

**К ВОПРОСУ О ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ
ГОРЯЩЕГО НИТРОГЛИЦЕРИНОВОГО ПОРОХА**

*В. В. Александров,
Э. В. Конев, В. Ф. Михеев, С. С. Хлевной
(Новосибирск)*

Измерения температурного профиля в конденсированной фазе горящего пороха и температуры на его поверхности имеют большое значение для изучения механизма горения пороха, поскольку зона химических реакций в конденсированной фазе играет важную роль в процессах горения порохов (при определенных условиях становится ведущей [1]). Ниже приводятся некоторые данные по зависимости температуры поверхности горящего на воздухе пороха H от начальной температуры.

Для измерения температуры поверхности использовались тонкие (в виде ленточки толщиной $\sim 5 \mu$ и шириной $\sim 60 \mu$) термопары манганин — константан, которые располагались на границе между порошком и инертной подложкой. Материал подложки выбирался с таким расчетом, чтобы ошибка измерения температуры на поверхности пороха была минимальна. В опытах для этой цели использовался эбонит, обладающий примерно такими же, как у пороха H , теплофизическими свойствами¹.

Пороховой образец диаметром 20 мм и тщательно отшлифованная подложка с размещенной на ней П-образной термопарой склеивались с помощью ацетона. Плечо термопары имело длину $2 \div 7$ мм. Благодаря размягчению поверхности пороха при склейке термопара углублялась в порох на свою толщину. В некоторых опытах термопары заделывались внутрь порохового образца для измерения температурного профиля в проходящем пламени, как это делалось в работе [2]. Боковая поверхность образцов покрывалась линолеумом или тефлоном.

Изготовленные таким образом образцы затем сушились на воздухе длительное время от нескольких дней до нескольких месяцев. Часть образцов сушилась в вакуумной камере при температуре $\sim +40^\circ \text{C}$ также в течение нескольких дней. Нагревание образцов перед опытом производилось в трубчатой электрической печи. Для получения низких температур использовалась смесь льда с хлорным железом. Образцы выдерживались при заданной температуре в течение ~ 1 часа. Затем они поджигались на воздухе с помощью нихромовой спирали. Сигналы термопар записывались на шлейфном осциллографе Н-700 (рис. 1).

За температуру поверхности можно принять температуру в одной из двух характерных точек на кривой рис. 1, а именно в точке перегиба и в точке максимума. Было принято, что температура на поверхности

¹ Идея использования инертной подложки для измерения температуры поверхности горящего пороха была предложена в Лаборатории горения конденсированных систем ИХКиГ СО АН СССР в 1959 г. и использовалась в работе [2].

горящего пороха соответствует точке перегиба с минимальным значением производной $\frac{dT}{dx}$, а начинающееся за нею незначительное, хотя и довольно резкое в большинстве случаев, повышение температуры обусловлено некоторым притоком тепла как от продолжающих реагировать в «остановившейся» газовой фазе продуктов полураспада сгоревшего пороха, так и от тех остатков к-фазы, которые должны были перейти при нормальном горении в дымо-газовую смесь.

В некоторых опытах, в основном при отрицательных начальных температурах, кривые на осциллограммах несколько отличались от кривой, показанной на рис. 1. Начиная с некоторой температуры, на них было зафиксировано резкое повышение температуры до максимальной без заметной точки перегиба. Одной из возможных причин этого может являться неодновременный выход фронта горения на границу с эбонитом и последующее влияние пламени догорающих остатков пороха на показания термопары. В таких случаях за температуру поверхности принималась температура в точке начала резкого изменения хода кривой.

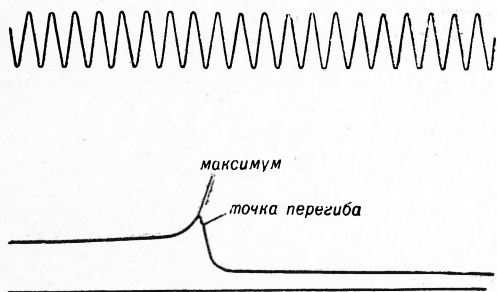


Рис. 1. Осциллограмма сигнала термопары.

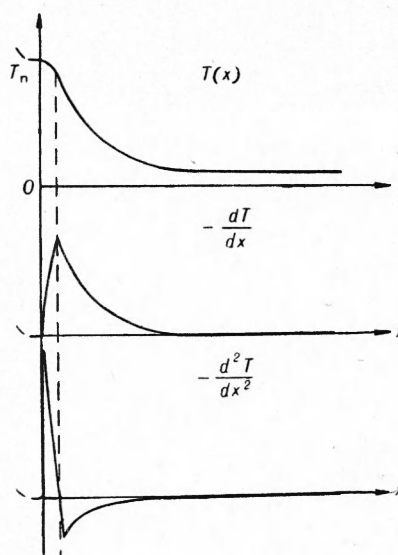


Рис. 2. Температурный профиль в порохе и его производные.

При определении температуры по точке перегиба с минимальным значением $\frac{dT}{dx}$, учитывалось следующее. Предположим, что температурное распределение в горящем порохе имеет вид, показанный на рис. 2 (для простоты рассматриваем случай, когда зона химических реакций в к-фазе является ведущей, т. е. когда $\frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \approx 0$). Тогда, дважды продифференцировав его, нетрудно убедиться в том, что оно должно иметь внутри зоны химических реакций две точки перегиба (в них $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$). Из рис. 2 видно, что точка, в которой производная $\frac{dT}{dx}$ равна нулю или, в общем случае, минимальна, должна совпадать с концом зоны тепловыделения, поэтому температура в этой точке, достаточно хорошо фиксируемая экспериментально, принималась за температуру поверхности горящего пороха.

Следует отметить, что в действительности конец первой зоны тепловыделения может не совпадать по тем или иным причинам с поверх-

ностью к-фазы, положение которой, кстати, очень трудно определить из-за плавности перехода к-фазы в дымо-газовую смесь. Поэтому использование термина «температура поверхности» для характеристики температуры в конце зоны тепловыделения носит несколько условный характер. Отметим, что для расчетов процесса горения важна именно температура в конце зоны тепловыделения.

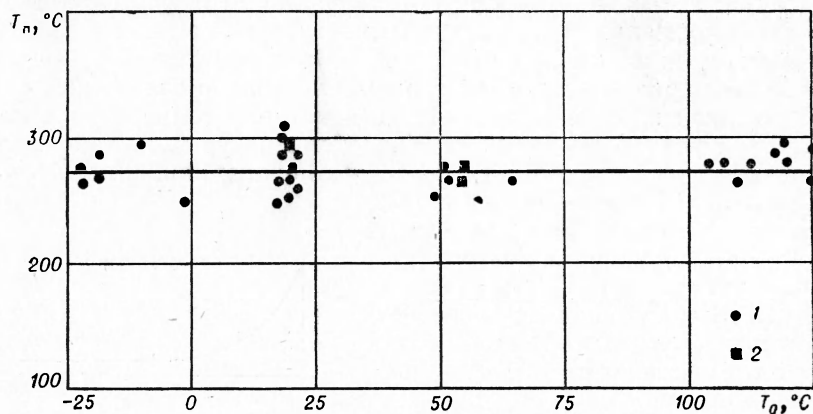


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности пороха Н от начальной температуры:

1 — по точке перегиба на эбоните; 2 — по точке перегиба в проходящем пламени.

Результаты измерения температуры на поверхности горящего пороха Н представлены на рис. 3 и в таблице. Как видно из рис. 3, значения температуры, взятые по точке перегиба в проходящем пламени, совпадают с соответствующими значениями температуры, полученными на границе с эбонитом.

Температура в точке перегиба практически не зависит от начальной температуры. Как показала обработка данных, она равна $275 \pm 21^\circ\text{C}$ при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и $281 \pm 11^\circ\text{C}$ при $T_0 = 116^\circ\text{C}$. Указанный разброс данных представляет собой среднеквадратическую погрешность измерений. Среднее значение температуры, подсчитанное по всем точкам, оказа-

лось в конце первой зоны тепловыделения равным $\sim 275^\circ\text{C}$. Следует отметить, что температура, взятая по максимуму кривых, также оказалась не зависящей от начальной температуры пороха, составляя величину порядка $320 \div 330^\circ\text{C}$.

Полученное значение температуры поверхности несколько ниже измеренной в работах [3] ($\sim 330^\circ\text{C}$) и [1] ($280 \div 300^\circ\text{C}$) и значительно выше измеренной в работе [2] ($\sim 200^\circ\text{C}$). Такое раз-

Температура поверхности пороха Н

$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_n, ^\circ\text{C}$
-21	262	20	282	61	265
-21	275	20	285	63	228*
-18	267	21	277	107	279
-18	286	22	258	105	279
-10	297	22	288	110	265
0	247	44	225*	113	281
19	265	49	292	118	288
19	304	50	251	120	281
19	245	52	273	120	299
19	307	53	267	126	291
19	264	54	265	124	266
19	246	55	272	131	330*
19	224*	59	246		

* При обработке данных эти точки не учитывались, так как находятся за пределами погрешности.

личие может быть связано как со всякого рода систематическими погрешностями при измерении температуры, так и со способом обработки экспериментальных данных. Эти причины, однако, вряд ли могут изменить основной результат данной работы — отсутствие изменения температуры в конце первой зоны тепловыделения пороха при изменении T_0 .

Постоянство температуры в конце первой зоны тепловыделения пороха позволяет предположить, что она равна температуре кипения смеси нитроглицерина и динитротолуола в присутствии нелетучей нитроклетчатки и продуктов полураспада. В пользу этого заключения говорит также тот факт, что измеренное значение температуры в конце первой зоны тепловыделения достаточно хорошо согласуется с оценкой температуры кипения чистого нитроглицерина ($\sim 254^\circ\text{C}$) и динитротолуола ($\sim 280^\circ\text{C}$), приведенной в работе [4]. Таким образом, испарение летучих составляющих играет, по-видимому, весьма большую роль в процессах горения нитроглицериновых порохов и несомненно должно учитываться при изучении механизма их горения. К подобным выводам пришли также многие из советских и зарубежных исследователей [5].

В связи с этим интересно вернуться к вопросу о причинах резкого усиления зависимости скорости горения от начальной температуры, начиная с некоторой температуры [6]. В работе [7] была сделана попытка объяснить это явление с помощью предположения о смене ведущей зоны горения. При этом принималось, что при начальных температурах ниже $+20 \div 40^\circ\text{C}$ ведущей зоной горения у нитроглицеринового пороха является зона реакций в дымо-газовой смеси, а выше этой температуры — зона химических реакций в к-фазе.

В свете полученных выше результатов представляется более вероятным переход ведущей стадии горения, если он вообще имеет место, из зоны реакций в к-фазе при $T_0 < +20 \div 40^\circ\text{C}$ в зону химических реакций в дымо-газовой смеси при более высоких начальных температурах.

Чтобы показать это, воспользуемся расчетами Я. Б. Зельдовича [8], выполненными для случая перехода горения летучих ВВ в детонацию. Как известно, Я. Б. Зельдович связывал этот переход с тем обстоятельством, что зона химических реакций в конденсированной фазе ВВ может стать ведущей при повышении давления, в то время как температура на его поверхности будет оставаться равной температуре кипения ВВ. Выражение для скорости горения, полученное при этом, имеет следующий вид:

$$u = \frac{1}{c\rho(T_k - T_0)} \sqrt{2\lambda AQ e^{-\frac{E}{RT_k}} \frac{RT_k^2}{E}} = \frac{\text{const}}{T_k - T_0}, \quad (1)$$

где ρ — плотность к-фазы; c — ее теплоемкость; T_0 — начальная температура пороха; T_k — температура кипения ВВ; λ — коэффициент теплопроводности; Q — тепловой эффект распада; A — предэкспонент.

Выражение под корнем пропорционально количеству тепла, вырабатываемому зоной химических реакций в к-фазе в единицу времени. Как видно из (1), оно должно быть постоянной величиной при данном давлении. Произведение $c\rho u(T_k - T_0)$ — это количество тепла, поступающее в единицу времени в движущийся со скоростью горения порох и идущее на его нагрев до температуры кипения. Формула (1) показывает, что скорость горения ВВ определяется скоростью нагрева вещества до температуры кипения.

Применив формулу (1) для расчета процесса горения пороха Н, нетрудно убедиться, что при $T_k = 275^\circ\text{C}$ она может описывать лишь

слабую зависимость скорости горения от начальной температуры, как раз такую, как у пороха Н при $T_0 < +20 \div 40^\circ \text{C}$. Рассчитанные с помощью соотношения (1) скорости горения (при расчетах принималось, что $\lambda = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}$, $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$, $c = 0,35 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$, $E = 32 \text{ ккал/моль}$, $A = 10^{13,6} \text{ 1/сек}$, $Q = 480 \text{ кал/см}^3$) в этом интервале начальных температур хорошо совпали с экспериментальными [9]. Естественно предположить поэтому, что при $T_0 < 20 \div 40^\circ \text{C}$ ведущей зоной горения у пороха Н является зона химических реакций в к-фазе.

В то же время сильную зависимость от T_0 может обеспечить только такая зона, температура в которой растет при достаточно большой энергии активации. Так как температура на поверхности горящего пороха в широком диапазоне начальных температур остается постоянной, то ведущей зоной горения при $T_0 > +40^\circ \text{C}$ у пороха Н является, скорее всего, не зона химических реакций в к-фазе, а какая-либо другая (например, зона химических реакций в дымо-газовой смеси).

Предположение о ведущей роли зоны реакций в к-фазе при $T_0 < +20 \div 40^\circ \text{C}$ позволяет рассчитать количество тепла, затрачиваемое этой зоной на нагрев пороха до температуры кипения, с помощью соотношения

$$Q^* = Qm_n = c(T_k - T_0) - \frac{q_l}{\rho u}, \quad (2)$$

где q_l — лучистый поток, поступающий в к-фазу горящего пороха из факела пламени и равный $\sim 1,0 \div 1,4 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}$ (согласно экспериментальным оценкам) (рис. 4). Необходи-

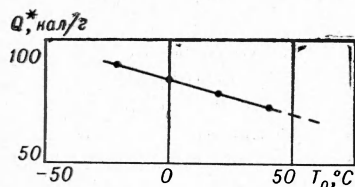


Рис. 4. Зависимость кажущегося теплового эффекта распада к-фазы пороха Н от начальной температуры:

$$c = 0,35 \text{ кал/г} \cdot \text{град}, \\ \rho = 1,60 \text{ г/см}^3.$$

мые для расчета значения скоростей горения пороха Н взяты из работы [9]. Соотношение (2), являющееся первым интегралом уравнения теплопроводности (при $x=0$), дает возможность рассчитать также глубину распада пороха в к-фазе (m_n), если известно Q . Как вытекает из соотношения (2) и рис. 4, глубина распада пороха в к-фазе должна уменьшаться (а процент диспергирования соответственно увеличиваться) при повышении начальной температуры пороха и соответ-

ствующем увеличении скорости его горения.

Авторы признательны А. А. Ковальскому за большое количество советов, а также всем сотрудникам Лаборатории горения конденсированных систем ИХКиГ СО АН СССР за обсуждение работы.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что температура в конце первой зоны тепловыделения пороха Н при горении на воздухе практически не зависит от начальной температуры, равна $\sim 275^\circ \text{C}$ и является, по-видимому, температурой кипения смеси нитроглицерина и динитротолуола в присутствии нитроклетчатки и продуктов полураспада.

2. Расчеты в предположении, что температура на поверхности пороха равна температуре кипения, хорошо описывают зависимость скорости горения пороха Н от начальной температуры при $T_0 < +20 \div 40^\circ \text{C}$.

