

лений в отраженной волне, а также возможность с помощью полученного потока высокоскоростного ускорения тел.

В заключение укажем, что возможности устройства, использующего схождение сферической волны в газе, исследованы в работе [12]. При возбуждении детонации в «центре» полусферического объема, заполненного стехиометрической смесью  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ , рассматривалась кумуляция отраженной полусферической ударной волны, усиленной действием тонкого слоя ВВ. С помощью этого устройства были получены плоские ударные волны в воздухе при 0,1 торр со скоростью около 19 км/с и изучались возможности применения его для высокоскоростного метания тел.

Авторы признательны М. А. Лаврентьеву за интерес к задаче, В. П. Урушкину и Н. Н. Горшкову за помощь в экспериментах.

Поступила в редакцию  
14/X 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. van Thiel, M. Ross et al. Phys. Rev. Lett., 1973, 31, 16.
2. W. G. Hoover, M. Ross et al. Phys. Earth Planet. Interiors, 1972, 6, 60.
3. V. M. Titov, V. V. Sil'vestrov. In book: «Recent Developments in Shock Tube Research». Proc. IX-th Int. Shock Tube Symp., Stanford, 1973, p. 526.
4. Л. В. Альтшулер, Е. А. Дынин, В. А. Свидинский. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, 1, 20.
5. M. van Thiel, B. J. Alder. Mol. Phys., 1966, 10, 427.
6. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. М. Титов. ФГВ, 1974, 10, 2, 265.
7. Ф. В. Григорьев, С. Б. Кормер и др. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 5, 286.
8. M. Ross. J. Chem. Phys., 1974, 60, 9, 3634.
9. Берстайн, Геттельман. Приборы для научных исследований, 1966, 10, 89.
10. Рибович, Уотсон, Гибсон. РТК 1968, 6, 7, 51.
11. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных и гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
12. I. Glass, S. K. Chan, H. L. Brode. AIAA J., 1974, 12, 3, 367.

УДК 536.46

#### УСЛОВИЕ ПРОРЫВА ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ПАСТЫ, ВЫДАВЛИВАЕМОЙ ИЗ КАНАЛА

Л. К. Гусаченко, А. Д. Марголин  
(Томск)

Горение вытекающей из каналов пасты, содержащей окислитель и горючее, может быть использовано в технических устройствах [1, 2]. Возможность прорыва пламени в канал исследуется аналогично работе [3]. При этом учитываются свойства пасты. Считаем, что пламя не проникает в канал, если всюду (на любом расстоянии  $r$  от оси) скорость  $v(r)$  потока больше скорости  $u(r, p)$  горения, которая наблюдалась бы при достижении этого места поверхностью горения. В качестве  $v(r)$  используется распределение скорости при стабилизированном течении в круглой трубе, в пренебрежении изменением, которое это распределение приобретает вблизи свободной поверхности (поверхности горения). Известно, что зависимость скорости горения от радиуса хорошо аппроксимируется ступенчатой функцией

$$u(r, p) = \begin{cases} 0 & a - \Delta x < r < a \\ u(p) & r < a - \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $a$  — радиус канала. Вблизи стенки  $u=0$  (горение невозможно) из-за больших теплотерь, при  $r < a - \Delta x$  влиянием теплотерь можно пренебречь. Расстояние  $\Delta x$  совпадает по порядку величины с легко определяемым экспериментально критическим диаметром  $d^*$  (максимальным диаметром канала с неподвижной пастой, горение в котором еще невозможно из-за теплотерь в стенке):

$$\Delta x \sim d^* \sim \chi/u(p) \quad (2)$$

( $\chi$  — температуропроводность пасты).

При убывающей с приближением к стенке скорости потока и ступенчатой зависимости (1) скорости горения от радиуса прорыва пламени, если он состоится, происходит при  $r = a - \Delta x$ , и именно в этом месте следует проверять условие отсутствия прорыва

$$v(a - \Delta x) > u(p). \quad (3)$$

Рассмотрим случай  $2a \gg d^*$ , когда (3) можно представить в виде

$$v(a) - \Delta x \frac{dv}{dr}(a) > u(p). \quad (4)$$

Скорость проскальзывания  $v(a)$  и градиент скорости у стенки  $dv/dr(a)$  для данного состава зависят от механики движения, т. е. от размера  $a$  и расхода  $Q$  (и, возможно, от давления через реологические константы  $\tau_f$ ,  $\eta_1$ ,  $k$ ,  $n$  и т. д.). Неньютоновские жидкости (см. [4]) принято различать по виду зависимости  $-dv/dr = f(\tau)$ , где  $\tau$  — касательное напряжение. Для любой жидкости  $\tau$  на стенке канала выражается через градиент давления

$$\tau_a = (a/2) \Delta p / \Delta z. \quad (5)$$

Для квазитвердого движения (в канале со смазанными стенками)  $v = v(a)$ ,  $f = 0$  условие (4) сводится к тривиальному  $v > u$ .

Для бингемовского пластика

$$v(a) = 0, \quad f(\tau) = (\tau - \tau_f) / \eta_1. \quad (6)$$

С учетом (2), (6) условие (4) принимает вид

$$\tau_a - \tau_f > u^2(p) / \chi \cdot \text{const}. \quad (7)$$

Согласно (7) экспериментальные данные для прорыва пламени в канал при выдавливании бингемовского пластика удобно обрабатывать в координатах  $\tau_a$ ,  $u^2$ . Может случиться так, что расстояние  $a(1 - \tau_f/\tau_a)$  от стенки до квазитвердого ядра потока окажется меньше  $\Delta x$  и разложение (4) станет незаконным. Но, поскольку  $\Delta x \ll 2a$ , квазитвердое ядро потока занимает почти все сечение канала, и условие отсутствия прорыва сводится к упоминавшемуся тривиальному  $v > u$ .

При обработке экспериментов по выяснению роли реологии часто применяется степенной закон

$$v(a) = 0, \quad f(\tau/k)^{1/n}. \quad (8)$$

Условие (4) в этом случае принимает вид

$$\tau_a/k)^{1/n} > u^2(p) / \chi \cdot \text{const} \quad (9)$$

или  $\tau_a > u^{2n} \cdot \text{const}$ , и при обработке эксперимента удобны координаты  $\lg \tau_a$ ,  $\lg u$ . Если диаметр  $2a$  канала сравним с критическим его диаметром  $d^*$ , разложение (4) также становится незаконным. В этом случае следует применять условие отсутствия прорыва в виде (3), подставляя для различных жидкостей соответствующие выражения  $v(r)$ , которые не приводятся ввиду их громоздкости.

Представляет интерес рассмотрение изменения скорости прорыва при изменении расхода. В частности, если истечение из камеры сгорания сверхзвуковое, давление в камере пропорционально расходу  $Q$  пасты. Для степенного закона (8) выполняется соотношение  $f(\tau_a) \sim Q$ . Если зависимость для скорости горения взять в форме  $u(p) \sim p^v$ , то условие (9) принимает вид, полученный для ньютоновской жидкости

$$Q < \text{const} \cdot Q^{2v}. \quad (10)$$

Согласно (10), при  $v > 0,5$  можно получить прорыв, увеличивая расход пасты, а при  $v < 0,5$  — уменьшая.

Следует иметь в виду, что полученные зависимости могут не выполняться даже качественно, если паста содержит неоднородности размера  $\sim \Delta x$  или больше, вызывающие при сдвиговом течении конвективный теплообмен. Если упомянутые неоднородности сравнимы по величине с диаметром канала, реология может зависеть от диаметра.

Поступила в редакцию  
28/X 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Ж. «Авиационные и ракетные двигатели», 1968, 11. 34. 137 п.
2. Р. Ж. «Авиационные и ракетные двигатели», 1970. 2, 34, 123 п.
3. Е. С. Ш е т н к о в. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.
4. У и л к и н с о н. Неньютоновские жидкости. М., «Мир», 1964.