

поверхности алюминия, причем полиоргановые пленки могут реагировать не только с алюминием, но и с его окисью, что приводит к снижению скорости горения состава.

Поступила в редакцию  
10/VII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Глазкова. ФГВ, 1966, 2, 59.
2. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука».
3. R. Friedman, R. G. Nugent a.o. VI Symposium on Combustion N. Y., 1957, 619.
4. Л. Д. Ромоданова, П. Ф. Похил. ФГВ, 1969, 5, 2.
5. К. А. Андрианов, Теплостойкие кремнийорганические диэлектрики. М.—Л., «Энергия», 1964.

УДК 536.468+662.311.1

### СКОРОСТЬ ПРОНИКНОВЕНИЯ ГОРЕНИЯ В ПОРЫ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

*Ю. К. Краснов, В. М. Маргулис,  
А. Д. Марголин, П. Ф. Похил  
(Москва)*

Известно, что пористые пороха и ВВ при некоторых условиях горят с очень большой скоростью [1—7]. Это происходит потому, что горячие продукты сгорания, опережая фронт нормального горения, проникают в поры заряда и поджигают их. Критические условия проникновения горения в поры изучались в работах [8—10]. Целью данной работы было изучение вопроса о скорости проникновения горения в поры заряда ВВ.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения проникновения пламени в поры удобно пользоваться моделью единичной поры, которой, например, может быть щель между порохowymi пластинами, канал в заряде и др. Цилиндрические образцы баллиститного пороха А длиной 40 мм, диаметром канала 1; 1,5; 2,5; 4 мм и толщиной стенки 0,5—1,5 мм устанавливались в бомбе постоянного давления (рис. 1). Нижний конец образца соединялся с атмосферой посредством тонкой металлической трубки, запирающейся электромагнитным клапаном. Канал образца и металлическая трубка заполнялись жидкостью (вода, спирт), которая под влиянием высокого давления в бомбе выдавливалась из канала порохового образца через клапан, причем скорость вытекания определялась давлением в бомбе и проходным сечением отверстия клапана. Регулируя площадь проходного отверстия клапана, можно задавать любую скорость вытекания жидкости вплоть до 1 м/сек. Уходящая жидкость служила поршнем; она увлекала

за собой горячие продукты сгорания пороха, которые поджигали изнутри пороховой канал. Задавая скорость течения жидкости, тем самым определяли скорость втекания продуктов горения в канал. При толщинах порядка миллиметра порох А достаточно прозрачен, поэтому при помощи киноаппарата «Конвас» производилась регистрация движения границы жидкости и фронта воспламенения стенки канала. С помощью данной методики можно было задавать скорость проникновения горячих продуктов сгорания в пороховой канал и найти количественную связь между скоростью проникновения горячих газов и скоростью передвижения фронта поджигания стенки канала.

В ряде опытов применялась видоизмененная методика без использования жидкости. Через канал образца пропускался азот из бомбы, причем скорость течения азота по каналу регулировалась при помощи клапана и измерялась по секундному расходу. После поджигания верхнего торца образца в канал пороха устремлялись горячие продукты сгорания с уже установленной скоростью переднего фронта (равной скорости вытекающего азота), поджигая стенки порохового канала.

Опыты, проведенные на одинаковых образцах с помощью этих двух методик, дали одинаковые результаты.

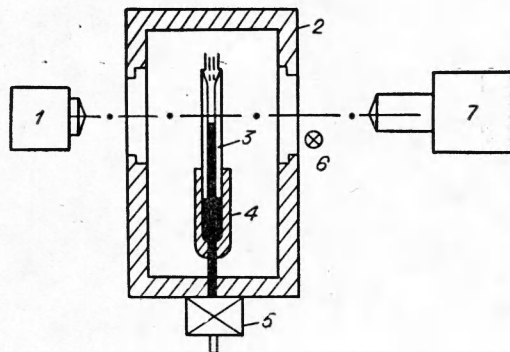


Рис. 1. Схема установки.

1 — осветитель; 2 — бомба постоянного давления; 3 — образец пороха; 4 — держатель образца; 5 — электромагнитный клапан; 6 — отметчик времени; 7 — кинокамера.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Опытным путем было обнаружено, что скорость поджигания стенки порохового канала не равна скорости проникновения в канал продуктов сгорания. На рис. 2 показано отставание фронта поджигания стенки канала от поверхности вытекающей жидкости.

Процесс поджигания порохового канала можно представить следующим образом (рис. 3). Жидкость, играющая роль поршня, увлекает за собой горячий газ, который, отдавая свое тепло стенкам канала, остывает и накапливается около поршня. Скорость движения остывшего газа равняется скорости движения поршня. Скорость движения фронта воспламенения стенки порохового канала определяется достижением на поверхности стенки пороха условий воспламенения. На рис. 3 показаны траектории движения поршня, фронта воспламенения, частиц газа; отсюда можно найти соотношения между скоростями движения поршня  $v$  и фронта воспламенения  $w$

$$w = v / \left( 1 + \frac{\rho_{гх} \tau_0}{\rho_{гг} \tau_в} \right);$$

где  $\tau_0$  — время остывания горячих продуктов;  $\tau_в$  — время задержки воспламенения данного пороха;  $\rho_{гг}$  — плотность горячих продуктов;  $\rho_{гх}$  — плотность остывших продуктов сгорания.

На рис. 4 приведены графические зависимости отставания фронта воспламенения ( $v/w$ ) стенок канала пороха А при разных диаметрах

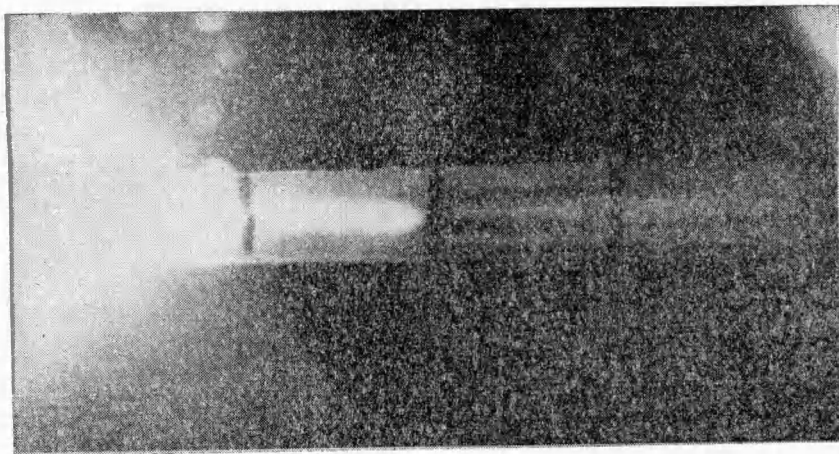


Рис. 2. Горящий образец пороха с вытекающей на канале жидкостью.

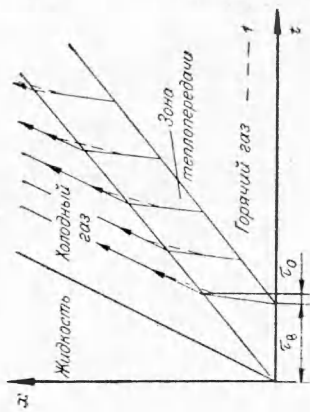


Рис. 3. Диаграммы движения жидкости и газа в канале образца пороха.  
1 — траектории движения остывающих частиц газа.

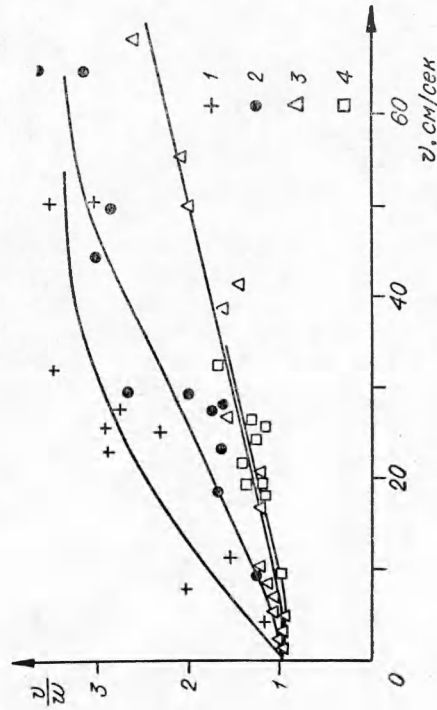
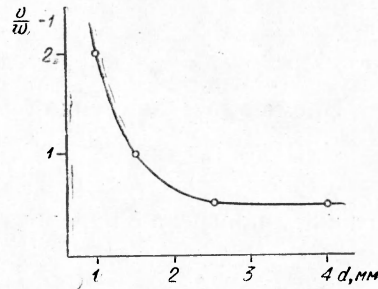


Рис. 4. Зависимость отставания фронта воспламенения стенок канала пороха А от скорости движения остывших продуктов сгорания.

Диаметр канала, мм: 1 — 1; 2 — 1,5; 3 — 2,5; 4 — 4.

канала от скорости движения остывшего газа ( $v$ ). На рис. 5 приведена зависимость отставания фронта воспламенения от диаметра канала при скорости движения остывшего газа  $v=30$  см/сек. При диаметре канала  $>2$  мм отношение скоростей движения остывшего газа и фронта воспламенения не зависит от диаметра канала.

Рис. 5. Зависимость отставания фронта воспламенения стенок канала пороха А от диаметра канала.



### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Скорость движения фронта воспламенения можно рассчитать исходя из рассмотрения упрощенной схемы этого явления (рис. 6). Пусть горячий газ с температурой ( $T_r$ ) входит в канал пороха диаметром  $d$  со скоростью  $v_{rg}$ . На участке прогрева  $L$  горячий газ остывает до температуры  $T_0$ , образуя прогретый слой в порохе  $\delta$ . В системе координат, где фронт пламени покоится, можно написать для потоков тепла в газе и твердой фазе равенство (1).

Для упрощения выкладок ширина прогретого слоя пороха считается постоянной на всем участке теплообмена. Такое же приближение использовалось в работе [8]. Более точные вычисления, которые будут опубликованы отдельно, приводят к результатам, близким к полученным в данной статье.

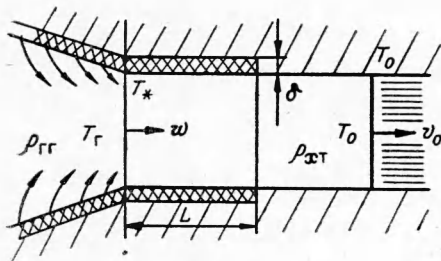


Рис. 6. Упрощенная схема для скорости передвижения фронта поджигания стенки порохового канала.

$$(v_0 - w) c_r \rho_{xg} (T_r - T_0) \frac{\pi d^2}{4} = w c_t \rho_t (T_* - T_0) \pi d \cdot \delta, \quad (1)$$

где  $v_0$  — скорость холодных газов;  $c_r, c_t$  — теплоемкости газа и пороха;  $\rho_t$  — плотность топлива;  $T_*$  — температура воспламенения пороха. Здесь было использовано условие непрерывности потока газа:

$$(v_{rg} - w) \rho_{rg} = (v_0 - w) \rho_{xg}$$

и условие  $\delta/d \ll 1$ , что подтверждается последующими расчетами. Отсюда находим

$$\delta = \frac{(v_0 - w) c_r \rho_{xg} (T_r - T_0) \cdot d}{4 w c_t \rho_t (T_* - T_0)}. \quad (2)$$

Уравнение теплообмена горячего газа со стенкой канала на участке  $L$  имеет вид

$$(v_0 - w) \rho_{xg} c_r \frac{\pi d^2}{4} = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{d} (T_r - T_*) \cdot L \cdot \pi d, \quad (3)$$

где  $\lambda_r$  — коэффициент теплопроводности газа;  $Nu$  — критерий Нуссельта (для трубы  $Nu=3,6$ ).

$$L = \frac{(v_0 - w) d^2 (T_r - T_0)}{4Nu \kappa_r (T_r - T_*)}, \quad (4)$$

где  $\kappa_r = \frac{\lambda_r}{c_r \rho_r}$  — коэффициент температуропроводности газа.

Время прогрева стенки будет равно

$$\tau = \frac{L}{w}, \quad (5)$$

а глубина прогрева  $\delta$  определяется соотношением

$$\delta^2 = \tau \kappa_r, \quad (6)$$

где  $\kappa_r$  — коэффициент температуропроводности пороха.

Подставляя в выражение (6) значения  $\delta$  и  $\tau$  и используя выражение (4), получим уравнение для скорости распространения фронта воспламенения по каналу

$$\frac{v_0}{w} = 1 + \frac{4\rho_r c_r \lambda_r (T_* - T_0)^2}{Nu \rho_r c_r \lambda_r (T_r - T_0) (T_r - T_*)}. \quad (7)$$

Равенство (7) описывает поджигание гладкой поверхности. В случае шероховатой поверхности воспламенение будет происходить на выступах толщиной порядка прогретого слоя (тонкие выступы не успевают поджечь порох, в толстых будет значительный теплоотвод в порах) и выражение для скорости воспламенения канала можно найти из условия (5), где  $\tau = \frac{\kappa_r}{u^2}$  — характерное время прогретого слоя пороха ( $u$  — нормальная скорость горения пороха):

$$\frac{v_0}{w} = 1 + \frac{4Nu \kappa_r \kappa_r}{u^2 d^2}. \quad (8)$$

Рассмотрение выражений (7) и (8) показывает, что соотношение скоростей газа и фронта поджигания не зависит от скорости проникновения продуктов сгорания в канал. В случае поджигания гладкой стенки скорость распространения фронта воспламенения вообще не зависит от диаметра канала.

При сопоставлении расчетных данных с экспериментальными (см. рис. 4, 5) видно, что в эксперименте независимость скорости поджигания от диаметра наблюдается при диаметрах, больших 2 мм, а отношение скоростей газа и воспламенения уменьшается с уменьшением скорости втекания продуктов сгорания в канал заряда.

Последнее явление можно объяснить следующим образом. Если взять образец пороха с каналом, закрытым с одного конца, то при определенном давлении и диаметре канала, начиная с некоторого диаметра, наблюдается самопроизвольное проникновение пламени в канал [7]. График рис. 7 построен на основе результатов опытов, полученных на образцах пороха А длиной 40 мм, диаметром каналов до 4 мм и при давлении  $p=40$  атм.

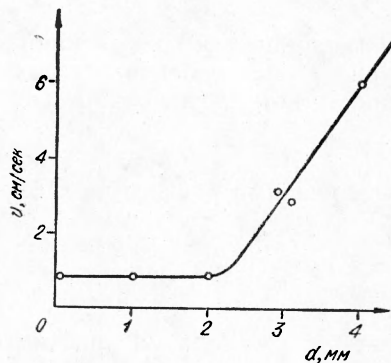


Рис. 7. Зависимость скорости проникновения пламени в глухой канал пороха А от диаметра канала.

