

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.

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 послойного горения, что приводит к возникновению избыточного давления в поре.

Избыточное давление  $\Delta p = p_T - p_0$  достигает максимальной величины ( $\Delta p_{\max}$ ) 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 вида<sup>1</sup>

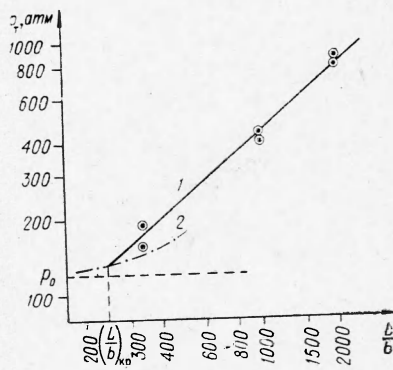


Рис. 1. Зависимость повышения давления в поре от параметра  $\frac{L}{b}$ .

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

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.

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

Величину  $\Delta p_{\max}$  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  $c = \frac{\rho_n^2 RT}{\mu}$  ( $\rho_n$  — плотность пороха;  $\mu$ ,  $T$  — молекулярный вес и температура продуктов сгорания);  $u_0$  — скорость нормального горения<sup>1</sup>.

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  $\Delta p_{\max}$  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  $\Delta p_{\max}$  предложена система алгебраических уравнений:

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

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

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

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

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

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

<sup>1</sup> 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  $\Delta p_{\max}$  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-

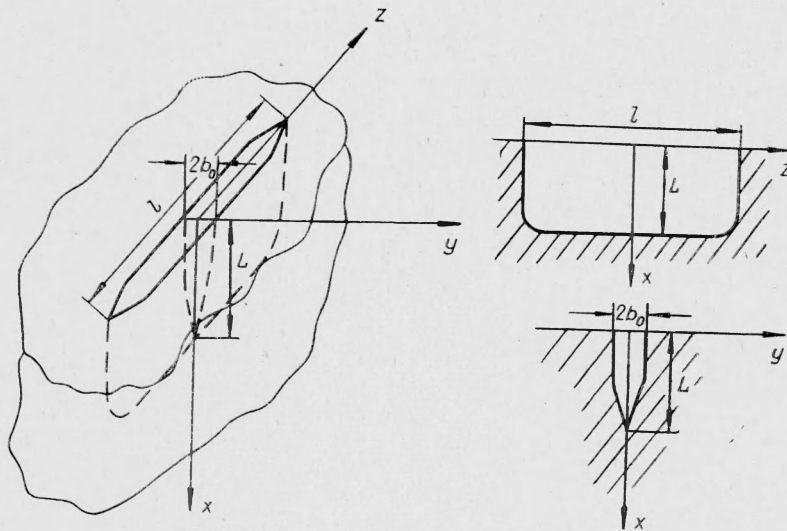


Рис. 2. Схема плоской поры в полупространстве пороха.

делить  $\Delta p_{\max}$  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  $\Delta p_{\max}^*$  ( $\Delta p_{\max}^*(b_0, L_0) \leq \Delta p_{\max}^*$ ) (рис. 3). Величина  $\Delta p_{\max}^*$  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

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

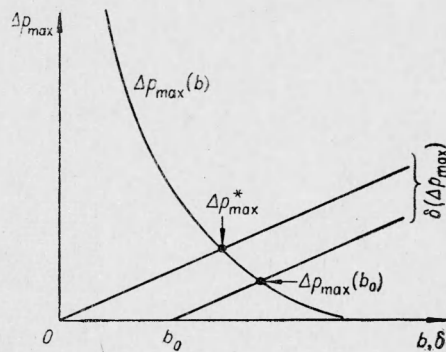


Рис. 3. Определение графическим методом величины избыточного давления в деформируемой поре.

где  $\Delta p_{\max}^*$ ,  $p_0$ ,  $E$  выражено в  $\text{кг/см}^2$ . 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  $\text{мм/сек}$ .

При  $b_0 \neq 0$  связь между  $\Delta p_{\max}$  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

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

2. Увеличение глубины трещины за время действия избыточного давления конечно. Прекращение роста обусловлено конечным временем существования избыточного давления при недостаточно высокой скорости роста. Назовем такой рост ограниченным. Он реализуется при

$$\frac{K'}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}} < \Delta p_{\max} < \frac{K''}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}}, \quad (13)$$

где  $K'' > K' > K$ .

3. Увеличение глубины трещины за счет роста компенсирует увеличение ширины трещины за счет разгорания таким образом, что повышение давления все время остается достаточным для продолжения роста. Этот случай наблюдается, когда

$$\Delta p_{\max} > \frac{K''}{\left(2 - \frac{\pi}{4}\right) \sqrt{2L_0}}. \quad (14)$$

Необходимо особо отметить, что отличие значений  $K'$ ,  $K''$  от  $K$  обусловлено необходимостью учета скорости роста и не связано с зависимостью  $K$  от времени. Границы практической устойчивости и самоподдерживающегося роста не могут быть получены чисто расчетным путем, без эксперимента, так как расчет скорости роста при современном развитии теории не представляется возможным.

Подстановка в выражения (11)–(14) величины максимального давления по формуле (10) позволяет связать устойчивость трещин при горении с их начальными размерами.

Таким образом, плоскость  $L_0$ ,  $b_0$  можно разбить на четыре области (см. также рис. 8 [2]):

1 — область абсолютной (механической) устойчивости [4], 2 — область практической устойчивости, 3 — область ограниченного роста, 4 — область самоподдерживающегося роста.

Значения  $L^*$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  определяются величинами  $K$ ,  $K'$ ,  $K''$  и предельной величиной повышения давления  $\Delta p_{\max}^*$

$$L^* = \frac{1}{2} \left(2 - \frac{\pi}{4}\right)^2 \left(\frac{K}{\Delta p_{\max}^*}\right)^2 \approx \frac{1}{3} \left(\frac{K}{\Delta p_{\max}^*}\right)^2;$$

$$L_1 \approx \frac{1}{3} \left(\frac{K'}{\Delta p_{\max}^*}\right)^2; \quad L_2 \approx \frac{1}{3} \left(\frac{K''}{\Delta p_{\max}^*}\right)^2.$$

Расширение области устойчивости по сравнению с механическим расчетом обусловлено низкой скоростью роста трещин в порохе в сочетании с кратковременностью существования избыточного давления в горячей трещине.

Поступила в редакцию  
5/V 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
2. А. Ф. Беляев, А. И. Куротков и др. ФГВ, 1969, 5, 1.
3. О. И. Лейпунский. Докт. дисс. ИХФ АН СССР, 1946.
4. О. И. Лейпунский, З. В. Кирсанова. ФГВ, 1970, 6, 1.
5. Г. И. Баренблатт. ПММ, 1959, 23, 3–5; ПМТФ, 1961, 4.