

и давления, так и для отладки программ численного счета полной системы (1) на ЭВМ.

В заключение авторы благодарят С. С. Новикова и А. Г. Истратова за обсуждение работы.

Поступила в редакцию
19/III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Ассовский, А. Г. Истратов. ПМТФ, 1971, 5.
2. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3.
3. В. Б. Либрович, Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1971, 4.
4. Э. Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М., «Наука», 1965.
5. Ю. А. Гостинцев. ПМТФ, 1973, 1.

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ЗАЖИГАНИИ И ГОРЕНИИ ПОРОХОВ

В. Ф. Михеев, Ю. В. Левашов
(Новосибирск)

Вопрос о критических условиях при зажигании и горении порохов тесно связан с общим вопросом о механизме их горения. Экспериментальные исследования в этом направлении имеют особое значение, поскольку до сих пор отсутствует надежное обоснование теоретических моделей, используемых в расчетах по нестационарному горению.

Ниже изложены результаты экспериментов, целью которых было определение реакции (отклика) горящего пороха на дозированные тепловые воздействия. Работа состоит из трех разделов. Измерены критические времена передержки потока излучения при зажигании, критические длительности при импульсном и критические амплитуды при продолжительном действии потока излучения на стационарно горящий порох. Под критическими всюду подразумеваются такие максимальные уровни теплового воздействия, когда еще обеспечивается возможность установления процесса стационарного горения после прекращения действия возмущающего влияния.

Объектом исследования служили нитроглицериновый порох Н и порох Н с добавкой 1% сажи (Н+сажа). Поток излучения интенсивностью до 9 кал/см²·с обеспечивался графитовой печью [1]. Измерение амплитудной величины светового потока q_0 производилось с помощью медных калориметров. Опыты проводились при атмосферном давлении. Пороховые образцы в виде цилиндров высотой 20 и диаметром 20 мм бронировались обдувом боковой поверхности струей азота. Интенсивность обдува устанавливалась экспериментальным путем. Начальная температура образца варьировалась с помощью кольцевой электрической печки и регистрировалась манганин-константановыми термопарами, сигнал которых подавался на записывающий потенциометр типа ЭПП-09. Точность измерения температуры $\sim 1,5\%$, тепло-

вого потока $\sim 2,5\%$ [2]. Продолжительность действия потока излучения на горящую поверхность задавалась шторным затвором, время перекрытия (открывания) потока шторкой не превышало 30 мс.

Критические времена передержки светового потока при зажигании

Образцы пороха облучались световым потоком заданной интенсивности до момента воспламенения и в течение некоторого интервала времени $\Delta\tau_3$ после него. Момент воспламенения τ_v определялся по срыву на термопарной записи кривой разогрева поверхности. В терминах данной статьи воспламенение нитроглицеринового пороха можно отождествить с нижней границей устойчивого зажигания, поскольку при этом в условиях нулевой передержки светового облучения всегда происходит выход на режим стационарного горения¹. По истечении времени $\tau = \tau_v + \Delta\tau_3$ действие света прекращалось и фиксировался переход к стационарному горению или погасание. На рис. 1 даны экспериментальные данные для пороха Н+сажа в координатах $\Delta\tau_3, q_0$. Области устойчивого сгорания и погасания разделяет эмпирическая кривая, соответствующая критическим временам передержки излучения. При больших временах передержки наблюдается погасание, при меньших — устойчивое сгорание. Из анализа экспериментальных данных следует: а) при действии световых потоков интенсивностью до $q_0 \approx 1$ кал/см²·с критические времена отсутствуют, порох всегда устойчиво сгорает после прекращения воздействия; б) с ростом величины q_0 критические времена передержки уменьшаются и при $q_0 = 2,5 \div 3$ кал/см²·с становятся сравнимыми с временем перекрытия потока.

На рис. 1, 2 представлены результаты аналогичных опытов на порохе Н. Качественно они совпадают с теми, что получены на порохе Н+сажа. Нижний предел по q_0 , когда критическое время передержки стремится к бесконечности, составляет $\sim 2 \div 2,5$ кал/см²·с. Верхний предел найти не удалось вследствие ограниченной мощности графитового излучателя.

По данным рис. 1 с учетом результатов [2, 3] можно построить области зажигания для исследованных порохов в координатах время нагрева — поток излучения (рис. 2). Кривые a_1 и a_2 соответствуют временам воспламенения — нижним границам устойчивого зажигания порохов Н+сажа и Н [2, 3], кривые b_1 и b_2 — максимальным временам передержки ($\tau = \tau_v + \Delta\tau_3$) при действии данного светового потока,

¹ В [2] было показано, что рамки такой трактовки процесса воспламенения ограничены сверху предельным значением теплового потока. При $q_0 = 2,5 \div 3$ кал/см²·с и немедленном после вспышки прекращении действия излучения стационарное горение не реализуется, происходит поверхностный «ожог» вещества.

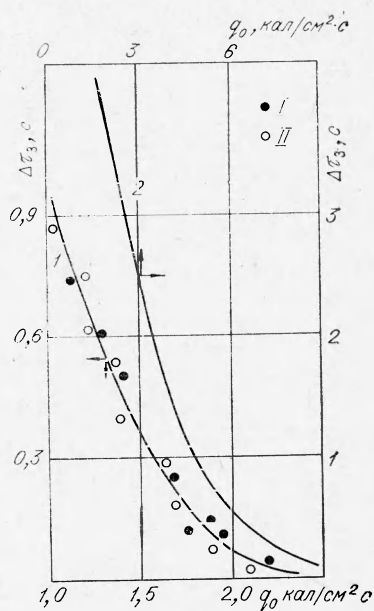


Рис. 1. Критические времена передержек светового потока при зажигании.

1 — порох Н+сажа; 2 — порох Н.
I — погасание; II — горение.

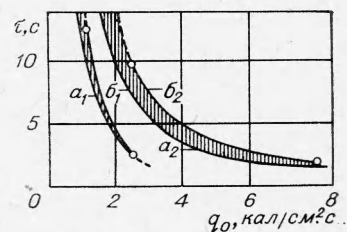


Рис. 2. Области устойчивого зажигания.

когда еще осуществляется переход к стационарному горению. Между кривыми вида *a* и *b* заключена область устойчивого зажигания. Левее ее зажигания не происходит из-за недостаточного нагрева пороха, при этом температура поверхности оказывается ниже температуры воспламенения. Правее осуществляется режим неустойчивого зажигания: порох горит только при действии светового потока и гаснет после снятия потока излучения. Точками на кривых b_1 и b_2 обозначены интервалы потоков, в которых времена передержки определены с достаточной надежностью.

Критические длительности импульсного теплового воздействия при стационарном горении

В этой серии опытов пороховые образцы зажигались накаливаемой спиралью. В течение 3—5 с устанавливался режим стационарного горения, а затем порох подвергался действию светового потока известной интенсивности, причем длительность воздействия $\Delta\tau_r$ варьировалась. В опытах определялся результат такого воздействия — переход к новому режиму стационарного горения без дополнительного теплоподвода, либо погасание. На рис. 3 представлены экспериментальные данные для порохов Н+сажа и Н. Области устойчивого сгорания и погасания разделены эмпирической кривой критической длительности воздействия $\Delta\tau_r(q_0)$. Выше кривой расположена область погасания, под нею — область горения. Нижние предельные значения q_0 для порохов Н+сажа (~ 1 кал/см²·с) и Н (~ 2 кал/см²·с) близки по величине к аналогичным величинам при зажигании. При повышении интенсивности теплового потока критическая длительность $\Delta\tau_r$ уменьшается. Для пороха Н+сажа при $q_0 \approx 2,5$ кал/см²·с $\Delta\tau_r$ становится сравнимым

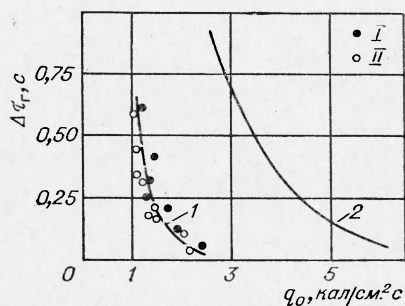


Рис. 3. Критические времена передержки светового потока при стационарном горении. (Обозначения см. на рис. 1.)

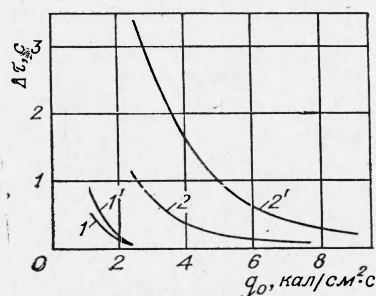


Рис. 4. Сопоставление критических времен передержки световых потоков при зажигании и горении. 1 — кривая 1 на рис. 3; 1' — кривая 1 на рис. 1 (Н+сажа); 2 — кривая 2 на рис. 3; 2' — кривая 2 на рис. 1 (Н).

по величине со временем срабатывания штормового затвора. В опытах с порохом Н верхнее предельное значение q_0 определить не удалось из-за ограниченной мощности излучателя.

На рис. 4 сопоставлены экспериментальные передержки светового потока при зажигании $\Delta\tau_z$ (см. рис. 1) с критическими длительностями при горении $\Delta\tau_r$ (см. рис. 3). Из рисунка следует, что для одинаковых значений потоков излучения критические времена передержки при зажигании превосходят критические длительности при горении. Особенно велика разница в случае прозрачного пороха Н.

Критические амплитуды потоков излучения для стационарно горящего пороха

Образцы пороха зажигались накаленной спиралью и горели в условиях облучения потоком заданной интенсивности в течение 4÷10 с. При этом процесс горения заведомо выходил на стационарный режим. Затем световой поток перекрывался шторкой и фиксировался результат опыта — переход к новому стационарному режиму горения или погасание. Опыты проводились при начальных температурах образца 20 и 100°С. Экспериментальные данные для пороха Н+сажа приведены в таблице.

Аналогичные опыты на порохе Н проведены только при начальной температуре 20°С. Результаты представлены ниже:

q_0 (+)	1,92; 1,92; 1,90
q_0 (-)	2,21; 1,99; 1,92
q_0 (крит.)	2,0

$T_0, ^\circ\text{C}$	$q_0(+)$	$q_0(-)$	q_0 (крит.)
20	0,93; 0,99; 1,02; 1,06	0,88; 0,97; 0,99; 1,02	1,0
100	1,55; 1,52; 1,50; 1,46; 1,42	1,77; 1,67; 1,51; 1,41; 1,40	1,5

Примечание. (+) — максимальные величины потоков, действие которых не привело к погасанию; (-) — минимальные значения гасящих потоков. q_0 (крит.) приближенно определены как среднее арифметическое указанных предельных величин.

Обсуждение результатов

Следует обратить внимание на методические особенности и специфику проведения описанных выше опытов. Необходимо иметь в виду, что непосредственно измерялся и всюду приводится полный поток излучения, посланный излучателем на воспринимающую поверхность образца. Для нахождения количества поглощенного порохом тепла следует ввести коррекцию на отражение от поверхности и поглощение в газовой фазе. Оценки этих величин для стационарно горящих при комнатной начальной температуре порохов Н+сажа и Н приведены в [4]. Не исключено, что в нестационарных условиях, а также при изменении начальной температуры эти коэффициенты будут иметь другие значения. Следует также отметить, что все изложенные опытные данные относятся к спектральному составу теплового излучателя с номинальной температурой ~2000°С.

Найденные эмпирические зависимости критической длительности передержек светового потока при зажигании и при действии излучения на стационарно горящий порох могут в дальнейшем подвергаться уточнению, поскольку в опытах использовалась аппаратура с конечным временем перекрывания света ~30 мс, которое сравнимо по величине со временем тепловой релаксации реакционного слоя конденсированной фазы. Можно заметить, что обнаруженное ранее для пороха Н+сажа верхнее предельное значение теплового потока при воспламенении [2], равное ~2,5÷3 кал/см²·с, совпало с предельным тепловым потоком, вызывающим погасание пороха при минимальных длительностях воздействия, обеспечиваемого установкой. Весьма вероятно, однако, что указанные верхние пределы могут зависеть от способа бронирования и от условий в газовой фазе над поверхностью. В частности, верхний предел по тепловому потоку для воспламенения пороха Н+сажа в неподвижном горячем азоте, по данным [5], несколько выше ~3,5÷4 кал/см²·с.

Весьма интересным представляется факт обнаружения нижних предельных значений теплового потока, при которых всегда осуществляются устойчивые переходы от зажигания к горению или с одного режима горения на другой. Эти величины равны ~1 кал/см²·с для

пороха Н+сажа и ~ 2 кал/см²·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/см²

*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-