

Аналогично приведенным в данной работе примерам полезные соотношения подобия могут быть получены и в некоторых других задачах нестационарного горения конденсированных систем. Отметим, что эти соотношения могут быть использованы как для обобщения результатов расчетов и экспериментов, так и для экспериментальной проверки справедливости теорий нестационарного горения, предложенных в [1, 2, 10], и их модификаций.

Поступила в редакцию  
4/II 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
2. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1964, 3.
3. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1962, 5.
4. И. Г. Ассовский, А. Г. Истратов. ПМТФ, 1971, 5.
5. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович, Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1964, 3.
6. Ю. А. Гостинцев, А. Д. Марголин. НТПГВ, 1965, 1, 2.
7. В. Н. Маршаков, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1967, 3, 2.
8. Б. Ф. Новожилов. ПМТФ, 1966, 5.
9. В. А. Фрост, В. Л. Юмашев. ПМТФ, 1973, 2.
10. Б. В. Новожилов. ПМТФ, 1965, 4.

УДК 662.612.3

### ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ГОРЮЧЕГО В ПОТОКЕ ГАЗООБРАЗНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

Ю. С. Кичин, С. А. Осветимский, Н. Н. Бахман

(Москва)

Горение блока твердого горючего в потоке газообразного окислителя рассматривалось в работах [1—5]. Подробно изучена зависимость скорости газификации горючего  $u$  [мм/с] от плотности потока окислителя  $\rho v$  [2, 3] и от давления  $p$  [2, 4, 5]. Эти зависимости, а также зависимость  $u$  от характерного размера  $d$  принято аппроксимировать степенной функцией:

$$u = A (\rho v)^n p^\nu d^m. \quad (1)$$

В работе [2] показано, что при  $\rho v = \text{const}$  показатель  $\nu$  снижается с увеличением давления, а показатель  $n$  при  $p = \text{const}$  уменьшается с увеличением  $\rho v$ .

При горении в цилиндрическом канале интересен случай, когда отношение расхода окислителя  $q_{\text{ок}} = (\rho v) \frac{\pi d^2}{4}$  к расходу горючего  $q_{\text{г}} = \rho_{\text{г}} u \pi l d$  (где  $d$ ,  $l$  — диаметр и длина канала, а  $\rho_{\text{г}}$  — плотность горючего) остается постоянным при разгорании канала, а также при изменении расхода окислителя.

Рассмотрим случай, когда суммарный расход газа  $q_{\text{ок}} + q_{\text{г}}$  в выходном сечении канала пропорционален давлению в канале. Исходную систему уравнений запишем в виде:

$$\frac{q_{\text{г}}}{q_{\text{ок}}} = \frac{\rho_{\text{г}} A (\rho v)^n p^\nu d^m \pi l d}{(\rho v) \frac{\pi d^2}{4}} = B = \text{const}, \quad (2)$$

$$q_{\Gamma} + q_{\text{ок}} = Zp, \quad (3)$$

где  $Z = \text{const}$ . Из (2) следует

$$\frac{q_{\Gamma} + q_{\text{ок}}}{q_{\text{ок}}} = B + 1. \quad (2')$$

Подставляя (3) в (2'), получим

$$p = \frac{B+1}{Z} q_{\text{ок}} = \frac{B+1}{Z} \rho v \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим

$$4A \left( \frac{B+1}{Z} \frac{\pi}{4} \right)^v \rho_{\Gamma} l (\rho v)^{n+v-1} d^{2v+m-1} = B. \quad (5)$$

Чтобы  $q_{\Gamma}/q_{\text{ок}} = B$  не зависело от  $\rho v$  и от  $d$ , должны выполняться условия

$$n+v-1=0, \quad (6)$$

$$2v+m-1=0. \quad (7)$$

Таким образом, желательно, чтобы зависимость скорости газификации от давления и плотности потока окислителя была не произвольной, а подчинялась соотношениям (6) и (7).

В данной работе сделана попытка менять показатели  $n$  и  $v$  при газификации полиметилметакрилата (ПММА) в газообразном кислороде путем введения в ПММА добавок уротропина, гексогена и медных иголок. Опыты проводились на цилиндрических образцах с внутренним диаметром  $d=8$  мм, внешним диаметром  $D=30$  мм и длиной  $l \approx 70$  мм, полученных путем прессования смесей порошкообразного ПММА с добавками до относительной плотности  $\rho/\rho_{\text{max}} \approx 0,9 \div 0,93$ . Плотность потока окислителя менялась от  $10 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$  до  $40 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ . Давление в камере сгорания составляло  $5 \div 70$  атм.

Газообразный кислород подавался через диафрагму, на которой поддерживался критический перепад давления. Расход окислителя определялся по падению давления в баллоне с помощью дифференциального манометра. Время проведения опытов составляло  $1-5$  с. В момент окончания опыта подача кислорода прекращалась и для быстроты гашения образец обдувался потоком азота. Скорость горения находилась весовым методом.

На рис. 1 представлена зависимость скорости газификации чистого ПММА от давления при плотностях потока окислителя  $\rho v$   $10$  (1),  $25$  (2) и  $40 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$  (3). Как видно, средний наклон кривых к оси  $\lg p$  (т. е. величина  $v$ ) практически одинаков  $p=5 \div 50$  атм;  $v$  равна приблизительно  $0,1$ . Для плотности потока  $40 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$

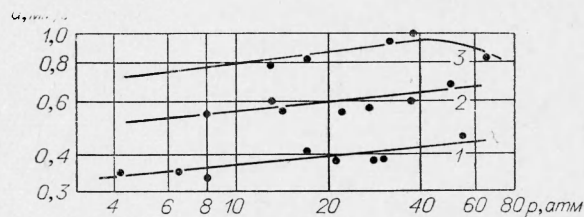


Рис. 1. Зависимость скорости газификации ПММА от давления.

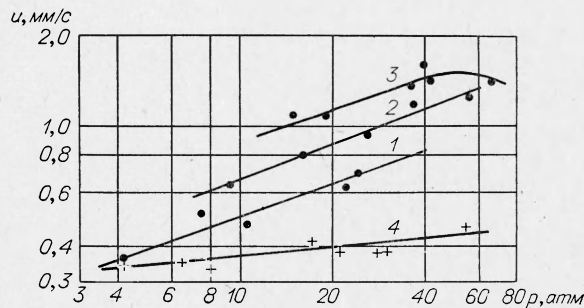


Рис. 2. Зависимость скорости газификации от давления для смеси 60% ПММА ( $\sim 12$  мк) + 40% гексогена ( $\sim 5$  мк):  
1 —  $\rho v = 10 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ ; 2 —  $\rho v = 25 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ ; 3 —  $\rho v = 40 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ ;  
4 —  $\rho v = 10 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$ , чистый ПММА.

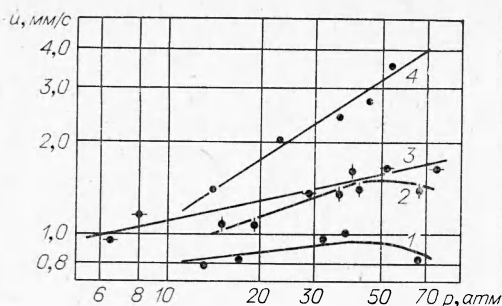


Рис. 3. Зависимость скорости горения от давления при  $\rho v = 40$  г/см<sup>2</sup>·с.  
1 — ПММА; 2 — 60% ПММА+40% гексогена (~5 мк); 3 — 90% ПММА+10% гексогена (0,5÷2,5 мм); 4 — 60% ПММА+40% гексогена (0,5÷2,5 мм).

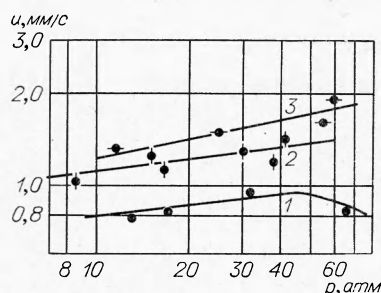


Рис. 4. Зависимость скорости горения от давления при  $\rho v = 40$  г/см<sup>2</sup>·с.  
1 — ПММА; 2 — 80% ПММА+20% уротропина (1,5÷2,5 мм); 3 — 85% ПММА+15% медных иголок (l~4 мм, d~0,2 мм).

до сильнее, чем при добавке 40% мелкого гексогена. Сильно увеличивается и скорость горения при  $\rho v = 40$  г/см<sup>2</sup>·с и  $p = 40$  атм до 2,8 мм/с по сравнению с 0,95 мм/с для чистого ПММА.

Исследовалась также смесь 90% ПММА+10% гексогена (0,5÷2,5 мм). При сравнении результатов опытов для этой смеси и смеси 60% ПММА+40% гексогена (~5 мк) видно, что величина  $v = 0,2$  первой смеси ниже, чем второй ( $v = 0,4$ ). Однако значения скорости горения первой смеси несколько выше, чем второй (кривые 2 и 3 рис. 3).

Добавка к ПММА 20% уротропина с размером частиц 1,5÷2,5 мм или медных иголок (диаметром 0,2 мм и длиной ~4 мм) практически не изменила величину  $v$  (рис. 4, 2, 3), но уровень скорости горения возрос<sup>1</sup> в 1,5÷2 раза. Было исследовано также влияние этих добавок на зависимость скорости газификации ПММА от плотности потока окислителя, т. е. на величину  $n$ . Для чистого ПММА  $n \approx 0,4 \div 0,5$ , добавка 20% уротропина практически не меняет величину  $n$ . Добавка 15% медных иголок ( $d = 0,2$  мм и  $l \sim 4$  мм) увеличивает  $n$  до 0,9.

Необходимо отметить, что после гашения образца 85% ПММА+15% иголок на поверхности были хорошо видны иголки, которые выступали над поверхностью на 1,5÷2 мм. Вдоль каждой иголки имелись конусообразные выемки глубиной ~0,5 мм. Можно предположить, что увеличение  $n$  при добавке медных иголок связано с увеличением шероховатости горячей поверхности, что, в свою очередь, увеличивает тепло- и массоперенос в горящем канале.

при  $p > 50$  атм наблюдается небольшое снижение скорости газификации ПММА.

В опытах предпринималась попытка менять зависимость скорости горения от давления путем введения в ПММА гексогена, так как он способен к самостоятельному горению и имеет высокое  $v = 0,8 \div 0,9$ .

Из сравнения кривых 1—3 и кривой 4 рис. 2 видно, что при всех изученных плотностях потока окислителя добавка гексогена существенно увеличивает наклон кривых к оси абсцисс (величина  $v$  возрастает от 0,1 до 0,4). Одновременно значительно увеличивается  $u$ , а для смеси 60% ПММА+40% гексогена (~5 мк), как и для чистого ПММА при  $\rho v = 40$  г/см<sup>2</sup>·с, наблюдается небольшое снижение скорости газификации при  $p > 50$  атм.

Были проведены опыты с добавками крупнодисперсного (0,5÷2,5 мм) гексогена. В случае системы 60% ПММА+40% гексогена величина  $v$  возрастает (рис. 3, 4) до  $v = 0,7$ , т. е. гораз-

Поступила в редакцию  
28/XI 1972

<sup>1</sup> Увеличение скорости горения конденсированных смесей при введении теплопроводящих элементов (в том числе медных иголок) было изучено в работах [6, 7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. G. Marxman, T. Gilbert. 9-th symposium (Intern) on Combustion, 1963.
2. Ю. А. Кустов, С. С. Рыбанин. ФГВ, 1970, 6, 1.
3. L. D. Smoot, C. F. Pvice. AIAA, J., 1966, 4, 5.
4. L. D. Smoot, C. F. Pvice. AIAA, J., 1967, 5, 1.
5. В. В. Воробей. ФГВ, 1971, 7, 1.
6. И. Н. Лобанов, С. М. Жукова, Н. Н. Бахман. Сб. Физика аэродисперсных систем. Киев, изд-во Киевского университета, 1972, вып. 7.
7. Z. H. Caveny, R. Z. Glick. J. Spacecraft and Rockets, 1967, 4, 1.

УДК 535.233+629.7.018.1

### СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ С ГОРЮЧЕЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗОЙ

*Е. Г. Карпунов, Л. М. Негруцак, А. Б. Рыжик,  
С. И. Фраерман, Ю. А. Юрманов*

*(Ленинград)*

Интерес к проблеме горения металлических частиц в сверхзвуковых двухфазных потоках пробудился в связи с их использованием в качестве высокоэнергетических горючих. Теоретическое рассмотрение задачи о термическом равновесии между частицами и газом в большинстве случаев носит только оценочный характер вследствие обилия влияющих факторов: излучение частиц, их конвективный теплообмен с окружающей средой, теплопередача внутри частицы и другие. Экспериментальная оценка температур фаз в сверхзвуковых гетерогенных потоках до настоящего времени является затруднительной.

В настоящей работе были предприняты исследования относительного спектрального распределения энергии при взаимодействии детонационных волн в стехиометрических водородно-воздушных смесях с навеской алюминиевого и магниевых порошков.

#### Особенности метода исследования и экспериментальная установка

Известно, что излучение нагретого тела описывается формулой Планка

$$B_{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\lambda T} C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (1)$$

где  $B_{\lambda}$ ,  $T$  — соответственно спектральная яркость и температура излучающей поверхности;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $C_1$ ,  $C_2$  — константы;  $\varepsilon_{\lambda T}$  — коэффициент поглощения. В области малых значений  $\lambda T$  (при  $\frac{C_2}{\lambda T} \gg 1$ ) соотношение (1) с достаточной точностью сводится к формуле Вина

$$B_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda T} C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (2)$$

или после логарифмирования и очевидных преобразований

$$\lg(B_{\lambda} \lambda^5) = \lg(C_1 \varepsilon_{\lambda T}) - \frac{0,434 C_2}{T} \cdot \frac{1}{\lambda}. \quad (3)$$