

**ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
И ПРОЗРАЧНОСТИ НИТРОГЛИЦЕРИНОВОГО ПОРОХА
НА ЗАЖИГАНИЕ ЕГО СВЕТОМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

С. С. Хлевной, В. Ф. Михеев
(Новосибирск)

Настоящая работа является продолжением исследований по зажиганию нитроглицеринового пороха световым излучением [1, 2]; этими исследованиями была подтверждена тепловая модель [3], исходящая из того, что зажигание пороха определяется химическими реакциями в к-фазе. Модель позволяет предсказать, что в условиях нагрева пороха световым излучением прозрачность пороха уменьшает температуру зажигания T_n и увеличивает поджигающий импульс, причем с увеличением плотности светового потока и прозрачности пороха этот эффект проявляется сильнее. С другой стороны, увеличение начальной температуры T_0 пороха должно приводить к незначительному уменьшению температуры зажигания и уменьшать поджигающий импульс пропорционально разности ($T_n - T_0$).

Цель настоящей работы — экспериментальная проверка справедливости этих закономерностей.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЗАЖИГАНИЮ ПОРОХА СВЕТОМ

Опыты по выяснению влияния прозрачности пороха на его зажигание проводились с нитроглицериновым порохом Н и Н+сажа на световой установке, описанной в [1], на воздухе и в азоте в условиях свободной конвекции при давлении 1 атм ($H = \frac{a}{\lambda} = 0,8 \text{ см}^{-1}$) и комнатной температуре.

Измерение температуры зажигания осуществлялось термопарными датчиками манганин — константан и медь — константан $\varnothing 30 \div 40 \text{ мк}$, прокатанными до толщины 5 мк и вклеенными ацетоном в поверхность порохового образца. Регистрация термо-э.д.с. осуществлялась электронным потенциометром ЭПП-09М или шлейфовым осциллографом Н-700. Методика эксперимента подробно описана в [1].

Экспериментальные точки для поджигающего импульса u_n и температуры зажигания T_n , относящиеся к пороку Н, в зависимости от времени зажигания τ_0 приведены на рис. 1.

Там же для сравнения приведены экспериментальные точки и расчетная кривая для поджигающего импульса u_n , а также теоретическая кривая для температуры T_n , относящиеся к пороку Н+сажа (по данным работы [1]).

Легко видеть, что для зажигания более прозрачного пороха Н необходим больший поджигающий импульс, а температура зажигания ниже, чем для пороха Н+сажа. При зажигании пороха Н не обнаружено критического времени $\tau_{к1}$, ниже которого зажженный порох гаснет после снятия излучения.

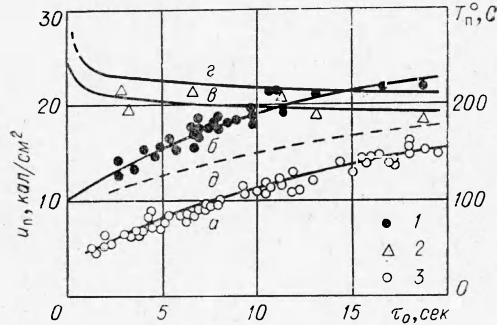


Рис. 1. Зависимость T_p , u_p и u_0 от времени зажигания τ_0 при атмосферном давлении и $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

a — u_p для пороха Н+сажа (3); b — u_p для пороха Н (1); v — T_p для пороха Н (2); z — T_p для пороха Н+сажа (экспериментальные точки не приведены); d — u_0 для пороха Н к моменту зажигания.

нагрев и охлаждение образцов осуществлялись с помощью специального держателя, установленного в бомбе и нагреваемого миниатюрной трубчатой электропечью или охлаждаемого испаряющимся жидким азотом, проходящим через рубашку охлаждения в держателе. Начальная температура контролировалась одной из трех термопар манганин — константан толщиной 5 мк, вклеенных в поверхность образца. Эти же термопары использовались для записи разогрева поверхности образца за время облучения. В первых опытах для дополнительного контроля T_0 использовались термопары, вклеенные внутрь образца.

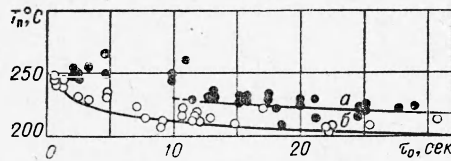
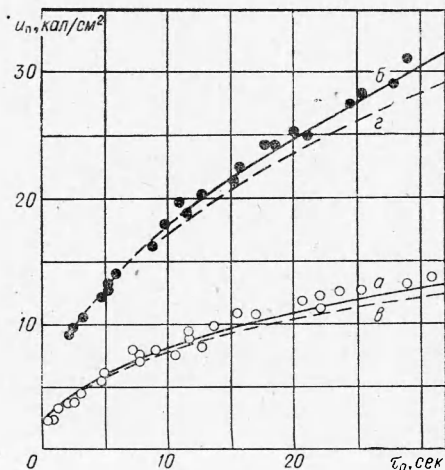


Рис. 2. Зависимость T_p от τ_0 при $p = 1 \text{ атм}$ (азот). T , °C; a — $+75$; b — -75 .

Рис. 3. Зависимость импульса зажигания от τ_0 при $p = 1 \text{ атм}$ (азот); u_p при T_0 , равной 75°C (а) и -75°C (б); u_0 при T_0 , равной 75°C (в) и -75°C (г).



Результаты измерений температуры и импульса зажигания в зависимости от времени зажигания представлены на рис. 2 и 3. Из них следует, что с понижением начальной температуры от $+75^\circ \text{C}$ до -75°C температура зажигания T_p незначительно увеличивается (приблизительно на $15 \div 20^\circ \text{C}$), а импульс зажигания растет пропорционально $T_p - T_0$ (в данном случае возрастает примерно в 2,5 раза).

При $T_0 = +75^\circ \text{C}$ образцы пороха сгорают до конца во всем исследу-

В опытах по изучению влияния начальной температуры на зажигание пороха объектом исследования был порох Н+сажа. Окружающая среда — азот при атмосферном давлении ($H = 0,8 \text{ см}^{-1}$). Начальные температуры образцов пороха $T_0 = +75^\circ \text{C}$ и $T_0 = -75^\circ \text{C}$. В проведении опытов принимал участие Э. Г. Гассольд.

Нагрев и охлаждение образцов осуществлялись с помощью специального держателя, установленного в бомбе и нагреваемого миниатюрной трубчатой электропечью или охлаждаемого испаряющимся жидким азотом, проходящим через рубашку охлаждения

дованном диапазоне времени зажигания ($0,5 < \tau_0 < 30$ сек), в то время как при $T_0 = -75^\circ\text{C}$ зажженные образцы мгновенно гаснут при удалении источника зажигания вслед за появлением вспышки, когда время зажигания $\tau_0 \lesssim 12$ сек (при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ зажигание этого пороха светом было неустойчиво при $\tau_0 < 1,3$ сек [1]). Таким образом, с понижением начальной температуры область устойчивого зажигания пороха, не сопровождаемого предварительной эрозией поверхности, смещается в сторону больших времен. Все экспериментальные точки для $T_0 = -75^\circ\text{C}$ и $\tau_0 < 12$ сек получены по появлению пламени над поверхностью пороха.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Когда порох обладает некоторой прозрачностью, лучистая энергия поглощается не на поверхности, а в массе вещества; чем выше прозрачность пороха, тем больше эффективная толщина проникновения лучистой энергии. Влияние прозрачности становится особенно существенным при большой скорости нагрева вещества, которой соответствуют сравнительно небольшие времена зажигания, и приводит к тому, что распределение температуры в порохе оказывается более пологим, а зона химической реакции шире, чем при поверхностном нагреве, и тем шире, чем больше прозрачность пороха. По этой причине зажигание более прозрачного пороха должно осуществляться при более низких температурах T_n .

С другой стороны, снижение начальной температуры требует дополнительных затрат тепла на нагрев пороха до T_n . Температура зажигания при этом должна возрасти (правда, незначительно), так как увеличение расхода тепла требует более высокой плотности светового потока; последняя, в свою очередь, вызывает увеличение скорости теплоотвода из зоны химической реакции в глубь пороха, которую в момент зажигания можно скомпенсировать только большей скоростью экзотермической реакции в химической зоне (т. е. достижением более высокой T_n).

Все эти соображения отражены в условии зажигания, сформулированном в [3], которое здесь перепишем в виде:

$$\frac{Q_1 \cdot k_0 \cdot \tau_0}{c(T_n - T_0)} \exp\left(-\frac{E}{RT_n}\right) \geq \frac{1 + \chi\psi}{1 + \alpha\varphi} \cdot \alpha \cdot \varphi \cdot F_0, \quad (1)$$

где $\varphi = \sigma \sqrt{a\tau_0}$; $\psi = H \sqrt{a\tau_0}$; $\chi = \chi(\gamma)$; $\alpha = \alpha(\gamma)$; $F_0 = F_0(\gamma)$; $\gamma = f(E, T_0)$; Q_1 — тепловой эффект реакции; k_0 — предэкспонент; c — удельная теплоемкость пороха; a — температуропроводность пороха.

Из соотношения (1) следует, что при исчезающе малой теплоотдаче в окружающую среду ($\psi \rightarrow 0$) и для почти непрозрачного пороха ($\varphi \rightarrow \infty$) (причем при конечной прозрачности влияние ее ослабляется с увеличением времени зажигания) правая часть (1) стремится к $F_0(\gamma)$, постоянной для пороха определенного состава, имеющего заданную начальную температуру T_0 .

Кривые, приведенные на рис. 4, иллюстрируют зависимость параметров F_0 , χ и α от отношения

$$\gamma = \frac{T_1 - T_0}{T_n - T_0}. \quad (2)$$

Величина γ , как было показано в [3], зависит только от энергии

активации E и начальной температуры T_0 и может быть вычислена с привлечением формулы

$$\frac{E}{RT_n} + 1 = \frac{E}{RT_1}. \quad (3)$$

Кривые рис. 4 предлагаются для применения в расчетах параметров зажигания пороха. Пределы изменения γ (от 0,84 до 0,97) охватывают возможные случаи изменения T_0 и химических констант пороха.

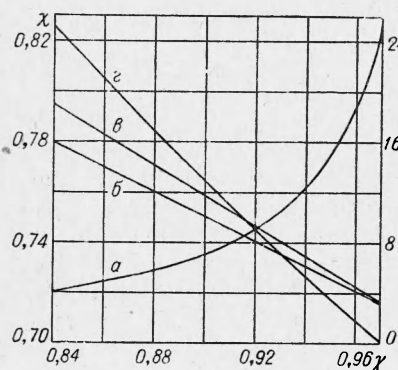


Рис. 4. Зависимость параметров F_0 (а), χ (б), y_0 (в) и χ (з) от γ .

На этом же рисунке для справки приводится величина $y_0 = \frac{x_1}{2\sqrt{a\tau_0}}$, ко-

торая служит для оценки ширины зоны химической реакции x_1 , при нагреве непрозрачного пороха, когда теплоотдача в окружающую среду пренебрежимо мала.

Полный световой поджигающий импульс u_n вычисляется из выражения

$$u_n = \frac{\alpha \cdot \tau_0 (T_n - T_0)}{B} \left\{ 1 - \frac{\nu}{\nu - 1} \times \left[\exp \psi^2 \operatorname{erfc} \psi - \frac{1}{\nu} \exp \varphi^2 \cdot \operatorname{erfc} \varphi \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

где B_1 — коэффициент поглощения света порохом; α — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; $\nu = \frac{\sigma}{H} = \frac{\varphi}{\psi}$.

«Полезный» поджигающий импульс u_0 (количество тепла, поглощенное порохом к моменту зажигания) вычисляется по формуле

$$u_0 = B_1 u_n - \int_0^{\tau_0} \alpha \cdot t(0, \tau) \cdot d\tau = \frac{\nu}{\nu - 1} \cdot B_1 u_n \left\{ \frac{1}{\psi^2} \left[\frac{2\psi}{\sqrt{\pi}} - (1 - \exp \psi^2 \cdot \operatorname{erfc} \psi) \right] - \frac{1}{\nu \varphi^2} \left[\frac{2\varphi}{\sqrt{\pi}} - (1 - \exp \varphi^2 \cdot \operatorname{erfc} \varphi) \right] \right\}. \quad (5)$$

Изложенный выше экспериментальный материал был сопоставлен с теорией. Для этого при вычислении параметров зажигания, как и ранее в работах [1—3], принималось, что нитроглицериновый порох имеет следующие свойства: $c=0,35$ кал/г · град, $a=10^{-3}$ см²/сек, $\rho=1,6$ г/см³, $E=33\,000$ кал/моль, $k_0=4 \cdot 10^{13}$ сек⁻¹, $Q_1=300$ кал/г.

Зажигание пороха во всех опытах осуществлялось в условиях свободной конвекции; оцененный экспериментально коэффициент теплоотдачи $\alpha=4,5 \cdot 10^{-4}$ кал/см² · град · сек ($H=0,8$ см⁻¹).

Поглощение света в порохе, различное для порохов Н и Н+сажа и оказывающее разное влияние на их зажигание (см. рис. 1), оценивалось из измерений температуры поверхности этих порохов, нагреваемых световым потоком заданной плотности. Применительно к излагаемому в статье вопросу оказалось приемлемым допустить, что убывание поглощаемого потока по толщине пороха происходит по экспоненциальному закону Бугера $q(x) = B_1 q_0 e^{-\sigma x}$, где q_0 — плотность падающего на поверхность пороха светового потока, B_1 — коэффициент поглощения пороха, σ — эффективный показатель прозрачности. При таком

допущении показатель прозрачности σ для пороха Н оказался равным 15 см^{-1} , для пороха Н+сажа — 115 см^{-1} . Коэффициенты поглощения этих порохов равнялись соответственно 0,86 и 0,97 (эта оценка хорошо согласуется с данными работы [4]).

В расчетах принималась во внимание зависимость параметров γ , χ , κ и F_0 от начальной температуры T_0 . Эти параметры вычислялись по формулам (2) и (3) с использованием рис. 4 и сведены в таблицу.

Температура зажигания $T_{\text{п}}$ и поджигающие импульсы $u_{\text{п}}$ и u_0 вычислялись по формулам (1), (4) и (5).

Обращаясь к рисункам 1—3, где нанесены теоретические кривые для $T_{\text{п}}$ и $u_{\text{п}}$ (сплошные линии), можно видеть, что соответствие их экспериментальным точкам хорошее. Пунктирные линии даны для «полезного» импульса зажигания.

Таким образом, эксперименты по влиянию прозрачности нитроглицеринового пороха и начальной температуры на его зажигание лучистой энергией, дополняющие экспериментальный материал, опубликованный ранее [1—2], подтверждают закономерности зажигания, вытекающие из тепловой модели зажигания в ж-фазе пороха [3].

Авторы благодарят А. А. Ковальского за внимание к работе и В. Ф. Жданова, В. П. Дьячкова и Т. Ф. Воеводченко за помощь в проведении опытов.

Поступила в редакцию
15/V 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Михеев, А. А. Ковальский, С. С. Хлевной. ФГВ, 1968, 4, 1.
2. С. С. Хлевной, А. П. Калмыкова. ФГВ, 1968, 4, 1.
3. А. А. Ковальский, С. С. Хлевной, В. Ф. Михеев. ФГВ, 1967, 3, 4.
4. Э. В. Конев. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 2.