

**ЗАЖИГАНИЕ БАЛЛИСТИТНОГО ПОРОХА
СВЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

В. Ф. Михеев, А. А. Ковальский, С. С. Хлевной
(Новосибирск)

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] предложена тепловая модель, базирующаяся на представлении о зажигании баллиститного пороха при его нагреве, как о тепловом процессе, происходящем в результате ускорения химических реакций в конденсированной фазе пороха. Полученные соотношения позволяют проследить закономерности изменения характеристик зажигания в зависимости от условий, при которых этот процесс возникает. Такими характеристиками в первую очередь являются поджигающий импульс u_n — энергия на единицу площади заряда, вызывающая его зажигание; время зажигания τ_0 и температура T_n поверхности заряда в момент зажигания. Поэтому представляется интересным экспериментально изучить, как зависят эти характеристики от условий опыта (давление и состав окружающей среды, скорость теплообмена между нагреваемым порохом и средой, плотность потока энергии к образцу). Такие исследования должны проверить правомерность развитой в [1] тепловой модели зажигания пороха.

Наиболее удобным в таком исследовании является метод, использующий световое излучение. Плотность потока световой энергии достаточно точно измеряется непосредственно и легко дозируется.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментального исследования зажигания баллиститного пороха Н с добавкой 1% ламповой сажи при атмосферном давлении (в азоте и воздухе) и при 50 атм (в азоте); начальная температура образцов — комнатная. Максимальная плотность светового потока равнялась $\sim 5 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Зажигание пороха осуществляется на световой установке (рис. 1), источником излучения в которой служит пластинка из графита, накаливаемая электрическим током [2]. Излучение подается в стальную бомбу 1 через окна 11 и 12 из оптического кварца на образец пороха 10 и калориметр 3. Кварцевое окно 11 крепится к корпусу бомбы поджимной гайкой 2. Окно 12 из тонкого кварца служит для защиты окна 11 от продуктов сгорания. Калориметр представляет собой полый медный цилиндр.

линдр, прикрепленный на трех тонких эбонитовых стойках к текстолитовому держателю 4. В калориметр впаяна термопара (медь — константан 5) диаметром 0,15 мм, спай которой находится в точке средней температуры [3]. Торцевая поверхность калориметра, обращенная к излучателю, покрыта тонким слоем сажи с тем, чтобы свести к минимуму отражение света от воспринимающей поверхности. Боковая поверхность калориметра покрыта алюминиевой фольгой (толщина ~20 мк) для того, чтобы избежать дополнительного нагрева калориметра с этой поверхности косыми лучами света.

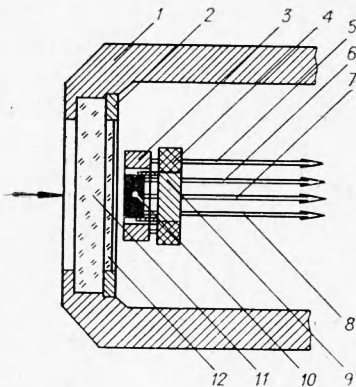


Рис. 1. Расположение образца и калориметра в бомбе.

Вклеивание термопар осуществлялось притиркой поверхности образца с натянутыми термопарами к поверхности оптического стекла, смоченного ацетоном; ацетон растворял поверхностный слой пороха, и термопары углублялись на свою толщину. База клейки термопар равна 12–13 мм, спай находится примерно на середине базы. Образцы с термопарами подвергались затем высушиванию при комнатной температуре в течение 10 суток.

Для проверки глубины заделки термопар в отдельных высушенных образцах термопары были удалены, после чего была измерена глубина следа с помощью микроскопа, которая оказалась равной толщине термопар (5–6 мк).

Разогрев калориметра ΔT за время опыта регистрировался быстродействующим потенциометром ЭПП-09М1 на 10 мВ. По разогреву ΔT , известной массе калориметра m , его воспринимающей поверхности S и теплоемкости меди c определялся поджигающий импульс:

$$u_n = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{S}$$

Поскольку в опытах ΔT не превышала 20°С, теплоотдача от калориметра была пренебрежимо малой по сравнению с u_n при давлении в среде 1 атм, однако потери тепла при 50 атм учитывались, так как превышали 10%. Специальными опытами было установлено, что неравномерность светового потока по полю калориметра и образца не превосходит 4%, а поджигающий импульс измеряется с точностью до 10%.

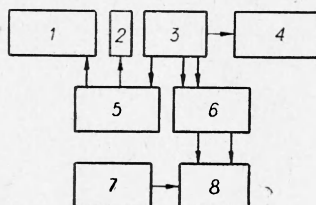
Коэффициент поглощения пороха Н+сажа равен 0,97. В опытах записывался также разогрев воспринимающей поверхности пороха от начальной температуры до температуры зажигания. С этой целью сигналы двух термопар 6 и 7 образца подавались непосредственно на вибраторы 1-го класса осциллографа Н-700 или на вибраторы 3-го

класса с предварительным усилением сигналов полупроводниковым усилителем постоянного тока. Сигнал третьей термопары δ мог регистрироваться таким же путем либо подавался на электронный блок, позволяющий выключать световую установку и прекращать облучение образца и калориметра по достижении на поверхности пороха заданной температуры. Точность выключения по температуре около 5°C . Блок-схема всей установки приведена на рис. 2.

Теплоотдача образца пороха в окружающую среду при давлениях 1 и 50 атм определялась по записи температуры поверхности пороха

Рис. 2. Блок-схема установки.

1 — излучатель; 2 — шторный затвор; 3 — бомба с образцом и калориметром; 4 — потенциометр ЭПП-09М1 на 10 мв; 5 — электронный блок для автоматического выключения излучения; 6 — усилитель постоянного тока; 7 — отметчик времени; 8 — шлейфный осциллограф.



в условиях нагрева его постоянным световым потоком. Получены следующие коэффициенты теплоотдачи: при $p=1$ атм $\alpha=4,9 \cdot 10^{-4}$ кал/см²·сек·град; при $p=50$ атм $\alpha=12,5 \cdot 10^{-4}$ кал/см²·сек·град.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И СРАВНЕНИЕ С ТЕОРИЕЙ

Анализ кривых нагрева поверхности пороха показывает, что ее температура вначале монотонно растет (рис. 3 и 4), как при нагреве поверхности химически инертного тела; по приближении момента зажигания ($\sim 200^\circ\text{C}$) такая закономерность сменяется более быстрым подъ-

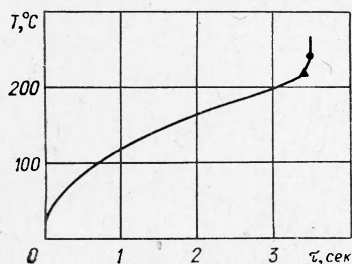


Рис. 3. Кривая разогрева поверхности пороха во времени. Окружающая среда — азот, давление 1 атм.

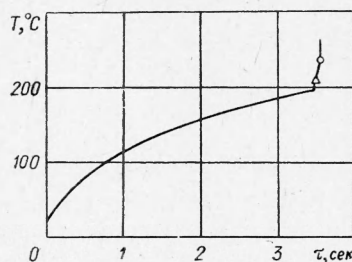


Рис. 4. Кривая разогрева поверхности пороха во времени. Окружающая среда — воздух, давление 1 атм.

емом температуры, приводя в момент поджигания пороха τ_0 к почти мгновенному ее скачку. Многочисленными опытами установлено, что при прекращении облучения пороха, когда температура на его поверхности равна или больше температуры, при которой $\frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \gg 0$, происходит зажигание пороха (эта точка на рис. 3 обозначена треугольником). Прекращение облучения при меньших температурах приводит к охлаждению пороха. Таким образом, «искажение» кривой температуры поверхности при временах, близких к τ_0 , происходит из-за выделения тепла химической реакцией в конденсированной фазе пороха, скорость

которой при этих температурах становится сравнительно большой. Подтверждение этому можно видеть, сравнивая кривые разогрева пороха в азоте и в воздухе.

Если в атмосфере азота осуществляется более или менее плавный подъем температуры перед скачком, то взаимодействие кислорода воздуха с продуктами разложения пороха приводит к небольшому «всплеску» на кривой температуры; затем в связи с быстрым догоранием этой

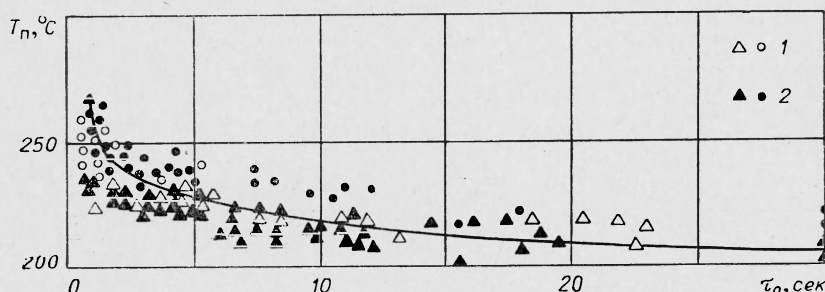


Рис. 5. Температура поверхности к моменту зажигания в зависимости от времени задержки, давление 1 атм.

1 — воздух; 2 — азот.

смеси термопара фиксирует такой же монотонный разогрев поверхности пороха, как и в опытах в азоте, с последующим скачком температуры. Величина задержки зажигания τ_0 и поджигающего импульса u_n в том и другом случае сохраняется.

Визуальными наблюдениями и при измерениях температуры поверхности пороха одновременно в нескольких точках установлено, что в процессе нагрева поверхность пороха превращается в бугристую из-за образования в поверхностном слое «пузырьков» продуктов разложения, а температура поверхности в каждой ее точке неодинакова (выше на бугорках). Зажигание имеет очаговый характер, причем эта «очаговость» становится более ощутимой с уменьшением плотности светового потока, когда задержки зажигания τ_0 велики. При небольших задержках (8—10 сек) бугорки сменяются очень мелкими кратерами (из-за прорыва продуктов наружу); количество их по мере нагрева непрерывно растет, пока они не сольются друг с другом; температура в каждой точке поверхности пороха почти одинакова. В связи с этим наиболее достоверные измерения температуры поверхности могли быть проведены только при временах зажигания в несколько секунд. В наших опытах за температуру зажигания T_n принимали температуру, выше которой процесс зажигания после прекращения облучения может развиваться самостоятельно (эта температура на рис. 3 и 4 обозначена треугольником).

На рис. 5, 6 и 7 нанесены экспериментальные точки температуры зажигания T_n и поджигающего светового импульса u_n .

Зажигание пороха при временах 1,0—1,3 сек и меньше при давлении 1 атм независимо от состава окружающей среды не приводит к устойчивому горению. Сразу же после прекращения воздействия светового излучения зажженный порох мгновенно гаснет.

Можно видеть, что температура зажигания не является температурой какого-либо фазового превращения, которая обязана оставаться постоянной при неизменных внешних условиях. Наоборот, она монотон-

но уменьшается с увеличением времени зажигания и практически не зависит от давления и присутствия кислорода в окружающем пороховом газе. Область изменения T_{II} лежит в интервале температур 200–250°С, ниже температуры поверхности горящего пороха. Поджигающий импульс также не зависит от присутствия кислорода в газе и монотонно растет с увеличением времени зажигания вследствие теплообмена в порохе, а

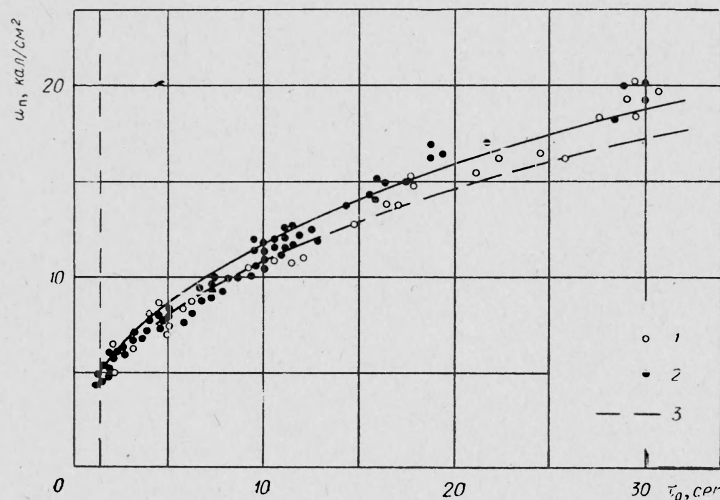


Рис. 6. Зависимость поджигающего импульса от времени зажигания, давление 1 атм.
1 — воздух; 2 — азот.

также между порохом и средой. Зависимость u_n от давления связана с тем, что теплоотдача от образца увеличивается с давлением. Влияние некоторой прозрачности пороха ($\sigma \approx 100 \text{ см}^{-1}$) проявляется при небольших задержках зажигания. Это наглядно видно на рис. 6 и 8: с уменьшением времени зажигания импульс u_n , уменьшаясь, стремится к некоторому конечному пределу, а не к нулю.

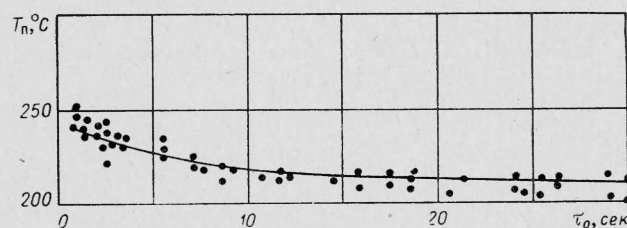


Рис. 7. Температура поверхности к моменту зажигания в зависимости от времени зажигания, давление 50 атм (азот).

Таким образом, совокупность всех приведенных выше экспериментальных фактов позволяет судить о зажигании баллиститного пороха как о процессе, происходящем в конденсированной фазе.

Все экспериментальные результаты хорошо описываются зависимостями, установленными для тепловой модели зажигания в работе [1].

Теоретические кривые, представленные на рисунках, были получены расчетным путем по формулам, взятым из этой работы:

а) для температуры зажигания $T_{п}$

$$\frac{Q_1 \cdot k_0 \cdot \tau_0}{c (T_{п} - T_0)} \exp\left(-\frac{E}{RT_{п}}\right) \geq \frac{1 + \kappa\psi}{1 + \chi\varphi} \cdot \chi \cdot \varphi \cdot F_0,$$

б) для поджигающего светового импульса

$$u_{п} = \alpha \cdot \tau_0 (T_{п} - T_0) \left\{ 1 - \frac{\nu}{\nu - 1} \left[\exp \psi^2 \operatorname{erfc} \psi - \frac{1}{\nu} \exp \varphi^2 \cdot \operatorname{erfc} \varphi \right] \right\}^{-1},$$

где

$$\nu = \frac{\sigma}{H}; \quad H = \frac{\alpha}{\lambda}; \quad \psi = H \sqrt{a \tau_0}; \quad \varphi = \sigma \sqrt{a \tau_0}$$

(обозначения взяты из [1]).

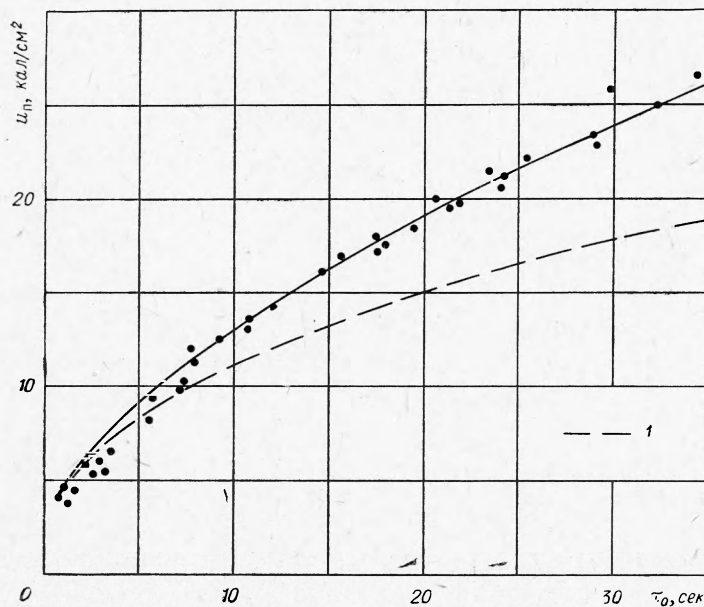


Рис. 8. Зависимость поджигающего импульса от времени зажигания, давление 50 атм (азот).

При вычислениях в соответствии с [1] принято $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-4}$ кал/см · сек · град, $c = 0,35$ кал/г · град, $a = 10^{-3}$ см²/сек, $\rho = 1,6$ г/см³, $k_0 = 4 \cdot 10^{13}$ сек⁻¹, $E = 33000$ кал/моль, $Q = 300$ кал/г, $\sigma = 100$ см⁻¹. При начальной температуре $T_0 = 20^\circ \text{C}$, коэффициенты $F_0 = 10,5$, $\kappa = 0,07$, $\chi = 0,735$.

В соответствии с экспериментальными материалами расчет показывает, что теплоотдача умеренно влияет на поджигающий световой импульс и практически никак не сказывается на температуре зажигания. На рис. 6, 3 и 8, 1 показан полезный поджигающий световой импульс ($u_{п}$) (количество тепла, необходимое только для нагрева пороха до его зажигания).

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность Т. Ф. Воеводченко, В. П. Дьячкову, С. М. Борину за большую помощь в подготовке и проведении экспериментов, а также всем сотрудникам лаборатории за участие в обсуждении результатов и ценные замечания.

*Поступила в редакцию
27/VI 1967*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Ковальский, В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной. ФГВ, 1967, III, 4.
2. Э. В. Конев, С. С. Хлевной. ПМТФ, 1962, 2.
3. Е. В. Кудрявцев, К. Н. Чекалев, Н. В. Шумаков. Нестационарный теплообмен. М., Изд-во АН СССР, 1961.