

**ГОРЕНИЕ НИТРОГЛИЦЕРИНОВОГО ПОРОХА В ВАКУУМЕ  
И ПРИ ДАВЛЕНИЯХ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО**

А. А. Зенин  
(Москва)

Горение пороха в вакууме и при пониженном давлении представляет интерес, поскольку в этих условиях влияние газовой фазы на процесс горения либо отсутствует, либо ослаблено. В настоящей статье излагаются результаты измерения распределения температуры в волне горения предварительно нагретого баллиститного пороха Н<sup>1</sup>. Диапазон давлений составлял от  $p \leq 0,5$  до  $p = 620$  мм рт. ст., диапазон начальных температур  $T_0 = +100 \div 140^\circ \text{C}$ .

Измерения проводились ленточными П-образными термопарами медь — константан и манганин — константан толщиной 5  $\mu$  с шириной ленты  $\sim 300$   $\mu$ , величиной плеча  $0,5 \div 1,0$  мм [1]. Термопары клеивались ацетоном в шашки пороха диаметром 5 мм. Порох сушился около 3-х суток при температуре  $50^\circ \text{C}$ . Расстояние между термопарами измерялось, что позволяло в каждом опыте знать скорость горения. Термоэдс регистрировалась на осциллографе ПОБ-14. Шашка нагревалась перед опытом тепловым излучением от специальной электрической печи (кварцевый цилиндр с нихромовой проволокой). Опыты проводились в установке [2], состоящей из стеклянного колокола емкостью 7 л, притертого к латунной подставке, на которой были смонтированы все крепления и вводы. Откачка производилась форвакуумным насосом. Давление азота измерялось ртутным манометром. Небольшой интервал начальных температур вызван, как известно, тем, что при  $T_0 < 80 \div 100^\circ \text{C}$  и пониженных давлениях порох не может устойчиво гореть (табл. 1), а при  $T_0 > 150^\circ \text{C}$  в результате местных перегревов наступает самовоспламенение шашки (температура самовоспламенения навески в  $0,2$  г —  $180^\circ \text{C}$  [2]).

Т а б л и ц а 1

$p$ , мм рт. ст.	<0,5	200	400	600
$T_{0\text{min}}$ , $^\circ\text{C}$	100	90	87	80

В табл. 2 приведена усредненная по многим опытам зависимость скорости горения от давления и начальной температуры пороха. Температурные коэффициенты скорости горения  $\beta = \frac{d \ln u}{dT_0}$ , рассчитанные по этим усредненным данным, приведены в табл. 3.

Распределения температуры в конденсированной и газовой фазах при горении пороха Н в зависимости от давления представлены на

рис. 1.

Распределения температуры в конденсированной и газовой фазах при горении пороха Н в зависимости от давления представлены на

<sup>1</sup> Эти результаты получены автором и доложены на семинарах в ИХФ в 1958—1959 гг. и приведены в диссертации «Изучение распределения температуры при горении конденсированных веществ». ИХФ АН СССР, Москва, 1962.

рис. 1. Изменение начальной температуры при фиксированном давлении принципиально не изменяет вида температурного профиля.

Записи температуры при измерении в вакууме имеют вид чередующихся пиков. Первый пик имеет наибольшую высоту, высоты последующих на  $20 \div 50^\circ$  ниже, а расстояния между ними возрастают. Естественно считать подъем температуры в первом пике распределением температуры в зоне прогрева (и химических реакций) конденсированной фазы (к-фазы), а высоту пика — температурой реагирующей поверхности. Последующие всплески температуры можно объяснить оседанием на термopаре частичек реагирующего пороха — явление,

иногда наблюдаемое визуально для крупных частиц. Увеличение расстояния между пиками объясняется тогда тем, что часть диспергированных частиц, которые могли бы попасть на термоспай, успевает прореагировать. Оседание частиц на термopару при повышении давления становится редким явлением, так как диспергированные частицы облетают термopару из-за отклоняющего действия газового потока, обтекающего термopару.

Таблица 2

<i>p</i> , мм рт. ст.	$T_0$ , °C			
	110	120	130	140
	<i>u</i> , мм/сек			
<0,5	0,4	0,58	0,72	0,88
220	1,10	1,27	1,45	1,63
420	1,15	1,75	1,93	2,12
620	1,90	2,10	2,31	2,55

Таблица 3

<i>p</i> , мм рт. ст.	$T_0$ , °C			
	110	120	130	140
	$\beta \cdot 10^8$ , 1/град			
<0,5	38,2	27,8	21,8	18,0
220	19,9	13,7	12,0	10,8
420	13,3	11,8	10,5	9,7
630	11,5	10,4	9,3	8,5

Граница раздела фаз на температурных профилях при ненулевом давлении получается сравнением их с профилями в вакууме, так как распределение температуры в к-фазе не зависит от давления (при близких скоростях горения *u*), а в газовой фазе — зависит.

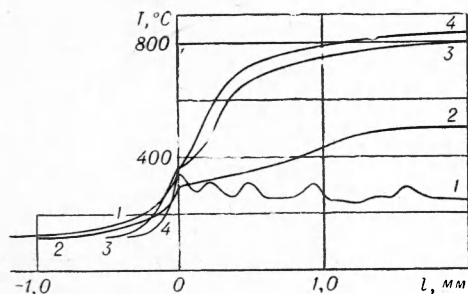


Рис. 1. Распределение температуры по зоне горения.  $T_0 = 120^\circ \text{C}$ .  
1 —  $p < 0,5$  мм рт. ст.; 2 —  $p = 120$  мм рт. ст.;  
3 —  $p = 320$  мм рт. ст.; 4 —  $p = 620$  мм рт. ст.

Нетрудно видеть, что температурой поверхности  $T_s$  начинается область замедленного роста температуры (плато) на профилях температуры при 100 и 200 мм рт. ст. Протяженность плато составляет 1 мм и 0,3 мм соответственно. Остаток этого плато наблюдается и при более высоких давлениях. Значения температур поверхности в зависимости от давления и  $T_0$  приведены на рис. 2. Разброс составляет  $40 \div 60^\circ$ ; поэтому можно говорить лишь о тенденции изменения  $T_s$ . Заметим,

что приборная ошибка в опытах не превышала  $5^\circ$ , поэтому наблюдаемый разброс связан, по-видимому, с неоднородностью структуры зоны горения. Практически зависимость  $T_s$  от давления отсутствует (лишь  $T_s$  опытов в вакууме лежат на нижней границе разброса). Это позволило нанести все экспериментальные точки на один график. Заметен

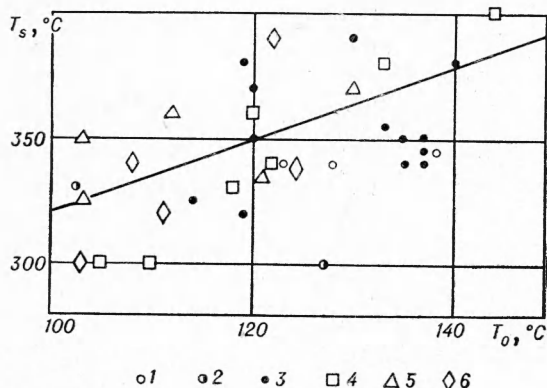


Рис. 2. Температура поверхности  $T_s$  в зависимости от начальной температуры и давления:  
1 —  $p < 0,5$  мм рт. ст.; 2 —  $p = 120$  мм рт. ст.; 3 —  $p = 220$  мм рт. ст.; 4 —  $p = 320$  мм рт. ст.; 5 —  $p = 420$  мм рт. ст.; 6 —  $p = 620$  мм рт. ст.

рост  $T_s$  с ростом  $T_0$ . Обработка методом наименьших квадратов дает для  $\frac{dT_s}{dT_0}$  величину 1,26 со стандартной ошибкой  $\pm 0,266$ .

Распределение температуры в к-фазе либо совпадает с михельсоновским ( $a = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/сек), либо примерно в 1,5 раза шире. Профили температуры позволяют получить количество тепла, выделяющегося в каждой из зон горения, и оценить подвод тепла из газовой фазы в конденсированную (рис. 3).

Тепловыделение в к-фазе практически не зависит от

давления и составляет в среднем  $70 \div 80$  кал/г (ср. [2]), тепловыделение в газовой фазе быстро растет до 130 кал/г с ростом давления от 0,5 до 200 мм рт. ст., затем замедляется. Разброс данных не позволяет проследить зависимость тепловыделений от начальной температуры. Доля тепла, подводимого из газовой фазы в к-фазу (по сравнению с выделением тепла в к-фазе), колеблется в отдельных опытах от 0 до 5—10% — для  $p > 200$  мм рт. ст. и равна 0 для  $p < 200$  мм рт. ст.

Полученные данные позволяют рассчитать критерий устойчивости горения пороха  $[\beta(T_s - T_0)]$  в рассмотренных условиях. Значения этого критерия приведены в табл. 4. Величина  $\beta(T_s - T_0)$  растет с уменьшением температуры начального подогрева и с уменьшением давления.

Я. Б. Зельдович первый рассмотрел вопрос об устойчивости горения пороха [3] и дал критерий устойчивости, который имеет вид:

$$\beta(T_s - T_0) \leq \frac{C_{p1}}{C_3} \cong 1. \quad (1)$$

А. И. Коротков и О. И. Лейпунский показали [4], что в реальных условиях этот критерий может не выполняться. В настоящее время имеется несколько критериев устойчивости. А. Д. Марголин [5] предложил критерий устойчивости, учитывающий протяженность и инерционность зоны химической реакции в к-фазе ( $T_s$  считается постоянной):

$$\beta(T_s - T_0) \leq \frac{C_{p1}}{C_3} + \beta \frac{q}{C_3}, \quad (2)$$

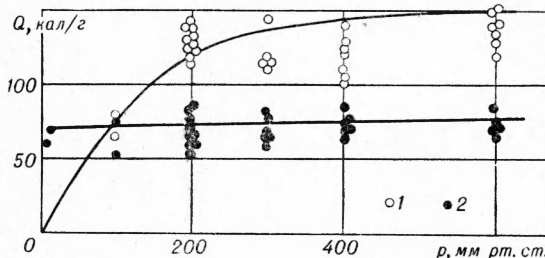


Рис. 3. Количество тепла, выделяющееся на 1 г пороха:  
1 — в газовой фазе; 2 — в конденсированной фазе.

Т а б л и ц а 4

<i>p</i> , мм рт. ст.	<i>T</i> <sub>0</sub> , °С			
	110	120	130	140
	$\beta (T_s - T_0)$			
<0,5	8,4	5,9	4,5	3,6
220	3,2	2,7	2,3	2,1
630	2,5	2,2	1,9	1,7

здесь  $q$  — количество тепла, выделяющееся на грамм пороха в реакционном слое к-фазы;  $C_3$  — удельная теплоемкость к-фазы;  $C_{p1}$  — удельная теплоемкость газовой фазы при постоянном давлении.

Б. В. Новожилов [6] предложил критерий устойчивости, при выводе которого предполагалось безынерционность реакционных зон, но учитывалась переменность температуры поверхности  $T_s$ :

$$r \geq \frac{(k-1)^2}{k+1}; \text{ для } k > 1 \quad (3)$$

и имеет тот же вид, что и критерий Зельдовича, при  $k < 1$ . Здесь

$$r = \frac{dT_s}{dT_0}; k = \beta (T_s - T_0).$$

Поскольку в изученных условиях осуществляется стационарный режим горения пороха, можно проверить предложенные критерии. Нетрудно видеть, что для этих условий во всем изученном интервале давлений выполняется лишь критерий (2): при  $p \leq 0,5$  мм рт. ст. и  $T_0 = 110^\circ \text{C}$  имеем  $8,4 \leq 8,8$ ; при  $p = 630$  мм рт. ст. и  $T_0 = 140^\circ \text{C}$  имеем  $1,7 < 1,9$ . Критерий (3) дает  $k = 3,3$ , в соответствии с экспериментально полученным  $r = \frac{dT_s}{dT_0} = 1,26$ , тогда как экспериментальное значение  $k$  изменяется от 8,4 до 3,6 при  $p \leq 0,5$  мм рт. ст.

Проведенное сопоставление позволяет утверждать, что устойчивость горения пороха при давлениях меньше 220 мм рт. ст. определяется инерционностью реакционного слоя к-фазы.

При давлении больше 220 мм рт. ст., кроме критерия (2), справедлив также и критерий (3), в котором учтено изменение  $T_s$  с изменением давления, а зоны реакций считаются безынерционными.

#### ВЫВОДЫ

Получены профили температур при стабильном горении пороха Н при давлениях от  $p \leq 0,5$  мм рт. ст. до  $p = 620$  мм рт. ст. при различных начальных температурах. Найдены температуры поверхности горящего пороха. Получены скорости горения пороха, температурные коэффициенты скорости горения и значения критерия  $\beta (T_s - T_0)$  в зависимости от давления и начальной температуры. Рассчитано количество тепла, выделяющееся в к-фазе и подводимое из газовой фазы в конденсированную.

Показано, что при давлении меньше 220 мм рт. ст. выполняется критерий устойчивости, учитывающий инерционность реакционного слоя

к-фазы (при постоянной температуре поверхности), а при давлениях от 220 мм рт. ст. и выше выполняется также критерий, полученный с учетом переменной (с давлением) температуры поверхности и в предположении о безынерционности реакционных зон.

Автор благодарит А. А. Ковальского за постановку работы по измерению температурных профилей и О. И. Лейпунского за развитие работы в исследовании устойчивости горения и ценные советы.

*Поступила в редакцию  
10/VII 1965*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин. ПМТФ, 1963, 5.
2. П. Ф. Похил, Л. Д. Ромоданова, М. Е. Белов.—Сб. «Физика взрыва». М., Изд-во АН СССР, 1953, № 1—2.
3. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
4. А. И. Коротков, О. И. Лейпунский.—Сб. «Физика взрыва». М., Изд-во АН СССР, 1953, № 2.
5. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович. ПМТФ, 1964, 5.
6. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1965, 4.