

Предельное условие  $p_{\max} = (\gamma + 1)b/\gamma$  определяет границу области запыриания (рис 3). Конвективное горение в этой области заведомо неустойчиво, так как давление в зоне горения и скорость КГ неограниченно возрастают в результате запыриания течения в зоне диспергирования. Если оценки провести для условий, в которых были рассчитаны зависимости  $v(p_{\max})$ , приведенные на рис. 1, то видно, что кривая 1 в данном интервале давлений целиком попадает в область запыриания, а кривая 2 — начиная с давления 15 атм. Таким образом, стационарный режим КГ, рассмотренный в данной работе, существует в сравнительно узком диапазоне давлений и характеризуется сильной зависимостью скорости распространения от давления. Этим объясняется легкость, с которой КГ взрывчатых веществ, запрессованных в прочные оболочки, переходит в детонацию [6]. Диспергирование «вбок», возникающее в образцах небольшого диаметра, которые помещаются в мягкие, разрушающиеся оболочки, сужает область запыриания и является фактором, стабилизирующим горение, как это и наблюдается на опыте [2].

Возможны другие модели, учитывающие неоднородные эффекты при конвективном горении и приводящие к тому же «стоку» газа, который мешает фильтрации, что и в случае модели двойной пористости. В [8] показано, что наличие U-образных пор существенно облегчает самопроизвольное проникновение горения в поры.

Авторы благодарны А. А. Сулимову за обсуждение физической модели процесса и замечания при постановке работы.

*Институт химической физики  
АН СССР,  
Москва*

*Поступила в редакцию  
23/II 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Куо, М. Summerfield. AIAA J., 1974, 12, 1, 49.
2. В. Ф. Дубовицкий, В. Г. Коростелев и др. ФГВ, 1974, 10, 6.
3. К. К. Куо, М. Summerfield. XV (Int.) Symposium on Combustion. Abstracts, Tokyo, Japan, 1974.
4. В. С. Ермолаев, Б. А. Хасанов и др. ФГВ, 1975, 11, 5.
5. В. С. Ермолаев, А. А. Ворисов, В. А. Хасанов. AIAA J., 1975, 13, 8.
6. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука», 1973.
7. Г. И. Баренблатт, В. Н. Ентов, В. М. Рыжик. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., «Недра», 1972.
8. А. Д. Марголин, В. Н. Маргулис. ФГВ, 1969, 5, 1.

#### КАТАЛИЗ И ИНГИБИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ В СЛОЕВОЙ СИСТЕМЕ ПХА — ПММА

*В. Ф. Мартынюк, Н. Н. Бахман, И. Н. Лобанов*

Горение систем, состоящих из контактирующих между собой плоских или цилиндрических слоев горючего и окислителя (сэндвичей) представляет значительный интерес для теории горения конденсированных смесей. Слоевые системы удобны при экспериментальном исследовании формы горящей поверхности и структуры пламени и позволяют сделать заключение о месте действия катализаторов. С теоретической точки зрения сэндвич — единственная система, для которой удается

получить уравнение для скорости горения с учетом двумерности задачи, а также рассчитать форму горящей поверхности.

В первых экспериментальных работах, посвященных горению слоевых систем [1—3], рассматривался случай, когда каждый из компонентов в отдельности не способен к горению в инертной атмосфере (например,  $\text{KClO}_4$  — полиметилметакрилат). Именно этот случай рассмотрен в теоретических работах, посвященных горению слоевых систем [4—8].

В большинстве экспериментальных работ [9—19] рассмотрен другой случай, когда окислитель (как правило, перхлорат аммония) способен к самостоятельному горению (в том диапазоне давления, в котором проведены опыты). Закономерности горения и прежде всего форма горящей поверхности для этих случаев могут существенно различаться.

В данной работе изучены закономерности катализа при горении слоевых систем перхлорат аммония (ПХА) — полиметилметакрилат (ПММА). Исследованы возможности ингибирования распространения пламени с помощью тонких пленок, нанесенных на поверхность контакта горючего и окислителя. Проведены одновременные измерения угла выгорания в слое окислителя и в слое горючего, что позволило оценить среднее соотношение между горючим и окислителем в зоне горения.

### Методика проведения опытов

Пластины ПММА размером  $10 \times 30 \times 5$  мм<sup>3</sup> нарезались из листового плексигласа. Использовались промышленные пленки поликарбоната (ПК) толщиной 25 мкм, политетрафторэтилена (фторопласт-4, ФП-4) толщиной 10 и 30 мкм, полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 25 мкм. Порошкообразный ПХА (техн.) высушивался 24 ч в сушильном шкафу при 80°C и просеивался через сито с просветом ячеек 100 мкм. В качестве катализатора использовалась окись железа (ч. д. а.) с удельной поверхностью 5—6 м<sup>2</sup>/г.

Из порошкообразного ПХА или ПХА, смешанного с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (смешение проводилось в лабораторном смесителе в течение 3 ч), прессовались плоские заряды размером  $30 \times 10 \times (6-10)$  мм<sup>3</sup>. В случае составных зарядов (слой чистого ПХА + слой катализированного ПХА) сначала прессовался чистый ПХА, а затем на поверхность полученного заряда в пресс-форму засыпался необходимый слой катализированного ПХА и проводилось повторное прессование.

Пластины ПММА и ПХА (без катализатора, с катализатором или составная) прижимались одна к другой с помощью струбины. В нескольких сериях опытов между пластинами помещались (в один или несколько слоев) полимерные пленки. Боковая поверхность ПХА бронировалась цементом-фосфатом, а затем на боковую поверхность всего заряда наносился слой эпоксидной смолы.

Скорость стационарного горения зарядов определялась в бомбе объемом 2 л в атмосфере азота с помощью фоторегистратора ФР-14. Заряд поджигался с помощью нихромовой спирали одновременно вдоль всей линии контакта горючего с окислителем на верхнем торце. Давление в бомбе в ходе опыта повышалось не более чем на 5%. Форма фронта горения исследовалась с помощью кинокамер «Красногорск» и «Пентацет-16» со скоростью съемки 48 и 300 кадров/с соответственно. Величина скорости горения усреднялась по 3—5 опытам. Исследовалась также форма поверхности зарядов, погашенных путем быстрого ( $\sim 4 \cdot 10^3$  атм/с) сброса давления в бомбе (методика гашения была такой же, как в [20]). Погашенные образцы обмерялись с помощью оптического микроскопа с микрометрической подачей по трем взаимно перпендикулярным осям. Шар по горизонтали был взят равным 100 мкм, глубина выемки измерялась с точностью 5 мкм. Результаты опытов усреднялись по пяти измеренным профилям.

## Результаты опытов и обсуждение

**Влияние катализатора на скорость распространения пламени вдоль поверхности контакта компонентов.** Действие катализаторов на скорость горения сэндвичей ПХА — связка исследовалось в [11, 17, 19]. Показано, что катализатор, введенный в слой связки, практически неэффективен. Эффективность катализатора, введенного в слой окислителя, близка к его эффективности в смесевых системах. В [19] исследовалось также действие слоя катализатора, нанесенного на поверхность контакта горючего и окислителя, однако толщина катализатора не контролировалась.

Таблица 1

$p$ , атм	$u$ , мм/с		$u_c / u_{i.o}$
	инертная оболочка (и. о)	слоевая система (с. с)	
35	2,8	3,6	1,28
40	3,3	4,25	1,28
45	3,5	4,5	1,28
50	4,6	5,6	1,22
70	7,9	7,85	0,99

В данной работе катализатор вводился в слой окислителя. Были исследованы четыре типа зарядов:

1) цилиндрические заряды катализированного ПХА в инертной оболочке (цемент-фосфат);

2) пластина ПММА, к которой прижат слой ПХА (чистого или катализированного);

3) пластина ПММА, к которой прижат слой (толщиной  $\Delta$ , изменяющейся в пределах от 0 до 1 мм) катализированного ПХА, а поверх него — слой чистого ПХА;

4) пластина ПММА, к которой прижат слой ( $\Delta=0 \div 1$  мм) чистого ПХА, а поверх него — слой катализированного ПХА.

Рассмотрим полученные результаты. При  $p \leq 70$  атм и соответственно при скорости горения  $\leq 8$  мм/с слоевая система (ПХА+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) — ПММА горела быстрее, чем заряды ПХА+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в обматке из цемент-фосфата. Результаты, полученные при добавке 1% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, приведены в табл. 1.

При  $p \leq 70$  атм пламя горючее — окислитель увеличивало скорость горения катализированного ПХА. По мере увеличения скорости горения (за счет увеличения давления) эта прибавка в скорости горения постепенно исчезала. Данный результат согласуется с представлениями о влиянии горючего на скорость горения ПХА, изложенными в [21].

Эффективность действия катализатора (1% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в слоевой системе заметно возрастала с ростом давления:

$p$ , атм	$u$ , мм/с	$z = u/u_0$
30	3,3	1,37
40	4,25	1,60
50	5,6	1,61
70	7,85	1,65

Аналогичный результат наблюдается для обычных смесей ПХА+ПММА [22].

Зависимость скорости горения и эффективности действия катализатора (при  $p=40$  атм) от процента катализатора характеризовалась следующими цифрами:

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0	0,5	1	2	3	5
$u$ , мм/с	2,65	3,0	4,28	5,20	3,54	3,52
$z = u/u_0$	—	1,13	1,62	1,96	1,34	1,33

Максимальное значение  $z_{\max} \approx 2$  достигается при содержании Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> около 2%. Близкие значения были получены в [23] для чистого ПХА в инертной оболочке ( $z_{\max} = 1,8-1,9$  достигался при содержании Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, равном 0,75—1%). Для стехиометрической мелкодисперсной смеси ПХА+ПММА  $z_{\max} = 1,36$  [22].

Представляют интерес опыты с зарядами третьего и четвертого типа. Из рис. 1 следует, что для зарядов третьего типа при увеличении толщины слоя  $\Delta$  катализированного ПХА скорость горения сначала возрастает, но начиная с  $\Delta_*$  становится практически постоянной. Для зарядов четвертого типа по мере увеличения толщины прослойки чистого ПХА, помещенной между пластиной ПММА и слоем катализированного ПХА, скорость горения сначала снижается, но при некоторой достаточно большой толщине (которая в пределах разброса совпадает с  $\Delta_*$ ) становится практически постоянной. Значение  $\Delta_*$  слабо зависит от давления (в интервале 10—40 атм) и составляет 400—500 мкм. Величина  $\Delta_*$  позволяет оценить ширину зоны, на которую распространяется действие катализатора.

**Влияние полимерных пленок, нанесенных на поверхность контакта горючего и окислителя.** В [2] было показано, что тонкие пленки фторопласта-4 и особенно полиэтилентерефталата (ПЭТФ) предотвращают горение в системе  $\text{КСЮ}_4$ —ПММА (или значительно снижают скорость пламени).

В данной работе изучено действие тонких пленок поликарбоната, фторопласта-4 и полиэтилентерефталата на горение слоевой системы ПХА—ПММА (рис. 2—4). Все изученные пленки уменьшают скорость распространения пламени вдоль границы контакта горючее—окислитель. Уменьшается и устойчивость горения: часть зарядов сгорает не до конца. Точки, соответствующие этому случаю, обведены на графиках кружками.

Для пленки ПК при  $p=5$  и 10 атм существует четко выраженная критическая толщина  $\Delta_{кр}$ , при которой пленки ПК полностью предотвращают горение ПММА (горение затухает на расстоянии  $\leq 1$  мм). При  $p=5$  атм  $\Delta_{кр} \approx 50$  мкм, а при  $p=10$  атм  $\Delta_{кр} \approx 100$  мкм.

Рассмотрим форму кривой  $u(\Delta)$  (рис. 2—4). Для пленок ФП-4 и ПЭТФ при всех изученных давлениях, а для пленок ПК при  $p=20$  атм по мере увеличения  $\Delta$  скорость горения сначала снижается, но затем зависимость  $u(\Delta)$  ослабляется. Плато на кривой  $u(\Delta)$  соответствует скорости горения системы ПХА—пленка при наличии «дежурного пламени» подложки из ПММА. Если толщина пленки слишком

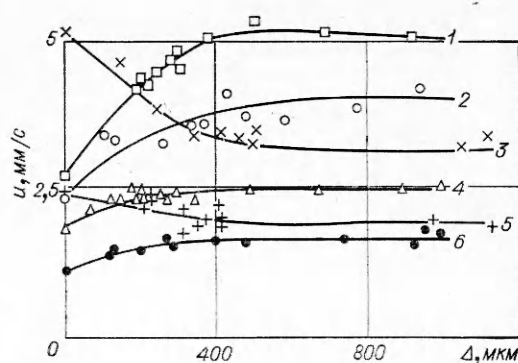


Рис. 1. Зависимость скорости горения составных зарядов от толщины  $\Delta$  слоя, контактирующего с пластиной ПММА, при различных давлениях. 1, 2, 4, 6—слой ПХА+2%  $\text{F}_2\text{O}_3$ ; 3, 5—слой ПХА.  $p$ , атм: 1—40, 2—30, 3—40, 4, 5—20, 6—10.

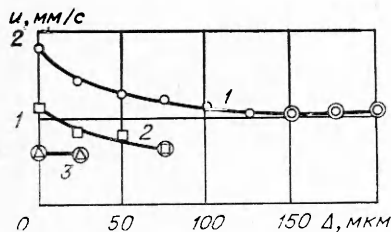


Рис. 2. Зависимость скорости горения зарядов ПХА—ПММА от толщины пленки ПК, помещенной между пластинами окислителя и горючего.

$p$ , атм: 1—20, 2—10, 3—5.

велика, «дежурное пламя» слабо влияет на «носик» пламени и горение может затухнуть.

При достаточно высоком давлении фторопласт-4, полиэтилентерефталат и поликарбонат, по-видимому, уже не нужны в таком «дежурном пламени». Были проведены опыты с системой ПХА—фторопласт (пластина толщиной 5 мм). Испытано 6 образцов. При  $p=30$  атм 4 заряда воспламенить не удалось, а для двух зарядов наблюдалось распространение пламени на расстоянии 4 и 5 мм соответственно.

Ингибирующие свойства пленок ПК, ФП-4 и ПЭТФ при горении системы ПММА—ПХА связаны с их способностью в рассматриваемых условиях образовывать на поверхности слой коксового остатка, который препятствует диффузии продуктов газификации горючего и окислителя к зоне горения, что приводит к затуханию заряда. Коксовый остаток на поверхности слоя горючего наблюдается для всех трех исследованных пленок (особенно для ПК).

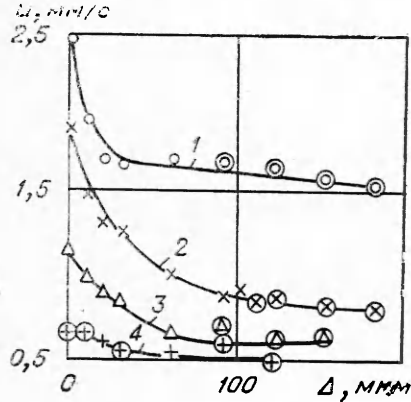


Рис. 3. Зависимость скорости горения слоевой системы ПХА—ПММА от толщины пленки ФП-4 между пластинами окислителя и горючего.

$p$ , атм: 1—30, 2—20, 3—10, 4—5.

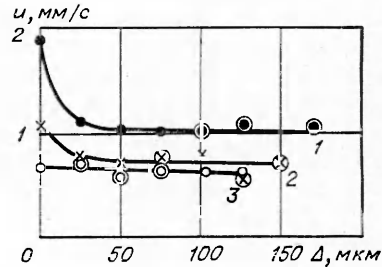


Рис. 4. Зависимость скорости горения слоевой системы ПХА—ПММА от толщины пленки ПЭТФ между пластинами окислителя и горючего.

$p$ , атм: 1—20, 2—10, 3—5.

Угол выгорания в пластинах горючего и окислителя. В [3] был измерен профиль выемки в пластине ПММА, которая горела (при  $p=1$  атм) в контакте со слоем  $\text{KClO}_4$  и гасилась струей воды. Было показано, что при увеличении  $u$  (за счет уменьшения толщины слоя окислителя между двумя пластинами ПММА) угол выгорания  $\varphi$  становится более острым (т. е. глубина выемки при  $x=\text{const}$  уменьшается).

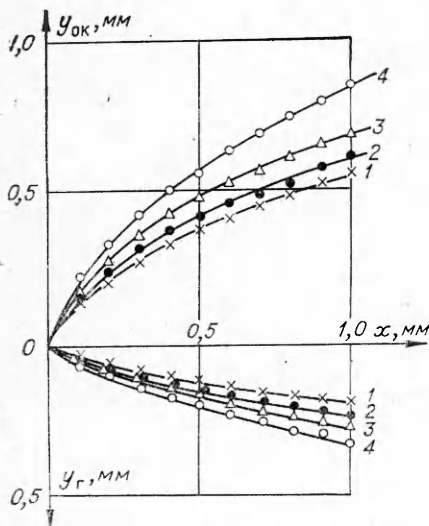


Рис. 5. Профили выемок в слоях ПХА—ПММА при различных давлениях.

$p$ , атм: 1—30, 2—20, 3—10, 4—5.

В [20] профиль выемки в пластине ПММА (для системы ПММА— $\text{KClO}_4$ ) был исследован подробнее. Прослежено уменьшение угла выгорания  $\varphi$  при росте скорости горения за счет увеличения давления (в пределах от 5 до 30 атм) или за счет уменьшения плотности слоя окислителя. При аппроксимации профиля выемки с помощью степенной функции  $x=ay^n$  (где ось  $x$  направлена вдоль поверхности контакта компонентов в сторону, противоположную направлению распространения пламени, а ось  $y$ — в глубину пластины горючего)  $n=1,41 \div 2,43$  (теория [5] дает  $n=2$ ).

В данной работе для слоевых систем на основе ПХА проведены одновременные измерения угла выгорания в пластине горючего и в слое окислителя. На рис. 5 приведены экспериментальные профили выемок в слое ПХА и ПММА при различных

Таблица 2

x, мм	Давление, атм							
	5		10		20		30	
	$\varphi_{ок}$	$\varphi_{г}$	$\varphi_{ок}$	$\varphi_{г}$	$\varphi_{ок}$	$\varphi_{г}$	$\varphi_{ок}$	$\varphi_{г}$
0,1	51	24	46	22	41	22	41	19
0,2	48	21	42	17	37	17	34	13
0,3	43	19	38	16	32	16	31	12
0,4	38	18	37	15	27	13	26	11
0,5	33	18	29	15	27	12	23	9
0,6	32	18	27	12	26	11	21	8
0,7	31	16	26	11	23	10	20	8
0,8	30	14	25	10	22	10	19	8
0,9	29	14	21	10	22	10	19	8
1,0	29	14	19	10	22	10	18	8

Примечание.  $\varphi_{ок}$ ,  $\varphi_{г}$  (в град) — углы, образуемые касательной к сгоревшей поверхности окислителя, горючего и поверхностью их раздела.

давлениях. Значения углов выгорания  $\varphi_{ок}$  и  $\varphi_{г}$ , рассчитанные по этим профилям, приведены в табл. 2.

Исходя из данных рис. 5 и табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1) глубина выемки (и угол выгорания) в слое ПХА значительно больше, чем в слое ПММА (глубина выемки — в 2,5—3 раза, угол выгорания — в 2—3 раза);

2) глубина выемки и угол выгорания (при  $x = \text{const}$ ) уменьшаются при увеличении скорости горения (за счет увеличения давления) — в согласии с [20]. Физический смысл данного результата состоит в том, что при увеличении скорости горения уменьшается время  $t = x/u$ , в течение которого поток тепла от пламени действует на элемент поверхности выемки, находящийся на данном расстоянии  $x$  от вершины выемки. В качестве примера в табл. 3 приведены данные для глубины выемки в слое окислителя ( $y_{ок}$ ) и горючего ( $y_{г}$ );

3) по мере увеличения расстояния от вершины выемки угол выгорания в слое окислителя и в слое горючего уменьшается;

4) если сравнить глубину выемки в слое ПММА для системы ПХА—ПММА и для системы КСЮ<sub>4</sub>—ПММА [20], то при одинаковых давлениях и  $x=1$  мм они близки (исключение составляют данные при  $p=30$  атм):

	$y_{г}$ , мм			
	5 атм	10 атм	20 атм	30 атм
КСЮ <sub>4</sub> —ПММА [20]	~0,32	~0,32	~0,29	~0,27
ПХА—ПММА	0,34	0,27	0,25	0,19

Система КСЮ<sub>4</sub>—ПММА горит быстрее, чем ПХА—ПММА. Поэтому, если проводить сравнение при  $u = \text{const}$ , разница в величине  $y_{г}$  для

Таблица 3

p, атм	u, мм/с	$y_{ок}$		$y_{г}$	
		x=0,2 мм	x=1 мм	x=0,2 мм	x=1 мм
		5	0,63	0,32	0,85
10	1,16	0,26	0,69	0,08	0,27
20	1,90	0,22	0,61	0,08	0,24
30	2,40	0,21	0,56	0,06	0,19

этих систем увеличивается (выемка в первом случае существенно глубже, чем во втором).

В координатах  $\lg x$ ,  $\lg y$  экспериментальные точки для системы ПХА—ПММА удовлетворительно группируются около прямых, т. е. профили выемок удовлетворительно аппроксимируются степенной функцией  $x=ay^n$ . При  $x=0,1 \div 1$  мм получены следующие значения показателя  $n$ :

	$n$		
	5 атм	10 атм	30 атм
ПХА	1,66	1,62	1,37
ПММА	1,23	1,38	1,38

Исследованную зону  $x \leq 1$  мм следует рассматривать как зону «носика» пламени. Соответственно к ней неприменимо теоретическое значение  $n=2$ , справедливое лишь вдали от «носика».

Одновременное измерение угла выгорания в слое окислителя и в слое горючего позволило вычислить среднее соотношение компонентов в зоне горения на различных расстояниях от вершины выемки. Если на длине  $\Delta x$  глубина выемок увеличивается на  $\Delta y_{ок}$  и  $\Delta y_{г}$ , то масса окислителя и горючего, которые газифицировались на длине  $\Delta x$ , равна соответственно  $\Delta x \cdot \Delta y_{ок} / 2 \cdot \rho_{ок}$  и  $\Delta x \Delta y_{г} / 2 \cdot \rho_{г}$ . Величина  $\alpha$  вычисляется по уравнению

$$\alpha = (m_{ок} / m_{г}) : (m_{ок} / m_{г})_{стех} = \Delta y_{ок} / \Delta y_{г} \cdot \rho_{ок} / \rho_{г} \cdot (m_{г} / m_{ок})_{стех} = \\ = (\operatorname{tg} \varphi_{ок} / \operatorname{tg} \varphi_{г}) \cdot [\rho_{ок} / \rho_{г} \cdot (m_{г} / m_{ок})_{стех}]. \quad (1)$$

Для системы ПХА—ПММА по формуле (1) были вычислены значения  $\alpha$  при различных давлениях и на различных расстояниях  $x$  от вершины выемок. В пределах разброса экспериментальных данных влияние давления на  $\alpha$  не прослеживается. При  $x=0,2$  мм  $\alpha = 0,69 \div 0,84$ ; при  $x=1$  мм разброс был значительно меньше:  $\alpha = 0,62 \div 0,67$ . Если рассчитывать  $\alpha$  на основе весовых количеств окислителя и горючего, которые газифицируются в данном сечении, то вблизи «носика» ( $x \leq 1$  мм) смесь значительно обогащена горючим. Возможно, что на достаточно большом расстоянии от «носика»  $\alpha$  приблизится к единице (в теории диффузионного горения обычно допущение, что в пламени реагирует стехиометрическая смесь).

Зная углы выгорания, можно вычислить также скорость газификации окислителя  $\omega_{ок}$  и горючего  $\omega_{г}$ , используя соотношение

$$\omega = u \cdot \sin \varphi. \quad (2)$$

Значения  $\omega_{ок}$  и  $\omega_{г}$  для системы ПХА—ПММА приведены в табл. 4, данные которой приводят к следующим выводам:

1) скорость газификации для ПХА в 2—2,5 раза больше, чем для ПММА;

2) скорости газификации ПХА и ПММА убывают по мере увеличения  $x$  (быстро при малых  $x$  и очень медленно при больших);

3) при  $x \leq 1$  мм скорости газификации ПХА и ПММА увеличиваются с ростом давления. Данный результат свидетельствует о том, что в области  $x=1$  мм горение носит кинетический характер. Если аппроксимировать зависимость  $\omega(p)$  степенной функцией  $\omega = bp^v$ , то для ПХА  $v = 0,55 \pm 0,05$ . Для ПММА зависимость  $\omega(p)$  удается аппроксимировать степенной функцией лишь при  $p = 5-20$  атм; точка при  $p = 30$  атм в координатах  $\lg \omega$ ,  $\lg p$  лежит существенно ниже прямой  $\lg \omega = \lg b + v \lg p$  (т. е. при  $p > 20$  атм зависимость  $\omega(p)$  ослабляется). Значение  $v_{5-20 \text{ атм}}$  лежит в интервале  $0,5 \div 0,7$ ;

Таблица 4

x, мм	Давление, атм							
	5		10		20		30	
	$w_{ок}$	$w_{г}$	$w_{ок}$	$w_{г}$	$w_{ок}$	$w_{г}$	$w_{ок}$	$w_{г}$
0,1	0,49	0,26	0,84	0,43	1,25	0,70	1,56	0,77
0,2	0,46	0,23	0,78	0,34	1,14	0,55	1,34	0,55
0,3	0,44	0,20	0,72	0,31	0,99	0,51	1,21	0,48
0,4	0,39	0,20	0,70	0,30	0,85	0,42	1,05	0,46
0,5	0,35	0,20	0,58	0,29	0,85	0,40	0,94	0,36
0,6	0,34	0,20	0,51	0,24	0,84	0,38	0,84	0,34
0,7	0,33	0,17	0,51	0,22	0,72	0,34	0,82	0,34
0,8	0,33	0,15	0,50	0,21	0,70	0,34	0,79	0,34
0,9	0,32	0,15	0,41	0,21	0,70	0,34	0,77	0,34
1,0	0,30	0,15	0,40	0,21	0,70	0,34	0,77	0,34

Примечание.  $w_{ок}$  и  $w_{г}$  даны в мм/с.

4) если сравнить данные для системы ПХА—ПММА и  $КСЮ_4$ —ПММА [20], то при одинаковых давлениях и глубине выгорания  $y_r$  скорость газификации ПММА в системе  $КСЮ_4$ —ПММА примерно в 2,5 раза выше, чем в системе ПХА—ПММА (табл. 5). Примерно такая же разница получается, если проводить сравнение при одинаковом расстоянии  $x$  от вершины выемки.

Зависимость  $w_r(p)$  для системы  $КСЮ_4$ —ПММА существенно слабее, чем для системы ПХА—ПММА. При глубине выгорания пластины ПММА (контактирующей с пластиной  $КСЮ_4$ ), равной  $y_r=0,3 \div 0,4$  мм,  $v_{10-25 атм}=0,15 \div 0,2$  (в то время как в системе ПХА—ПММА  $v_{5-20 атм}=0,5 \div 0,7$ );

5) сравним скорость газификации ПММА в условиях слоевой системы ПХА—ПММА и при горении цилиндрического канала в блоке ПММА (по каналу подавался газообразный кислород). По данным [24], величина  $w_r$  при  $p=20$  атм и минимальной исследованной плотности потока кислорода ( $10 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ) составляла  $\sim 0,4$  мм/с, в то время как в слоевой системе (при  $p=20$  атм) величина  $w_r$  лежала в пределах от  $0,7$  мм/с при  $x=0,1$  мм до  $0,34$  мм/с при  $x=1$  мм. Таким образом, в слоевой системе ПХА—ПММА скорость газификации ПММА вблизи «носика» пламени может быть выше, чем при горении ПММА в газообразном кислороде, тем более, что в условиях слоевой системы плотность потока окислителя очень мала.

Величину  $(\rho v)_{ПХА}$  можно оценить как  $(\rho v)_{ПХА} = \rho_{ок} u \cdot y_{ок} / y_{ок} + y_r$ . При  $p=20$  атм получим  $(\rho v)_{ПХА} \approx 0,25 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , что на полтора порядка ниже, чем минимальная плотность потока кислорода в [24]. При горении цилиндрического канала в блоке ПММА  $w_r \sim (\rho v)_{ок}^{0,4-0,5}$  в области  $(\rho v)_{ок} = 10-50 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , однако вид зависимости  $w_r = f[(\rho v)_{ок}]$  при очень малых  $(\rho v)_{ок}$  не исследован. Зависимость  $w_r(p)$  в [24] была слабой ( $v \approx 0,1$ ). При  $p=5$  атм  $w_r \approx 0,35$  мм/с, а в условиях слоевой системы ПХА—ПММА  $w_r = 0,26$  мм/с при  $x=0,1$  мм.

Результаты, полученные в этом разделе, свидетельствуют о том, что

Таблица 5

p, атм	Окислитель	$y_r$ , мм	$w_r$ , мм/с
10	ПХА	0,19	0,24
	»	0,23	0,21
	$КСЮ_4$	0,20	0,60
	ПХА	0,27	0,21
30	$КСЮ_4$	0,30	0,50
	ПХА	0,19	0,33
	$КСЮ_4$	0,20	0,81



при горении зарядов ПХА — ПММА, изученных в данной работе, при давлении  $p \leq 30$  атм ведущую роль играло пламя горючее — окислитель. Скорость газификации ПХА монотонно убывала по мере удаления от вершины выемки (при  $x=1$  мм и  $p=30$  атм  $w_{ок}$  составляла  $\sim 0,8$  мм/с). Образцы ПХА, использованные в данной работе, имели нижний предел самостоятельного горения  $p_n > 30$  атм. Из ряда работ (см. обзор в [25]) известно, что величина  $p_n$  весьма чувствительна к изменению параметров ПХА (например, дисперсности исходного порошка) и условий горения.

В [14, 15] максимальная скорость горения (при  $p \geq 20-35$  атм) образцов ПХА — полиуретан и ПХА — полибутadiен наблюдалась в слое ПХА на расстоянии  $\geq 300-500$  мкм от поверхности контакта горючего и окислителя (однако в системе катализированный ПХА — полибутadiен «носик» пламени двигался вдоль поверхности контакта [17]). Расхождение между результатами [14, 15] и данной работы может быть связано с различием в величине  $p_n$ , а также с влиянием природы горючего.

Были измерены профили выемок для систем, где между пластинами ПХА и ПММА были помещены пленки ПК и ФП-4 (рис. 6, 7). Чем толще были пленки ПК или ФП-4, тем ниже была скорость горения и тем глубже была выемка в слое ПХА.

Из сравнения рис. 6, 7 с рис. 5 следует, что снижение скорости горения за счет введения пленок ПК или ФП-4 увеличивало глубину выемки в слое ПХА гораздо сильнее, чем такое же снижение скорости горения за счет уменьшения давления. Это связано с тем, что в системе ПХА — ПММА помимо пламени горючее — окислитель имеется пламя продуктов газификации ПХА ( $NH_3 + HClO_4$ ). Если скорость «носика» снижается за счет введения пленок при  $p = const$ , то характеристики пламени  $NH_3 + HClO_4$  остаются без изменений. Если же скорость «носика» снижается за счет уменьшения давления, то

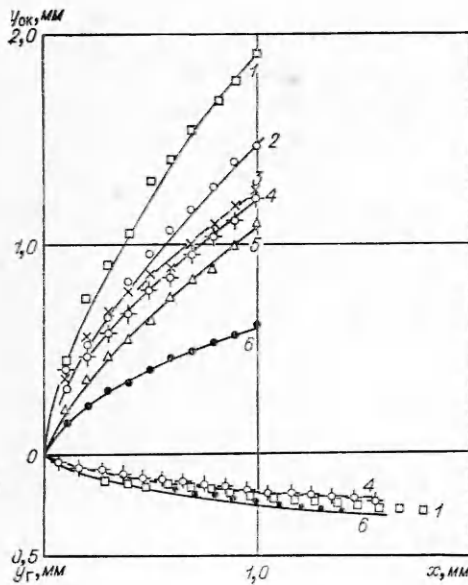


Рис. 6. Профили выемок зарядов ПХА — ПК — ПММА, погашенных при различных толщинах пленки ПК между пластинами окислителя и горючего ( $p=20$  атм).  $\Delta_{ПК}$ , мкм: 1 — 150, 2 — 100, 3 — 75, 4 — 50; 5 — 25; 6 — без пленок.

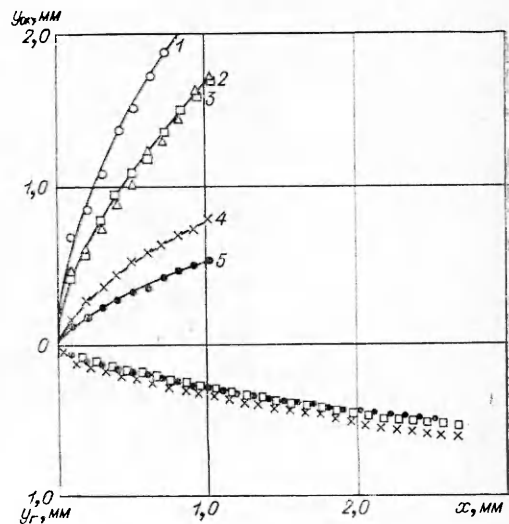


Рис. 7. Профили выемок зарядов ПХА — ФП-4 — ПММА, погашенных при различных толщинах пленки ФП-4 между пластинами окислителя и горючего ( $p=20$  атм).  $\Delta_{ФП-4}$ , мкм: 1 — 150, 2 — 120, 3 — 90, 4 — 30; 5 — без пленки.

уменьшается и скорость тепловыделения в пламени  $\text{NH}_3 + \text{HClO}_4$ . В первом случае при введении пленок скорость газификации ПХА при данной скорости «носика» будет выше (и соответственно глубина выемки будет больше), чем во втором случае.

В отличие от угла выгорания в слое ПХА угол выгорания в слое ПММА в пределах экспериментального разброса не изменялся при введении тонких пленок на поверхность контакта компонентов (см. рис. 6, 7). Этот эффект, возможно, связан с тем, что, с одной стороны, при введении пленок на поверхности ПММА образуется коксовый остаток, который снижает скорость газификации ПММА (т. е. уменьшает глубину выемки при данном  $x$ ); с другой стороны, пленки снижают скорость горения и соответственно увеличивают время воздействия пламени горючее — окислитель на каждый элемент поверхности ПММА, что увеличивает глубину выгорания. По-видимому, для рассматриваемых систем противоположное влияние этих факторов компенсируется.

*Институт химической физики  
АН СССР, Москва*

*Поступила в редакцию  
10/III 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Бахман. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5, 1079.
2. Н. Н. Бахман, Д. П. Поликарпов. Изв. АН СССР, ОТН. Энергетика и автоматика, 1961, 4, 37.
3. Д. П. Поликарпов, Н. Н. Бахман. ИФЖ, 1962, 5, 7, 11.
4. W. Nachbar. Solid Propellant Rocket Research (Ed. M. Summerfield), Academic Press, N. Y., 1960, p. 207.
5. В. Б. Либрович. ПМТФ, 1962, 4, 33.
6. Б. В. Новожилов. ЖФХ, 1962, 36, 11, 2508.
7. W. Nachbar, G. V. Cline. 5-th AGARD Colloquium, Macmillan Co., N. Y., 1963, p. 551.
8. J. V. Fenn. Combust. Flame, 1968, 12, 3, 201.
9. J. D. Lightower, E. W. Price. Astronautica Acta, 1968, 14, 1, 11.
10. L. Nadaud. Combust. Flame, 1968, 12, 3, 177.
11. Б. С. Ермолаев, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1969, 5, 2, 286.
12. Б. С. Ермолаев, А. И. Коротков, Ю. В. Фролов. ФГВ, 1970, 6, 3, 277.
13. M. Hertzberg. Oxid. Combust. Revs., 1971, 5, 1, 1.
14. A. M. Varney, W. C. Strahle. Combust. Sci. Techn., 1972, 4, 5, 197.
15. T. L. Boggs, D. E. Zurn. Combust. Sci. Techn., 1972, 4, 6, 279.
16. W. E. Brown, J. R. Kennedy, D. W. Netzer. Combust. Sci. Techn., 1972, 6, 4, 211.
17. H. E. Jones, W. C. Strahle. 14-th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1973, p. 1287.
18. J. L. Murphy, D. W. Netzer. AIAA J., 1974, 12, 1, 13.
19. J. C. Handley, W. S. Strahle. AIAA Paper, 1974, № 74—122; AIAA J., 1975, 13, 1, 5.
20. Б. Ф. Широков, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1972, 8, 2, 247.
21. В. С. Никифоров, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1972, 8, 4, 505.
22. В. С. Никифоров, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1969, 5, 2, 270.
23. В. И. Авдюнин, Н. Н. Бахман и др. Изв. вузов. Химия и хим. технология, 1971, 14, 5, 666.
24. Ю. С. Кичин, С. А. Осветимский, Н. Н. Бахман. ФГВ, 1973, 9, 3, 384.
25. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.