродвигателя. Расход горючего определялся показаниями индикатора 10, связанного с направляющим штоком 5 перемещающегося поршня. Подбором передаточного числа шестерен редуктора скорость подачи топлива можно было изменять в широких пределах.

© 1990 Калинин В. В., Стручаев А. И., Орловская С. Г., Чабанов М. И.