

## ЛИТЕРАТУРА

1. V. J. Hanby, D. J. Brown. J. of the Institute of Fuel. 1968, November.
2. В. С. Северянин. Теплоэнергетика, 1969, 1.
3. А. П. Бурдуков и др. Кинетика горения ископаемых топлив. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
4. А. Г. Попов. Теплоэнергетика, 1961, 3.
5. С. В. Бухман, Н. П. Крылова. Пульсационное горение. Матер. науч.-техн. конф. Челябинск, 1968.
6. Б. Д. Кацнельсон, В. С. Северянин, В. Я. Лысков. Пульсационное горение. Матер. науч.-техн. конф. Челябинск, 1968.
7. И. И. Палеев, Б. Д. Кацнельсон, А. А. Таракановский. Теплоэнергетика, 1963, 4.
8. Ю. А. Финаев. Вопросы нестационарного переноса тепла и массы. Минск, «Наука и техника», 1965.

УДК 662.313+536.46

## АВТОКОЛЕБАНИЯ И НИЗКОЧАСТОТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ПОРОХА

*В. М. Маргулис, А. Д. Марголин, М. И. Левичек,  
П. Ф. Похил, А. И. Ларин*

(Москва)

На основе представления о релаксирующем прогревом слое Я. Б. Зельдович [1] предложил теорию аномалии горения. Согласно теории, горение пороха в полузакнутом объеме становится неустойчивым, когда отношение времени истечения продуктов сгорания из камеры сгорания  $\tau_1 = \frac{V}{A \cdot S \cdot F}$  к времени релаксации прогреваемого слоя  $\tau_2 \sim \frac{\kappa}{u^2}$  становится меньше критической величины  $\theta_*$ , зависящей от свойств данного пороха и его начальной температуры (здесь  $V$  — величина свободного объема ракетной камеры;  $S$  — сечение сопла;  $u$  — скорость горения пороха;  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности;  $F$  — сила пороха;  $A$  — постоянная величина).

$$\theta = \frac{\tau_1}{\tau_2} > \theta_* \text{ —}$$

— условие устойчивости горения.

Такие выводы теории Я. Б. Зельдовича, как стабилизирующее действие свободного объема и давления, были установлены экспериментами О. И. Лейпунского и других исследователей [2]. Теория Я. Б. Зельдовича предсказывала низкочастотные колебания давления на пределе устойчивости. В работах [3—7] показано, что частота колебаний зависит от давления в камере.

Целью настоящей работы является дальнейшее изучение явления низкочастотной неустойчивости горения и выявление параметров, определяющих область низкочастотных автоколебаний, их частоту и амплитуду.

**Методика эксперимента.** Заряды нитроглицеринового пороха Н наружным диаметром 40, внутренним 8 или 16 и длиной 150 мм сжигались в полузакнутых объемах от 40 до 440 см<sup>3</sup>. Регистрация давления

в камере проводилась с помощью датчика ДД-10, усилителя ИД-2И и осциллографа Н-700. Кроме того, проводилось измерение электропроводности продуктов сгорания внутри объемов.

**Результаты опытов.** Образцы осциллограммы давления и электропроводности продуктов сгорания в полужамкнутом объеме приведены на рис. 1, а, б. На них видны низкочастотные автоколебания давления и электропроводности в широком интервале изменения основных параметров ( $p$ ,  $V$ ), причем амплитуда колебаний электропроводности на порядок величины превышает амплитуду пульсаций давления. На осциллограммах виден также сдвиг фаз между колебаниями давления и электропроводностью продуктов сгорания.

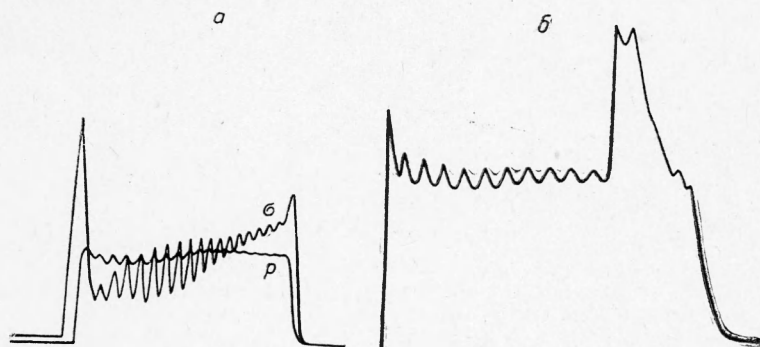


Рис. 1. Осциллограммы низкочастотных колебаний давления и электропроводности продуктов сгорания.

По результатам проведенных опытов был построен график зависимости частоты колебаний от давления при различных свободных объемах (рис. 2). Частота колебаний зависит от давления и практически не зависит от величины свободного объема. Кривая I построена на основании опытов с порохом Н при начальной температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ , кривая II — при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ .

В опытах низкочастотные автоколебания наблюдались в довольно широком диапазоне давлений (примерно от 60 до 150 ат), благодаря чему удается выявить количественные зависимости частоты от давления. Обработка графика рис. 2 дает эмпирические формулы типа  $f = ap^{1.5}$ . Если наиболее медленным процессом при горении является тепловая релаксация прогретого слоя пороха, то частота колебаний должна быть обратно пропорциональна этому характерному времени

$$f \sim \frac{u^2}{x} \sim \frac{p^{2\nu}}{x},$$

причем коэффициент пропорциональности зависит от температуры и сорта пороха. Для пороха Н, как известно,  $\nu = 0,65-0,75$ . Следовательно, эксперимент подтверждает эту формулу.

Особенно интересным является вопрос об амплитудной зависимости низкочастотной аномалии горения. В работе [4] описывается попытка найти зависимость амплитуды колебаний  $\Delta p$  от давления в ракетной камере  $p$ ; при этом, хотя и указывалось на влияние свободного объема, никаких количественных экспериментальных закономерностей или формул не приводилось. Согласно [4], была построена зависимость измеренной в настоящих опытах амплитуды автоколебаний  $\Delta p$  от  $p$  (рис. 3). Оказалось, что положение и наклон кривых весьма существенно зависят

от величины свободного объема камеры. Анализ уравнений нестационарного горения и сохранения массы газа в ракетной камере в предположении о нестационарности прогретого слоя пороха и квазистационарности остальных зон горения показывает, что амплитуда автоколебаний  $\Delta p/p$  зависит от безразмерного параметра  $\theta = \frac{\tau_1}{\tau_2}$  и параметров, опре-

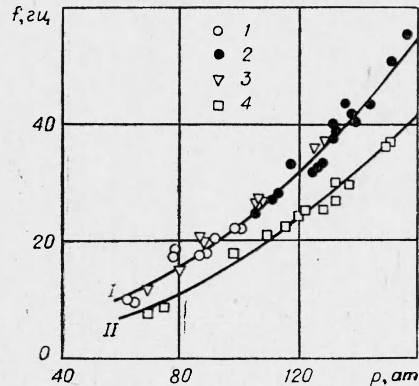


Рис. 2. Зависимость частоты низкочастотных автоколебаний от давления при разных свободных объемах.  
1 —  $V=40-240 \text{ см}^3$  и  $V=240-440 \text{ см}^3$ ; 2 —  $V=80-280 \text{ см}^3$ ; 3 —  $V=80-280 \text{ см}^3$ ; 4 —  $V=40-240 \text{ см}^3$ .

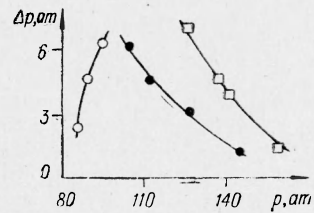


Рис. 3. Зависимость амплитуды низкочастотных автоколебаний от давления при различных свободных объемах.

деляющих механизм и закономерности горения пороха, согласно приведенным ниже уравнениям:

$$\frac{d\theta}{d\tau} \cdot \theta = u - P,$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \xi^2} - u \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi}.$$

Граничные условия:  $\vartheta=0$  при  $\xi=-\infty$ ,

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_{\xi=0} &= \vartheta \left( P, \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0}, \alpha_1, \alpha_2, \dots \right) \\ u &= u \left( P, \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0}, \alpha_1, \alpha_2, \dots \right) \end{aligned} \right\} \text{при } \xi=0.$$

Здесь  $P = \frac{p}{p_0}$  — давление;  $u = \frac{m}{m_0}$  — массовая скорость;  $\tau = \frac{t}{\tau_0}$  — время;  $\xi = \frac{x}{b_0}$  — координата;  $\vartheta = \frac{T - T_0}{T_p^0 - T_0}$  — температура;  $\tau_0 = \frac{x \cdot p^2}{m_0}$ ;

$l_0 = \frac{x \cdot p}{m_0}$ ;  $\tau_1 = \frac{v_{\mu}}{A \cdot S \cdot RT}$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  — константы пороха.

Общий вид решений этих уравнений:

$$u = u(\theta, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \tau); \quad \theta_{кр} = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots);$$

$$P = P(\theta, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \tau); \quad \omega = \frac{1}{\tau_0} F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \theta);$$

$$\vartheta = \vartheta(\theta, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \tau, \xi).$$

Видно, что скорость горения, температура пороха и давление в полузамкнутом объеме зависят от  $\theta$  и констант пороха. От параметра  $\theta$  зависит также и чистота колебаний. Чтобы выяснить, сильной или слабой является эта зависимость, необходимо решение приведенных выше уравнений. Проведенные опыты с нитроглицериновым порохом Н в диапазоне давлений 60—150 ат не обнаружили сколько-нибудь сильной зависимости частоты автоколебаний от  $\theta$ . В работе же [7] указывается на влияние свободного объема на частоту низкочастотных автоколебаний. В этой работе опыты проводились со смесевым порохом.

На рис. 4 приведен график зависимости относительной амплитуды колебаний  $\Delta p/p$  при различных объемах камеры и давления от безразмерного параметра  $\theta = \frac{\tau_1}{\tau_2}$ . Видно, что  $\Delta p/p$  зависит только от  $\theta$  и с ростом ее убывает.

По теории Я. Б. Зельдовича, устойчивость горения к малым возмущениям определяется параметром  $\theta$ . Когда  $\theta$  достигает критического значения  $\theta_*$ , горение становится неустойчивым.

Однако линейная теория не в состоянии определить реальный процесс, который наступает после развития неустойчивости, так как он может существенным образом определяться нелинейными явлениями. Проведенные опыты (см. рис. 4) показывают, что в общем случае при  $\theta < \theta_*$  вблизи  $\theta_*$  происходит низкочастотное автоколебательное горение. По мере дальнейшего уменьшения  $\theta$  относительно амплитуды автоколебаний  $\Delta p/p$  растет. Наконец, когда  $\theta$  становится достаточно малым ( $\theta < \theta_{**}$ ), амплитуда автоколебаний становится настолько большой, что при спаде давления порох потухает и наступает собственно «чихание».

Как известно [6], критерием потухания пороха является отношение времени релаксации прогретого слоя  $\tau_2$  к характерному времени изменения давления  $\tau_3$ :

$$B = B_{**},$$

где

$$B = \frac{\nu \tau_2}{\tau_3} = \frac{\nu}{u^2} \cdot \frac{\nu}{p} \cdot \frac{dp}{dt}; \quad \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \sim \frac{\Delta p}{p} \cdot \frac{1}{T}; \quad \frac{\Delta p}{p} = f(\theta)$$

— амплитуда автоколебаний;  $T \sim \frac{\nu}{u^2}$  — их период;  $B_{**}$  — критический параметр;  $\nu$  — показатель степенного закона горения пороха;  $p$  — давление в полузамкнутом объеме.

Отсюда

$$B = \frac{\nu \nu}{u^2} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \sim \frac{\nu \nu}{u^2} \cdot \frac{\Delta p}{p} \cdot \frac{1}{T} \sim \nu f(\theta).$$

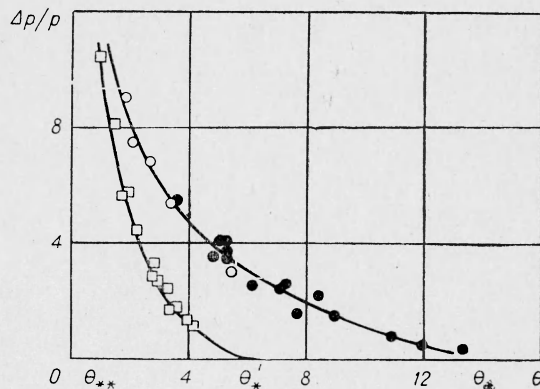


Рис. 4. Зависимость относительной величины низкочастотных колебаний давления в полузамкнутом объеме от безразмерного параметра (по горизонтали отложена величина, пропорциональная  $\frac{p^{2\nu} V}{S}$ ).

Следовательно, гашение происходит, когда величина  $B$  достигает критического значения

$$B = B_{**} = v_f(\theta_{**}),$$

т. е. условие самозатухания определяется тем же параметром  $\theta$ :

$$\theta < \theta_{**}.$$

Таким образом, можно различать три зоны аномального низкочастотного горения. Это хорошо видно на графике рис. 4. При  $\theta > \theta_*$  горение устойчиво по отношению к малым низкочастотным возмущениям, при  $\theta < \theta_*$  горение неустойчиво, причем при  $\theta_{**} < \theta < \theta_*$  происходит автоколебательное низкочастотное горение, а при  $\theta < \theta_{**}$  — самопроизвольное затухание заряда.

Следует отметить, что величина амплитуды  $\frac{\Delta p}{p}$  и критическое значение параметра  $\theta$  заметно зависят от вариаций состава пороха и его температуры. Верхняя кривая графика рис. 4 относится к пороху с начальной температурой  $20^\circ\text{C}$ , нижняя — к другому сорту пороха ( $-2^\circ\text{C}$ ). Этот же сорт пороха при температуре  $20^\circ\text{C}$  горел устойчиво при давлениях выше  $60 \text{ ат}$ . Очевидно, понижение температуры пороха приводит к увеличению  $\theta_*$ . Другие сорта пороха  $H$  при общем характере зависимости  $\frac{\Delta p}{p}$  от  $\theta$  имели свои критические значения  $\theta_*$  и  $\theta_{**}$ .

Поступила в редакцию  
18/III 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.
2. О. И. Лейпунский. Докт. дисс. М., 1945.
3. Б. В. Новожилов. ФГВ, 1967, 3, 1.
4. Янт, Эйнджелес. Ракетная техника и космонавтика, 1964, 7.
5. J. D. Haughton. Trans. Far. Soc., 1954, 50, 613.
6. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3.
7. М. Бекстенд, Н. Райн, А. Бир. Ракетная техника и космонавтика, 1966, 9.

УДК 662.313.2+536.46

### О ПОСЛЕДСТВИЯХ ПРОНИКАНИЯ ГОРЕНИЯ В ЕДИНИЧНУЮ ПОРУ

А. Ф. Беляев, М. К. Сукоян,  
А. И. Коротков, А. А. Сулимов  
(Москва)

Было показано [1, 2], что проникание горения в плоскую единичную пору (трещину) пороха или ВВ приводит в определенных условиях к возникновению в ней избыточного давления. Распирающее действие, которое оказывает избыточное давление на стенки трещины, в определенных условиях может приводить к развитию (увеличению глубины) трещины.