

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ОБРАЗЦА ТВЕРДОГО ГОРЮЧЕГО НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ВДОЛЬ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

Н. Н. Бахман, В. И. Кодолов, К. И. Ларионов, И. Н. Лобанов
(Москва)

В [1—9] экспериментально показано, что скорость распространения пламени w вдоль поверхности образца твердого горючего существенно зависит от угла наклона φ образца к горизонтали. Представляет интерес выяснить, во сколько раз может изменяться w за счет φ .

Для всех изученных твердых горючих максимальная скорость w_{\max} наблюдалась при горении вертикально вверх ($\varphi = +90^\circ$), так как в этом случае горячие газообразные продукты сгорания оттекают по направлению горения и интенсивно нагревают образец. Что касается минимального значения w_{\min} , то в большинстве случаев оно отмечается при горении вертикально вниз ($\varphi = -90^\circ$), когда газообразные продукты сгорания оттекают в сторону, противоположную направлению горения. В этих случаях $w_{\max}/w_{\min} = w_{90^\circ}/w_{-90^\circ}$. Однако в [5] при горении пленок полиэтилена на медных проволоках w_{\min} соответствовало горизонтальным образцам ($\varphi = 0$). Дело в том, что при $\varphi < 0$ расплав полиэтилена стекает по образцу и интенсифицирует теплопередачу от пламени; это увеличивает $w_{\varphi < 0}$. В данном случае $w_{\max}/w_{\min} = w_{90^\circ}/w_0$ (где $w_0 = w_{\varphi=0}$).

Следует отметить, что лишь в [5] и [9] скорость пламени определена во всем интервале $\varphi = -90^\circ \div +90^\circ$. Поэтому наряду с величиной $w_{90^\circ}/w_{-90^\circ}$ приходится также пользоваться отношениями w_0/w_{-90° и w_{+90°/w_0 , которые относятся к более узким интервалам φ .

Для плоских термически толстых образцов ПММА $w_0/w_{-90^\circ} = 1,35 \div 1,40$, а $w_{+90^\circ}/w_{-90^\circ} = 15 \div 17$ [9]. Для цилиндрических образцов ПММА величина w_0/w_{-90° составляла около 3, слабо уменьшаясь по мере уменьшения диаметра образца d (от 3,09 при $d = 12,7$ до 2,82 при $d = 6,35$ мм) [4]. Для пленок ПММА на медных проволоках и стеклянных нитях [5] $w_0/w_{-90^\circ} = 1,3 \div 1,5$, а $w_{\max}/w_{\min} = w_{90^\circ}/w_{-90^\circ} = 5 \div 13$. При заданном диаметре подложки $d_n = \text{const}$ величина w_{\max}/w_{\min} возрастала при увеличении толщины пленки Δ ПММА, а при $\Delta = \text{const}$ — при уменьшении d_n . Для пленок полиэтилена на медных проволоках [5] значения $w_{\max}/w_{\min} = w_{90^\circ}/w_0$ лежали в пределах $3 \div 5$, увеличиваясь с ростом Δ (при $d_n = \text{const}$).

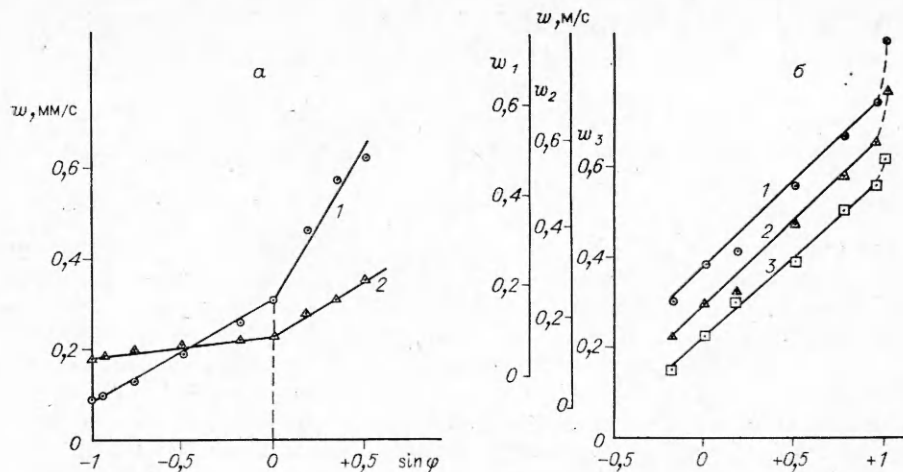
В данной работе проведены опыты с плоскими образцами композитов на основе смолы ЭД-20 и вискозной ленты ЛТТ или стеклоткани. Длина образцов составляла 200, а ширина — 26 мм, толщина Δ и массовое содержание наполнителя (степень наполнения) N варьировались. Образцы испытывались в режиме двухстороннего горения по методике [8]. Результаты для композита с лентой ЛТТ приведены в табл. 1, а для композита со стеклотканью — в табл. 2. Видно, что при переходе от образцов, горящих вертикально вниз, к горизонтальным значение w возрастает в 2—4 раза, а при переходе от последних к образцам, горящим вертикально вверх, — еще в 2,5—4,5 раза. Можно предположить, что w_0/w_{-90° и w_{90°/w_0 должны зависеть от природы наполнителя, степени наполнения и толщины образца, однако полученных данных недостаточно, чтобы проследить эти зависимости.

Интерес представляет также форма кривой $w(\varphi)$. Рассмотрим простейшую модель, учитывающую влияние естественной

Таблица 1

N, %	Δ , мм	w_0/w_{-90°
0	4,8	2,44
	8,5	1,28
5,3	3,2	4,18
	6,0	3,0
12,1 *	1,5	3,68
31,8	1,2	3,4

* В смолу введен ингибитор-пластификатор.



Зависимость $w(\sin \varphi)$ для плоских образцов (толщиной Δ) композитов: смола ЭД-20 + наполнитель.

а) лента ЛТТ: 1 — $N = 31,8\%$, $\Delta = 1,2$ мм, 2 — $N = 0$, $\Delta = 8,5$ мм; б) стеклоткань: $N = 20\%$, $\Delta = 2,5$ (1), 4 (2) и 5,5 мм (3) (шкалы w для каждой Δ сдвинуты друг относительно друга во избежание наложения кривых).

конвекции на величину w . При горении вверх ($\varphi > 0$) естественная конвекция обеспечивает течение газообразных продуктов сгорания по направлению горения. Вектор скорости конвекции v_k , направленный вертикально вверх, можно разложить на компоненту, параллельную поверхности образца $v_k \sin \varphi$, и компоненту, перпендикулярную поверхности $v_k \cos \varphi$. Примем, что скорость пламени w вдоль поверхности образца можно записать как

$$w_\varphi = w_0 + a(v_k \sin \varphi)^n = w_0 + b \sin^n \varphi \quad (1)$$

или

$$w_\varphi/w_0 = 1 + k \sin^n \varphi. \quad (2)$$

Следует ожидать, что коэффициент k должен зависеть от природы горючего и окислителя. Чем больше k , тем выше чувствительность данного горючего (в данном окислителе) к обдуву собственными продуктами сгорания. Следует ожидать также, что k будет зависеть от геометрии образца (пластина или цилиндр) и его размеров.

Если при горении вверх изменение w связано с наличием потока горячих продуктов сгорания по направлению горения, то при горении вниз ($\varphi < 0$) компонента v_k , параллельная поверхности образца, направлена в сторону, противоположную горению. Это вызывает течение холодного окислителя навстречу фронту горения. По данным [11], в случае горения ПММА в смеси $O_2 + N_2$ при не слишком высокой концентрации кислорода (в частности, на воздухе) w монотонно убывает по мере роста скорости встречного потока газа.

Здесь полезно отметить, что линейная зависимость

$$w_\varphi/w_0 = 1 + k \sin \varphi \quad (3)$$

(в отличие, например, от квадратичной $n = 2$) автоматически учитывает изменение хода зависимости $w(|\varphi|)$ при переходе через $\varphi = 0$ (при $\varphi < 0$ увеличение угла наклона образца снижает w , а при $\varphi > 0$, напротив, увеличивает w). Однако следует ожидать, что значение коэффициента k в (3) (или коэффициентов k и n в (2)) при $\varphi < 0$, где ориентация образца влияет на скорость встречного потока холодного окислителя, будет отличаться от значений тех же величин при $\varphi > 0$, где ориентация влияет на скорость спутного потока продуктов сгорания.

Проведенный в данной работе анализ показал, что для плоских образцов во многих случаях (3) удовлетворительно аппроксимирует опыт-

Таблица 2

Ингибитор*	N, %	Δ, мм	$\frac{w_0}{w_{-90^\circ}}$	$\frac{w_{90^\circ}}{w_0}$	
Без ингибитора	0	0,8	2,28	—	
		5 **	4,0	2,15	
	20	0,5	2,04	—	
		0,7	2,77	—	
		1,5	—	3,93	
		2,5	—	3,02	
		4,0	—	3,03	
	5,5	—	2,77		
	n = 1	20	1,5	—	2,65
			2,5	—	4,34
n = 2	20	1,6	—	3,09	

* Состав ингибитора: n % красного фосфора + 0,1n % $\text{Ba}(\text{VO}_3)_2$ [10].
** В смолу введен ингибитор-пластификатор.

Таблица 3

N, %	Δ, мм	k **		Интервал φ, град
		k ₊	k ₋	
0	4,8	1,09	0,51	-70 ÷ 0
	8,5	1,04	0,22	-90 ÷ 0
	11,0	2,38	0,60	-50 ÷ 0
5,3	3,2	2,30	—	—
	6,0	2,30	0,67	-90 ÷ 0
31,8	1,2	2,19	0,71	-90 ÷ 0
	2,8	2,00	—	—
	5,0	1,28	—	—
0 *	1,3	—	0,41	-70 ÷ 0
	6,0	—	0,65	-50 ÷ 0
5,7 *	2,1	—	0,49	-70 ÷ -10
	6,3	—	0,38	-50 ÷ 0
12,1 *	1,5	—	0,43	-70 ÷ -10

* В смолу введен ингибитор-пластификатор.
** Значения k_± получены в интервале φ = 0 ÷ 30°.

ные данные в достаточно широком интервале φ (см. рисунок). Значения коэффициента k приведены в табл. 3 и 4 соответственно для композита с лентой ЛТТ и стеклотканью (при N = 20 %). Для композитов без ингибитора получено $k_+ = k_{\varphi > 0} = 1 \div 2,4$. При введении в композит ингибитора k_+ уменьшился до 0,7—1,3. При φ < 0 значения $k = k_-$ для композитов ЭД-20 — ЛТТ существенно ниже: $k_- = 0,2 \div 0,7$. Для листового ПММА обработка данных [3] дает $k_- \approx 0,4$ (табл. 5).

Данные по зависимости w(φ) для цилиндрических образцов ПММА приведены в [4]. Их анализ показал, что при φ > 0 кривая w(sin φ) существенно параболична. При φ < 0 параболичность выражена значительно слабее и опытные данные можно (хотя и приближенно) аппроксимировать с помощью (3). Полученные при этом значения k₋ примерно вдвое выше, чем для листового ПММА (см. табл. 5).

Отметим, что в [6, 7] наблюдались случаи немонотонной зависимости w(φ). Так, в [6] при горении бумаги w оставалась постоянной в интервале φ = -90° ÷ -40° и лишь затем начинала возрастать. В [7] для слоя сосновой хвои (с влажностью 12 %) в интервале φ = -27° ÷ +10° w оставалась постоянной, после чего начинала быстро повышаться с ростом φ.

Таблица 4

Ингибитор*	Δ, мм	k ₊	Интервал φ, град
Без ингибитора	2,5	1,58	0 ÷ 70
	4,0	1,62	
	5,5	1,64	
n = 1	1,5	0,72	0 ÷ 70
	2,5	0,86	
n = 2	1,6	1,31	0 ÷ 70
	2,4	0,94	10 ÷ 70

* Состав ингибитора тот же, что и в табл. 2.

Таблица 5

Форма образца ПММА	Толщина (диаметр), мм	k ₋	Интервал φ, град
Лист [3]	1,59	*	-90 ÷ -30
	2,54	0,40	
	4,76	0,43	
	6,35	0,43	
	12,7	0,36	
	25,4	0,41	
Стержень [4]	6,35	0,74	-70 ÷ 0
	9,52	0,78	
	12,7	0,80	

* Точки не ложатся на кривую (3).

Естественно, что никакая монотонно изменяющаяся функция $w(\varphi)$ (и, в частности, (2) и (3)) не может описать подобных данных во всем интервале φ . Следует отдельно объяснять участки, где $w = \text{const} \neq f(\varphi)$ и где w растет вместе с φ . Если зависимость (3) выполняется во всем интервале $\varphi = -90^\circ \div +90^\circ$, то $k_+ = w_{90^\circ}/w_0 - 1$; $k_- = 1 - w_{-90^\circ}/w_0$.

Таким образом, приведенный анализ показал, что формула (3) во многих (хотя и не во всех) случаях позволяет удовлетворительно прогнозировать зависимость скорости пламени вдоль поверхности образца твердого горючего от ориентации образца и позволяет расположить различные горючие в ряд по их чувствительности к обдуву собственными продуктами сгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Magee R. S., McAlevy R. F. J. Fire Flammability, 1974, 2, 271.
2. Fernandez-Pello A., Williams F. A. 5-th Symp. (Intern.) on Combustion.— Pittsburgh, 1974.
3. Fernandez-Pello A., Williams F. A. Comb. Sci. Technol., 1976, 14, 4—6, 155.
4. Sibulkin M., Lee C. K. Comb. Sci. Technol., 1974, 9, 3—4, 137.
5. Bakhman N. N., Aldabaev L. I., Kondrikov B. N. e. a. Comb. Flame, 1981, 44, 1, 17.
6. Hirano T., Noreikis S. E., Waterman T. E. Comb. Flame, 1974, 22, 3, 353.
7. Сухинин А. И., Конев Э. В., Курбатский И. П. ФГВ, 1975, 11, 5, 743.
8. Бахман И. И., Кодолов В. И., Ларионов К. И. и др. ФГВ, 1986, 22, 5, 22.
9. Ito A., Kashiwagi T. Comb. Flame, 1988, 71, 2, 189.
10. Кодолов В. И., Князева Л. Ф., Храмая Г. С. и др. Пластмассы, 1985, 11, 56.
11. Fernandez-Pello A. C., Hirano T. Comb. Sci. Technol., 1983, 32, 1—4, 1.

*Поступила в редакцию 24/IV 1986,
после доработки — 23/XI 1987*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ИНЕРТНОГО РАЗБАВИТЕЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГАЗОФАЗНЫЕ ПЛАМЕНА

*Г. А. Гуляев, Г. А. Попков, Ю. Н. Шебеко, А. П. Короленок
(Балашиха)*

Разбавление исходной горючей смеси инертным газом, наложение на пламя электрического поля определенной геометрии и полярности могут приводить к гашению пламени [1]. С точки зрения изучения механизма процессов горения, а также для практического применения электрических полей для управления этими процессами, представляет интерес исследование совместного действия на пламена органических веществ инертного разбавителя и электрического поля. В работе [2] показано, что наложение на разбавленное азотом или аргоном пламя предварительно перемешанной смеси пропан-бутана с воздухом электрического поля приводит к усилению огнетушащего действия аргона и ослаблению действия азота. Однако не выявлена зависимость наблюдаемого эффекта от величины приложенного электрического потенциала, состава окислительной среды, вида пламени (предварительно перемешанной смеси или диффузионное). Исследованию влияния перечисленных выше факторов посвящена настоящая работа.

Опыты проводили на круглой металлической горелке с внутренним диаметром 10 мм, окруженной коаксиальной с ней цилиндрической металлической сеткой диаметром 150 мм с размером ячейки 1×1 мм. Изучали пламя предварительно перемешанной смеси пропан-бутана с окислительной средой (воздух, разбавленный аргоном или азотом; смесь аргона с кислородом в соотношении 4:1, разбавленная аргоном или азотом), а также диффузионное пламя пропан-бутана в воздухе. В последнем случае инертный разбавитель добавляли в горючий газ. Горел-