

пороха Н+сажа и  $\sim 2$  кал/см<sup>2</sup>·с для пороха Н и определены достаточно надежно.

Экспериментально найдено, что устойчивость переходного процесса при зажигании нитроглицеринового пороха выше, чем при горении (см. рис. 4). Причиной этого, на наш взгляд, является существенно больший запас тепла в прогретом слое в первом случае. Обнаружено также, что с увеличением амплитуды возмущающего теплового воздействия устойчивость переходных процессов понижается. Последнее согласуется с общими представлениями о конечном запасе энергии в зоне химических реакций в твердой фазе и о конечных временах релаксации теплового и реакционного слоев.

В данной работе изложены предварительные результаты по экспериментальному исследованию нестационарных переходов при зажигании и горении порохов. Не затронуты, в частности, вопросы о взаимодействии и роли различных фаз при горении, о нестационарном поведении скорости горения и т. п. Все это требует дальнейших экспериментальных исследований.

*Поступила в редакцию  
5/III 1973*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Конев, С. С. Хлевной. ПМТФ, 1963, 2.
2. В. Ф. Михеев. Зажигание порохов световым излучением. Канд. дисс., ИХКиГ. Новосибирск, 1970.
3. А. А. Ковальский, С. С. Хлевной, В. Ф. Михеев. I Всесоюзн. симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. М., «Наука», 1968.
4. Э. В. Конев. НТПГиВ, 1965, 1, 2, 76.
5. В. Е. Зарко. Изучение зажигания порохов контактными способами. Канд. дисс., ИХКиГ. Новосибирск, 1971.

УДК 662.581

#### **ЗАЖИГАНИЕ ГЕКСОГЕНА НАГРЕТЫМИ ПРОВОЛОЧКАМИ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ 1000—13 000 кг/см<sup>2</sup>**

*И. С. Клочков, Н. Д. Маначинский  
(Москва)*

Известно, что при инициировании ВВ ударом или ударной волной процесс воспламенения начинается в отдельных точках, или, как их называют, в очагах разогрева. Одним из способов, позволяющим найти условия воспламенения ВВ в подобных случаях, является изучение зажигания ВВ малыми источниками нагрева при высоких давлениях.

Результаты существующих теоретических и экспериментальных исследований не дают представления о воспламенении ВВ при высоких давлениях. В тепловой модели горения [1, 2] воспламенение ВВ рассматривается без учета влияния давления. По этой модели воспламенение происходит тогда, когда тепловыделение вследствие химических реакций в конденсированной фазе становится, по крайней мере, рав-

ным теплоотводу. Отсутствие зависимости воспламенения от давления, по-видимому, связано с предположением о том, что тепловыделение происходит только за счет реакций ниже первого порядка, скорость которых не зависит от давления. Зачастую кинетическая картина реакций в ВВ является более сложной. Если в тепловую модель ввести предположение о том, что ведущими являются реакции более высокого порядка, то, возможно, обнаружится зависимость воспламенения от давления.

В феноменологической теории горения [3, 4] считается, что воспламенение ВВ определяется температурой и градиентом температуры на поверхности ВВ и что значения этих величин такие же, как и при стационарном горении. Но поскольку при горении градиент температуры зависит от давления, то последнее должно существенно сказываться и на процессе воспламенения. Однако применимость этой теории доказана для относительно невысоких давлений  $p=100-150$  кг/см<sup>2</sup>. Пантофличек и Лебр [5] в рамках упомянутой теории показали, что возможно зажигание быстрыми («минимальное» зажигание) и медленными («затяжное» зажигание) тепловыми потоками, когда они соответственно больше или меньше, чем при установившемся горении. При «минимальном» зажигании энергия, необходимая для воспламенения ВВ, определяется теплом, заключенным в прогретом слое ВВ, нормально горящего в таких же условиях. В этом случае изменение энергии воспламенения примерно обратно пропорционально изменению давления. При «затяжном» зажигании в ВВ уходит больше энергии, чем при «минимальном», и влияние давления незначительно. Возможно, этими соображениями объясняются полученные в работе [6] относительно высокие значения энергии воспламенения и незначительная зависимость их от давления.

В представленной работе излагаются результаты исследования влияния давления, значения которого достигали 13 000 кг/см<sup>2</sup>, на процесс зажигания гексогена тепловыми потоками, создаваемыми тонкими (20—70 мк) проволочками накаливания. Энергия и температура воспламенения гексогена определялись по энергии конденсатора, при разряде которого нагревалась помещенная внутрь ВВ проволочка, и по времени задержки воспламенения, которое измерялось от момента замыкания цепи до образования зоны ионизированных продуктов горения вдоль проволочки. Результаты эксперимента сравниваются со значениями энергии воспламенения, рассчитанными в соответствии с феноменологической теорией для случая «минимального» зажигания.

### Зажигание гексогена

Гексоген, находящийся под прессом, зажигали тонкой проволочкой, нагреваемой при прохождении через нее электрического тока, который создавался путем разряда конденсатора емкостью 1 мкФ. Схема опыта представлена на рис. 1. ВВ запрессовывалось в виде таблетки диаметром 10 и толщиной 0,6 мм. Для зажигания использовались никелевая (диаметром 20 мк), молибденовая (70 мк) и вольфрамовая (20 мк) проволочки. Для подвода тока к проволочке, находящейся внутри таблетки, применялись полоски изолированной медной фольги (толщиной 20 мк), в которые проволочка зажималась с обоих концов. Таким путем удалось избежать обрывов проволочки.

Во избежание потерь энергии в подводящей цепи конденсатор устанавливался в непосредственной близости от проволочки накаливания и соединялся с полосками фольги при помощи толстой (диаметром 4 мм) медной проволоки. Конденсатор, медная проволока и полоски фольги соединялись между собой достаточно надежно при помощи

пайки и клемм. Надежность контакта фольга — проволочка накаливания обеспечивалась тем, что он находился под давлением, и поэтому проволочка плотно прижималась к фольге. Потери энергии в клеммах электрореле, через которые конденсатор разряжался на проволочку накаливания, не определялись; считалось, что они незначительны. Потери энергии в подводящей цепи в расчетах не учитывались ввиду их малости.

При разряде конденсатора ВВ либо воспламенялось и полностью сгорало (горение сопровождалось сильным звуковым эффектом), либо оставалось целым без каких-либо следов воспламенения. Отметим, что при разряде конденсатора, заряженного до  $\sim 80$  В, при испытании с никелевой проволочкой последняя оставалась целой и сопротивление ее почти не изменялось. Это связано с тем, что величина тока была недостаточна для электровзрыва. То же самое наблюдается в случаях отказа в аналогичных опытах с инертным веществом. Разрыв проволочки происходит только при напряжениях, значительно превышающих те, при которых регулярно воспламенялось ВВ.

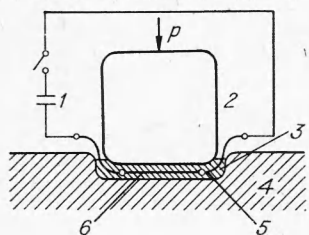


Рис. 1. Схема опыта по зажиганию ВВ при высоком давлении.

1 — конденсатор; 2 — ролик; 3 — таблетка ВВ; 4 — поддон; 5 — фольга; 6 — проволочка накаливания.

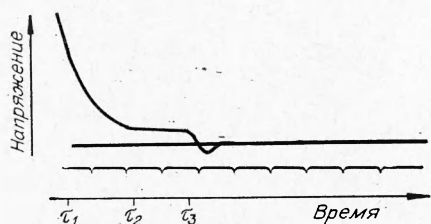


Рис. 2. Осциллограмма разряда конденсатора на проволочку накаливания.

$\tau_1$  — момент начала разряда конденсатора;  $\tau_2$  — момент обрыва проволочки накаливания;  $\tau_3$  — момент образования зоны ионизированных продуктов горения вдоль проволочки накаливания.

Напряжение конденсатора, при разряде которого происходит воспламенение ВВ, колеблется в относительно широких пределах, поэтому определялась зависимость частоты взрывов от этого напряжения. За напряжение воспламенения принималось то, при котором ВВ воспламенялось в 4—6 опытах из десяти. Относительная ошибка определения не превышала  $\pm 3\%$ . При вычислении этой ошибки максимальное отклонение рассчитывалось из графика зависимости частоты взрывов от напряжения конденсатора по разбросу экспериментальных точек, составляющих этот график. Перед зажиганием при помощи обычного моста измерялось сопротивление проволочки накаливания. Ошибка измерения не превышала  $\pm 3\%$ .

Ниже приведены результаты определения напряжения воспламенения  $U$  и усредненные по десяти опытам значения сопротивления проволочки накаливания  $R$  для различных давлений  $p$ . Опыты проводились с никелевой проволочкой накаливания

$p$ , кг/см <sup>2</sup>	$R$ , Ом	$U$ , В
1690	0,90	80
6400	0,89	66
12 600	0,90	65

За время задержки воспламенения принималось время от момента замыкания цепи до образования зоны ионизированных продуктов горения вдоль проволочки. Для того чтобы зафиксировать момент образования ионизированных продуктов горения ВВ, на проволочку

подавалась энергия бóльшая, чем необходимая для достижения граничного напряжения, и достаточная для нагрева ее до температуры, близкой к температуре плавления. При этом в конце разряда конденсатора проволочка обрывается. На осциллограмме (рис. 2), где записано напряжение разряда конденсатора, этот момент характеризуется образованием горизонтального участка кривой — ток перестает течь, напряжение конденсатора остается неизменным. Электрический контакт восстанавливается за счет образования ионизированных продуктов горения в окрестностях обрыва. В этот момент напряжение на конденсаторе падает, что отчетливо фиксируется на осциллограмме. Картина обрыва проволочки при прохождении через нее электрического тока воспроизводится при идентичных опытах с инертным веществом.

Таблица 1

Число опытов	Материал проволочки	$\rho$ , кг/см <sup>3</sup>	$T_{пл}$ , °С	$\tau$ , мкс
10	Никель	1690	1452	40 ± 1
6		6400		23 ± 1
7		12600		15 ± 1
5	Молибден	1690	2620	30 ± 2
6	Вольфрам	1690	3380	18 ± 3

Кроме кривой разряда конденсатора на осциллограмме (см. рис. 2) до опыта записывалась линия нулевого напряжения. Благодаря этому видно, что в момент обрыва проволочки накаливания конденсатор разряжен не полностью. При помощи второго луча осциллографа записывались также метки времени через 10 мкс.

В табл. 1 приведены результаты измерения времени задержки воспламенения гексогена  $\tau$  для различных давлений и температур. Температуры изменялись применением набора проволочек из разных металлов, имеющих различные  $T_{пл}$ . Значения среднего арифметического времени задержки приведены вместе со значениями среднеквадратичной ошибки.

### Температура и энергия воспламенения гексогена

Время задержки воспламенения в основном намного больше, чем время разряда конденсатора, поэтому для расчета теплопередачи сделано следующее допущение: проволочка накаливания мгновенно нагревается до максимальной температуры и затем, остывая, передает тепло ВВ. Поскольку проволочки тонкие, то температура внутри и на поверхности проволочки почти одинакова [7], и энергия воспламенения может быть определена по минимальной в момент воспламенения ВВ и максимальной температуре проволочки. Максимальная температура вычислялась по энергии конденсатора, заряженного до напряжения воспламенения, и по массе проволочки накаливания. Масса проволочки, у которой известны диаметр и удельное сопротивление, вычислялась по измеряемым значениям сопротивления. Минимальная температура определялась из уравнения Фурье, решение которого для тонких проволочек имеет вид [7]

$$T_{\min} - T_0 = (T_{\max} - T_0) \cdot \exp \cdot \left( - \frac{\lambda_{ВВ} \cdot \tau}{2c\rho r^2} \right), \quad (1)$$

где  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  — максимальная и минимальная температуры проволочки;  $T_0$  — температура проволочки до нагревания;  $\tau$  — время задержки воспламенения;  $\lambda_{ВВ}$  — теплопроводность ВВ;  $c$  — теплоемкость материала проволочки;  $\rho$  — плотность материала проволочки;  $r$  — радиус проволочки.

Минимальная температура принималась за температуру воспламенения ВВ ( $T_B$ ). Отметим, что, поскольку время задержки воспламенения мало, температура проволочки в течение этого времени почти

не изменяется. Воспламенение происходит при почти постоянной температуре поверхности проволоочки (и соответственно поверхности ВВ). Поэтому в данном случае осуществляется так называемое «минимальное» зажигание. Все тепло, перешедшее от проволоочки к ВВ, расходуется на воспламенение ВВ.

В опытах время задержки воспламенения определялось при высоких температурах, в уравнении же (1) за время задержки принимались значения, экстраполированные к температуре воспламенения.

Таблица 2

$p$ , кг/см <sup>2</sup>	$\tau$ , мкс	$T_B$ , °C	$Q \cdot 10^3$ , кал/см <sup>2</sup>	
			эксперим.	расч. по(2)
14	300[8]	500[1]	340[8]	280
1690	52	760	3,9	14
6400	39	540	2,0	2,6
12600	29	510	1,4	1,3

В табл. 2 приведены экстраполированные значения времени задержки воспламенения и рассчитанные по экспериментальным данным значения температуры и энергии воспламенения гексогена. При экстраполяции принималось, что при давлениях 6400 и 12600 кг/см<sup>2</sup> время

задержки воспламенения зависит от температуры так же, как и при давлении 1690 кг/см<sup>2</sup>. Для сравнения дано значение энергии воспламенения, полученное Брайном и Нуаном [8] при зажигании гексогена быстро сжимающимся газом при низких давлениях (время задержки воспламенения около 3 мкс). При  $p=14$  кг/см<sup>2</sup> приведена температура воспламенения по данным Боудена [1]. В табл. 2 представлены также значения энергии воспламенения, рассчитанные по теплу в прогретом слое при нормальном горении, в соответствии с феноменологической теорией. Расчет производился по формуле

$$Q = \frac{\lambda_{ВВ}}{u\Psi} (T_s - T_0), \quad (2)$$

где  $Q$  — энергия воспламенения;  $u$  — скорость горения ВВ при соответствующих давлениях;  $T_s$  — температура поверхности ВВ;  $\Psi = f \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{\lambda_{ВВ}}{c_{ВВ} \cdot \rho_{ВВ} \cdot r \cdot u} \right)^2 \right]$  — коэффициент, учитывающий кривизну ВВ.

Здесь  $\lambda_{ВВ}$ ,  $c_{ВВ}$ ,  $\rho_{ВВ}$ ,  $u$ ,  $r$  — соответственно теплопроводность, теплоемкость, плотность, скорость горения ВВ и радиус кривизны ВВ, равный радиусу проволоочки. В работе [7] рассчитаны значения  $\Psi$  для различных параметров.

При вычислении энергии воспламенения по формуле (2) за температуру поверхности ВВ принято значение температуры воспламенения ВВ, полученное в данной работе. Скорость горения в формуле (2) принята согласно [9]. Ошибка определения температуры воспламенения составила  $\pm 14\%$ , энергии воспламенения —  $\pm 15\%$ .

Из табл. 2 видно, что до сравнительно высоких давлений энергия воспламенения зависит от давления, уменьшаясь с его ростом. Особенно ярко это демонстрируется при сравнении результатов данной работы и работы [8].

Экспериментальные значения энергии воспламенения в основном совпадают с рассчитанными по формуле (2). Различие, наблюдающееся при  $p=1690$  кг/см<sup>2</sup>, возможно, объясняется тем, что при этом давлении не происходит полного разрушения частиц ВВ, и проволоочка не по всей своей поверхности соприкасается с ВВ. При этом давление в местах соприкосновения частиц ВВ с проволоочкой больше среднего, а энергия воспламенения меньше расчетной. Таким образом, из результатов экспериментов следует, что формула (2) может быть применена для оценки энергии воспламенения до относительно высоких давлений. Получено также, что значения температуры и времени задержки воспламенения уменьшаются с ростом давления. В аналогичных опытах

