

ЗАЖИГАНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ КОНВЕКТИВНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В. И. Розенбанд,
В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов
(Москва)

Экспериментальное исследование зажигания конденсированных взрывчатых веществ потоком горячего газа проводилось в работах [1, 2]. Полученные в них результаты трактовались на основе тепловой теории воспламенения, которая предполагает, что основные процессы, приводящие к зажиганию, имеют место в конденсированной фазе. Однако в этих работах имели место простые условия теплообмена при низкой интенсивности тепловых потоков, что не позволяло получать коротких задержек зажигания. Поэтому представлялось интересным выяснить применимость тепловой теории воспламенения к быстротекающим режимам зажигания при сложном в реальных условиях характере теплообмена. Для абсолютных расчетов характеристик зажигания в качестве объектов были выбраны вещества с известными кинетическими параметрами.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Зажи-

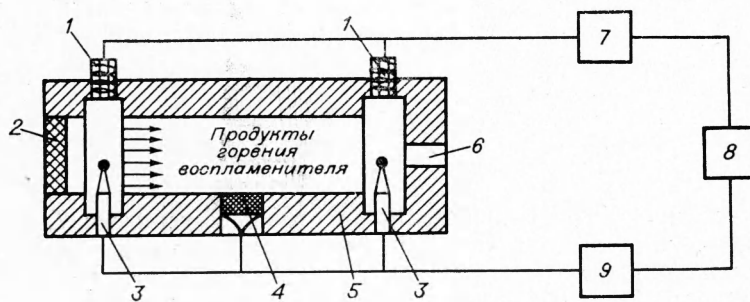


Рис. 1. Схема установки.

1 — датчики давления ДД-10; 2 — воспламенитель; 3 — термопары для измерения температуры газа; 4 — воспламеняемый образец с термопарой на поверхности; 5 — камера; 6 — выходное отверстие сопла; 7 — индикатор давления; 8 — плейффовый осциллограф; 9 — термопарный усилитель.

гаемые образцы диаметром 10 и высотой 8 мм, запрессованные в специальные сборки, вводились внутрь камеры так, чтобы торцевая поверхность образца была заподлицо с внутренней поверхностью канала камеры. На поверхность образца ацетоном наклеивалась термопара медь — константан, прокатанная до толщины ≈ 8 мк. Оцененная погрешность измерения температуры поверхности этой термопарой составляет менее 4%. Поток горячих газов, воспламеняющих исследуемый об-

разец, создавался горением воспламенителя. Использовались как насыпные, так и прессованные воспламенители разного веса и состава. Условия нарастания давления в камере, а следовательно и теплового потока к образцу, обеспечивались выбором соответствующего диаметра выходного отверстия типа сопла (от 0,5 до 2 мм) и поверхностью горения воспламенителя. В двух точках камеры у переднего и заднего концов измерялось давление газа индукционными датчиками давления и температура газа с помощью высокотемпературных вольфрам-рениевых термопар ВР-5/20 диаметром 50 мк, температурная зависимость термо-э. д. с. которых была взята по данным работы [3]. Давление, температура газа и температура поверхности воспламеняемого образца с помощью индикатора давления и разработанного Л. Н. Гальпериным с сотрудниками специального широкополосного четырехканального термопарного усилителя регистрировались на шлейфовом осциллографе Н-700. Момент

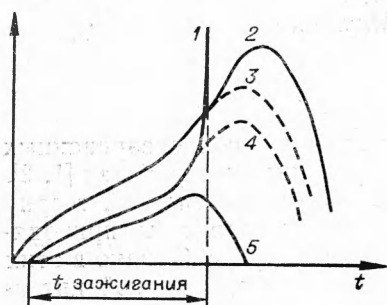


Рис. 2. Временные зависимости параметров, регистрируемых в камере.

1 — температура поверхности воспламеняемого образца; 2 — давление у воспламенителя в камере с воспламеняемым образцом; 3 — давление у воспламенителя в камере с инертным образцом; 4 — температура поверхности топлива, рассматриваемого как инертное тело; 5 — тепловой поток к образцу.

воспламенения образца определяется по показанию термопары, измеряющей температуру поверхности. Типичный ход этой температуры и давления в камере со временем показан на рис. 2. Для оценки величины теплового потока от горячих газов к воспламеняемому образцу использовалась методика, примененная в работе [4]. Вместо воспламеняемого образца вводился образец из инертного материала асбоцемента аналогичных размеров и с известными теплофизическими свойствами, определенными по методу Волькенштейн [5] (коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-3}$ кал/см · сек · град, коэффициент температуропроводности $a = 3,6 \cdot 10^{-3}$ см²/сек). Полученная на инертном веществе кривая зависимости температуры поверхности от времени аппроксимировалась степенным рядом:

$$T_{\text{пи}} = T_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_k t^k, \quad (1)$$

где $T_{\text{пи}}$ — температура поверхности инертного материала; T_0 — начальная температура образца. При аппроксимации обычно бралось $n=5$. Для определения потока тепла к образцу использовался способ, предложенный в работах [6, 7]. Решая задачу о нагреве полубесконечного тела

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_n \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\text{при } 0 \leq x < \infty, \quad t > 0$$

с граничным условием (1) и начальным условием $T(x, 0) = T_0$, получаем зависимость $T(x, t)$. Определяя поток тепла к образцу как $q(t) = -\lambda \times$

$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}$, можно получить:

$$q(t) = \sqrt{\frac{(\lambda c \rho)_n}{\pi t}} \sum_{k=1}^n \frac{2k!}{(2k-1)!} \alpha_k t^k, \quad (3)$$

где ρ_n, c_n — плотность и удельная теплоемкость асбоцемента. Типичная зависимость $q(t)$, рассчитанная по формуле (3), показана на рис. 2.

Пересчет измеренной температуры поверхности инертного образца на температуру поверхности воспламеняемого образца, рассматриваемого как инертный, согласно [8], проводится по формуле:

$$T_{nt} - T_0 = \sqrt{\frac{(\lambda c \rho)_n}{(\lambda c \rho)_t}} (T_{ni} - T_0), \quad (4)$$

где индексом «и» — обозначены величины, относящиеся к асбоцементу, а индексом «т» — величины, относящиеся к воспламеняемому топливу.

Ввиду сложного, плохо воспроизводимого условия газовыделения при горении воспламенителя условия теплоотдачи от газов к образцу тоже плохо воспроизводились. Так, например, при одном и том же воспламенителе и диаметре выходного отверстия разброс задержек зажигания может составлять 60%. Однако наблюдается вполне однозначная зависимость между ходом нарастания давления в камере при горении воспламенителя и ростом температуры поверхности инертного образца, а следовательно, и зависимостью $q(t)$. Более крутое нарастание со временем давления в камере при одних и тех же температуре и составе газов продуктов сгорания воспламенителя обуславливает достижение более высоких температур поверхности и тепловых потоков, что вполне понятно в условиях преобладающей конвективной теплопередачи в камере. Поэтому для сравнения теоретически рассчитанных задержек воспламенения с экспериментальными был применен следующий способ. При идентичных условиях проводилась серия опытов с воспламеняемым образцом и серия опытов с инертным материалом. При определении экспериментально наблюдаемой задержки зажигания и расчете зависимости $q(t)$, на основе которой в дальнейшем теоретически рассчитывалась задержка воспламенения, бралось по одному опыту из каждой серии, в которых вид кривой давления до момента воспламенения образца был близок.

В качестве воспламенителя использовались пироксилин и смесь, состоящая из 90% перхлората аммония и 10% полиэтилена, дающие чисто газообразные продукты сгорания с температурой примерно 1250 и 1130°K в районе исследуемого образца соответственно. Воспламеняемыми образцами служили таблетки из пироксилина и поливинилнитрата со следующими теплофизическими и кинетическими параметрами [1, 2, 9, 10].

Пироксилин: $\lambda = 3 \cdot 10^{-4}$ кал/см · сек · град; $c = 0,31$ кал/г · град; $E = 48500$ кал/моль; $Qk_0 = 4,23 \cdot 10^{21}$ кал/г · сек.

Поливинилнитрат: $\lambda = 3,65 \cdot 10^{-4}$ кал/см · сек · град; $c = 0,29$ кал/г · град; $E = 37000$ кал/моль; $Qk_0 = 5,1 \cdot 10^{16}$ кал/г · сек (E — энергия активации, Q — тепловой эффект на единицу массы, k_0 — предэкспонент).

Значения средних тепловых потоков, полученных при разных воспламенителях и различных диаметрах выходного отверстия, лежат в пределах от 2 до 20 кал/см² · сек, а соответствующие задержки воспламенения — от 1,5 до 0,04 сек. Расчет задержек воспламенения производился приближенно и с помощью ЭВЦМ. Приближенный расчет проводился по тепловой теории с применением критерия воспламенения предложенного в работе [11] и предполагающего, что воспламенение кон-

Зажигаемое вещество	Воспламенитель	$\frac{q}{\text{кал}}$ $\text{см}^2 \cdot \text{сек}$	Время воспламенения вещества, сек			$T_3, ^\circ\text{K}$	$h, \text{мм}$	$\frac{q_3}{\text{кал}}$ $\text{см}^2 \cdot \text{сек}$	$\frac{Q_3}{\text{кал}}$ см^2
			эксперимент	расчет					
				на ЭВМ	приближенный метод				
Пироксилин	Пироксилин	7,8	0,057	0,059	0,058	645	0,075	50,24	0,46
		4,62	0,30	0,34	0,32	602	0,15	8,23	1,57
		3,57	0,52	0,53	0,50	594	0,2	6,32	1,89
	Смесь ПХА + ПЭ	11,9	0,058	0,063	0,057	640	0,075	28,3	0,75
		3,52	0,61	0,68	0,65	586	0,2	4,13	2,39
		2,67	0,89	0,95	0,9	579	0,3	3,65	2,53
		2,24	1,35	1,35	1,29	570	0,4	3,58	3,02
	Поливинилнитрат	Пироксилин	10,1	0,059	0,06	0,06	687	0,075	68,6
5,83			0,32	0,3	0,27	630	0,15	8,59	1,75
4,16			0,5	0,52	0,48	617	0,2	8,01	2,16
2,6			1,25	1,25	1,19	600	0,4	5,27	3,25
Смесь ПХА + ПЭ		17,9	0,045	0,052	0,048	695	0,075	25,9	0,93
		3,95	0,64	0,7	0,69	612	0,25	6,09	2,76
		2,4	1,32	1,35	1,27	600	0,4	5,42	3,25

Примечание. Глубина прогретого слоя (h) определена по наибольшей касательной температурного профиля, полученного из счета ЭВМ; T_3 — температура воспламеняемого топлива, рассматриваемого как инертное вещество в момент воспламенения, определенный приближенным методом; q_3 — поток тепла в момент зажигания; q — средний поток тепла за время нагрева образца до зажигания; Q_3 — количество тепла, поступившее к образцу извне к моменту зажигания.

денсированного вещества произойдет в тот момент, когда внешний теплотеплоприход от горячих газов сравняется с внутренним тепловыделением за счет химической реакции в веществе. Математически это записывается так:

$$q(t_3) = Q k_0 \int_0^\infty e^{-E/RT(x, t_3)} dx. \quad (5)$$

где $q(t_3)$ — значение потока тепла в момент воспламенения.

Подставляя сюда значения $T(x, t)$ из решения инертной задачи и считая, что профиль температуры в области максимальной температуры, достигаемой в случае положительного внешнего потока тепла на поверхности, крутой и градиент температуры велик, проводим разложение $T(x, t)$ в окрестности поверхности и, ограничиваясь первым членом этого разложения, приводим (5) к виду:

$$q^2(t_3) = \frac{Q k_0 R \lambda_T T_{\text{пт}}^2(t_3) e^{-E/RT_{\text{пт}}(t_3)}}{E}, \quad (6)$$

где R — газовая постоянная, а $T_{\text{пт}}(t_3)$ температура поверхности воспламеняемого образца, рассматриваемого как инертный, в момент воспламенения.

Используя полученные значения $q(t)$, зная из (4) $T_{\text{пт}}(t)$, можно из (6) определить момент воспламенения. Кроме этого, по экспериментально определенному граничному условию $q = q(t)$ момент воспламенения определялся и из решения с помощью ЭВЦМ точной задачи с учетом тепловыделения от химической реакции. Полученные данные приведены в таблице.

Из таблицы видна явная тенденция к увеличению глубины прогретого слоя и тепла, переданного воспламеняемому образцу к моменту зажигания извне, с уменьшением среднего теплового потока. Одновременно наблюдается значительное уменьшение «температуры воспламенения» при уменьшении величины среднего теплового потока, т. е. эта температура сильно зависит от интенсивности теплообмена.

Как видно из таблицы, все полученные значения задержек зажигания хорошо совпадают, отклонение рассчитанного приближенно времени воспламенения от истинного во всем диапазоне применяемых тепловых потоков лежит в пределах 10%, что говорит о применимости тепловой теории воспламенения и используемого критерия зажигания в этих условиях.

Авторы благодарят В. Т. Гонтковскую за составление программы и помощь в получении численного счета на ЭВЦМ.

Поступила в редакцию
16/V, 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Лисицкий, А. Г. Мержанов. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
2. Ю. М. Григорьев, В. И. Лисицкий, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 4.
3. А. А. Зенин. Канд. дисс. Москва, 1962 г.
4. I. A. Keller, N. W. Ryan. ARS Journal, 1961, 31, 10.
5. В. С. Волькенштейн. II Всесоюзное совещание по тепло- и массообмену. Минск, 1961 г.
6. V. Kmonices. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1966, 9, 3.
7. W. Jaworski. Astronautica Acta, 1966, 12, 2.
8. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М., 1964.
9. Ю. М. Григорьев, Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
10. Г. Б. Манелис, Ю. И. Рубцов и др. Кинетика и катализ, 1962, 3, 1.
11. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР (в печати).