

## ЛИТЕРАТУРА

1. E. Spiegler, M. Wolfstein, Y. Manheimer-Timnat. *Acta Astronautica*, 1976, 3, 265.
2. О. М. Колесников. ФГВ, 1985, 21, 1, 53.
3. J. S. Evans, C. J. Schexnayder. *ATAA J.*, 1980, 18, 2, 188.
4. Турбулентные течения реагирующих газов/Под ред. П. А. Либби и Ф. А. Вильямса. М.: Мир, 1983.
5. В. Р. Кузнецов, А. Б. Лебедев, А. П. Секундов и др.— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, 1977.
6. Ю. Я. Бурико, А. Б. Лебедев. Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, 4, 25.
7. В. Л. Зимонт, В. М. Левин, Е. А. Мещеряков и др. ФГВ, 1983, 19, 4, 75.
8. С. П. Барановский, А. С. Надворский, В. А. Перминов.— В кн.: Струйные течения жидкостей и газов. Ч. 1. Новолоцк, 1982.
9. С. П. Барановский, В. А. Перминов.— В кн.: Струйные течения в элементах авиационных двигателей. М., 1985.
10. J. S. Evans, C. J. Schexnayder, H. L. Beach. *NASA TP-1169*, 1978.
11. Методы расчета турбулентных течений/Под ред. В. Колльмана. М.: Мир, 1984.
12. J. H. Kent, R. W. Bilger. 14-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combust. Inst. Pittsburgh, 1973.

Поступила в редакцию 9/XII 1985,  
после доработки — 10/VII 1986

## О ГОРЕНИИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОЙ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А. Г. Архипов, А. П. Денисюк, Б. Н. Кондриков  
(Москва)

Горение смесей нитроцеллюлозы (НЦ) с пластификатором с теоретической точки зрения представляет интерес главным образом как пример сложной экзотермической реакции, идущей в конденсированной и газовой фазах в тонком слое вблизи поверхности раздела фаз. Теория этого процесса разработана весьма детально. Один из важных ее результатов заключается в том, что при определенных соотношениях между характеристиками горения и внешними условиями процесс теряет устойчивость и переходит на нестационарный колебательный режим либо затухает [1—3]. Скорость горения  $u$  на неустойчивом режиме, равно как зависимость скорости от температуры  $T$  и давления  $p$ , в общем виде теоретически рассчитать не удастся: это нелинейная задача, аналитического решения которой не имеется. Опыт также пока не дал ответа на этот вопрос, быть может, потому, что до сих пор изучались преимущественно смеси с большим (до 60%) содержанием НЦ и резко отрицательным кислородным балансом. У таких смесей невысокая зависимость  $u(T_0)$ , умеренная скорость горения и соответственно низкая температура поверхности раздела фаз. Кроме того, при большом недостатке кислорода на поверхности образуется слой — каркас из обугленных нитей полимера, который заметно повышает устойчивость горения [4]. Можно было думать, что при уменьшении содержания НЦ и применении богатого кислородом пластификатора устойчивость горения понизится и удастся измерить скорость горения на неустойчивом колебательном режиме.

В соответствии со сказанным в данной работе изучались зависимости  $u(p)$  и  $u(T_0)$  для двойных смесей НЦ — пластификатор при содержании НЦ до 40%.

Опыты проводили в массивном (4,5 кг) металлическом блоке с отверстием диаметром 12 и глубиной 160 мм. Блок вместе с цилиндрическим образцом (диаметром 7, длиной 12—15 мм), помещенным в отверстие, выдерживали в термостате до полного выравнивания температуры в системе, после чего перенесли в прибор постоянного давления (объем 5 дм<sup>3</sup>). Горение происходило в атмосфере азота. Скорость горения определяли по скорости роста давления, которую измеряли тензодатчиком. Максимальное изменение  $p$  в ходе горения составляло

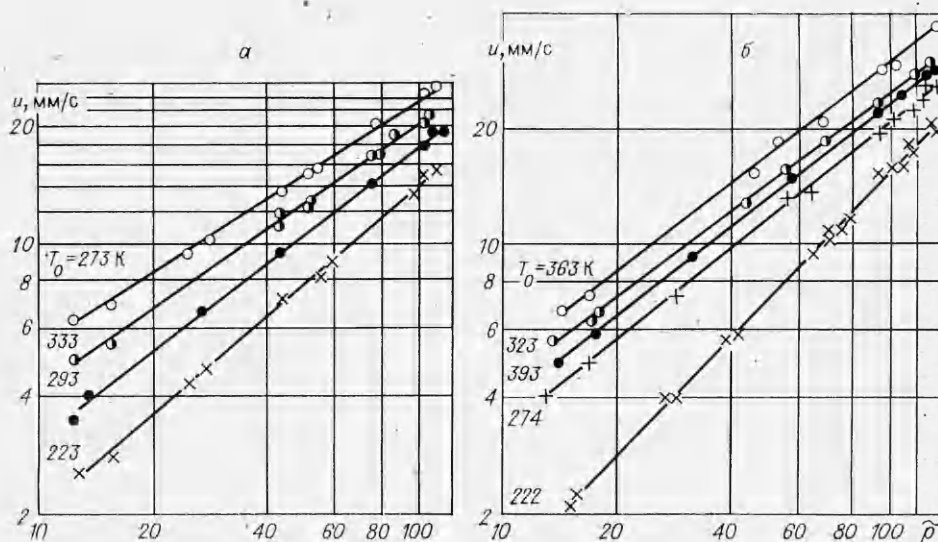


Рис. 1. Зависимость  $u(\tilde{p})$  для смесей 60/40 (а) и 40/60 (б).

0,5 МПа. Интервал изменения начального давления 1,5—14 МПа, начальной температуры 220—370 К.

Предварительное совмещение НЦ (коллоксилин НХ, 12% N) с пластификатором (тринитрат пропантриола) проводили диспергированием компонентов в водной среде при 320 К, окончательное — на лабораторных вальцах при 370 К. Образцы для проведения опытов готовили проходным прессованием на гидравлическом прессе, разрезали на части и бронировали: цилиндр, слегка смазанный вазелином, с усилием вводили в резиновую трубку диаметром 6 мм. В каждой серии опытов температура термостата и блока поддерживалась постоянной, давление менялось. Испытывали смеси, содержащие 60, 50 и 40% НЦ; в дальнейшем они обозначаются соответственно 60/40, 50/50 и 40/60.

Зависимость скорости горения от давления для всех смесей имеет обычный вид (рис. 1):

$$u = u_0 \tilde{p}^\nu,$$

где  $\tilde{p} = p/p_0$ ;  $u_0 = u(p_0)$ ;  $p_0 = 0,98 \cdot 10^5$  Па. Величины  $u_0$  и  $\nu$  для всех смесей не зависят от давления.

Для смеси 60/40 зависимости  $u_0$  и  $\nu$  от начальной температуры имеют вид

$$u_0 = 0,0312 \exp(T_0/100,8) \text{ мм/с}, \quad \nu = 1,182 - T_0/679,4,$$

а коэффициент температурной чувствительности зависит только от давления (рис. 2, а):

$$\beta = (\partial \ln u / \partial T_0)_p = (9,92 - 1,472 \ln \tilde{p}) \cdot 10^{-3}, \text{ К}^{-1}.$$

Производная  $\beta$  по температуре, так же как  $\nu$  — по логарифму давления, равна нулю.

Смесь 50/50 (рис. 2, б) при  $p_0 = 6,5 \div 14$  МПа обнаруживает слабые искажения линейного хода зависимости  $\lg u(T_0)$ , лежащие вблизи предела точности измерений. При более низком давлении наблюдается резкое изменение этой зависимости: при  $T_0 = 220 \div 290$  К  $\beta$  в 2—2,5 раза выше, чем при  $T_0 = 330—370$  К.

С уменьшением содержания НЦ до 40% (рис. 2, в) резкие изломы на кривых отмечаются во всем изученном интервале давлений, причем их левая часть идет тем круче, чем ниже давление. Значения  $\beta$  приведены в табл. 1.

Основной результат данной работы заключается в том, что при низкой  $T_0$  смеси с повышенным содержанием пластификатора (50/50 и

Таблица 1

Содержание НЦ, %	$T_0$ , К	$\beta \cdot 10^3$ , К при $p$ , МПа				
		1,5	3,0	6,5	10	14
60	223—373	5,93	4,91	3,78	3,14	—
50	223—293	10,7	8,45	6,0	4,6	3,6
	293—323	2,9	3,2	3,5	3,7	3,8
	323—373	4,2	4,4	4,7	4,8	5,0
40	223—293	13,3	10,6	7,7	6,0	4,7
	293—323	3,2	2,5	1,7	1,2	0,9
	323—363	4,1	4,5	4,9	5,1	5,3

40/60) горят заметно медленнее, чем смесь 60/40, хотя при комнатной и повышенной температурах величина  $u$  повышается при росте содержания богатого кислородом пластификатора. Одновременно увеличивается при низкой начальной температуре значение  $\gamma$  и еще более сильно —  $\beta$ .

Естественно связать эти изменения с переходом горения на неустойчивый колебательный режим. Согласно [2], при  $r = (\partial T_{\text{н}}/\partial T) > 0$  и  $Z =$

$= \beta(T_{\text{н}} - T_0) > 1$  устойчивость горения определяется критерием Новожилова

$$N = (Z - 1)^2 / (Z + 1)r.$$

При  $N < 1$  горение устойчиво, в случае  $N > 1$  оно переходит на режим колебательной, а при  $N > 2 - \frac{r}{Z+1} \approx 2$  — экспоненциальной неустойчивости. Если на поверхности имеется слой нагретых до высокой температуры инертных частиц, предельное значение  $N$  увеличивается [4]. Для тонкого слоя ( $\delta_{\text{сл}} \ll 1$ ) предел колебательной неустойчивости возрастает на величину

$$Z\delta_{\text{сл}}[1 + Z(1 - \delta_{\text{сл}})]^{-1},$$

где  $\delta_{\text{сл}} = u c_p \rho_{\text{сл}} d_{\text{сл}} / \lambda_{\text{п}}$  — безразмерная толщина слоя;  $\rho_{\text{сл}}$  — его плотность;  $d_{\text{сл}}$  — размерная толщина;  $c_p$  и  $\lambda_{\text{п}}$  — средняя удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности горючего. Например, при  $Z = 2$  и  $r = 0,2$  предельное значение  $N_{\text{п}} = 1,15$ .

Расчет значений  $N$  проведем вначале для смеси 60/40, горящей устойчиво. Воспользуемся формулой, полученной в [5]:

$$u_{\text{н}} = 1,8 \cdot 10^4 \exp(5000/T_{\text{п}}) \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2. При  $T_0 = 223$  К горение идет вблизи предела колебательной неустойчивости:  $p = 3$  и  $1,5$  МПа,  $N = 0,95$  и  $1,13$  соответственно. По-видимому, в последнем случае

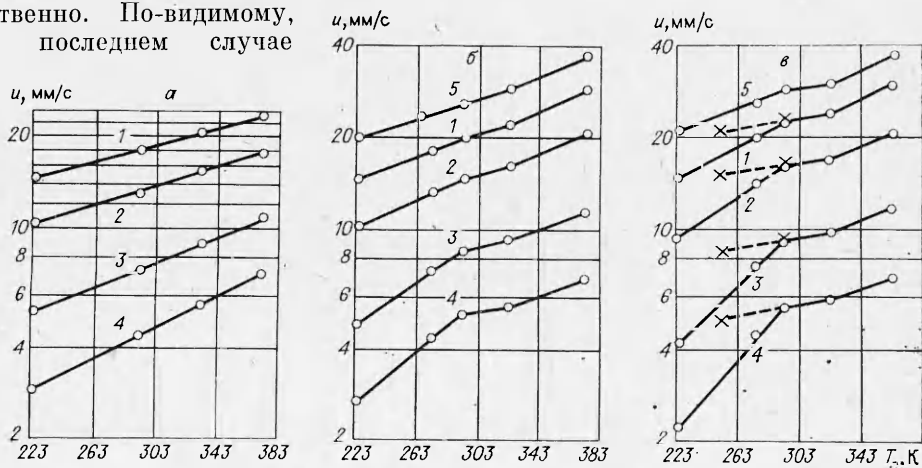


Рис. 2. Зависимость  $u(T_0)$  для смесей 60/40 (а), 50/50 (б) и 40/60 (в).  
 $p$ , МПа: 1 — 10, 2 — 6,5, 3 — 3, 4 — 1,5, 5 — 14.

Таблица 2

$T_0, K$	$p, MPa$	$u, mm/s$	$T_D, K$	$r$	$Z$	$N$
373	1,5	7,5	679	0,55	1,82	0,43
	3,0	10,85	721	0,51	1,71	0,36
	6,5	17,7	776	0,46	1,52	0,24
	10,0	23,25	811	0,41	1,38	0,14
293	1,5	4,29	636	0,48	2,04	0,74
	3,0	7,25	682	0,46	1,91	0,62
	6,5	13,0	741	0,42	1,69	0,43
	10,0	18,0	778	0,38	1,52	0,29
223	1,5	2,9	606	0,44	2,27	1,13
	3,0	5,2	653	0,42	2,11	0,95
	6,5	10,2	715	0,39	1,86	0,67
	10,0	14,5	753	0,36	1,66	0,47

горение удерживается в устойчивом режиме ввиду наличия на поверхности тонкого слоя углеродистых частиц.

Расчет параметров, определяющих устойчивость горения, при  $N > 1$  некорректен [2]. С помощью такого расчета можно определить только границу области неустойчивого горения. В табл. 3 приведены данные для смесей 50/50 и 40/60. Граница определяется четко и совпадает с полученной экспериментально: для смеси 50/50 горение неустойчиво ( $N > 1$ ) при  $T_0 < 293 K$ ,  $p \leq 6,5 MPa$ ; для смеси 40/60 — при  $T_0 < 293 K$ ,  $p \leq 14 MPa$ . Очевидно, что горение, идущее под пределом, распространяется в режиме колебательной неустойчивости. Область экспоненциальной неустойчивости, в которой продолжительное горение невозможно [6, 7], в данном случае, вероятно, не достигается — значения  $N > 2$  (см. табл. 3) связаны, видимо, с тем, что измерения  $N$  проведены в области колебательной неустойчивости.

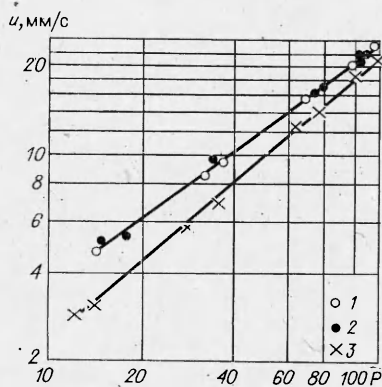
Предположение о том, что горение смеси 40/60 при  $T_0 < 293 K$  идет на неустойчивом режиме, проверено опытами, в которых к смеси добавляли 1—2% сажи. Согласно теории [4] и опытам [4, 7], введение сажи приводит к повышению устойчивости горения в результате образования слоя нагретых до высокой температуры частиц на поверхности топлива. Сама сажа обладает очень слабым каталитическим действием, поэтому ее влияние на устойчивость горения определяется чисто физическими причинами. Результаты опытов показаны на рис. 2, в и 3. При комнатной температуре в области устойчивого горения скорость горения

Таблица 3

$p, MPa$	$N$ смесей	
	50/50	40/60
1,5	1,79/2,33	2,19/2,65
3,0	1,60/2,04	1,99/2,47
6,5	1,22/1,55	1,67/2,04
10	0,88/1,15	1,36/1,68
14	0,58/0,79	1,07/1,31

Примечание. Величины  $N$  даны в числителе для  $T_0 = 293 K$ , в знаменателе — для  $T_0 = 223 K$ .

Рис. 3. Влияние сажи на скорость горения смеси 40/60 при 253 K.  
1, 2 — 1,2 и 2% сажи; 3 — без добавок.



смесей с сажей и без нее одинакова. При низкой температуре в области неустойчивого горения величина  $u$  смеси с сажей существенно выше, чем без нее. Одновременно введение сажи уменьшает  $\gamma$ : горение тем менее устойчиво, чем ниже давление. Соответственно падение скорости в опытах без стабилизирующей добавки при низком давлении более значительно.

В заключение заметим, что, судя по характеру кривых  $u(T_0)$ , влияние степени тепловой неустойчивости на скорость горения более сложно (см. рис. 2, б, в): участку резкого падения скорости при  $N > 1$  предшествует небольшой интервал температуры, в котором скорость слабо зависит от  $T_0$ . Причины и роль этого явления в процессе перехода от устойчивого горения к неустойчивому пока не ясны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
2. Б. В. Повожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М.: Наука, 1973.
3. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, Б. В. Либрович. Теория нестационарного горения порохов. М.: Наука, 1978.
4. Б. Н. Кондриков, Б. В. Повожилов. ФГВ, 1976, 12, 3, 333.
5. А. А. Зенин.— В кн.: Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980.
6. Б. Н. Кондриков, Б. В. Повожилов. ФГВ, 1974, 10, 5, 661.
7. В. Э. Аншиков, Б. Н. Кондриков. ФГВ, 1979, 15, 1, 57.

*Поступила в редакцию 4/VIII 1985,  
после доработки — 31/III 1986*

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИНТЕГРАЛЬНУЮ СТЕПЕНЬ ЧЕРНОТЫ ОКСИ МАГНИЯ

*В. Г. Скогарев, А. В. Флорко*

*(Одесса)*

Имеющиеся экспериментальные данные о величинах интегральной степени черноты  $\epsilon$ , спрессованных порошков  $MgO$  с размерами частиц  $d_0 = 1 \div 100$  мкм в диапазоне температур  $T = 400 \div 2300$  К заметно различаются, причем с увеличением  $d_0$  величина  $\epsilon$  возрастает [1]. При горении одновременно образуются частицы  $MgO$ , размер которых значительно меньше  $d_0$  ( $\leq 0,1$  мкм [2]), и развиваются температуры до 3000 К. Поэтому использование имеющихся результатов при построении теоретических моделей горения представляется некорректным. Цель настоящей работы — изучение температурной зависимости степени черноты  $MgO$  при  $T = 1300 \div 3000$  К.

Частицу  $Mg$  с  $d \sim 3$  мм помещали на острие иглы и зажигали пламенем спиртовки. Изображение горячей частицы фокусировалось с трехкратным увеличением в плоскости входной скрещенной щели скоростного спектрального прибора, изготовленного на основе интерференционных клиньев [3]. Разложенное в спектр излучение регистрировали фотозлектронным умножителем ФЭУ-62 в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = 0,4 \div 1,2$  мкм с частотой 100 спектров в секунду. Сигнал с ФЭУ подавался на осциллограф С1-83 и регистрировался с экрана кинокамерой. Развертку осциллографа запускали синхронно с вращением клиньев. В момент угасания частицы зона горения приближалась к поверхности окисного остатка, в результате чего его температура повышалась до 2800 К. Такие температуры традиционными методами (например, с помощью печей) получить трудно. Далее температура окисного остатка понижалась за счет естественных процессов теплообмена с окружающей средой.