

ГОРЕНИЕ И ПОТУХАНИЕ ПОРОХА  
ПРИ БЫСТРОМ СПАДЕ ДАВЛЕНИЯ

В. Н. Маршаков, О. И. Лейпунский  
(Москва)

При горении в конденсированной фазе (к-фазе) пороха создается прогретый (тепловой) слой, толщина которого зависит от скорости горения. Скорость же горения однозначно определяется температурным распределением в тепловом слое и давлением.

При спаде давления горение пороха может протекать либо в квазистационарном, либо в нестационарном режиме в зависимости от скорости изменения давления. Если время релаксации давления в рабочем объеме больше времени релаксации температурного распределения любой из зон горения пороха, то имеет место квазистационарный режим горения. Это означает, что в любой момент времени мгновенному значению давления и градиенту температуры у границы к-фазы однозначно отвечает значение скорости горения в соответствии со стационарным законом горения. При этом температурное распределение по зонам горения успевает перестраиваться в соответствии с давлением.

При быстрой смене давления за время, меньшее, чем времена релаксации зон горения, осуществляется нестационарный режим горения, при котором однозначная связь между скоростью горения и давлением отсутствует. В этом случае скорость горения начинает зависеть не только от мгновенного значения давления, но и от скорости изменения давления, начального и конечного уровней давления и от соотношения времени изменения давления с временами релаксации зон горения.

Впервые нестационарный режим горения был рассмотрен Я. Б. Зельдовичем [1, 2]. Рассматривался случай, когда спад давления происходит за время, меньшее времени релаксации теплового слоя к-фазы при начальном давлении и большее времен релаксации зон горения в газовой фазе (г-фаза). При этом полагалось, что реакция в к-фазе отсутствует, температура горячей поверхности пороха не зависит от давления. Поведение горящего пороха при спаде давления должно определяться параметрами: 1) начальным давлением (перед спадом) —  $p_n$ ; 2) конечным давлением (после спада) —  $p_k$ ; 3) скоростью изменения давления в начальный момент времени —  $\dot{p}$ ; 4) временем релаксации теплового слоя при начальном давлении —  $\tau_{т.с}$ . Из них можно составить два независимых безразмерных параметра:  $H = p_k/p_n$  — относительное конечное давление при спаде и  $W = \dot{p} \cdot \tau_{т.с} / p_n$  — безразмерная скорость спада давления.

Известно, что  $\tau_{т.с} = \kappa / u_n^2$  ( $\kappa$  — коэффициент температуропроводности,  $u_n$  — стационарная скорость горения пороха при  $p_n$ ) и если

принять, что стационарный закон горения имеет вид  $u_n = u_0 p^\nu$ , то  $W$  может быть представлена в следующем виде:

$$W = \frac{P_{\text{т.с}}}{p_n} = \frac{p_n}{p_n u_n^2} = \frac{\alpha}{u_0^2} \cdot \frac{p}{p_n^{2\nu_n}}$$

Коэффициент  $\alpha/u_0^2$  — величина постоянная для любого конкретного вида топлива, а  $\nu=0,57$  для исследуемого пороха, тогда  $W = \text{const} \frac{p}{p_n^{2,14}}$ .

Очевидно, что в координатах  $H$ ,  $W$  будут существовать области таких  $H$  и  $W$ , при которых порох гаснет или продолжает гореть, несмотря на спад давления. Эти области могут быть разделены «кривой потухания» пороха. Теоретически кривые потухания пороха в рамках предположений, принятых Я. Б. Зельдовичем [1, 2], были получены в работе [3]. Экспериментальное исследование кривых затухания являлось целью настоящей работы.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводились на нитроглицериновом порохе с добавкой 2% окиси магния. Образцы имели вид цилиндрических шашек диаметром 8 и высотой 10—13 мм. Эксперимент проводился с помощью установки, состоящей из бомбы емкостью 800 см<sup>3</sup> и ресивера емкостью 6200 см<sup>3</sup>. В начале опыта ресивер отделялся от бомбы мембраной. Образец помещался в бомбу и горел в атмосфере азота при заранее выбранном давлении.

В заданный момент времени пробойник накалывал мембрану, которая благодаря разнице давлений окончательно разрывалась, и происходило перетекание азота из бомбы в ресивер, т. е. осуществлялся спад давления в бомбе. Варьируя соотношение объемов бомбы и ресивера, а также заполняя ресивер до выбранного давления, можно было получать спады давления с различной глубиной. Меняя же проходное сечение между бомбой и ресивером, можно получать различные скорости спада давления.

Таким образом, на этой установке можно независимо менять как скорость, так и глубину спада давления, выясняя, какие спады давления приводят к потуханию пороха, т. е. приводят к закалке порохового образца.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

Опыты по сбросу давления с различных начальных уровней (30–60 кг/см<sup>2</sup>) показали, что области  $W$  и  $H$ , при которых порох гаснет, не совпадают для данных начальных давлений, а следовательно нельзя построить одну универсальную кривую потухания. Для каждого из этих давлений существует кривая потухания (рис. 1, 2). Для  $p_n = 30$  кг/см<sup>2</sup> вместо кривой потухания имеет место область или полоса потухания (см. рис. 2, полоса между кривыми 5 и 4), вне которой порох либо гаснет (ниже кривой 5), либо сгорает (выше кривой 4), а внутри полосы возможны оба варианта. Тот факт, что для каждого из указанных начальных давлений имеется своя кривая потухания, объясняется тем, что спады давления с разных уровней в данных координатах  $W$ ,  $H$

не могут считаться подобными, так как имеет место зависимость температуры горячей поверхности от давления. Наличие «полосы потухания» (см. рис. 2, 4, 5) объясняется близостью  $p_n$  к области давлений, при которых наблюдается неполное выделение энергии при горении.

Поскольку спад давления в настоящих опытах имел вид экспоненциальной зависимости, то его можно характеризовать не скоростью и глубиной спада, а характерным временем и глубиной. Под характерным временем спада ( $\tau$ ) подразумевается время, за которое разница между начальным и конечным давлением ( $\Delta p$ ) уменьшается в  $e$  раз. Каждую из кривых потухания можно построить в координатах  $\tau, H$  (рис. 3).

Значение характерного времени, соответствующего кривой потухания, будем называть критическим —  $\tau_{кр}$ . Если спад давления до данного конечного уровня осуществляется за время  $\tau$ , меньшее  $\tau_{кр}$  для данной глубины спада, то порох гаснет; если  $\tau > \tau_{кр}$  — порох сгорает.

Посмотрим, в каком соотношении находятся критические характерные времена спадов с различными временами релаксации зон горения. Предварительно проведенные термпарные измерения распределения температур по зонам горения при различных давлениях (по методике [4]) позволили получить зависимость времени релаксации теплового и реакционного слоев к-фазы от давления.

При сравнении критических характерных времен спадов давления с временами релаксации теплового слоя и реакционного слоя конденсированной фазы выяснилось следующее:

1. Критические характерные времена спадов давления, отвечающие

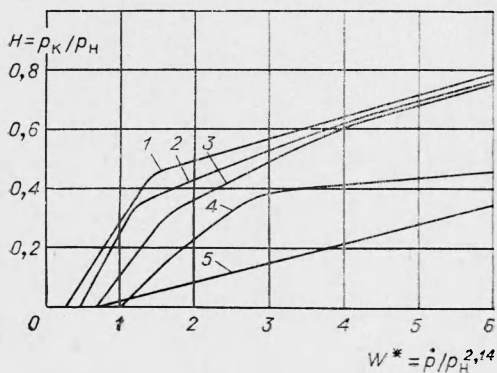


Рис. 2. Критические параметры спадов давления.

1, 2, 3 — «кривые потухания» для спадов давления с начальными уровнями в 60, 50, 40 кг/см<sup>2</sup> соответственно. Кривые 5 и 4 ограничивают «полосу потухания» при спаде давления с начального уровня в 30 кг/см<sup>2</sup>.

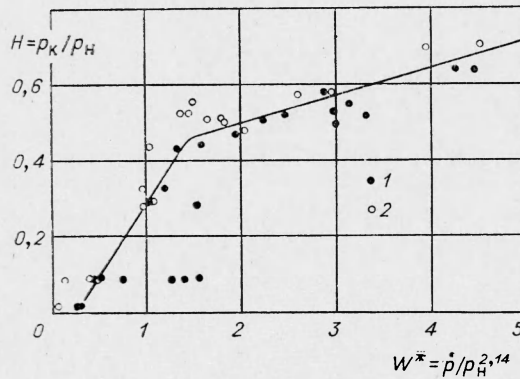


Рис. 1. «Кривая потухания» пороха для спадов давления с начального уровня 60 кг/см<sup>2</sup>.

1 — спады давления, при которых порох гаснет; 2 — спады давления, при которых порох сгорел.

участку кривой потухания с относительно высокими конечными уровнями от 0 до 0,45 (крутой участок кривой), соизмеримы с временами релаксации теплового слоя для соответствующих конечных давлений. На рис. 4 представлены две кривые: кривая 1 дает значения критических характерных времен при спадах давления до относительного конечного уровня  $p_k/p_n = 0,1$  для начальных давлений от 40 до 60 кг/см<sup>2</sup>, а кривая 2 — времена релаксации теплового слоя при конечных давлениях, равных  $p_k = 0,1 p_n$ . Отметим, что с повышением конечного уровня давления при спаде  $\tau_{кр}$  уменьшается в соответствии с уменьшени-

ем времени релаксации теплового слоя для соответствующих конечных давлений и в пределе при относительных конечных уровнях спада  $0,35 \div 0,45$ , при которых наблюдается излом кривой потухания, критические характерные времена спада становятся равными времени релаксации теплового слоя при начальном давлении (рис. 5).

2. Критические характерные времена спадов давления, отвечающие участку кривой потухания с относительными конечными уровнями да-

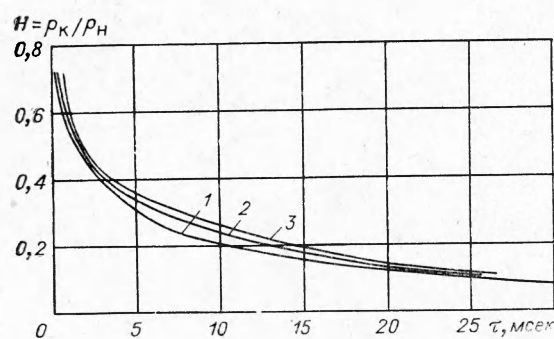


Рис. 3. Зависимость критического характерного времени спада относительного конечного давления при спаде.  $p_n$  равно 60 (1), 50 (2) и 40  $\text{кг/см}^2$  (3).

нения в  $0,7 \div 0,8$  критические характерные времена становятся близки к временам релаксации реакционного слоя к-фазы при начальном давлении. Сравнение этих времен дано на рис. 6.

Обратим внимание на тот факт, что при спаде давления до уровня  $p_k/p_n = 0,7$   $\tau_{кр} \approx 0,4$  мсек, а  $\tau_{р.с} = 0,7$  мсек (для  $p_n = 50 \text{ кг/см}^2$ ); при спаде до уровня  $p_k/p_n = 0,35$  (излом кривой потухания для  $p_n = 50 \text{ кг/см}^2$ )  $\tau_{кр} = \tau_{р.с} = 5$  мсек. Как критические характерные времена спадов, так и соответствующие им времена релаксаций для двух этих уровней спада

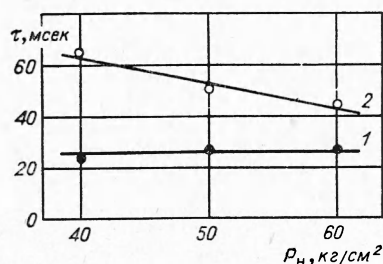


Рис. 4. Зависимость критического характерного времени спада от начального давления для спадов с  $p_k/p_n = 0,1$   $p_n$  (1) и времени релаксации теплового слоя от начального давления для спадов с относительным конечным уровнем 0,1 (2).

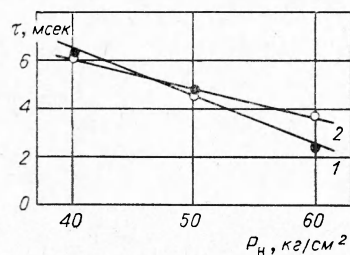


Рис. 5. Зависимость критического характерного времени спада от начального давления для спадов с  $p_k/p_n = 0,35 \div 0,45$  (1) и времени релаксации теплового слоя от начального давления (2).

отличаются на порядок. Это означает, что в первом случае тепловой слой не успевает следить за изменением давления. Горение пороха при таком спаде давления оказывается возможным лишь потому, что температурные распределения в к-фазе, соответствующие начальному и конечному давлениям, близки и отличаются не более, чем на  $50^\circ \text{C}$ . Будет же гореть порох при спаде или погаснет, определяет в этом случае перестройка реакционного слоя к-фазы.

Из сказанного выше следует: время релаксации теплового слоя при конечном давлении для первого участка кривой потухания и время релаксации реакционного слоя при конечном давлении для второго участка кривой потухания (выше излома кривой) являются временами, необходимыми для перестройки начального теплового или начального реакционного слоев к конечным, т. е. к таким слоям, которые отвечали бы конечным стационарным режимам горения. И если осуществляется спад давления с характерным временем спада, большим, чем эти времена перестроек, то порох горит при спаде давления с нестационарной скоростью; если же характерное время спада меньше, чем эти времена, то он гаснет.

Таким образом, результаты экспериментов лишь отчасти подтвердили выводы теории [3], основанной на представлениях Я. Б. Зельдовича, определяющих потухание пороха двумя параметрами: скоростью и глубиной спада давления. Наличие различных кривых потухания, соответствующих различным начальным давлениям, указывает на существование третьего параметра, связанного с начальным давлением, который не был учтен в теории. Этот параметр, по-видимому, связан с тем, что температура поверхности пороха может меняться нестационарным образом в процессе спада давления и зависит также от начального уровня давления, а не остается постоянной, как это предполагал Я. Б. Зельдович. Кроме того, как было показано, ход кривой потухания на некотором ее участке (пологая часть кривой) определяется релаксацией зоны химической реакции в к-фазе (реакционного слоя).

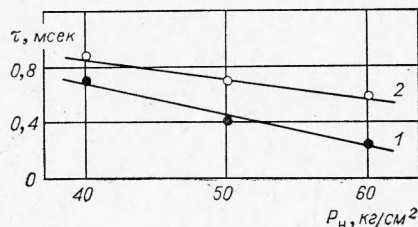


Рис. 6. Зависимость от начального давления критического характерного времени спада (1) и времени релаксации реакционного слоя (2) для спадов давления с относительными конечными уровнями 0,7.

Поступила в редакцию  
7/XII 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
2. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3.
3. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович, Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1964, 3.
4. А. А. Зенин. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, М., 1962.