

3. Время, необходимое для формирования фронта горения в поджигаемой системе, определяется в основном характеристиками воспламенителя. Время установления стационарной скорости горения зависит в сильной степени как от характеристик воспламенителя, так и от характеристик самой поджигаемой системы.

Поступила в редакцию
12/II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Шидловский. Основы пиротехники. М., «Машиностроение», 1973.
2. А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский. ПМТФ, 1969, 5.
3. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович. ПМТФ, 1964, 5.
4. С. С. Новиков, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1968, 180, 6.
5. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
6. В. А. Фрост, В. Л. Юмашёв. ПМТФ, 1973, 3.
7. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1971, 7, 3.
8. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.

УДК 662.215.1

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЗАЖИГАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

В. Т. Кузнецов, В. П. Марусин, А. И. Скорик

(Томск)

Зажигание гетерогенных конденсированных систем представляет собой сложный нестационарный процесс. Изучение этого явления при низких интенсивностях подвода тепла (до $4 \cdot 10^5$ Вт/м²) проводилось многими авторами, например [1, 2]. Результаты этих исследований описываются в рамках тепловой теории зажигания [3]. Опытные данные, полученные при более высокой интенсивности теплоподвода [4, 5], с позиции тепловой теории зажигания объяснить невозможно. В данной работе изучено влияние интенсивности подвода тепла, давления и состава атмосферы на механизм зажигания гетерогенной системы, состоящей из перхлората аммония и полимерного горючего (в отношении 76:24).

Исследования проводились на установке радиационного нагрева «Уран-1» [6], в которой излучение ксеноновой лампы ДКСР-10 000 фокусировалось эллиптическим зеркалом в пятно диаметром $1,2 \cdot 10^{-2}$ м. Установка обеспечивала стабильность светового потока во времени не ниже 95%. Отклонение от фокальной плоскости на $1 \cdot 10^{-3}$ м в любую сторону приводило к уменьшению теплового потока на 5%.

Интенсивность теплового излучения измерялась медным калориметром [7], ошибка в измерении не превышала 10%. Исследуемые образцы имели форму цилиндров диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $5 \cdot 10^{-3}$ м. Изменение высоты образца за счет выгорания поверхностного слоя в индукционный период зажигания не превышало $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Коэффициент отражения исследуемых образцов, определенный на шаровом фото-

метре ФМШ-56М в диапазоне длин волн 0,36—1,1 мк, составлял 7% и практически не зависел от длины волны. Изменение коэффициента отражения в процессе опыта и поглощение внешнего излучения продуктами газификации не измерялось и при количественных оценках не учитывалось.

В опытах при повышенных давлениях и различных составах атмосферы использовалась камера объемом $5 \cdot 10^{-4}$ м³ с кварцевыми окнами, которая устанавливалась в фокальном объеме оптической печи. Тепловой поток излучения в этом случае подавался на образец через шторный электрозатвор со временем раскрытия $13 \cdot 10^{-3}$ с. При проведении опытов в среде воздуха и атмосферном давлении использовался дисковый затвор, обеспечивающий получение трапециевидного импульса света. Величина теплового потока сохранялась постоянной в течение 3/5 времени экспозиции. Начало и конец экспозиции, а также момент появления пламени фиксировались фотоэлектрической системой и записывались на шлейфовом осциллографе Н-700.

Время задержки зажигания в зависимости от интенсивности теплового потока, давления и состава окружающей среды в опытах измерялось двумя методами: по критерию воспламенения «да — нет» и по появлению видимого пламени. В первом случае за время задержки принималось минимальное время экспозиции, приводящее к устойчивому горению гетерогенной системы [8]. Во втором — промежуток времени от начала экспозиции до момента появления видимого пламени. Для получения качественной картины зажигания проводилась киносъемка процесса со скоростью 1500 кадров в секунду камерой ККС-16-1м.

Результаты исследований зависимости времени задержки зажигания от интенсивности поглощенного теплового потока в среде воздуха и атмосферном давлении представлены в таблице. Приведенные значения времени задержки являются средними из 5—10 опытов. До потока порядка $6 \cdot 10^5$ Вт/м² времена зажигания, определенные обоими методами, практически совпадают, и зависимость времени задержки от теплового потока в логарифмических координатах описывается прямой с тангенсом угла наклона — 1,9, что соответствует твердофазной модели зажигания. При больших потоках времена зажигания, измеренные по появлению пламени, меньше, чем определенные по методу «да — нет», а зависимость времени задержки от теплового потока в логарифмических координатах становится более слабой (тангенс угла наклона прямой, описывающей эту зависимость, равен 0,8).

Скоростная киносъемка процесса показала, что при потоках порядка $6 \cdot 10^5$ Вт/м² ($q_{кр}$) происходит изменение физической картины зажигания. Потоки ниже критического приводят к появлению пламени непосредственно на поверхности образца, и зажигание всегда переходит в устойчивое горение.

При более высоких интенсивностях излучения ($q > q_{кр}$) первичное пламя появляется в газовой фазе на некотором расстоянии от образца, а затем распространяется к его поверхности. Для устойчивого зажигания необходимо некоторое переоблучение образцов. Если внешний тепловой поток прерывается в момент появления пламени в газовой фазе, то происходит погасание.

Тепловой поток излучения $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м ²	Время задержки зажигания, с	
	по методу «да — нет»	по появлению пламени
0,9	—	7,7±0,5
1,6	—	3,7±0,3
2,4	1,35±1,40	1,3±0,1
4,6	0,55±0,57	0,55±0,05
6,8	0,33±0,34	0,25±0,04
7,5	0,32±0,33	0,19±0,02
9,3	0,20±0,22	0,16±0,02
11,3	0,190±0,195	0,09±0,01
19,3	0,155±0,160	0,075±0,005
23,0	0,135±0,140	0,065±0,005

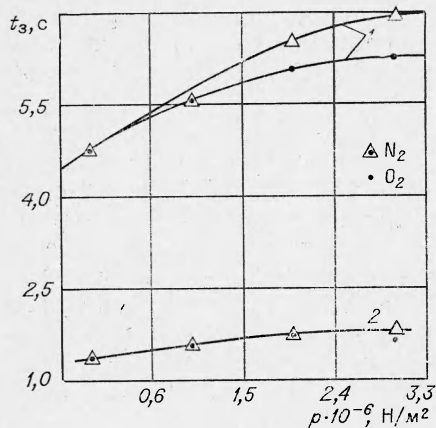


Рис. 1. Зависимость времени задержки от давления и состава среды при зажигании потоком тепла низкой интенсивности.

1 — $q = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 — $q = 3,1 \cdot 10^5$ Вт/м².

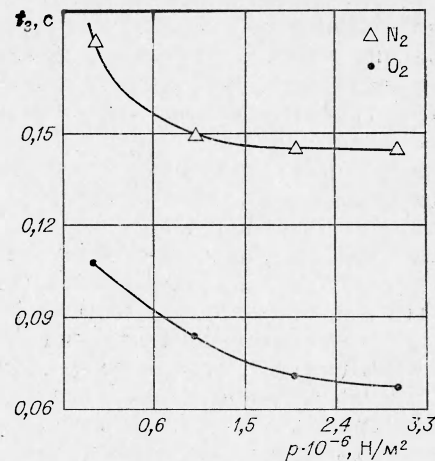


Рис. 2. Зависимость времени задержки зажигания от давления и состава среды при тепловом потоке $q = 10^6$ Вт/м².

Наличие критического теплового потока, выше которого в процессе зажигания возрастает роль газофазных реакций, подтверждается и опытами по влиянию на время зажигания состава и давления окружающей среды, которые проводились в атмосфере азота (инертная среда) и кислорода (окислительная среда) при давлениях от атмосферного до $3 \cdot 10^6$ Н/м² и интенсивностях теплового потока $1,5 \cdot 10^5$, $3,1 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ Вт/м². Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2. Из приведенных данных видно, что при потоках $1,5 \cdot 10^5$ и $3,1 \cdot 10^5$ Вт/м² (ниже критического) состав атмосферы не оказывает существенного влияния на время зажигания. Повышение давления приводит к некоторому увеличению задержки зажигания, что может быть связано с повышением теплообмена между образцом и окружающей средой и дополнительными теплотерями из прогретого слоя (см. рис. 1). При потоке $1 \cdot 10^6$ Вт/м² (выше критического) время зажигания в окислительной атмосфере примерно вдвое ниже, чем в инертной, а повышение давления уменьшает задержку зажигания (см. рис. 2). Наблюдаемые эффекты указывают на то, что в данных условиях решающую роль играют не процессы теплообмена, а скорость протекания газофазных реакций.

Полученные результаты интересно рассмотреть с точки зрения энергетических затрат. На рис. 3 изображены зависимости энергии, обеспечивающей устойчивое зажигание исследуемых образцов (кривая 1), и энергии, необходимой для образования и воспламенения продуктов газификации гетерогенной системы (кривая 2), от интенсивности теплового потока. Характерным является наличие минимума на кривой 1 при потоке порядка $8 \cdot 10^5$ Вт/м². Наблюдаемую закономерность можно объяснить следующим образом. Согласно [9], для устойчивого зажигания необходимо повысить температуру поверхности до величины, близкой в температуре поверхности горения в стационарном процессе, и создать необходимый запас тепла в прогретом слое. Исходя из этого, можно предположить, что расход энергии на зажигание должен быть минимальным, если режим нагрева обеспечивает одновременное достижение этих условий. При заданных кинетических и теплофизических параметрах исследуемой системы такому режиму соответствует вполне определенное значение теплового потока q^* .

Уменьшение и увеличение интенсивности потока приводит к некоторому «перерасходу» энергии. Если зажигание производится тепловым

потоком более низкой интенсивности ($q < q^*$), температура поверхности повышается медленно и образцы прогреваются на большую, чем необходимо для стационарного горения, глубину. При высокой интенсивности подвода тепла ($q > q^*$) температура поверхности может достигнуть критического значения раньше, чем сформируется прогретый слой, обеспечивающий устойчивое зажигание, и процесс дальнейшего прогрева образца будет сопровождаться расходом энергии на интенсивную газификацию вещества с поверхности. В последнем случае образовавшиеся продукты газификации могут воспламениться в индукционном режиме или вследствие дополнительного нагрева за счет поглощения внешнего излучения [10]. Как показывает сравнение кривых 1 и 2 (см. рис. 3), при потоках выше $6 \cdot 10^5$ Вт/м² для этого требуется меньше энергии, чем для осуществления устойчивого зажигания. Следует отметить, что поглощение внешнего излучения продуктами газификации может привести к ослаблению зависимости времени задержки зажигания от теплового потока.

Таким образом, изучение воспламенения гетерогенной системы при различных интенсивностях подвода тепла показало, что существует критический тепловой поток ($6 \cdot 10^5$ Вт/м²), ниже которого опытные данные описываются в рамках тепловой теории зажигания. При потоке выше критического существенно возрастает роль газофазных реакций в процессе зажигания.

Переход от зажигания к стационарному горению гетерогенной системы при потоках ниже критического наблюдается с момента появления пламени. При потоках выше критического вспышка продуктов газификации над поверхностью образца не приводит к стационарному горению и необходимо некоторое переоблучение поверхности гетерогенной системы, чтобы зажигание перешло в режим стационарного горения. Количество энергии, необходимое для устойчивого зажигания, зависит от интенсивности теплового излучения и имеет минимум при потоке порядка $8 \cdot 10^5$ Вт/м².

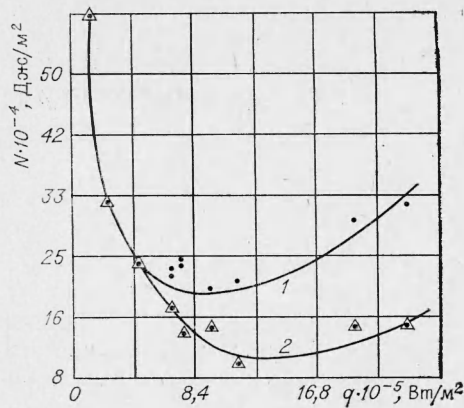


Рис. 3. Зависимость поглощенной энергии от интенсивности теплового излучения.

Поступила в редакцию
12/11 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Altman, A. F. Grant. 4-th Symposium (Intern.) on Combustion, Baltimore 1953.
2. A. D. Ваер, N. W. Ryan. AIAA J., 1965, 3, 5.
3. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. Combustion and Flame, 1971, 16, 1.
4. Беер, Н. Фишман. В сб. «Исследование ракетных двигателей на твердом топливе». М., ИЛ, 1963, стр. 427.
5. L. Shanno. AIAA J., 1970, 8, 2.
6. Г. Г. Лопатина, В. П. Сосоров и др. Оптические печи. М., «Металлургия», 1967.
7. Beyer, Mecully, Evans. Appl. Optics, 1964, 3, 1.
8. W. A. Rosser, N. Fishman, H. Wise. AIAA J., 1966, 4, 9.
9. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
10. С. М. Mihifeith, A. D. Ваер, N. W. Ryan. AIAA J., 1972, 10, 10.