

**К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ ПОРОХА  
ПРИ СПАДЕ ДАВЛЕНИЯ**

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

Нестационарное горение пороха наблюдается при быстром изменении давления в рабочем объеме. Под «быстрым» понимается такое изменение давления, когда время его изменения меньше времени релаксации зон горения. В частности, при спаде давления время изменения давления может быть так мало, что перестройка зон горения не успевает произойти и порох гаснет.

Было показано [1, 2], что горение пороха при спаде давления может характеризоваться двумя параметрами: безразмерной скоростью спада давления  $W = (\kappa/u_n^2)(\dot{p}/p_n) = (\kappa/u_0^2)(\dot{p}/p_n^{2\nu+1})$  и глубиной спада или относитель-

ным конечным уровнем давления (после спада)  $H = \frac{p_k}{p_n}$ , где  $\dot{p}$  — производная давления по времени в момент начала спада;  $p_n$  — величина давления перед спадом;  $p_k$  — конечное давление после спада;  $u_n$  — стационарная скорость горения при  $p_n$ ,  $u_n = u_0 p_n^\nu$  — закон горения;  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности.

В координатах  $W, H$  должна существовать область таких скоростей и глубин спада, в которой порох гаснет, и область  $W, H$ , где порох продолжает гореть. Эти области могут быть разделены «кривой потухания», дающей критические, т. е. минимальные значения  $W, H$ , при которых горение пороха прекращается. В работе [3], в рамках предположений нестационарной теории горения Я. Б. Зельдовича, были теоретически получены кривые потухания для различных начальных температур и двух законов спада давления: линейного и экспоненциального. В работе [4] при исследовании горения нитроглицеринового пороха с добавкой 2% окиси магния при разных начальных давлений получены «кривые затухания» (рис. 1 и 2 [4]) и «полоса потухания» (при  $p_k = 30 \text{ кг/см}^2$ ). Выше «кривой» или «полосы потухания» порох продолжает гореть, ниже гаснет, а внутри «полосы» возможны оба случая. Последнее объяснено близостью  $p_n = 30 \text{ кг/см}^2$  к области давлений, при которых наблюдается неполное сгорание пороха, а следовательно, и некоторое отличие в механизме горения. На рис. 1 [4] каждая кривая имеет характерный излом, который делит ее на две ветви: крутую и пологую. Крутая ветвь отвечает перестройке теплового (прогретого) слоя конденсированной фазы, а пологая — перестройке ее реакционного слоя.

В настоящей работе рассматривается вопрос о перестройке зон горения при спаде давления.

Эксперименты проводились по методике, изложенной в [4]. Для наблюдения за перестройкой зон горения во время спада давления использовались П-образные ленточные термопары из пары вольфрам с 5% рения + вольфрам с 20% рения диаметром 25—30 мк, прокатанные до толщины 7—10 мк, которые заклеивались в продольный разрез порохового образца на расстоянии ~1 мм одна над другой. Это расстояние каждый раз перед склейкой тщательно промерялось.

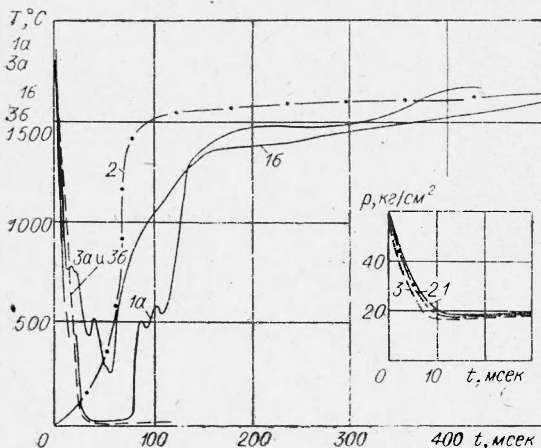


Рис. 1. Изменение температуры и давления во времени для  $p_n = 60 \text{ кг/см}^2$  и  $p_k = 18 \text{ кг/см}^2$ ;  $H_0$  — расстояние до горячей поверхности перед спадом давления (отрицательные значения соответствуют местоположению термопары в к-фазе).

1a —  $H_0 = 1,5 \text{ мм}$ ; 16 —  $H_0 = 0,38 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 7000 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел; 2 —  $H_0 = -0,1 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 7400 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел; 3a —  $H_0 = 1,2 \text{ мм}$ , 36 —  $H_0 = 0,12 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 10600 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох погас.

Собственное время таких термопар при  $p = 50 \text{ кг/см}^2$  и  $T = 1000^\circ \text{C}$  в условиях стационарного горения равно 1,35 мсек [5]. В условиях настоящего эксперимента, где скорость обтекающих термопару газов при спаде давления возрастает примерно в 1,5 раза, собственное время термопары меньше миллисекунды. Попытка использовать ленточные термопары толщиной в 3,5 мк оказалась неудач-

ной — такие термопары при спаде давления рвались. Местоположение термопар во время опыта определялось следующим образом.

Предварительно измерялись стационарные распределения температур по зонам горения и температура поверхности горящего пороха. Последняя определялась по первому максимуму тепловыделения в к-фазе и соответствующему ему излому на температурной кривой [5]. Сопоставляя стационарные распределения с записями термопар до того, как производился спад давления, и зная скорость горения пороха при данном давлении, мы определяли, где находилась термопара в момент сброса давления. Положение термопары относительно горячей поверхности пороха во время горения при спаде давления, точно определить невозможно, поскольку неизвестна скорость горения в нестаци-

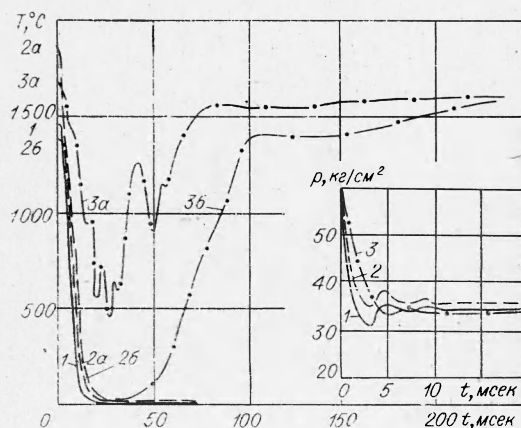


Рис. 2. Изменение температуры и давления во времени для  $p_n = 60 \text{ кг/см}^2$  и  $p_k = 34 \text{ кг/см}^2$ . 1 —  $H_0 = 0,27 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 20900 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох погас; 2a —  $H_0 = 0,83 \text{ мм}$ , 26 —  $H_0 = 0,12 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 18100 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох погас; 3a —  $H_0 = 0,6 \text{ мм}$ , 36 —  $H_0 = -0,18 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 9100 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел.

онарном режиме. Поэтому положение термопары определялось приблизительно в предположении, что в каждый момент времени скорость горения соответствует стационарной для данного давления.

На рис. 1, 2 и 3 приведены результаты трех серий опытов по горению пороха при спаде давления, в которых производились измерения температуры. Анализируя температурные кривые, полученные в опытах, где спад давления осуществлялся со скоростью меньшей, чем критическая, и порох не гас, можно сделать следующие выводы:

1. При заданных  $p_n$ ,  $p_k$  и  $\dot{p}$  с удалением от горячей поверхности пороха (на расстояниях больше 500 мк) температура понижается, все больше отличаясь от стационарной и может быть ниже температуры поверхности (рис. 1, 1а и 1б).

2. Вблизи поверхности пороха (примерно до 300 мк) независимо от скорости и глубины спада давления (для  $H$  и  $W$  меньше критических) температура газов выше температуры поверхности (рис. 3, 2б).

3. Большие скорость или глубина спада давления при прочих равных условиях вызывают более глубокие спады температуры (ср. кривую 3а с 4а рис. 3 и крив. 1б рис. 2 с 3а рис. 2).

4. Минимальная температура в данной точке над поверхностью во всех опытах наблюдалась примерно через 9–12 τ после начала спада давления (τ — характерное время спада, т. е. время, за которое  $\Delta p = p_n - p_k$  уменьшается в  $e$  раз).

Основываясь на приведенных данных, можно попытаться представить, как разрушаются зона пламени и пародымогазовая зона при спаде давления с различной скоростью и до разных конечных уровней. На рис. 4 представлены кривые, дающие распределение минимальных температур, наблюдаемых в газовой фазе через 9–12 τ после начала спада. Эти кривые качественные, так как построение точного профиля потребовало бы измерений температуры в нескольких точках, находящихся на разных расстояниях от горячей поверхности. Заклейка нескольких термопар с расстояниями между спаями в десятые доли миллиметра практически невозможна как по технологическим соображениям, так и по той причине, что могла изменить теплопроводность в порохе. Получение же тождественных спадов давления с термопарой, находящейся в заданной точке над поверхностью, задача весьма трудная. По этим причинам температурные профили были построены на основе данных нескольких отличных опытов с учетом закономерности изменения температуры при спаде давления. Точки на этих кривых — температуры, непосредственно

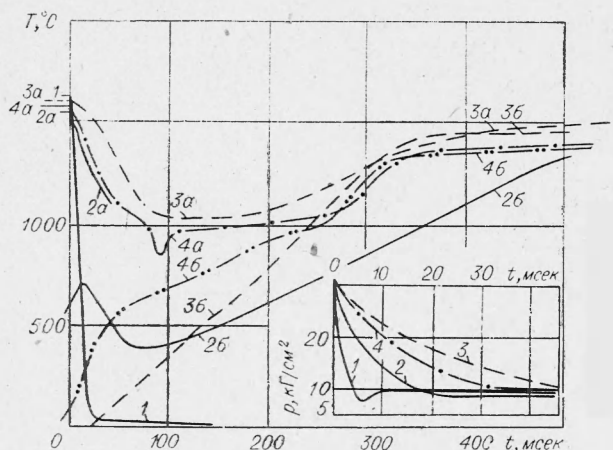


Рис. 3. Изменение температуры и давления во времени для  $p_n \approx 30 \text{ кг/см}^2$  и  $p_k \approx 10 \text{ кг/см}^2$ .

1 —  $H_0 = 0,69 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 8700 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох погас; 2а —  $H_0 = 0,86 \text{ мм}$ , 2б —  $H_0 = 0,02 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 2460 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел; 3а —  $H_0 = 0,8 \text{ мм}$ , 3б —  $H_0 = -0,14 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 1150 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел; 4а —  $H_0 = 0,79 \text{ мм}$ , 4б —  $H_0 = 0,04 \text{ мм}$ ,  $\dot{p} = 1900 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ , порох сгорел.

замеренные в опыте с данными параметрами. Падение температуры в газовой фазе при спадах давления с  $p < p_{кр}$  ( $W < W_{кр}$ ) оказывается столь значительным, что реакция практически прекращается. Действительно, если происходит спад температуры с 1800 даже до 800°С и если считать, что энергия активации находится в диапазоне от 20 до 50 ккал/моль, то скорость реакции падает на 2-5 порядков.

При малой скорости сброса давления теплоподвод в к-фазу еще имеет место; условием погасания пороха должно быть прекращение теплоподвода из г-фазы. Так как спад давления значительно опережает падение температуры и при уменьшении давления г-фаза еще играет

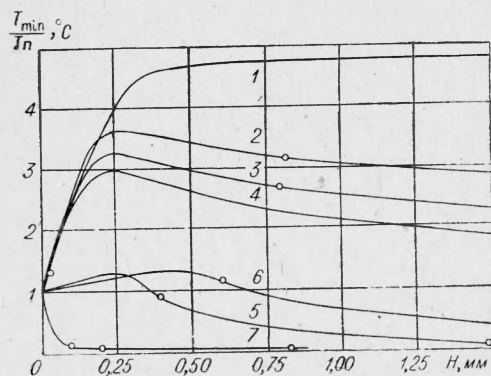


Рис. 4. Распределение минимальной температуры в газовой фазе пороха при различных спадах давления.

1 — стационарное температурное распределение при  $p=10$  кг/см<sup>2</sup>; 2, 3, 4 — нестационарные температурные распределения при спаде давления от  $p_n=30$  кг/см<sup>2</sup> до  $p_k \approx 10$  кг/см<sup>2</sup> с  $p=1150, 1900$  и  $2460$  кг/см<sup>2</sup>·сек соответственно; 5, 6, 7 — нестационарные температурные распределения при спаде давления от  $p_n=60$  кг/см<sup>2</sup> до  $p_k=30$  кг/см<sup>2</sup> со скоростью  $p=7000$  кг/см<sup>2</sup>·сек, до  $p_k=34$  кг/см<sup>2</sup> с  $p=9100$  кг/см<sup>2</sup>·сек и до  $p_k=1$  кг/см<sup>2</sup> с  $p=19000$  кг/см<sup>2</sup>·сек соответственно.

некоторую роль в процессе горения, то при установлении конечного уровня давления, когда температура еще продолжает падать, вклад г-фазы в процесс горения практически отсутствует. По этой причине в течение десятка миллисекунд наблюдается своеобразный нестационарный режим горения, похожий на беспламенное горение пороха в вакууме, когда горение поддерживается лишь благодаря экзотермической реакции в к-фазе, хотя конечное давление здесь больше 10 кг/см<sup>2</sup>. Затем в течение 70-100 мсек (для  $p_n=20-30$  кг/см<sup>2</sup>) и 250-300 мсек (для  $p_n \approx 10$  кг/см<sup>2</sup>) температурное распределение в г-фазе восстанавливается до вида, отвечающего соответствующему стационарному давлению  $p_k$ . Восстановление его начинается от поверхности пороха. На рис. 5 показано как происходит перестройка температурного распределения в г-фазе при спаде давления с 60 до 30 кг/см<sup>2</sup> при скорости спада  $p=9000$  кг/см<sup>2</sup>·сек. Кривая, соединяющая точки 1-12, показывает примерное положение термопары относительно горячей поверхности пороха и температуру в этих точках (по данным кривой 3а рис. 2).

О поведении к-фазы во время спада давления можно судить по температурным кривым, полученным при помощи термопар, находившихся в момент сброса давления в тепловом слое пороха или вблизи него (рис. 1, 2, рис. 2, 3б, рис. 3, 3б и 4б).

В этих опытах скорость спада давления меньше критической и образцы пороха сгорают. Из наклона кривых видно, что при спаде давления экзотермические реакции продолжают идти. Как следует из рис. 6, нарастание температуры в к-фазе по мере приближения термопары к поверхности в период спада давления идет медленнее, чем во время стационарного горения при  $p_n$ , и быстрее, чем при стационарном горении при  $p_k$ . При установившемся конечном давлении нарастание температуры продолжается, но с меньшей скоростью, чем при горении в стационарных условиях. Это можно объяснить следующими причинами:

1) теплоотвод в глубь пороха некоторое время продолжает оставаться прежним, а теплоподвод из г-фазы резко сократился; 2) при спаде давления, возможно, происходит частичное разрушение реакционного слоя. Таким образом, можно считать установленным, что при сбросе давления реакция в г-фазе может практически прекратиться и теплоподвод в к-фазу будет близок к нулю. Реакция сохранится лишь в реакционном

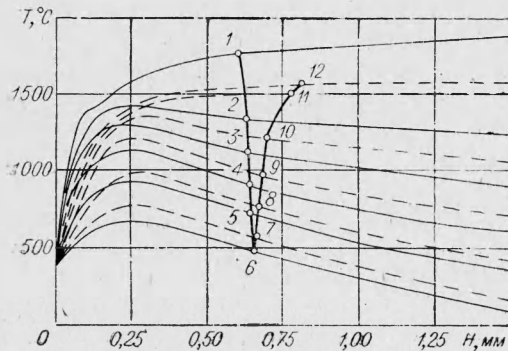


Рис. 5. Изменения температурного распределения при спаде давления с  $p_H = 60 \text{ кг/см}^2$  до  $p_K = 30 \text{ кг/см}^2$  с  $r = 9000 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ . 1 — стационарный режим при  $p = 60 \text{ кг/см}^2$ ; 2—11 — нестационарный режим при спаде через 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 45; 55 и 75 мсек; 12 — стационарный режим при  $p_K = 30 \text{ кг/см}^2$ , установившийся через 130 мсек.

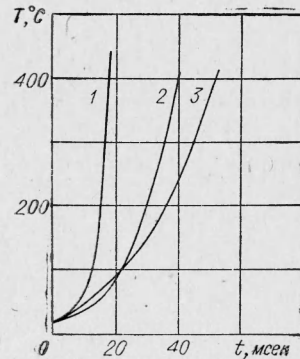


Рис. 6. Изменения температуры в конденсированной фазе. 1 — стационарный режим при  $p = 60 \text{ кг/см}^2$ ; 2 — стационарный режим при  $p = 20 \text{ кг/см}^2$ ; 3 — нестационарный режим при спаде с  $p_H = 60 \text{ кг/см}^2$  до  $p_K = 18 \text{ кг/см}^2$  со скоростью  $r = 7400 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$ .

слое к-фазы. Наблюдается своеобразный нестационарный режим горения, подобный беспламенному горению пороха в вакууме. Затем постепенно устанавливается стационарный режим горения, отвечающий новому давлению, и это восстановление идет со стороны к-фазы, от поверхности пороха.

Поступила в редакцию  
15/VII 1968

#### 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. В. Н. Маршаков, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1967, 3, 2.
5. А. А. Зенин. Канд. дисс. М., 1962.