

ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ НЦ-ПОРОХОВ КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Леонов Г.Н.

Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул

Аннотация. Проводится исследование зависимости скорости горения порохов на основе нитроцеллюлозы от температуры поверхности горения. Описываются математические модели и приводятся результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: порох, температура, горение.

НЦ-пороха, т.е. пороха на основе нитроцеллюлозы, имеют широкое применение. Именно с рассмотрения горения НЦ-порохов стала развиваться теория горения конденсированных систем (к-систем) [1,2,3]. Среди характеристик НЦ-порохов несколько являются определяющими, имеющими большое практическое значение. К ним относятся линейная скорость горения, температура горения и температурный коэффициент скорости горения. Правильное понимание механизма горения НЦ-порохов позволяет проследить влияние рецептурных, сырьевых, технологических и иных факторов на эти характеристики горения, и, прежде всего, на скорость горения. Именно линейная скорость горения, наряду с формой, размерами пороховых элементов и весом заряда, определяет динамику газо-энергоприхода. Температура горения полностью определяется рецептурой пороха. Температурный коэффициент скорости горения определяется рецептурой, температурой горения, начальной температурой пороховых элементов, энергией активации терморазложения.

Линейная скорость горения, как правило, задается в виде закона скорости горения $u = u(P)$, т.е. зависимостью скорости горения от давления, при котором происходит горение. Знание закона горения позволяет варьировать формой и размерами пороховых элементов, а также весом заряда для получения соответствующих баллистических характеристик.

Экспериментальные данные для высоких давлений показывают, что для линейной скорости горения ее зависимость от давления имеет простой вид [4,5,6]

$$u = u_1 P \quad (1).$$

Здесь: u_1 - единичная скорость горения (скорость горения, приведенная к давлению $P = 1$ атм.; P - текущее давление.

Согласно работе [2] под скорость горения порохов понимается скорость исчезновения к-фазы, т.е. исчезновение к-фазы как твердого вещества. Для разрушения к-фазы предполагает разрушение химических связей. Скорость разрыва внутренних связей определяется функцией Аррениуса. Полный разрыв связей происходит на поверхности, которую обычно называют поверхностью горения с температурой T_S . При температурах $T < T_S$ имеем к-фазу, температурах $T > T_S$ имеем г-фазу, а при температуре $T = T_S$ - поверхность горения. Поэтому поверхность горения представляется в виде математической плоскости, что, в общем, не отражает её реального состояния. С этих позиций под линейной скоростью горения предполагается скорость перемещения изотермической поверхности T_S вглубь к-фазы. Изменение температуры к-фазы от начальной T_0 до температуры поверхности T_S , согласно тепловой теории горения [1], происходит за счет тепла из г-фазы, что не исключает тепловыделения и к-фазе. Таким образом, с химической точки зрения скорость горения химического процесса разрушения к-фазы может быть представлена в виде, подобной функции Аррениуса

$$u = Be^{-\frac{E}{RT_S}} \quad (2).$$

Здесь: E - энергия активации терморазложения к-фазы; R - универсальная газовая постоянная; T_S - температура поверхности горения; B - некоторая константа. Вектор линейной скорости горения направлен перпендикулярно плоскости T_S вглубь к-фазы (пороха).

Обычно к-фаза НЦ-порохов традиционно предполагается гомогенной, однородной и анизотропной [1-8]. Соответственно, величины E и B в формуле (2) также предполагаются величинами постоянными и независимыми от давления, т.к. характеризуют процессы в к-фазе. В тоже время линейная скорость горения является функцией давления. Таким образом, для получения зависимости линейной скорости горения от давления необходимо иметь зависимость для температуры поверхности от давления $T_S = T_S(P)$, т.е. что температура поверхности горения не может быть величиной постоянной. Кроме того, такое представление скорости горения предполагает, что основное тепловыделение при горении должно происходить в газовой фазе (г-фаза). Именно такой подход предполагает, что исчезновение (терморазложение) к-фазы как твердого тела в виде линейной скорости горения происходит за счет потока тепла из г-фазы в к-фазу. Величина $T_S = T_S(P)$ должна быть такой, чтобы обеспечивать скорость исчезновения к-фазы, соответствующей скорости горения пороха при данном давлении. В работе [8] на основе экспериментальных данных

приведены зависимости $T_S = T_S(P)$ для модельного баллиститного пороха Н и пироксилинового пороха с содержанием азота 13%. Для высоких давлений от 150 атм. до 4000 атм. можно рекомендовать следующие зависимости для оценки T_S в К :

$$\text{для пороха Н} - T_S = \frac{20600}{40,3 - \ln P} \quad (3),$$

$$\text{для ПП N=13\%} - T_S = \frac{28100}{53,0 - \ln P} \quad (4).$$

На рис.1 в сравнении приведены графики изменения температуры поверхности T_S в К от

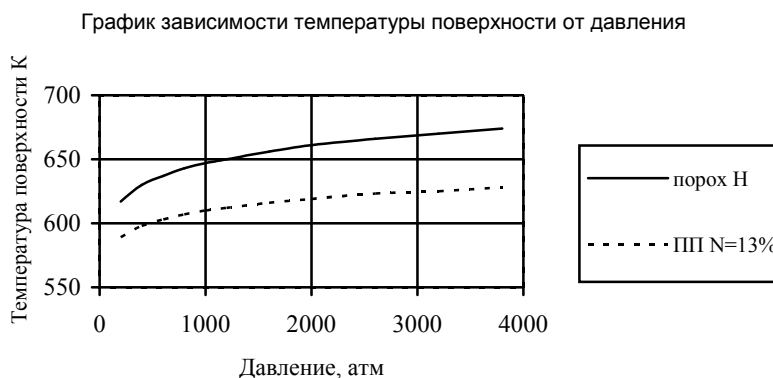


Рис.1

давления.

В принципе применение формулы (2) предполагает единую зависимость скорости горения от температуры поверхности $u = u(T_S)$. Ранее такое предположение о единой зависимости скорости горения от температуры поверхности было высказано в работе [8]. Для выполнения этого необходимо равенство нулю функционального определителя для параметров горения.

$$J = \frac{\partial(u, T_S)}{\partial(P, T_0)} = 0 \quad (5),$$

$$\text{или} \left(\frac{\partial u}{\partial P} \right)_{T_0} \left(\frac{\partial T_S}{\partial T_0} \right)_P - \left(\frac{\partial u}{\partial T_0} \right)_P \left(\frac{\partial T_S}{\partial P} \right)_{T_0} = 0 \quad (5').$$

Частные производные для вычисления функционального определителя для модельного пороха Н вычисляются из соотношений (6)

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_{T_0} &= u_1 \left[\frac{\text{см/сек}}{\text{атм}} \right] \\ \left(\frac{\partial u}{\partial T_0}\right)_P &= u \cdot \beta \left[\frac{\text{см/сек}}{\text{град}} \right] \\ \left(\frac{\partial T_S}{\partial P}\right)_{T_0} &= \frac{20600}{(40,3 - \ln P)^2} \frac{1}{P} \left[\frac{\text{град}}{\text{атм}} \right] \\ \left(\frac{\partial T_S}{\partial T_0}\right)_P &= \beta \cdot T_S^2 \cdot \frac{R}{E} \end{aligned} \right\} \quad (6),$$

а для пироксилинового пороха ПП с азотом N-13% из соотношений (7)

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial P}\right)_{T_0} &= u_1 \left[\frac{\text{см/сек}}{\text{атм}} \right] \\ \left(\frac{\partial u}{\partial T_0}\right)_P &= u \cdot \beta \left[\frac{\text{см/сек}}{\text{град}} \right] \\ \left(\frac{\partial T_S}{\partial P}\right)_{T_0} &= \frac{28100}{(53 - \ln P)^2} \frac{1}{P} \left[\frac{\text{град}}{\text{атм}} \right] \\ \left(\frac{\partial T_S}{\partial T_0}\right)_P &= \beta \cdot T_S^2 \cdot \frac{R}{E} \end{aligned} \right\} \quad (7).$$

В табл.1 приведены зависимости функционального определителя J от давления. Для расчета были взяты следующие: А) для пороха Н - $\beta = 0,003 \frac{1}{\text{град}}$, $u_1 = 0,0072 \frac{\text{см/сек}}{\text{атм}}$,

$E = 43 \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$; для ПП N=13% - $\beta = 0,002 \frac{1}{\text{град}}$, $u_1 = 0,0084 \frac{\text{см/сек}}{\text{атм}}$, $E = 56 \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$

[5,10]. $-7,156 \cdot 10^{-7}$

Таблица 1.

Пор ох	Давление, атм.					
	200	600	1200	2000	3000	4000
Пор ох Н	-7,156·	-7,627·	-7,949·10	-8,199·10	-8,406·10 ⁻⁷	-8,558·10
ПП N=13%	-6,124	-6,416·	-6,611·10	-6,761·10	-6,883·10 ⁻⁷	-6,972·10

Из таблицы видно, что значения функционального определителя близки к нулю. Следовательно, предположение об единой зависимости скорости горения от температуры

поверхности вполне правомерно. По данным работы [7] для данного пороха Н при давлении

$$P=20 \text{ атм. } |J| = (0.9 \div 0.6) \cdot 10^{-3} \frac{\text{см/сек}}{\text{атм}}.$$

Рассмотрим применимость формулы (2) для модельного НЦ-пороха – пороха Н, и для ПП N=13%. Порох Н - баллиститный порох на основе коллоксилина (НЦ с содержанием 11.85% N) и нитроглицерина [7,8]. Для нитроглицерина энергия активации $E = 45 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$, а

для коллоксилина $E = 43 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$ [9,10]. В качестве энергии активации для данного пороха

можно взять энергию активации коллоксилина, как единственно твердого вещества в данном порохе. $B = 2,432 \cdot 10^{15} \left[\frac{\text{см}}{\text{сек}} \right]$. Для нитроцеллюлозы с содержанием азота 13% (ПП N=13%) энергия активации E , определенная для различных интервалов температур у различных авторов существенно различается [10]. Но прослеживается тенденция увеличения

График отношения скорости горения по формуле (2) к скорости по формуле (1) от давления

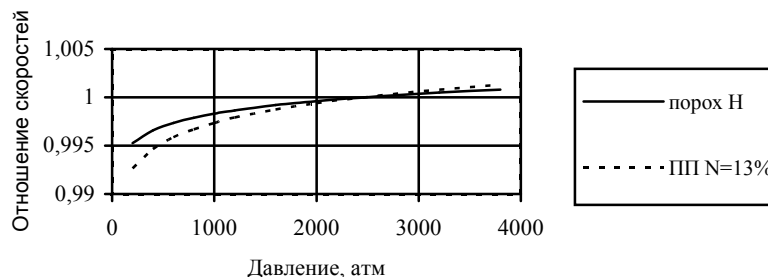


Рис.2.

энергии активации при увеличении содержания азота, также увеличивается. Поэтому для применения формулы (2) было взято значение $E = 56 \frac{\text{ккал}}{\text{моль} \cdot \text{град}}$ [10] и $B = 1,0 \cdot 10^{21}$. На рис.2 приведены графики отношения скорости по формуле (2) к скорости по общепринятой зависимости (1) с соответствующими значениями единичной скорости u_1 для каждого из рассматриваемых НЦ-порохов.

Из графиков видно, различие в значениях скоростей по формулам (1) и (2) незначительное. Это подтверждает предположение о том, что существует единая зависимость скорости горения от температуры поверхности и закон горения в форме (2), наряду с общепринятой формулой (1), вполне приемлем для НЦ-порохов в широком интервале высоких давлений.

Такой подход не противоречит, а лишь подтверждает тепловую теорию Зельдовича [1]. В работе [3] как раз утверждается, что тепловая теория Зельдовича наиболее приемлема для высоких давлений горения, когда можно пренебречь тепловыделением в к-фазе по сравнению с теплом, поступающим из г-фазы. В этом случае процесс горения контролируется газофазными химическими процессами тепловыделения. А к-фаза в этом случае рассматривается как инертное тело, тепловая инерционность которого определяет, в частности, нестационарное горение при динамически изменяющемся давлении.

Экспериментальные исследования по определению распределения температуры в волне горения показывают, что для пороха Н в интервале давлений от 30 атм. и выше, профиль температуры представляет собой гладкую кривую от начальной температуры вплоть до температур, больших температуры поверхности [11]. Имеющиеся пульсации температуры в г-фазе определяются процессами на поверхности горения. Но с ростом давления эти пульсации исчезают. Это говорит о том, что волна горения представляет собой волну разряжения, в которой вектор оттока продуктов разложения к-фазы направлен в противоположную сторону вектора линейной скорости горения [9]. В этой волне все параметры изменяются непрерывно, без скачков. При постоянном давлении на поверхности горения устанавливается тепловое равновесие, т.е. поток тепла из г-фазы q_2 в к-фазу равен потоку тепла q_k от поверхности горения вглубь к-фазы

$$q_k = q_2 \quad (6)$$

Это означает, что уравнения теплопроводности для к-фазы и г-фазы в волне горения сопрягаются в соответствие с граничными условиями 4-го рода

$$\lambda_k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_2 \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \quad (7),$$

$$T_S = T_S(P), \text{ при } x = 0 \quad (8).$$

Так как при высоких давлениях температура горения $T_2 = const$, и эта температура всегда равна температуре T_p [12], то изменение давления, при котором происходит горение, изменяет тепловой поток q_2 не за счет изменения температуры горения, а за счет изменения расстояния между поверхностью горения и зоной тепловыделения в г-фазе, т.е. изменения потока тепла из г-фазы в к-фазу. При этом температура поверхности $T_S = T_S(P)$ является параметром согласования между тепловым потоком к поверхности горения q_2 и тепловым потоком от поверхности горения вглубь к-фазы q_k , а также скоростью терморазложения к-фазы. Косвенным подтверждением этого могут служить формулы по оценке единичной

скорости горения u_1 для НЦ-порохов на труднолетучих растворителях типа нитроглицерин или нитродигликоль:

нитроглицериновые пороха типа НДТ - $u_1 = 0,000003 \cdot T_V^0 K - 0,0013$;

нитродигликолевые пороха типа ДГ - $u_1 = 0,00000314 \cdot T_V^0 K - 0,002$.

Общеизвестно, что существуют два режима волны реакции химической реакции с выделением тепла в пространстве: со сверхзвуковой скоростью и с до звуковой скоростью. Режим со сверхзвуковой скоростью, это детонационный режим, обусловленный быстрым сжатием вещества в ударной волне. Ударная волна обеспечивает необратимый разогрев вещества, что приводит к дополнительному выделению тепла за счет химической реакции, которая и поддерживает ударную волну. При этом вектор потока продуктов реакции совпадает с вектором распространения ударной волны, т.е. это волна сжатия. Режим с до звуковой скоростью определяет горение вещества, скорость которого поддерживается за счет теплопроводности от зоны основного тепловыделения в г-фазе к твердому веществу. А вектор скорости продуктов горения направлен в противоположную сторону от вектора распространения скорости горения, т.е. горение – это волна разряжения. Но для оттока газообразных продуктов от поверхности горения необходима некоторое избыточное давление сверх давления горения. Это давление развивается именно в подповерхностном слое δx_k .

Литература

1. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ// ЖЭТФ.–1942. – т.12., Вып.11/12. – С. 498-524.
2. Мержанов А.Г., Дубовицкий Ф.И. К теории стационарного горения пороха// ДАН СССР. – 1959. – т.129, №1. – С. 153-156.
3. Вилюнов В.Н. К математической теории стационарной скорости горения конденсированного вещества// ДАН СССР. – 1961. – т.136, №1. С. 136-139.
4. Гальвиц У. Артиллерийские пороха и заряды. – М.: Из-во ОП, 1950. – 194 с.
5. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962. – 703с.
6. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1978. – 207с.
7. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 1973. – 176 с.
8. Зельдович Я.Б., Лейпунский О.И., Либрович В.Б. Теория нестационарного горения пороха. – М.: Наука, 1975. – 131 с.

9. Леонов Г.Н. Особенности механизма горения бездымных порохов при высоких давлениях. Материалы Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г.Томск, Из-во ТГУ, 2002 г., с.88-89.
10. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., Наука, 1966 г., 346 с.
11. Зарко В.Е., Леонов Г.Н., Григорьев В.Г. Исследование профиля температуры в газовой фазе стационарно горящего пороха. Физика горения и методы её исследования. ЧГУ, г.Чебоксары, 1975 г., с.27-37.
12. Зельдович Я.Б., Ривин М.А., Франк-Каменецкий Д.А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. М., Оборонгиз, 1963 г., 190 с.