

## О ВОСПЛАМЕНЕНИИ ПОРОХОВ И ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*В. Б. Либрович*

(Москва)

Рассматривается воспламенение порохов и взрывчатых веществ потоком горячих газов в случае, когда газификация конденсированного вещества происходит целиком за счет подвода тепла к поверхности газификации из пламени газообразных продуктов разложения вещества. В основу положена схема горения Я. Б. Зельдовича — А. Ф. Беляева [1, 2].

§ 1. Постановка задачи о воспламенении. Будем рассматривать воспламенение пороха, если на его поверхности задан поток тепла в виде

$$q = \alpha(T_r - T_s) \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, определяемый в каждом конкретном случае из зависимости между безразмерными критериями, описывающими теплоотдачу,  $T_r$  — температура горячих газов (в дальнейшем будем считать ее постоянной),  $T_s$  — температура поверхности пороха, ее величина с прогревом пороха изменяется.

В теории горения порохов и взрывчатых веществ Я. Б. Зельдовича [1] принимается, что скорость горения пороха в общем случае (стационарного и нестационарного горения) определяется градиентом температуры в порохе вблизи его поверхности и кинетикой химической реакции в пламени над порохом. Пламя над поверхностью пороха может существовать не при любых градиентах температуры; существует определенный максимальный критический градиент, при котором еще возможно горение. Величина этого градиента

$$\left| \left( \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right)_* \right| = \frac{2}{e} \rho' c_p'' \frac{RT_b^2}{E} u(T_*) \quad (1.2)$$

Здесь  $T_b$  — температура горения пороха в стационарном режиме горения,  $E$  — энергия активации,  $u(T_*)$  — скорость горения полностью прогретого пороха (до температуры поверхности горящего пороха  $T_*$ , в теории она предполагается постоянной),  $\lambda$  — теплопроводность,  $c_p$  — теплоемкость,  $\rho$  — плотность, индексы ' и '' относятся соответственно к пороху и газу.

Чтобы воспламенить порох, нужно, во-первых, прогреть его настолько, чтобы температура поверхности достигла температуры  $T_*$ , при которой начинается интенсивная газификация пороха; во-вторых, создать в порохе достаточно глубокий прогретый слой, глубина слоя должна быть такой, чтобы градиент температуры у поверхности обеспечивал бы возможность существования пламени; в-третьих, воспламенить продукты газификации над поверхностью пороха. В работе Я. Б. Зельдовича [1] показано, что потребное для воспламенения газов количество тепла мало по сравнению с теплом, идущим на прогрев пороха; также мало их время воспламенения по сравнению со временем прогрева. Будем ими пренебрегать и считать, что порох воспламеняется в тот самый момент, как только закончилось прогревание пороха (температура горячих газов считается достаточно высокой, чтобы обеспечивать воспламенение газов над поверхностью пороха).

Выполнение условия воспламенения пороха не означает, что после воспламенения порох выйдет на стационарный режим горения. Как известно из теории Я. Б. Зельдовича, порох, охлажденные до низкой температуры, гореть стационарно не могут. Однако такие порох можно воспламенить. При воспламенении они будут давать кратковременные вспышки, длящиеся в течение времени выгорания прогретого воспламенителем слоя пороха. Для возникновения стационарного горения требуется выполнение условия [1]

$$\frac{E}{2RT_0^2}(T_* - T_0) \frac{c_p'}{c_p''} \leq 1 \quad (1.3)$$

где  $T_0$  — начальная температура пороха.

Разграничим два режима поджигания пороха:

а) Слабый подвод тепла к пороху

$$\alpha(T_r - T_*) < \left| \left( \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right)_* \right| \quad (1.4)$$

Это условие означает, что градиент температуры на поверхности пороха, вырабатывающийся во время прогрева, всегда меньше критического. В таком случае, очевидно, порох воспламенится сразу же, как только температура его поверхности достигнет температуры  $T_*$ .

б) Сильный подвод тепла к пороху

$$\alpha(T_r - T_*) > \left| \left( \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right)_* \right| \quad (1.5)$$

В этом случае уже недостаточно только нагреть поверхность пороха до температуры  $T_*$ ; градиент температуры при этом оказывается больше критического и существование пламени невозможно. Можно, однако, надеяться, что продолжая подводить тепло, изменим градиент температуры у его поверхности. Возникнет вынужденная, под воздействием внешнего теплового потока, газификация. Оттекающие от поверхности газы будут препятствовать подводу тепла. Кроме того, тепло в большей своей части пойдет на газификацию вещества. Эти два фактора приведут к тому, что градиент температуры будет уменьшаться. Когда его величина станет равной критической, произойдет воспламенение.

§ 2. Воспламенение пороха при слабом теплоподводе. Прогрев пороха при слабом его подогреве легко рассчитать, решив задачу о нестационарном распространении тепла в полубесконечном теле ( $x > 0$ ) при заданном потоке тепла на его границе ( $x = 0$ ) в виде (1.1). Задача эта легко решается методом операционного исчисления [3]. Для распределения температуры в порохе получается выражение

$$\Theta = \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{\tau}} \right) - e^{\zeta + \tau} \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau} \right) \quad (\zeta > 0, \quad \tau > 0) \quad (2.1)$$

$$\operatorname{erfc} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-y^2} dy$$

Здесь  $\Theta$  — безразмерная температура,  $\zeta$  — безразмерная координата,  $\tau$  — безразмерное время

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_r - T_0}, \quad \zeta = \frac{x\alpha}{\lambda'}, \quad \tau = \frac{\alpha^2 t}{\rho' c_p' \lambda'} \quad (2.2)$$

Время воспламенения  $\tau_*^{(1)}$  определяется как время достижения на поверхности температуры  $\Theta_*$

$$\Theta_* (\tau_*^{(1)}) = \frac{T_* - T_0}{T_r - T_0} = 1 - e^{\tau_*^{(1)}} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau_*^{(1)}} \quad (2.3)$$

Зависимость  $\tau_*^{(1)}$  от  $\Theta_*$  изображена на фиг. 1.

Количество тепла  $Q$ , необходимое для воспламенения

$$\frac{Q\alpha}{\rho'c_p\lambda'(T_r-T_0)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau_*^{(1)}} + e^{\tau_*^{(1)}} \operatorname{erfc} \sqrt{\tau_*^{(1)}} - 1 \quad (2.4)$$

Для предельного случая  $\sqrt{\tau_*^{(1)}} \ll 1$  можно пользоваться асимптотическими формулами

$$\tau_*^{(1)} = \frac{\pi}{4} \Theta_*^2, \quad \frac{Q\alpha}{\rho'c_p\lambda'(T_r-T_0)} = \tau_*^{(1)} \quad (2.5)$$

**§ 3. Воспламенение пороха при сильном теплоподводе.** Для того чтобы найти время воспламенения и количество необходимого для воспламенения тепла в случае сильного теплоподвода, нужно решить задачу о вынужденной газификации пороха. Эта задача сводится к решению уравнения теплопроводности

$$\rho'c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (x > l(t), t > 0) \quad (3.1)$$

с подвижной границей. На подвижной границе, поверхности пороха, задаются условия

$$T = T_*, \quad \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T_r - T_*) + \beta \frac{dl}{dt} + \rho'r \frac{dl}{dt} \quad \text{при } x = l(t) \quad (3.2)$$

Здесь  $l(t)$  — координата поверхности пороха,  $l(0) = 0$ .

Во втором условии (3.2) второй член правой части представляет собой уменьшение теплоподвода оттекающими от поверхности газами, коэффициент  $\beta$  определяется в каждом конкретном случае из эксперимента, приближенно можно считать  $\beta = \rho'c_p T_*$ , а третий член выражает затрату тепла на газификацию ( $r$  — теплота газификации).

Начальным условием (время отсчитывается от начала газификации пороха) будет

$$T(x, 0) = g(x, \tau_*^{(1)}) \quad (3.3)$$

где  $g(x, \tau_*^{(1)})$  — распределение температуры (2.4).

Решение уравнения (3.1) с условиями (3.2) и (3.3) получим приближенным методом интегральных соотношений [4-6]. Интегрируем (3.1) по координате  $x$  от поверхности пороха до  $+\infty$  и, используя условие  $\partial\Theta/\partial\xi = 0$  при  $\xi = +\infty$ , имеем

$$\frac{d}{d\tau} \int_{s(\tau)}^{\infty} \Theta d\xi + \Theta_* \frac{ds}{d\tau} = - \frac{\partial\Theta}{\partial\xi} \Big|_{\xi=s(\tau)} \quad (3.4)$$

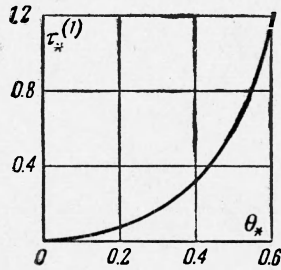
Здесь  $s(\tau)$  — поверхность пороха в переменных (2.2).

Решение интегрального соотношения (3.4) ищем в виде

$$\Theta = \Theta_* e^{-(\xi-s)/\xi} \quad (3.5)$$

где  $\xi(\tau)$  — параметр, подлежащий определению. В начальный момент времени ( $\xi(0) = \xi_0$ ) его выберем так, чтобы получить лучшую аппроксимацию профиля температуры (3.3). Для этого потребуем, чтобы производные температуры при  $\xi = s(0)$ , подсчитанные по (3.3) и (3.5), совпадали; найдем

$$\xi_0 = \vartheta_* \Theta_*, \quad \vartheta_* = \frac{1}{1 - \Theta_*} \quad (3.6)$$



Фиг. 1

Подставляя (3.5) в соотношение (3.4), получаем

$$\frac{d\xi}{d\tau} + \frac{ds}{d\tau} = \frac{1}{\xi} \quad (3.7)$$

Вторым уравнением, связывающим  $s$ ,  $\xi$ ,  $\tau$ , будет второе граничное условие на поверхности пороха (3.2), которое в безразмерных переменных записывается

$$\frac{ds}{d\tau} = \frac{1}{\gamma} \left( 1 - \Theta_* - \frac{\Theta_*}{\xi} \right), \quad \gamma \equiv \frac{\rho' r + \beta}{\rho' c_p' (T_r - T_0)} \quad (3.8)$$

Решение уравнений (3.7) и (3.8) с условиями  $\tau = 0$ ,  $\xi = \xi_0$ ,  $s = 0$  имеет вид

$$e^{-s} = \left[ \frac{(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \xi}{(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \xi_0} \right]^{\gamma \vartheta_*} e^{\xi - \xi_0} \quad (3.9)$$

$$e^{-\tau(1-\Theta_*)/\gamma} = \left[ \frac{(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \xi}{(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \xi_0} \right]^{(\gamma + \Theta_*) \vartheta_*} e^{\xi - \xi_0} \quad (3.10)$$

На фиг. 2 в координатах  $y = \tau(1 - \Theta_*) / \gamma$  и  $\xi$  изображены интегральные кривые (3.10) для различных значений  $\gamma$ . Они выходят из точки  $\xi_0 = \Theta_* \vartheta_*$  и имеют асимптоты  $\xi_\infty = (\gamma + \Theta_*) \vartheta_*$ . Как легко убедиться непосредственной подстановкой в уравнения (3.7) и (3.8), точки  $\xi_\infty$  соответствуют стационарному режиму газификации пороха под воздействием внешнего теплового потока. Скорость газификации в стационарном режиме равна

$$\frac{ds}{d\tau} = \frac{1 - \Theta_*}{\gamma + \Theta_*} \quad (3.11)$$

Интегральные кривые (3.9) имеют вид, аналогичный кривым (3.10).

Пользуясь фиг. 2, легко определить время газификации  $\tau^{(2)*}$ , необходимое для того, чтобы порох воспламенился. Для этого следует отметить на кривой фиг. 2, соответствующей заданным  $\vartheta_*$  и  $\gamma$ , точку  $\xi_* = \Theta_* / \Phi_*$ , для которой профиль температуры имеет критический градиент

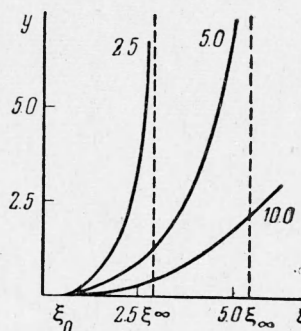
$$\Phi_* = \frac{1}{\alpha (T_r - T_0)} \left| \left( \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right)_* \right|$$

Рассматриваемый случай воспламенения пороха с предварительной его газификацией ( $\Phi_* < 1 - \Theta_*$ ), как легко видеть из полученного решения, можно подразделить на два варианта:

1) Пусть  $\Phi_* > (1 - \Theta_*) \Theta_* / (\gamma + \Theta_*)$ . В этом случае, соответствующем не очень сильному подводу тепла, воспламенение возможно. Полное время воспламенения складывается из времени нагрева поверхности пороха до температуры  $\Theta_* - \tau_*^{(1)}$ , рассчитываемого по фиг. 1, и времени, потраченного на газификацию пороха —  $\tau_*^{(2)}$ , определяемого по формуле (3.10) и фиг. 2. Количество тепла, потраченного на воспламенение  $Q$ , находится как сумма затраты тепла на газификацию пороха

$$Q_*^{(1)} = \frac{\rho' \lambda' r}{\alpha} s_* \quad (3.12)$$

(толщина газифицированного слоя  $s_*$  рассчитывается по формуле (3.9)) и количества тепла, содержащегося в прогретом слое пороха в момент

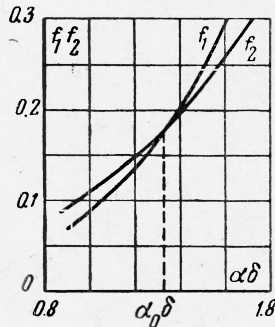


Фиг. 2

его воспламенения

$$Q_*^{(2)} = \frac{\rho' c_p' \lambda'}{\alpha} (T_r - T_0) \frac{\Theta_*^2}{\varphi_*} \quad (3.13)$$

2) Пусть  $\varphi_* < (1 - \Theta_*) \Theta_* / (\gamma + \Theta_*)$ . Очень интенсивный подход тепла. В этом случае воспламенение пороха вообще невозможно, так как при газификации пороха в конце концов устанавливается стационарный режим с градиентом температуры, при котором пламя над поверхностью пороха существовать не может. Поток тепла от воспламенителя превышает тот поток, который может дать пламя; как только работа воспламенителя прекращается, горение обрывается.



Фиг. 3

Отметим важную особенность воспламенения пороха: нельзя, интенсифицируя подвод тепла, бесконечно уменьшать время воспламенения. Действительно, при слабом подогреве (случай, рассмотренный в § 2) время воспламенения уменьшается с ростом  $\alpha$  как  $\alpha^{-2}$ , но при дальнейшем увеличении теплоподвода, при приближении потока тепла к предельному, при котором возникает стационарный режим газификации, время воспламенения растет до бесконечности. Поэтому существует оптимальный режим теплоподвода с минимальным временем воспламенения. Значение  $\alpha$  в этом режиме легко определить, исследуя на экстремум зависимость  $\tau_*^{(1)} + \tau_*^{(2)}$  от  $\alpha$ . Получается следующее выражение для определения оптимального значения  $\alpha_0$ :

$$\frac{\alpha_0 \delta}{2[(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \alpha_0 \delta]} - \frac{1 - \Theta_*}{\gamma} \tau_*^{(1)} = \Theta_* \vartheta_* - \alpha_0 \delta + (\gamma + \Theta_*) \vartheta_* \ln \gamma \vartheta_* - (\gamma + \Theta_*) \vartheta_* \ln [(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \alpha_0 \delta] \quad (3.14)$$

в котором

$$\delta \equiv \Theta_* (T_r - T_0) \left| \left( \lambda' \frac{\partial T}{\partial x} \right)_* \right|^{-1}$$

а  $\tau_*^{(1)}$  и  $\vartheta_*$  определяются по формулам (2.3) и (3.6).

Минимальное время воспламенения равно

$$\tau_{\min} = \gamma (\alpha_0 \delta)^2 / (1 - \Theta_*) [(\gamma + \Theta_*) \vartheta_* - \alpha_0 \delta] \quad (3.15)$$

На фиг. 3 изображено графическое решение уравнения (3.14). По оси ординат отложены левая ( $f_1$ ) и правая ( $f_2$ ) части (3.14) в зависимости от  $\alpha \delta$ . Точка пересечения кривых определяет  $\alpha_0 \delta$ .

§ 4. О переходе от воспламенения к режиму стационарного горения. Рассмотрим, как разные режимы воспламенения пороха влияют на характер его горения после воспламенения.

Когда возможно стационарное горение пороха (выполнено условие (1.3)), неустановившаяся скорость горения пороха после его воспламенения может быть больше или меньше стационарной скорости при тех же внешних условиях в зависимости от режима воспламенения. Если осуществляется слабый подвод тепла к пороку и выполняется условие

$$\alpha (T_r - T_*) < \rho' c_p' u_0 (T_* - T_0) \quad (4.1)$$

где  $u_0$  — стационарная скорость горения, то неустановившаяся скорость будет превышать стационарную. Условие (4.1) означает, что градиент температуры на поверхности пороха при воспламенении меньше, чем при стационарном горении. По выгорании пороха он будет увеличиваться и стремиться к стационарному. Если имеет место обратное неравенство — такой случай всегда получается при воспламенении с газификацией

