

ния  $C_{NO}$  по высоте пламени (рис. 3) удовлетворительно согласуются с экспериментом. Рассчитанная концентрация NO в конце зоны горения также согласуется с экспериментом (см. таблицу).

При измерении  $C_{NO}$  для пламени названных порохов, горящих при давлениях 5, 10, 20 атм, удалось установить только часть профиля  $C_{NO}=f(h)$  (см. рис. 3). Со стороны поверхности горения измерения  $C_{NO}$  были ограничены высокой концентрацией NO (практически полное поглощение света источника). Однако можно заметить, что характер зависимости  $C_{NO}=f(h)$  при давлениях 5—20 атм для всех исследованных порохов остается качественно таким же, как и при 1 атм.

*Институт химической  
физики АН СССР, Москва*

*Поступила в редакцию  
29/X 1975*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Кондратьев. Свободный гидроксил. ГОНТИ, 1939.
2. Л. А. Авраменко. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1940.
3. С. С. Пеннер. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М. ИЛ, 1963.
4. W. E. Kasikan, D. E. Hughes. Combustion and Flame, 1973, 20, 3, 381.
5. В. М. Мальцев. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1963.
6. Я. Б. Зельдович и др. Окисление азота при горении. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947.
7. П. Ф. Похил. Докт. дис. ИХФ АН СССР, 1950.
8. Л. Д. Ромоданова. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1955.
9. Е. Л. Давидчук, В. М. Мальцев и др. 1977, 13, 1.

#### ЗАЖИГАНИЕ ОКТОГЕНА СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ

*В. Т. Кузнецов, А. И. Скорик*

Имеющиеся в литературе данные по зажиганию вторичных взрывчатых веществ относятся, как правило, к оценке их воспламеняемости по чувствительности к лучу огня бикфордова шнура [1] или по величине минимальной навески воспламенителя [2] и не позволяют сделать выводы о механизме и основных закономерностях процесса. В связи с этим изучение зажигания вторичных взрывчатых веществ в модельных, строго контролируемых условиях представляет определенный интерес.

В данной работе приведены результаты исследования физической картины зажигания октогена световым потоком, изучено влияние на время зажигания плотности светового потока, состава и давления окружающей атмосферы, а также определены условия перехода от зажигания к устойчивому горению.

Опыты проводились на установке радиационного нагрева «Уран-1» по методике, подробно описанной в [3]. Использовались цилиндрические образцы октогена (ОК) и октогена с 1% сажи марки ПМ-75 (ОК+1%С)<sup>1</sup> диаметром  $1 \cdot 10^{-2}$  м, высотой  $0,5 \cdot 10^{-2}$  м, спрессованные до плотности  $1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Зажигание осуществлялось с торцевой поверхности цилиндра. Используемая аппаратура позволяла проводить опы-

<sup>1</sup> Термогравиметрический анализ показал, что введение сажи не влияет на кинетику термического разложения октогена, поэтому в дальнейшем сажу рассматривали как инертную добавку, изменяющую только оптические характеристики образцов.

ты при интенсивностях поглощенного светового потока  $(0,1 \div 27) \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, давлениях  $(1 \div 30) \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> в атмосфере азота, кислорода и воздуха.

Помимо исследования процесса зажигания были измерены коэффициенты отражения образцов ОК и ОК+1%С, скорость горения  $u$  при атмосферном давлении в воздухе и температура поверхности горения  $T_s$  в этих условиях<sup>2</sup>. Полученные результаты приведены в таблице.

Исследование зависимости времени зажигания от плотности светового потока проводилось в воздухе при атмосферном давлении. За время зажигания принимали время от начала облучения поверхности образца до момента появления пламени, фиксируемого фотоэлектрическим датчиком. Приведенные на рис. 1 значения времени зажигания яв-

Образцы	Коэффициент отражения (%) при длине волны (мкм)		$u \cdot 10^4$ , м/с	$T_s$ , К
	0,36	1,0		
ОК	$87 \pm 1$	$93 \pm 1$	$4,5 \pm 0,2$	$750 \pm 20$
ОК+1%С	$11 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	$5,2 \pm 0,2$	$750 \pm 20$

ляются средними из результатов 3—7 опытов. Отклонения от среднего значения не превышали 10%. Опытные данные в координатах  $\lg t_3$ ,  $\lg q$  ложатся на прямую линию с тангенсом угла наклона — 1,3.

Скоростная киносъемка процесса зажигания октогена показала, что под действием светового потока происходит плавление и кипение поверхностного слоя образца, сопровождающееся выделением пара и мелких капель. Пламя появляется в газовой фазе у поверхности образца, вспышка продуктов газификации сопровождается характерным хлопком.

Влияние давления и состава окружающей среды на время зажигания октогена исследовалось при плотностях потока  $0,3 \cdot 10^5$  и  $12,2 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Образцы помещались

внутри бомбы, снабженной кварцевыми окнами для ввода излучения и наблюдения за процессом. Результаты, полученные в атмосфере азота и кислорода при давлениях до  $30 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, приведены на рис. 2. Видно, что время зажигания октогена потоками высокой интенсивности сокращается при замене азота на кислород, а в атмосфере одного и того же газа — при повышении давления (кривые 1). Время зажигания потоками малой интенсивности несколько увеличивается с ростом давления и не зависит от химической активности окружающей атмосферы (кривая 2).

Для изучения закономерностей перехода от зажигания октогена к его устойчивому горению были проведены опыты, в которых образцы ОК и ОК+1%С подвергались

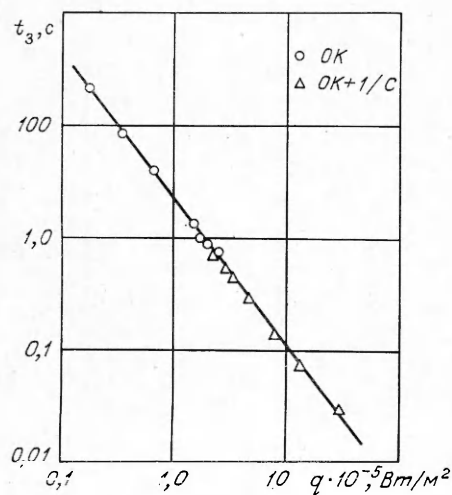


Рис. 1. Зависимость времени зажигания от плотности светового потока.

<sup>2</sup> Температура поверхности горения определялась по характерному перегибу на кривой температурного профиля, полученного с помощью вольфрам-рениевых термопар диаметром 50 мкм, запрессованных в образцах.

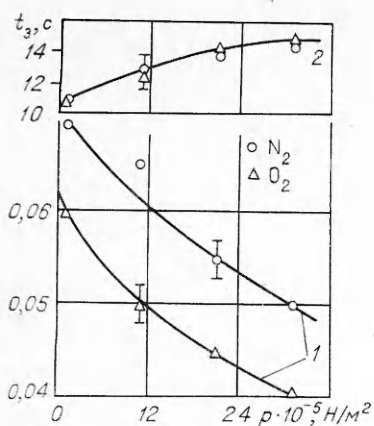


Рис. 2. Влияние давления и состава атмосферы на время зажигания октогена при интенсивностях светового потока  $12,2 \cdot 10^5$  (1) и  $0,3 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> (2).

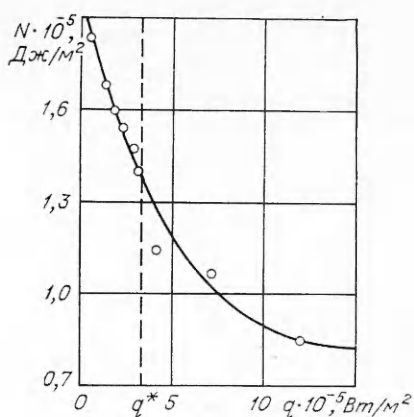


Рис. 3. Влияние плотности светового потока на величину поглощенной энергии, необходимой для зажигания.

нагреву световым потоком различной интенсивности и длительности. Время экспозиции изменялось в широком диапазоне с помощью дискового и электрического затворов. Минимальные времена экспозиции соответствовали времени задержки зажигания, фиксируемого по появлению пламени. Максимальные времена экспозиции в 3—5 раз превышали время зажигания. В опытах фиксировалось устойчивое горение или погасание образцов после прекращения действия светового потока.

Установлено, что в атмосфере кислорода при давлении  $1 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> зажигание потоками интенсивностью до  $30 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> приводит к устойчивому горению образцов. В инертной среде (азот) к устойчивому горению приводит зажигание световым потоком, плотность которого не превышает определенной величины  $q^*$ . При больших плотностях образцы после прекращения действия светового потока погасают. Для образцов ОК+1%С при комнатной температуре и давлении  $1 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>  $q^* \approx 2,7 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. В атмосфере воздуха предельные значения лучистых потоков составляют  $3,3 \cdot 10^5$  для образцов ОК+1%С и  $29 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> для ОК. Величина  $q^*$  существенно зависит от давления окружающей среды. Так, в атмосфере азота повышение давления с  $1 \cdot 10^5$  до  $2 \times 10^5$  Н/м<sup>2</sup> приводит к увеличению  $q^*$  для ОК+1%С с  $2,7 \cdot 10^5$  до  $21 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. При более высоких давлениях образцы ОК+1%С устойчиво зажигаются во всем исследованном интервале плотности потоков (до  $30 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>).

Приведенные выше закономерности по влиянию плотности светового потока, состава и давления окружающей атмосферы на время задержки указывают на то, что зажигание октогена происходит в газовой фазе. Действительно, замена инертного азота на химически активный кислород, а также повышение давления, ускоряющее процессы в газовой фазе, приводят к значительному сокращению времени зажигания (см. рис. 2, 1). Угловой коэффициент прямой, описывающей зависимость времени зажигания от плотности потока, значительно меньше 2 (см. рис. 1), что в соответствии с [4] является формальным признаком существенной роли газофазных процессов. Наконец, прямые наблюдения за моментом зажигания показывают, что первичное пламя появляется в газовой фазе.

Представления о газофазном механизме зажигания октогена противоречат результаты опытов при низкой интенсивности светового потока (см. рис. 2, 2). Отсутствие разницы времени зажигания в азоте и кислороде, а также увеличением времени задержки при повышении дав-

ления характерно для твердофазной модели зажигания. Одной из возможных причин этого противоречия может быть увеличение относительного вклада времени прогрева образца  $t_{\text{п}}$  в общее время зажигания  $t_{\text{з}}$  при низких потоках. На самом деле,  $t_{\text{з}} = t_{\text{п}} + t_{\text{и}}$ , где  $t_{\text{и}}$  — время индукции химических реакций [5]. При малой интенсивности подвода тепла  $t_{\text{п}} \gg t_{\text{и}}$  и  $t_{\text{з}} \approx t_{\text{п}}$ . В этом случае сокращение  $t_{\text{и}}$  при замене азота на кислород или при повышении давления слабо сказывается на  $t_{\text{з}}$  и может быть соизмеримо с ошибкой опыта.

В условиях лучистого теплообмена повышение тепловой активности среды с ростом давления увеличивает теплотери с поверхности образца, что приводит к повышению  $t_{\text{п}}$ , а соответственно и  $t_{\text{з}}$  [6]. Кроме того, прямые наблюдения за процессом зажигания, отсутствие изломов на прямой, описывающей логарифмическую зависимость времени задержки от плотности потока (см. рис. 1), показывают, что в исследованном интервале потоков механизм зажигания не меняется.

Погасание образцов ОК и ОК+1%С после прекращения действия светового потока определенной интенсивности, о чем говорилось ранее, может быть следствием нарушения теплового режима, характерного для стационарного горения октогена. Действительно, если сопоставить количество тепла, запасенного при стационарном горении октогена, используя соотношение [7]  $Q = \lambda u^{-1} (T_s - T_0) \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^2$  ( $u$  и  $T_s$  определены экспериментально, значение коэффициента теплопроводности  $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$ ), с теплом, подведенным к образцу за время зажигания потоками различной интенсивности (рис. 3), то оказывается, что в случае зажигания октогена световым потоком предельной величины и выше, запасенного тепла в прогретом слое меньше, чем это необходимо для стационарного горения. По-видимому, в этих условиях роль газовой фазы в формировании тепловой волны горения незначительна, а запасенного тепла в прогретом слое образца недостаточно для развития процесса горения без дополнительного (внешнего) подвода тепла. Однако с ростом давления и концентрации окислителя в окружающей атмосфере роль газовой фазы в формировании тепловой волны горения повышается, что приводит к увеличению предельных значений светового потока. Это подтверждают результаты опытов, где наблюдается значительное увеличение предельных значений светового потока при повышении давления и замене инертной атмосферы (азот) на химически активную (кислород).

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность В. Н. Вилюнову за обсуждение результатов работы и ценные советы.

*НИИ прикладной математики и механики  
при Томском государственном  
университете*

*Поступила в редакцию  
22/1 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. К. К. Андреев, В. М. Рогожников.— В сб.: Теория ВВ. М., «Высшая школа», 1967.
3. В. Т. Кузнецов, В. П. Марусин, А. И. Скорик. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. Олемиллер, Саммерфилд. РТК, 1968, 6, 5, 134.
5. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Инж.-физ. ж., 1965, 9, 2.
6. В. Н. Вилюнов, С. С. Хлевной. ФГВ, 1974, 10, 4.
7. Э. И. Аристова, О. И. Лейпунский. ЖФХ, 1946, 11.