

Следовательно, гашение происходит, когда величина B достигает критического значения

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

т. е. условие самозатухания определяется тем же параметром θ :

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

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

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.

В работе излагаются результаты измерения и расчета величины избыточного давления, а также рассматривается вопрос об особенностях роста горящих трещин.

Величина избыточного давления в недеформируемой плоской поре

Измерение повышения давления проводилось по методике, подробно описанной в работах [1, 2]. Применялась манометрическая бомба с большим свободным объемом, снабженная двумя пьезоэлектрическими датчиками давления. Один из датчиков регистрировал давление $p_0(t)$ в объеме бомбы, другой — непосредственно $p_T(t)$ в трещине у донного закрытого конца. Плоская пора была образована двумя тонкими пластинами пороха и заключена в прочную оболочку, что практически исключало деформацию поры при горении. Геометрические размеры поры определялись глубиной L и шириной $2b$ (расстоянием между пластинами пороха). Поджигалась пора конвективным потоком горячего газа, образующегося при сгорании воспламенителя, который одновременно создавал начальное давление в бомбе. В этих условиях поджигание может происходить с высокой скоростью [1, 2], величина которой на несколько порядков превышает скорость послыоного горения, что приводит к возникновению избыточного давления в поре.

Избыточное давление $\Delta p = p_T - p_0$ достигает максимальной величины (Δp_{\max}) в момент полного охвата поверхностей поры горением и в дальнейшем уменьшается вследствие разгорания поры. Время существования избыточного давления в поре не превышает нескольких сотых долей секунды. Было проведено изучение зависимости максимального давления в поре от соотношения ее геометрических размеров — параметра L/b . Данные для одного из исследованных порохов представлены на рис. 1, 1. Полученные результаты автоматически учитывают влияние скорости воспламенения и, следовательно, физико-химических свойств пороха, а также влияние нестационарных эффектов горения пороха в поре. Экспериментальные данные в широком интервале изменения L/b удовлетворительно описываются аналитической зависимостью вида¹

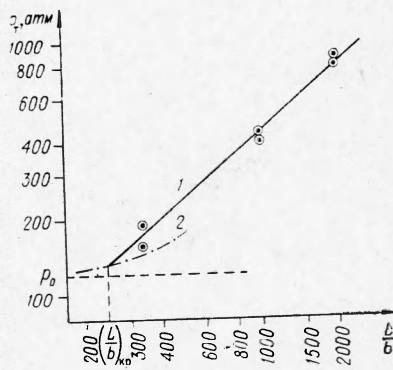


Рис. 1. Зависимость повышения давления в поре от параметра $\frac{L}{b}$.

$$\Delta p_{\max} = 1,1 p_0 \left[\frac{\frac{L}{b}}{\left(\frac{L}{b}\right)_{\text{кр}}} \right]^n - p_0, \quad (1)$$

где p_0 — давление в объеме бомбы; $\left(\frac{L}{b}\right)_{\text{кр}}$ — значение, при котором $\Delta p_{\max} = 0,1 p_0$; n — эмпирическая константа, величина которой близка к единице для пор глубиной несколько сантиметров.

¹ Формула (1) справедлива как при дозвуковом, так и звуковом (критическом) истечении продуктов сгорания.

Величину Δp_{\max} при значениях L/b , меньших $(L/b)_{\text{кр}}$, можно вычислить, пользуясь выражением (2), которое получено из уравнений сохранения массы и импульса для несжимаемой жидкости без учета трения о стенки:

$$\Delta p_{\max} = c \frac{u_0^2}{p_0} \left(\frac{L}{b} \right)^2, \quad (2)$$

где $c = \frac{\rho_n^2 RT}{\mu}$ (ρ_n — плотность пороха; μ , T — молекулярный вес и температура продуктов сгорания); u_0 — скорость нормального горения¹.

При небольших повышениях давления ($\Delta p_{\max} \ll p_0$) можно не учитывать зависимость скорости горения от давления и скорости газового потока в поре. Тогда скорость горения u_0 в выражении (2) зависит только от давления p_0 в объеме.

Подставляя в (2) типичные значения входящих в нее величин, получим

$$\left(\frac{L}{b} \right)_{\text{кр}} = \frac{20 p_0}{u_0}. \quad (3)$$

При $L/b > (L/b)_{\text{кр}}$ газодинамический расчет (см. рис. 1, 2) дает заниженные значения Δp_{\max} по сравнению с опытом.

РАСЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГОРЯЩЕЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОРЕ

Перейдем к случаю, когда пора окружена толстым слоем пороха и вследствие действия избыточного давления имеет возможность деформироваться.

В работе [4], посвященной рассмотрению механической устойчивости горящих трещин, в общем виде произведен точный учет упругой деформации трещины под действием внутреннего избыточного давления при малой величине последнего, $\Delta p_{\max} \ll p_0$. Для определения Δp_{\max} предложена система алгебраических уравнений:

$$\Delta p_{\max} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot q \cdot \frac{\rho_r^2 u_0^2 L^2}{p_0 b^2}; \quad (4)$$

$$b = b_0 + \delta; \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\Delta p_{\max} L}{E} (1 - \nu)^2, \quad (6)$$

где x — текущая координата (рис. 2); γ — показатель адиабаты газов сгорания; q , ρ_r — теплотворная способность и плотность пороха; $2b_0$ — ширина трещины до проникания в нее горения; 2δ — смещение берегов трещины под действием повышения давления; E , ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона пороха.

С использованием этих уравнений и условий устойчивости выражения (11), в работе [4] были определены значения Δp_{\max} в предельных устойчивых трещинах.

Вместе с тем, задача о нахождении зависимости величины повышения давления в деформируемой поре от ее начальных размеров L_0 , b_0

¹ Проверка формулы (2), при горении вкладного цилиндрического заряда в ракетном двигателе впервые проведена О. И. Лейпунским [3].

имеет и самостоятельное значение. В частности, экспериментальное изучение роста горящих трещин (см. ниже) потребовало знания величины Δp_{\max} в трещинах, глубина которых превышает предельную.

На основе предложенного в работе [4] подхода был проведен соответствующий расчет. Вместо выражения $\Delta p(L/b)$ вида (4) в расчет закладывалась экспериментальная зависимость (1), что позволило опре-

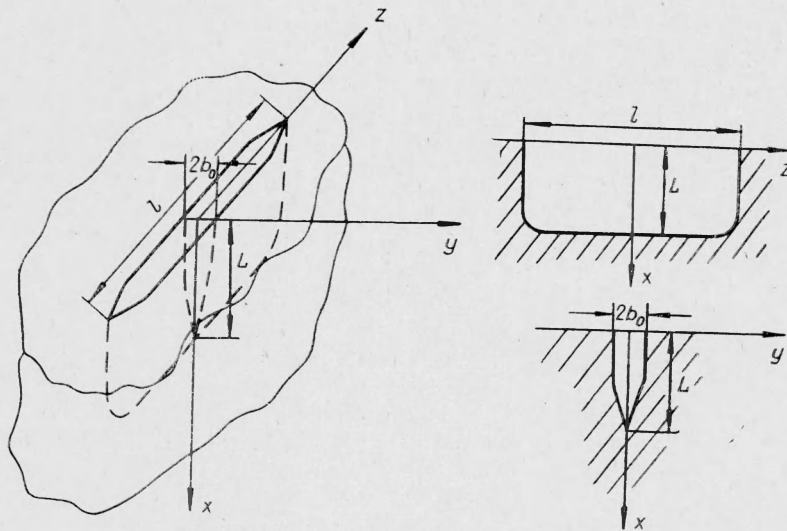


Рис. 2. Схема плоской поры в полупространстве пороха.

делить Δp_{\max} в широком диапазоне его изменения, $0,1 p_0 \lesssim \Delta p_{\max} \lesssim p_0$.

Расчет ограничен дозвуковым истечением, для которого справедлива формула (6). Рассмотрен случай $L \ll l$ (см. рис. 2), когда влиянием боковых границ можно пренебречь. Для решения системы уравнений (1), (5), (6) применен графический (рис. 3) и аналитический методы. Результаты представлены в виде формул, удобных для практического использования.

Показано, что для каждого пороха существует максимально возможное предельное значение величины повышения давления Δp_{\max}^* ($\Delta p_{\max}^*(b_0, L_0) \leq \Delta p_{\max}^*$) (рис. 3). Величина Δp_{\max}^* является функцией физико-химических и физико-механических характеристик пороха; реализуется в плоских порах с начальной шириной $b_0 \rightarrow 0$ при любых L_0 .

Решая совместно уравнения (1) и (6) при $n=1$ и $b=\delta$, получим

$$\Delta p_{\max}^* = \frac{p_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4,4 E}{p_0 (1 - \nu^2) \left(\frac{L}{b}\right)_{\text{кр}}}} - 1 \right], \quad (7)$$

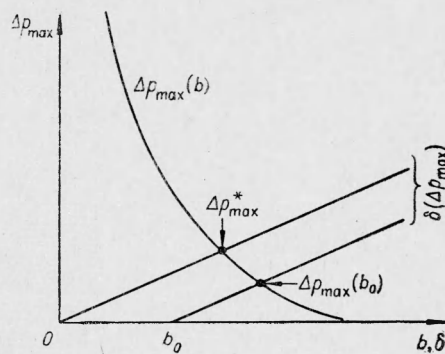


Рис. 3. Определение графическим методом величины избыточного давления в деформируемой поре.

где Δp_{\max}^* , p_0 , E выражено в кг/см^2 . С учетом (3) для описания зависимости (7) была подобрана эмпирическая степенная формула

$$\Delta p_{\max}^* = 6,5 \cdot 10^{-2} \frac{(u_0 E)^{4/5}}{p_0^{3/5}}, \quad (8)$$

справедливая при

$$1,7 p_0^2 < u_0 E < 30 p_0^2, \quad (9)$$

где u_0 выражается в мм/сек .

При $b_0 \neq 0$ связь между Δp_{\max} и начальными размерами плоской поры в первом приближении описывается соотношением

$$\Delta p_{\max} = \Delta p_{\max}^* \left[1 - \frac{b_0}{L_0} \left(\frac{L}{b} \right)_{\text{кр}} \right]. \quad (10)$$

Рост горящих трещин под действием избыточного давления

Ранее проведенные опыты показали, что местное повышение давления в горящей трещине способно при определенных условиях вызвать ее рост. В работе [4] был предложен математический подход к рассмотрению прочности горящих трещин в виде применения теории равновесных трещин в хрупком теле [5] и решена в статистической постановке задача о механической устойчивости горящей трещины. Согласно этому расчету, горящая трещина сохраняет механическую устойчивость, если выполнено неравенство

$$\Delta p_{\max} \leq \frac{K}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}}. \quad (11)$$

Входящий в выражение (11) коэффициент сцепления K введен Г. И. Баренблаттом в качестве интегральной характеристики интенсивности молекулярных сил взаимодействия в концевой области трещины и является одной из основных констант материала в теории равновесных трещин в хрупком теле. Методы определения величины K описаны в [5]. Невыполнение неравенства (11) влечет за собой, по расчету, рост трещины. Однако имеется ряд особенностей, специфических для процесса роста горящих трещин в порохе, которые делают такое рассмотрение недостаточным.

Необходимо, прежде всего, учесть временной фактор. Время действия повышенного давления в горящей трещине чрезвычайно мало и составляет, как отмечалось в [1, 2], сотые доли секунды. В связи с этим существенное значение приобретает скорость, с которой трещина начинает расти.

Проведенное изучение роста трещин показало, что потеря устойчивости горящей трещиной имеет совершенно различные последствия в зависимости от величины развивающегося в ней избыточного давления. Следует рассмотреть три характерных случая.

1. Увеличение глубины трещины за время действия распирающего давления пренебрежимо мало. Трещины, неустойчивые в механическом смысле, практически сохраняют устойчивость. Этот случай имеет место при

$$\frac{K}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}} < \Delta p_{\max} < \frac{K'}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}}. \quad (12)$$

