

4. L. C. Yang, V. J. Menichelli. Appl. Phys. Let., 1971, 19, 11, 473.
5. L. C. Yang, V. J. Menichelli. 6-th Symp. (Internat.) on Detonation. V. 2. California, 1976.
6. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников.— В кн.: Взрывное дело, № 68/25. М.: Недра, 1970.
7. А. Ф. Беляев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
8. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория ВВ. М.: Оборонгиз, 1960.
9. Ф. А. Баум и др. Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. М.: Недра, 1969.
10. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968.
11. Б. Н. Кутузов и др. Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт. М.: Недра, 1979.
12. К. К. Андреев, В. Г. Хотин.— В кн.: Взрывное дело, № 52/9. М.: Недра, 1963.
13. А. И. Гольбиндер, Л. М. Светлова, В. Ф. Тышевич.— Там же.
14. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.

### ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПММА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. Э. Аверсон, М. В. Алексеев, В. П. Борисов, В. Д. Кочаков  
(Чебоксары)

Изучению горения полимерных материалов, ориентированных под различными углами по отношению к направлению силы тяжести, посвящено большое количество работ [1—7]. В них рассматривается в основном влияние угла наклона на скорость горения [1—5] либо на условия потухания. Однако достаточно подробного анализа роли пространственной ориентации на воспламенение и движение продуктов газификации в литературе найти не удалось. В то же время эта проблема актуальна как с точки зрения пожаробезопасности, так и выяснения механизма возникновения пламени.

Данная работа посвящена исследованию влияния тепло- и массообмена на условия появления пламени в зависимости от ориентации поверхности полимера относительно направления силы тяжести. Эксперименты проводили при атмосферном давлении в воздухе на установке, включающей лазер на  $\text{CO}_2$  и электромеханический затвор с блоком формирования длительности импульса. Плотность потока излучения задавалась от 20 до 200 Вт/см<sup>2</sup>. Процесс визуализировался интерференционным методом и регистрировался кинокамерой СКС-1М. Образцы полимера размером  $20 \times 30$  см<sup>2</sup> и толщиной не менее 1 см облучали перпендикулярным к поверхности лучом лазера диаметром 0,5—1,5 см. Наклон образцов относительно направления силы тяжести меняли от «напольного» (излучение сверху,  $\varphi=0$ ) до «потолочного» (излучение снизу,  $\varphi=\pi$ ) положения. Воспламенение фиксировалось по появлению пламени.

На рис. 1 приведены зависимости времени задержки воспламенения полиметилметакрилата (ПММА) от угла ориентации при различных значениях теплового потока. Из рисунка видно, что при превышении некоторого критического угла  $\varphi$  время задержки воспламенения  $t$  резко увеличивается.

Для выяснения причин обнаруженного эффекта проведены исследования структуры потока продуктов

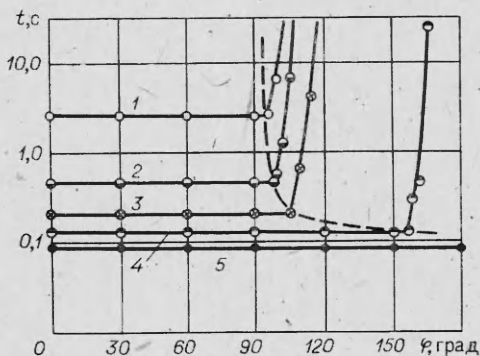


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения  $t$  от угла наклона  $\varphi$ . Плотность потока, Вт/см<sup>2</sup>: 1—40, 2—70, 3—100, 4—120, 5—180.

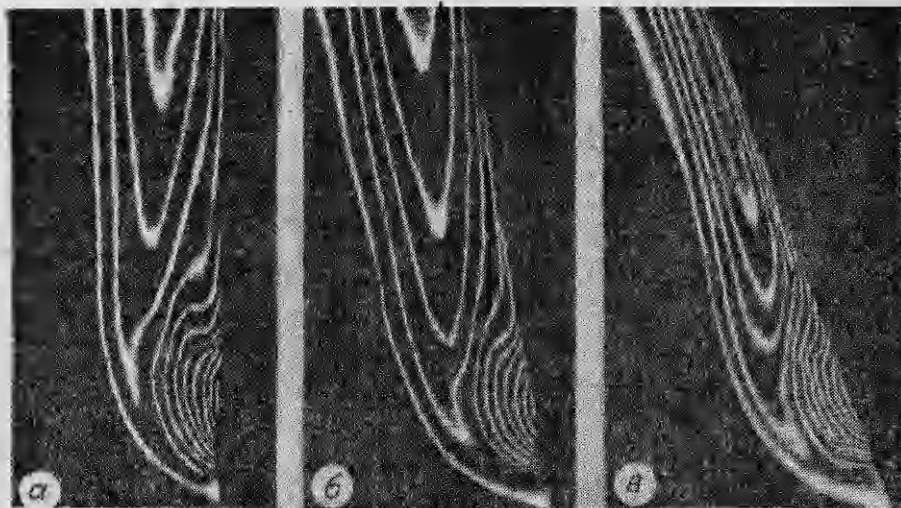


Рис. 2. Интерференционные картины течения продуктов газификации при различных ориентациях.  
 $\varphi$ , град: а) 90, б) 100, в) 110.

пиролиза интерференционным методом. Характерные картины визуализированного потока невоспламенившихся продуктов вблизи предела воспламенения для разных углов наклона образцов ПММА представлены на рис. 2. Анализ структуры интерференционных полос позволяет выделить две зоны в этом потоке: зону в виде полусферы, обусловленную оттекающими перпендикулярно поверхности продуктами деструкции полимера, возникшими вследствие термического действия лазерного излучения, и зону конвективного потока — результат совместного действия инерционных и гравитационных сил, в которой происходят смешение этих продуктов с окружающим воздухом и химические реакции дальнейшего распада и окисления. В зоне конвективного потока ядро течения характеризуется резким изломом интерференционных полос. Термопарные измерения показали, что ядро течения совпадает с областью максимальной температуры (850—900 К) и располагается на расстоянии 20—50 мм от очага газификации.

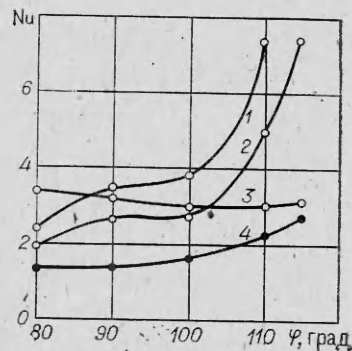
Как видно из рис. 2, поток газообразных продуктов при превышении критического угла прижимается к поверхности, а толщина его резко меняется; при этом, как показали измерения, температура в ядре струи остается практически постоянной  $\sim 900$  К.

Поскольку воспламенение полимеров определяют реакции окисления, протекающие в газовой фазе, естественно предположить, что изменение характеристик воспламенения связано с условиями оттока газообразных продуктов деструкции, т. е. процессов тепло- и массообмена. Для появления пламени в газовой фазе необходимо превышение скорости тепловыделения за счет химических реакций окисления  $Q$  над скоростью теплоотвода  $q$  на пределе воспламенения ( $Q \geq q$ ). В свою очередь, скорость теплоотвода из зоны химической реакции равна сумме скоростей теплоотвода в окружающую холодную газообразную среду  $q_r$  и в полимер  $q_{тв}$ .

Оценки интенсивности теплообмена в стенку  $q_{тв}$  и в окружающую среду  $q_r$  проведены путем обработки интерферограмм. Присутствие стенки (полимера) вблизи горячей струи продуктов пиролиза должно приводить к увеличению теплопотерь, что видно из сопоставления тепловых активностей окружающей среды и материала стенки:  $\sqrt{\lambda_{тв} c_{тв} \rho_{тв}} / \sqrt{\lambda_r c_r \rho_r} \approx 100$ , где для ПММА:  $\lambda_{тв} = 0,2$  Вт/(м·К),  $c_{тв} = 1600$  Дж/(кг·К),  $\rho_{тв} = 1200$  кг/м<sup>3</sup>; для воздуха:  $\lambda_r = 0,025$  Вт/(м·К),  $c_r = 1000$  Дж/(кг·К),  $\rho_r = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> [8, 9]. Зависимости локальных чисел Нуссельта, которые

Рис. 3. Зависимость локальных чисел  $Nu$  от угла наклона  $\varphi$  при плотности потока излучений  $50 \text{ Вт/см}^2$ .

Для  $Nu_{\Gamma x}$ , мм: 1 — 20, 2 — 15, 4 — 10; для  $Nu_{\Gamma}$   $x=15$  мм (3).



определены как  $Nu = x/\delta$ , где  $x$  — координата от центра пятна облучения,  $\delta$  — толщина приведенной пленки [10], равная расстоянию от ядра течения струи продуктов пиролиза до стенки или до холодных слоев окружающего воздуха, от угла наклона  $\varphi$ , представлены на рис. 3. Видно, что теплопотери в стенку существенно растут с увеличением угла наклона на расстоянии  $x = 15 \div 20$  мм от пятна облучения, т. е. в зоне максимальной температуры. В то же время в окружающую газовую среду теплопотери практически неизменны (см. рис. 3, 3).

Возвращаясь к рис. 1, отметим, что описанные явления наблюдаются в диапазоне плотностей потока  $20\text{--}180 \text{ Вт/см}^2$ , при меньших значениях ПММА не воспламеняется, а при больших — воспламеняется при углом  $\varphi_{кр}$  и плотностью потока, условно выделенная на рисунке штриховой линией, что можно объяснить разными скоростями струи продуктов пиролиза. Очевидно, что увеличение скорости приводит к удалению ядра струи от стенки, следовательно, условия воспламенения могут реализоваться при больших углах наклона.

Влияние ориентации на воспламенение должно проявиться и на других веществах, способных к диффузионному горению, что подтверждается экспериментами с полистиролом, деревом, картоном и даже бумагой. Однако для каждого из этих веществ существует свой диапазон плотностей потока облучения.

В заключение авторы выражают благодарность А. С. Штейнбергу за полезное обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию 14/VII 1983,  
после доработки — 6/XII 1983.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Moge, R. F. McAlevy, III. J. Fire and Flammability, 1971, 2, 271.
2. M. Sibulkin, C. C. Lee. Comb. Sci. and Techn., 1974, 9, 137.
3. A. Hansen, M. Sibulkin. Ibid., 1974, 9, 173.
4. K. Ahnamalai, M. Sibulkin. Ibid., 1979, 19, 167.
5. Л. И. Алдабаев, Н. Н. Бахман и др. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка, 1977.
6. Н. И. Бахман, Л. И. Алдабаев. — В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
7. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. — Там же.
8. Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
9. Дж. Кэй, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Физматгиз, 1962.
10. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.