

УДК 541(64+15)

## О РОЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА

© 1994 г. Н. А. Халтуринский, О. Н. Церникдзе, Д. В. Семенов, Г. Я. Малиновский

Институт синтетических полимерных материалов Российской академии наук

117393 Москва, ул. Профсоюзная, 70

Поступила в редакцию 18.10.93 г.

Изучен процесс распространения пламени по поверхности полимера и влияние теплопередачи излучением на этот процесс. Показано, что в случае оптически прозрачных пламен роль теплопередачи излучением незначительна. В случае оптически плотных пламен теплопередача излучением может быть существенной, особенно вблизи предела горения.

Оценка влияния теплопередачи излучением от пламени на распространение волны горения по поверхности полимера является актуальной проблемой и ей посвящен ряд работ. В работе [1] проведено исследование зависимости скорости горения топлива в условиях естественной конвекции на воздухе от его характерного размера. Показано, что, начиная с диаметра очага горения порядка 20 см, конвективная теплопередача от пламени к топливу меняется на теплопередачу излучением. Излучение от пламени, с одной стороны, приводило к возрастанию теплоприхода на полимер, увеличению скорости выгорания полимера и скорости распространения пламени. С другой стороны, оно способствовало уширению зоны пламени, понижению температуры пламени за счет тепло-

потерь в окружающую среду и уменьшению кондуктивной и конвективной теплопередач. Авторы работы [2] утверждают, что при горении малоразмерных эпоксидных образцов вблизи предела горения теплопередача излучением от пламени на полимер существенна. Де Рис [3] из данных о горении брусков топлива размером  $30 \times 30$  см в условиях естественной конвекции на воздухе сделал вывод о доминирующей роли теплопередачи излучением на полимер в случае оптически плотных пламен. Таким образом, в литературе указывается на ведущую роль теплопередачи излучением в развитом пожаре и для пламен с высокой светимостью. Вместе с тем вопрос о роли теплопередачи излучением в случае мелкомасштабных пламен, ее влиянии на процесс распространения пламени остается открытым, и настоящая работа посвящена его изучению.

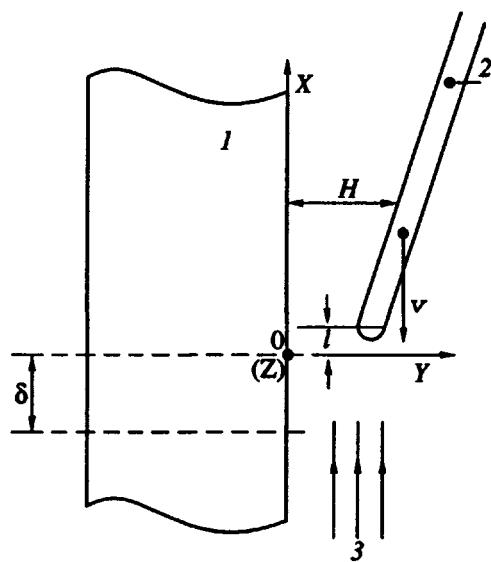


Рис. 1. Схема движения фронта пламени по поверхности полимера: 1 – образец полимера, 2 – поверхность пламени, 3 – поток окислителя; δ – характерная величина зоны прогрева конденсированной фазы.

источников света, причем толщина поверхности горения мала по сравнению с характерным расстоянием  $H$  от этой поверхности до полимера. Данное предположение подтверждается в работе [4].

Следовательно, поверхность горения в этой модели можно представить в виде сетки точечных источников излучения и экспериментально определить среднюю удельную светимость каждой ячейки сетки. Шаг сетки представляет собой расстояние вдоль оси  $OX$  (или времени, вследствие постоянной скорости  $v$  распространения пламени) между измерениями потоков лучистой энергии. Сетка имеет тот же шаг по оси  $Z$  в предположении, что интенсивность излучения не меняется по ширине пламени.

Представив плоскость пламени совокупностью точечных источников света, мы можем определить тепловой поток, приходящий в точку поверхности полимера с координатой  $(X, 0, 0)$  от всего пламени

$$Q(X) = \frac{1}{2\pi} \times \sum_{k=0}^N \left[ \arctg (\epsilon(M+1/2) [\epsilon(k+1) - X]) \right. \\ \times \frac{(H_k \sqrt{(\epsilon(k+1) - X)^2 + \epsilon^2(M+1/2)^2 + H_k^2})}{(H_k \sqrt{(\epsilon(k+1) - X)^2 + \epsilon^2(M+1/2)^2 + H_k^2})} - (1) \\ \left. - \arctg \frac{\epsilon(M+1/2)(\epsilon k - X)}{H_k \sqrt{(\epsilon k - X)^2 + \epsilon^2(M+1/2)^2 + H_k^2}} \right] I_k,$$

где  $M = B/2\epsilon$ ,  $H_k = B + A \epsilon (k + 1/2)$ ,  $\epsilon$  – коэффициент черноты пламени,  $I_k$  – интенсивность излучения пламени в центре  $k$ -ой ячейки разбиения.

Чтобы оценить влияние излучения пламени на процесс горения полимера, естественно решить следующую задачу, а именно, рассчитать, до какой температуры нагреется поверхность материала под действием данного теплового потока (1) и сравнить рассчитанную температуру с экспериментально измеренной. Такое сравнение даст нам возможность оценить вклад теплопередачи излучением в процессе распространения пламени по поверхности полимера.

Введем стандартные приближения: теплофизические характеристики полимера постоянны; теплоотдача в газовую фазу незначительна; скорость волны горения  $v$  постоянна. Тогда в системе координат, движущейся вместе с пламенем, уравнение теплопроводности записывается в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} - \frac{v \partial T}{\alpha \partial X} = 0, \quad -\infty < X < \infty, \\ T|_{X \rightarrow -\infty} = T|_{Y \rightarrow -\infty} = T_0, \quad Y \leq 0, \quad (2) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial Y}|_{Y=0} = Q(X),$$

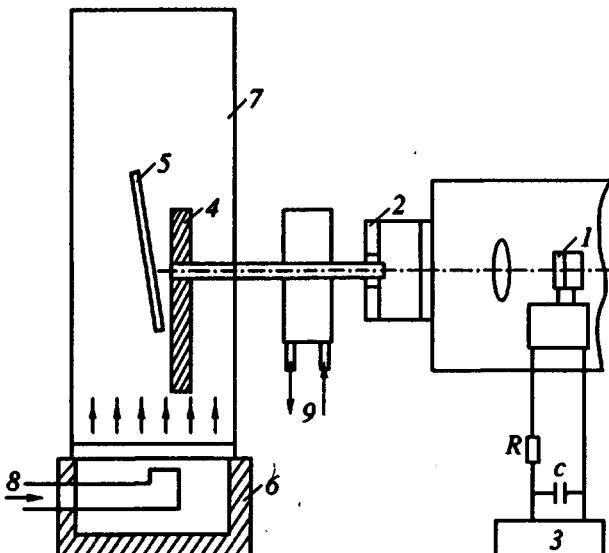


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования светимости пламенем: 1 – ИЛД-2М; 2 – диафрагма с трубкой; 3 – Н-117; 4 – образец полимера; 5 – поверхность горения; 6 – латунный стакан; 7 – кварцевая трубка; 8 – ввод окислителя; 9 – охлаждающая вода.

где  $T_0$  – начальная температура,  $\alpha$  – температуропроводность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $Q(X)$  – приходящий на поверхность образца тепловой поток, полученный по формуле (1).

Используя известную [5] функцию Грина для полуплоскости, можно получить следующее решение системы (2):

$$T(X) = T_0 + \frac{1}{\pi \lambda} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) \exp \left[ \frac{v}{2} (X - \xi) \right] K_0 \left\{ \frac{v}{2\alpha} |X - \xi| \right\} d\xi \quad (3)$$

( $K_0$  – модифицированная функция Ганкеля нулевого порядка).

Экспериментальная установка, предназначенная для измерения мощности излучения единицы поверхности пламени, расстояния от пламени до поверхности образца, скорости распространения пламени (навстречу потоку окислителя) по поверхности вертикально расположенного термически толстого слоя полимерного материала, представлена на рис. 2. В качестве датчика ИК-излучения использовали измеритель ИЛД-2М. На входное окно ИЛД-2М навинчивали диафрагму с трубкой (внутренний диаметр трубы 2.00 + 0.03 мм, длина 30 мм). Образцы материалов в форме параллелепипедов ( $50 \times 70 \times 10$  мм) надевали на трубку и поджигали нагревателем с верхнего края. Боковые грани образца закрывали алюминиевой фольгой, для предотвращения распространения пламени по ним. Мощность излучения участка пламени, находящегося в данный момент времени в поле зрения системы регистрации излучения,

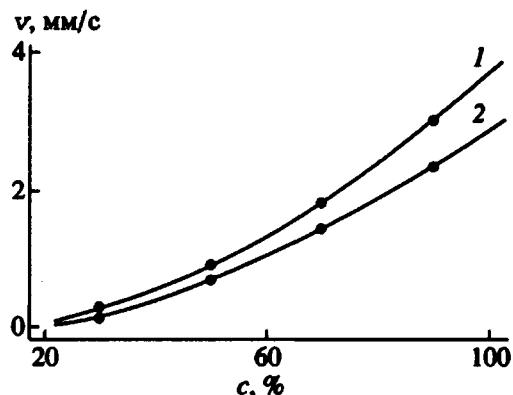


Рис. 3. Скорость распространения пламени по поверхности полимера  $v$  в зависимости от концентрации кислорода  $c$  в потоке окислителя; 1 – ПММА, 2 – эпоксидный полимер ЭД-20.

записывали на шлейфовый осциллограф Н-117. Одновременно осуществляли фотографирование пламени через равные промежутки времени. Скорость потока окислителя поддерживали постоянной и равной  $3.0 \pm 0.1$  см/с. Так как длина трубки  $L$  намного больше ее внутреннего диаметра  $d$  и расстояния от поверхности горения до поверхности полимера  $H$ , участок поверхности горения, находящийся в поле зрения системы регистрации, можно считать точечным источником излучения. Показания измерителя  $W$  связаны с удельной светимостью  $I$  данного участка поверхности горения по формуле

$$I(X) = W(X) \frac{4\pi L^2}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2}.$$

При концентрациях кислорода от 20 до 100% через каждые 10% изучали светимость пламен при горении ПММА и эпоксидного полимера. При каждой концентрации кислорода проводили серию из 10 экспериментов, результаты которых усредняли. Первичными результатами были фотопленки и показания измерителя излучения. Фотопленки проецировали на экран и на нем опре-

деляли скорость распространения пламени и расстояния от поверхности горения до поверхности полимера. Относительная точность определения скорости распространения пламени и расстояний была не ниже 5% для ПММА и 10% для эпоксидного полимера.

Зависимость коэффициентов  $A$  и  $B$  в уравнении поверхности максимального свечения  $Y = AX + B$  от концентрации  $O_2$  для ПММА и эпоксидного полимера ЭД-20

$c_{O_2}$ , %	$A \times 10^2$		$B$ , мм	
	ЭД-20	ПММА	ЭД-20	ПММА
20	–	2.0	–	2.1
40	6.8	2.4	1.0	1.9
60	5.7	3.0	0.8	1.8
80	5.4	3.6	0.5	1.7
100	4.2	4.2	0.4	1.5

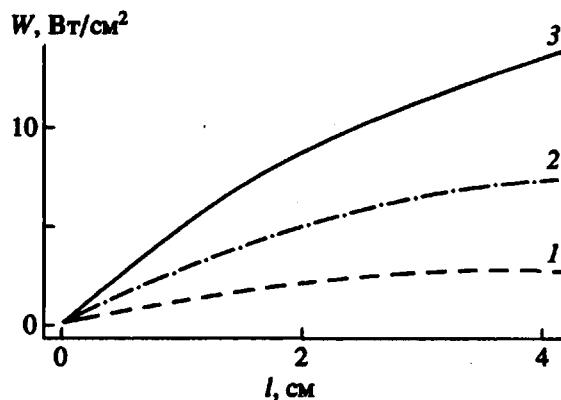


Рис. 4. Мощность излучения единицы поверхности пламени  $W$  ПММА в зависимости от расстояния до ведущей кромки пламени  $l$ ; концентрация  $O_2$  20 (1), 40 (2) и 100% (3).

деляли скорость распространения пламени и расстояния от поверхности горения до поверхности полимера. Относительная точность определения скорости распространения пламени и расстояний была не ниже 5% для ПММА и 10% для эпоксидного полимера.

Результаты измерения скорости распространения пламени по поверхности полимеров представлены на рис. 3. При горении ПММА и эпоксидного полимера расстояние от поверхности горения до поверхности полимера растет линейно при удалении от кромки вплоть до величины порядка 40 мм. Тогда поверхность горения можно представить полуплоскостью  $Y = AX + B$ . В таблице представлены данные по коэффициентам  $A$  и  $B$  в зависимости от концентрации кислорода в натекающем газовом потоке. При дальнейшем удалении от кромки пламени наблюдали турбулентную зону с сильно колеблющейся светимостью. По этой причине при расчетах ее не учитывали, тем более, что вероятное влияние зоны на распространение пламени незначительно вследствие больших расстояний до кромки. В случае эпоксидного полимера при концентрациях кислорода в газовом потоке до 50% пламя распространялось вниз отдельными языками, ширина которых составляла 3–5 мм. Сплошной фронт пламени возникал только на расстояниях 3–5 мм от этих ведущих кромок. Такая неравномерность распространения пламени и обусловила большую ошибку эксперимента в этом случае по сравнению с таковой для ПММА.

На фотоснимках, выполненных через красный светофильтр, поверхность горения выглядит как темная полоса, шириной от 0.2 до 1.0 мм в зависимости от расстояния до ведущей кромки. При анализе фотографий за поверхность максимальной светимости принимали линию максимальной оптической плотности на негативных фотоснимках.

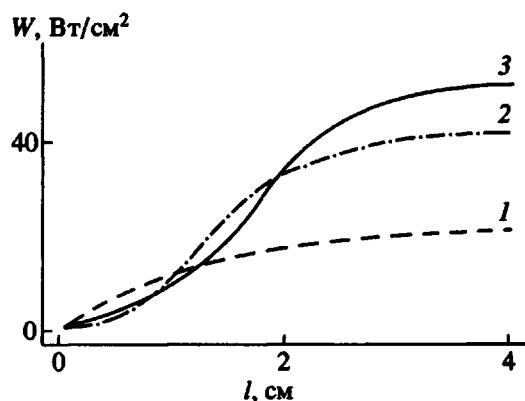


Рис. 5. Мощность излучения единицы поверхности пламени  $W$  эпоксидного полимера в зависимости от расстояния до ведущей кромки пламени  $l$ ; концентрация  $O_2$  30 (1), 60 (2) и 100% (3).

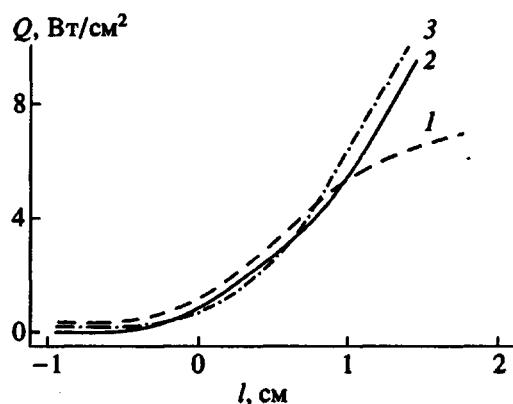


Рис. 7. Термовой поток на поверхность эпоксидного полимера в зависимости от расстояния до ведущей кромки пламени; концентрация  $O_2$  30 (1), 60 (2) и 100% (3).

Усредненные значения (имеющие относительную ошибку 10%) мощности излучения единицы поверхности пламени ПММА показаны на рис. 4; аналогичные данные для эпоксидного полимера — на рис. 5. По известной геометрии поверхности горения (высота пламени над поверхностью в каждой точке) и по данным о мощности излучения по формуле (1) были рассчитаны тепловые потоки на поверхность ПММА (рис. 6) и эпоксидного полимера (рис. 7).

Из известных величин удельного теплового потока, связанного с излучением на поверхность образца полимера, и скорости распространения пламени по формуле (3) рассчитывали температурные профили, возникающие на поверхности конденсированной фазы под действием излучения. Результаты расчета представлены на рис. 8 для ПММА и на рис. 9 для эпоксидного полимера. Если в случае ПММА воздействие излучения приводило к незначительному подъему температуры на кромке пламени, то для эпоксидной ком-

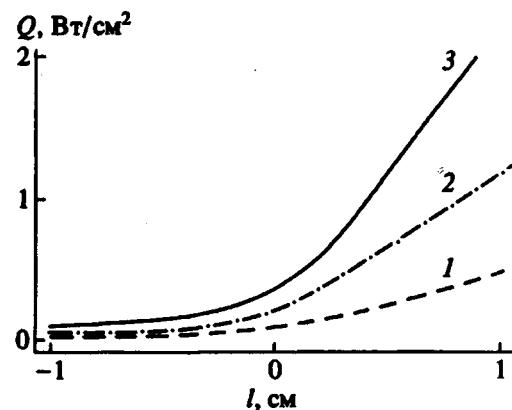


Рис. 6. Термовой поток на поверхность ПММА  $Q$  в зависимости от расстояния до ведущей кромки пламени  $l$ ; концентрация  $O_2$  20 (1), 40 (2) и 100% (3).

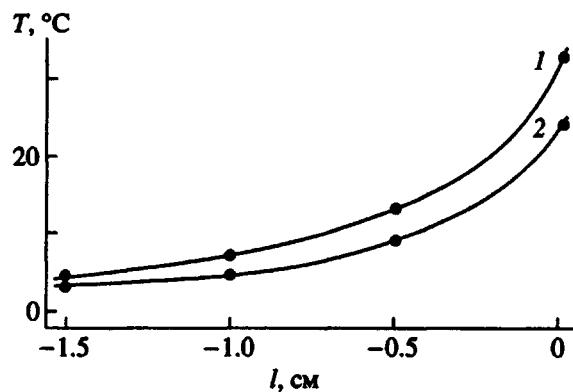


Рис. 8. Расчетный температурный профиль поверхности ПММА; концентрация  $O_2$  20 (1) и 40% (2).

позиции прогрев излучением оказался существенным.

На рис. 10 показаны температуры, до которых нагреваются поверхности полимеров под кромкой пламени под действием излучения. Оказалось, что несмотря на возрастание светимости пламени и, как следствие, увеличение тепловых потоков, связанных с излучением, при повышении концентрации кислорода перед кромкой распространяющегося пламени, вклад излучения в прогрев полимера падает. Этот факт легко объясняется при качественном рассмотрении влияния концентрации кислорода в окружающей среде на тепловые потоки, обусловленные излучением и конвекцией. Действительно, из экспериментальных данных, которые подтверждаются в работе [6], следует, что зависимость теплового потока, вызванная излучением, от концентрации кислорода близка к линейной. Конвективный же тепловой поток пропорционален квадрату концентрации окислителя (с повышением концент-

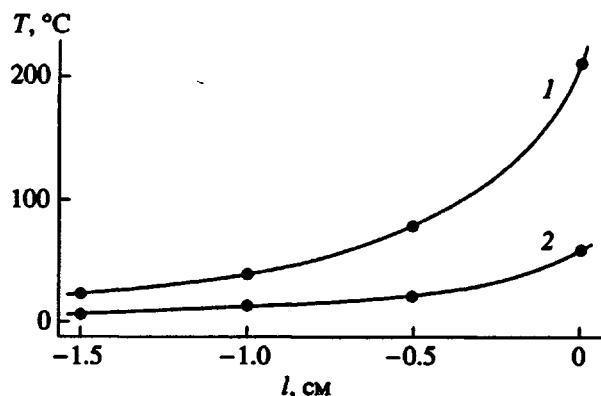


Рис. 9. Расчетный температурный профиль поверхности эпоксидного полимера; концентрация  $\text{O}_2$  30 (1) и 60% (2).

рации кислорода растет температура пламени и поверхность горения на кромке приближается к поверхности полимера). Кроме того, как видно на рис. 5, увеличение содержания кислорода в окружающей среде может привести к уменьшению светимости участка пламени, непосредственно примыкающего к кромке, из-за изменения условий воспламенения системы продукты пиролиза – окислительная среда. Таким образом, при увеличении содержания кислорода в газовой фазе конвективный тепловой поток вблизи кромки пламени растет быстрее теплового потока излучением, чем и объясняется уменьшение расчетной температуры.

Для оценки вклада кондуктивной теплопередачи через конденсированную фазу в прогрев полимера перед кромкой пламени при расчете температуры по формуле (3) тепловые потоки за кромкой были увеличены на порядок по сравнению с расчетными. Однако даже такие тепловые потоки не приводили к ощутимому подъему температуры перед кромкой. Следовательно, вклад кондуктивной теплопередачи в процесс распространения пламени при наблюдаемых скоростях распространения незначителен.

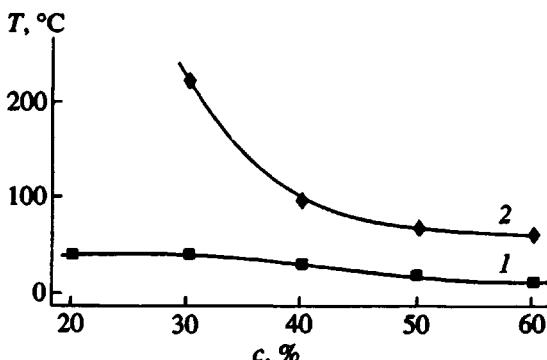


Рис. 10. Расчетные температуры под кромкой пламени для ПММА (1) и эпоксидного полимера (2) в зависимости от концентрации кислорода  $c$  в потоке окислителя.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в случае маломасштабных пламен влияние излучения на распространение пламени существенно меняется в зависимости от светимости. Если при горении ПММА (оптически прозрачное пламя) вклад излучения в прогрев поверхности полимера мал, то при горении эпоксидной композиции (сажистое пламя с высокой светимостью) прогрев излучением, особенно вблизи предела горения, входит в число основных факторов теплопередачи из пламени на поверхность полимера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Williams F.A. // Prog. Energy Comb. Sci. 1982. V. 8. P. 337.
- Махаринский Л.Е. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МФТИ, 1984.
- J. de Ris. 17th Symp. on Combustion. Wesport, 1979. P. 1003.
- Колесников Б.Я. Дис. ... д-ра хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1988.
- Нобл Б. Методы Винера-Хонда. М.: Изд-во Иностр. лит., 1962.
- Махаринский Л.Е., Халтуринский Н.А., Берлин А.Л.А. // Высокомолек. соед. А. 1985. Т. 27. № 1. С. 194.

## The Role of Radiation in Spread of Flame over the Surface of Polymer

N. A. Khalturinskii, O. N. Tserikidze, D. V. Semenov, and G. Ya. Malinovskii

Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,  
ul. Profsoyuznaya 70, Moscow, 117393 Russia

**Abstract** – The propagation of flame over the surface of polymer is investigated and the role of radiative heat transfer in the process studied. The role of radiative heat transfer is shown to be insignificant for optically transparent flames. For the optically dense flames the radiative heat transfer can play a significant role, especially close to the limit of combustion.