

В [13] из 185 испытанных добавок примерно половина ингибирует тление хлопковой ткани (это добавки, анионы которых содержат бор, фосфор, серу или галоген). Горение этой ткани ингибируют более половины изученных добавок, а более 80 ингибируют как тление, так и горение. Однако эти результаты чисто качественные, так как метод введения добавок (припудривание), принятый в [13], очень далек от практики и не позволяет равномерно нанести на ткань заданный процент добавки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cullis C. F., Hirschler M. M. The combustion of organic polymers.— Oxford: Clarendon Press, 1981.
2. Mintz K. J. // Fire and Materials.— 1991.— 15, № 2.— P. 93.
3. Ohlemiller T. J., Rogers F. E. // Combust. Sci. Technol.— 1980.— 24, N 3—4.— P. 139.
4. Palmer K. N. // Combust. Flame.— 1957.— 1, N 2.— P. 129.
5. Leisch S. O., Kauffman C. W., Sichel M. // 20th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Ints., 1984.— P. 1601.
6. Sato K., Sega S. // Combust. Flame.— 1991.— 83, N 1—2.— P. 146.
7. Бахман Н. Н., Кондриков Б. Н., Раубель С. О. и др. Критические условия горения плоских слоев ПММА на подложках различной толщины и теплопроводности // ФГВ.— 1983.— 19, № 4.— С. 7.
8. Материалы семинара по внутривспластовому горению нефти.— М.: ИПМ АН СССР, 1983.
9. Мурзагалиев А., Антипов Ю. В., Сагиндыков А. А. и др. // Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1986.— С. 40.
10. Мелихов А. С., Никитенко И. Н., Штепа А. В. // Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1989.— С. 110.
11. Gann R. G., Earl W. L., Manka M. J. et al. // 18th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1981— P. 571.
12. Bulewicz E. M., Piechocinska I. // Arch. Combust.— 1984.— 4, N 2.— P. 131.
13. McCarter R. J. // Fire and Materials.— 1981.— 5, N 2.— P. 66.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/VII 1992

УДК 536.46

Н. Н. Бахман

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ ТЛЕНИЯ. II. СКОРОСТЬ ТЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРА В ЗОНЕ ТЛЕНИЯ

Анализируются данные по зависимости скорости тления и температуры от основных определяющих параметров.

В [1] рассмотрены критические условия тления. Рассмотрим теперь данные, относящиеся к скорости тления. Нужно сразу подчеркнуть, что закономерности распространения волны тления вдоль свободной (граничащей с газом) поверхности горючего могут существенно отличаться от таковых при тлении с торца плоского слоя горючего, зажато с обеих сторон инертными слоями (или цилиндрического слоя горючего в инертной оболочке). Системы первого типа будем условно называть открытыми или полукрытыми (если с одной стороны слой горючего контактирует с инертной подложкой), а системы второго типа — закрытыми. Соответственно, скорость тления в первом случае обозначим  $w$ , а во втором —  $u$ .

Как  $w$ , так и  $u$  зависят от природы горючего, его дисперсности, характеристик слоя горючего (толщины  $\Delta$ , пористости  $\Pi$ , теплопроводности, теплоемкости, ориентации относительно горизонтали), концентрации кислорода, начальной температуры, скорости обдува поверхности горючего газообразным окислителем (для открытых и полукрытых систем)

© Н. Н. Бахман, 1993.

Таблица 1

Горючее	Характеристики слоя	$\varphi$ , град	$w$ , мм/с	Ссылка
Угольная пыль ( $>104$ мкм) Опилки (75—150 мкм)	Плоский, $\Delta = 10$ мм	0	0,017	[4]
		0	0,040	
Бумага	Цилиндрический (намотка), $d = 4 \div 8$ мм	-90	0,050 $\div$ 0,084	[4]
Табак	Сигарета, $d = 8$ мм $d = 7,5 \div 10$ мм	-90	0,045	[4]
		-90	0,035 $\div$ 0,085	[5]
Пенополиуретан (3 марки)	Бруски $50 \times 120 \times 450$ мм, стержни, $d = 18$ мм, $l = 450$ мм	0	0,033 $\div$ 0,117	[6]

Примечание.  $\varphi$  — угол наклона образца к горизонтали:  $\varphi = -90^\circ$  — распространение зоны реакции вертикально вниз,  $\varphi = 0$  — горизонтально,  $\varphi = +90^\circ$  — вертикально вверх.

или скорости принудительной фильтрации газа через слой горючего в закрытых системах.

**Форма фронта тления.** При тлении однородного слоя горючего ( $\Pi = \text{const}$ ) в закрытой системе форма фронта тления (или горения) может быть близка к плоской. Напротив, при распространении зоны реакции вдоль свободной поверхности слоя в горючем образуется криволинейная выемка. В [2, 3] изучена форма выемки в плоском слое ПММА при горении слоевой системы ПММА —  $\text{KClO}_4$ . Теоретический профиль выемки [2] не слишком близко от носика пламени описывается параболой  $x = ay^n$ , где  $n \approx 2$  (ось  $x$  ориентирована по направлению горения, а ось  $y$  направлена внутрь пластины ПММА). Экспериментальные значения  $n$  [3] зависят от  $y$  (а также от давления  $p$ ) и лежат в интервале  $1,41 \div 2,16$ . Из теории [2] следует, что  $y \sim 1/\sqrt{w}$  (где  $w$  — скорость пламени). Этот вывод удовлетворительно согласуется с опытными данными [3].

**Абсолютная величина скорости тления.** В табл. 1 представлены значения скорости тления на воздухе вдоль свободной поверхности слоя некоторых горючих в условиях свободной конвекции. В табл. 2 приведены значения скорости тления в закрытых системах. Величины  $u$  на 1—2 порядка ниже значений  $w$  в открытых системах (см. табл. 1).

Очевидно, что чем больше длина закрытой системы, тем меньше будет средняя скорость тления (или горения), так как удлиняется путь фильтрации окислителя (особенно при иницировании в центре системы). По данным [4], при тлении травяной муки ( $\Pi = 0,80 \div 0,82$ ) в картонных цилиндрах длиной  $l$  при иницировании со свободного торца  $\bar{u} = 6,4 \cdot 10^{-3}$  мм/с, а при иницировании в середине слоя (т. е. на расстоянии  $l/2$  от свободных торцов)  $\bar{u} = 3,3 \cdot 10^{-3}$  мм/с.

Таблица 2

Горючее	Характеристики слоя	$u$ , мм/с	Ссылка
Травяная мука (полидисперсная) Отруби (полидисперсные)	Цилиндрический, $d = 110 \div 300$ мм, $\Pi = 0,75$ $\Pi = 0,77$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	[7]
		$3,5 \cdot 10^{-3}$	
Травяная мука Нефтедержащая порола	$d = 3$ м, $l = 2,5$ м Пласт, $\Delta = 7 \div 10$ м, $\Pi = 0,28 \div 0,30$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	[8]
		$6,3 \cdot 10^{-4}$	[9]

Примечание. Значение  $\varphi$  в [7—9] не указано.

**Зависимость  $w$  от толщины слоя горючего.** Данные, относящиеся к зависимости  $w(\Delta)$ , содержатся лишь в работах [10, 11]. В работе [12] зависимость  $w(\Delta)$  при горении полимеров изучена достаточно подробно. Показано, что при большой толщине (термически толстый слой) скорость горения вообще не зависит от  $\Delta$ . Если же толщина плоского слоя или диаметр  $d$  цилиндрического образца не слишком велики, то возможны различные случаи:

1) если плоский слой горючего контактирует с не слишком тонкой теплопроводящей подложкой и горит с одной стороны, то величина  $w$  падает по мере уменьшения  $\Delta$ , и при  $\Delta = \Delta_*$  горение затухает из-за теплопотерь в подложку;

2) если плоский слой горит с обеих сторон (или цилиндрический слой горит по боковой поверхности), то величина  $w$  растет<sup>1</sup> по мере уменьшения  $\Delta$  (или  $d$ ), пока этому не положат конец теплопотери в окружающий воздух (величина  $\Delta_*$  в этом случае гораздо меньше, чем в первом). Такой же вид имеет зависимость  $w(\Delta)$  для плоского слоя на теплонепроницаемой подложке (например, асбесте).

В работе [11] изучено тление цилиндрических образцов ( $d = 3,8 \div 7,6$  мм) из туго свернутого листа картона. При тлении сверху вниз экспериментальные данные аппроксимированы выражением

$$w^2 [\text{см}^2/\text{с}^2] = 1,74 \cdot 10^{-2} \left( \frac{1}{d} + \frac{0,4}{d^2} \right) \left( \frac{1}{T_B - T_0} - 1,7 \cdot 10^{-3} \right), \quad (1)$$

где  $T_B = 460^\circ\text{C}$  — температура самовоспламенения образца. Из (1) видно, что в изученном интервале  $d$  величина  $w$  растет по мере уменьшения  $d$  аналогично горению по боковой поверхности цилиндрических образцов полимеров.

В качестве примера по формуле (1) были рассчитаны значения  $w$  при  $d = 3,8$  и  $7,6$  мм и  $T_0 = 40 \div 150^\circ\text{C}$ :  $w = 0,080$  (0,049),  $0,094$  (0,057),  $0,101$  (0,061),  $0,120$  (0,073) при  $T_0 = 40, 80, 100$  и  $150^\circ\text{C}$  соответственно (в скобках данные для  $d = 7,6$  мм). В данном случае при уменьшении диаметра образца вдвое скорость тления возросла в  $\sim 1,65$  раза.

В работе [10] исследовано влияние толщины горизонтального слоя пробковой пыли ( $< 65$  мкм) и травяной муки на скорость тления и показано, что величина  $w$  падает с ростом  $\Delta$ :  $w = 0,057$  (0,048),  $0,055$  (0,041),  $0,049$  (0,041),  $0,045$  (0,034),  $0,043$  (0,031) при  $\Delta = 3, 8, 10, 16,5$  и  $24$  мм соответственно (в скобках — данные для травяной муки). Смысл этого эффекта в [10] не обсуждается. Отметим, что опыты проводились в кюветах, сечение которых — круговой сегмент, поэтому при изменении толщины слоя одновременно менялась и ширина свободной поверхности слоя, что также могло влиять на величину  $w$ . В [10] не указаны материал и толщина стенок кюветы. Между тем известно [12], что тонкая подложка с высокой теплопроводностью может существенно повышать скорость распространения пламени (причем этот эффект зависит от толщины слоя горючего).

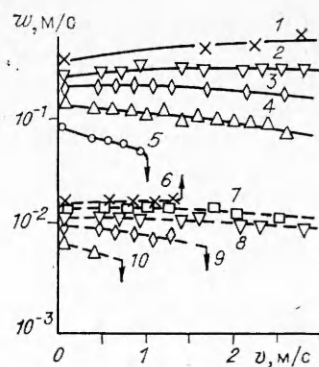
**Зависимость скорости тления от дисперсности горючего.** Данные по зависимости  $w(\delta)$  и  $u(\delta)$  (где  $\delta$  — размер частиц горючего) очень скудны. Согласно [10], увеличение размера частиц пробковой пыли от  $< 65$  до  $170$  мкм слабо влияет на  $w$  при тлении: при низких скоростях  $v$  обдува поверхности слоя  $w$  слабо повышается с ростом  $\delta$ , а при высоких — несколько падает с увеличением  $\delta$ .

В работе [7] при тлении травяной муки ( $\Pi = 0,78$ ) в картонных цилиндрах величина  $u$  слабо и неопределенно зависела от  $\delta$ : при  $\delta = 0,006 \div 0,63, 0,63 \div 1,0$  и  $1,0 - 1,6$  мм  $\bar{u} = 0,0075, 0,0054$  и  $0,0067$  мм/с. Увеличение  $\delta$  при  $\Pi = \text{const}$ , с одной стороны, растягивает зону тепловыделения (это должно уменьшать  $w$  и  $u$ ), а с другой — повышает прони-

<sup>1</sup> Рост  $w$  по мере уменьшения  $\Delta$  связан с тем, что волны прогрева, распространяющиеся от левой и правой стороны горящего образца, схлопываются. Чем тоньше образец, тем сильнее он прогревается и тем быстрее горит [12].

Зависимость  $w_{\varphi=-90^\circ}$  для цилиндрических образцов диаметром 4,8 мм из фильтровальной бумаги от скорости потока смеси  $O_2 + N_2$  [15].

1—5 — горение; 6—10 — тление.  $c_{O_2}$ :  
1, 6 — 0,50, 7 — 0,45, 2, 8 — 0,40, 3, 9 —  
0,35, 4, 10 — 0,30, 5 — 0,25.



цаемость слоя горючего из-за роста среднего диаметра пор, что может способствовать увеличению  $w$  и  $u$ .

**Зависимость  $w(c_{O_2})$ .** Как и следовало ожидать, скорость тления возрастает при увеличении концентрации кислорода (из-за роста скорости тепловыделения в зоне реакции). Так, в [13] для цилиндрических образцов  $\alpha$ -целлюлозы диаметром 0,86 мм показано (по-видимому, при  $v \approx 0$ ), что при увеличении  $c_{O_2}$  от 0,20 до 0,60  $w$  возрастает примерно вдвое (от  $\sim 0,023$  до  $\sim 0,050$  мм/с).

В работе [14] при тлении хлопкового шнура ШХБ4-3,5 (в спутном потоке при  $v = 1$  м/с) при  $c_{O_2} = 0,15 \div 0,25$   $w \approx 0,10 \div 0,34$  мм/с. В [15] приведены зависимости  $w(v)$  при  $c_{O_2} = \text{var}$  для цилиндрических образцов из фильтровальной бумаги (см. рисунок) и картона (горение вертикально вниз). В условиях свободной конвекции обсчет данных рисунка дает:  $c_{O_2} = 0,30, 0,35, 0,40$  и  $0,50$ ,  $w = 0,068, 0,099, 0,120$  и  $0,161$  мм/с.

Таким образом, в данном случае при увеличении молярной доли кислорода в  $\sim 1,7$  раза скорость тления возрастала в  $\sim 2,4$  раза.

**Зависимость скорости тления от начальной температуры  $T_0$  образца и окружающего воздуха** изучена в работе [11] для описанных выше цилиндрических образцов из картона. Величина  $w$  растет вместе с  $T_0$  (см. выше). Исходя из этих данных, можно рассчитать значения температурного коэффициента  $\beta = d \ln w / dT_0$ . В данном случае  $\beta = (3,7 \div 4,0) \cdot 10^{-3}$  1/К и весьма слабо зависит от  $d$  и интервала температуры.

**Зависимость  $w(v)$ .** В работе [10] скорость тления слоев пробковой пыли и травяной муки монотонно и притом существенно возрастала со скоростью спутного потока воздуха вдоль поверхности слоя (при  $v \leq 7$  м/с). В случае же встречного потока воздуха  $w$  лишь незначительно зависела от  $v$  (табл. 3). Соответственно отношение  $w_{\text{сп}}/w_{\text{встр}}$  быстро росло вместе с  $v$ . Следует обратить внимание на то, что для пробковой пыли во встречном потоке на кривой  $w(v)$  имеется слабо выраженный максимум при  $v \approx 2$  м/с.

Для листов теплоизоляции из фибры [10] максимум на кривых  $w(v)$  наблюдался не только для одного образца во встречном потоке, но и для двух образцов в спутном. При дальнейшем росте  $v$  происходил

Таблица 3

$v$ , м/с	$w$ , мм/с					
	Травяная мука			Пробковая пыль (<65 мкм)		
	спутный поток	встречный поток	$\frac{w_{\text{сп}}}{w_{\text{встр}}}$	спутный поток	встречный поток	$\frac{w_{\text{сп}}}{w_{\text{встр}}}$
0,8	0,058	0,051	1,14	0,076	0,076	1,00
1,0	0,068	0,053	1,28	0,083	0,077	1,08
2,0	0,114	0,057	2,00	0,112	0,088	1,27
4,0	0,200	0,059	3,39	0,154	0,087	1,77
6,0	0,271	0,060	4,52	0,182	0,076	2,39

срыв устойчивого тления. Так же как для пробковой пыли и травяной муки (см. табл. 3), для данной теплоизоляции при  $v = 1, 2$  и  $5$  м/с  $w_{св}/w_{встр} = 1,79, 2,49$  и  $3,28$ .

В работе [14] при тлении хлопкового шнура в спутном потоке смеси  $O_2 + N_2$  при малых  $v$  величина  $w$  монотонно возрастала с ростом  $v$ , а при  $v \approx 1$  м/с кривая  $w(v)$  выходила на плато.

**Зависимость величины  $w$  от угла  $\varphi$  наклона образца к горизонтали** достаточно подробно изучена при горении полимерных материалов (см. [17], где приведена дальнейшая библиография). Для неплавящихся горючих величина  $w$  монотонно повышается с ростом  $\varphi$ : относительно слабо в интервале  $\varphi = -90^\circ \div 0$  и все быстрее и быстрее при приближении к  $\varphi = +90^\circ$ . Смысл этого результата состоит в том, что при  $\varphi = +90^\circ$  горячие газообразные продукты сгорания оттекают по направлению горения и интенсивно нагревают свежий образец. При  $\varphi = -90^\circ$  продукты сгорания оттекают в сторону, прямо противоположную направлению горения. Другими словами, зависимость  $w(\varphi)$  обусловлена влиянием естественной конвекции на теплопередачу от зоны реакции к свежему горючему. Однако для горючих, плавящихся в процессе горения (например, для полиэтилена), минимальная скорость горения наблюдается не при  $\varphi = -90^\circ$ , а для горизонтальных образцов  $\varphi = 0$  [18]. Дело в том, что при  $\varphi < 0$  расплав стекает по поверхности образца и интенсифицирует теплопередачу от пламени, что увеличивает  $w$ .

Зависимость  $w(\varphi)$  для тления изучена лишь в работе [10] для двух образцов листовой теплоизоляции из фибры. При этом минимальная скорость тления наблюдалась для горизонтальных образцов:

$\varphi$ , град	-90	-60	-30	0	+30	+60	+90
$w \cdot 10^2$ мм/с (образец 1)	3,19	3,04	2,83	2,59	3,30	3,96	4,43
(образец 3)	3,65	3,51	3,36	3,21	3,96	4,49	4,72

Смысл подобного результата в [10] не обсуждается.

Отметим, что отношение  $w_{-90^\circ}/w_0$  для образцов 1 и 3 составляет 1,23 и 1,14, а  $w_{+90^\circ}/w_0 = w_{\max}/w_{\min}$  — соответственно 1,71 и 1,47. Таким образом, зависимость  $w(\varphi)$  при тлении указанных образцов оказалась довольно слабой. Для сравнения отметим, что при горении плоских образцов ПММА в [19] получено  $w_{\max}/w_{\min} = w_{+90^\circ}/w_{-90^\circ} = 20 \div 30$  (в зависимости от толщины образца).

**Зависимость  $w$  от влажности горючего.** В работе [10] приведены данные по влиянию влажности буковых опилок ( $\delta \approx 480$  мкм) на скорость их тления. При отсутствии обдува  $w$  монотонно падает с ростом влажности опилок:  $w = 0,0178, 0,0151$  и  $0,0140$  при содержании воды 0,5, 9,4 и 18,8 %. Однако при наличии обдува эта зависимость ослаблялась и становилась сравнимой с разбросом результатов.

**Сравнение скорости тления и скорости горения.** Опыты [15] дают возможность сравнить скорости тления и горения для одного и того же материала в одинаковых условиях. Данные для цилиндрических образцов фильтровальной бумаги приведены на рисунке, а их обсчет — в табл. 4. Видно, что в условиях свободной конвекции скорость горения фильтровальной бумаги в  $\sim 20$  раз превышает скорость ее тления, при-

Таблица 4

$CO_2$	$w_{\varphi = -90^\circ}$ , мм/с								
	$v \approx 0$			$v = 1$ м/с			$v = 2$ м/с		
	тление	горение	$w_{гор}/w_{тл}$	тление	горение	$w_{гор}/w_{тл}$	тление	горение	$w_{гор}/w_{тл}$
0,30	0,068	1,40	20,6	не тлеет	1,14	—	не тлеет	0,96	—
0,35	0,099	2,08	21,0	0,083	2,04	24,5	не тлеет	1,85	—
0,40	0,120	2,53	21,1	0,118	2,91	24,7	0,108	3,07	28,4
0,50	0,161	3,69	22,9	0,168	4,44	26,4	0,137	5,30	33,7

Таблица 5

Вещество	Горючее	Характеристики слоя	$T_{\max}$ , °C	Ссылка
1	Ликоподий	Плоский, насыпная плотность, подложка — асбоцемент	145	[20]
2	Какао		160	
3	Пириты FeS <sub>2</sub>		400	
4	Угольная пыль ( $<104$ мкм)		440	
5	Угольная пыль ( $>104$ мкм)	Плоский, $\Delta = 10$ мкм	460	[4]
6	Мучная пыль (кукуруза + соя)	$\Delta = 102$ мм, $\Pi = 0,73$	430 ÷ 530	[16]
7	Древесная пыль (сосна)	$\Pi = 0,58$	600	[16]
8	Травяная мука (полидисперсная)	Цилиндр, $d = 110 \div \div 300$ мм, $l = 300$ мм, $\Pi = 0,71 \div 0,82$	480 ÷ 550 (т)	[7]
9			260 ÷ 300 (с)	
10			550 ÷ 600 (т)	
11			150 (с)	
12	Отруби (полидисперсные)	$\Pi = 0,77 \div 0,80$	520 (т)	
13	Травяная мука	Цилиндр, $d = 3$ м, $l = 2,5$ м	380	[8]
14	Бумажная масса	$\Delta > 53$ мм	620	[21]
15	Пенополиуретан	$\Delta > 53$ мм	300—500	[22]

Примечание. 1—7, 14, 15 — полуоткрытые системы, 8—13 — закрытые; т — инициирование со свободного торца, с — инициирование из середины слоя на расстоянии  $l/2$  от торцов.

чем величина  $w_{\text{гор}}/w_{\text{тл}}$  слабо зависит от  $c_{\text{O}_2}$ , а с ускорением обдува это отношение растет. Разумеется, данное отношение может зависеть также от природы горючего, размеров образца и т. д.

**Температура в зоне тления.** В табл. 5 приведены значения максимальной температуры в зоне тления в условиях естественной конвекции. (По-видимому, все опыты, отраженные в табл. 5, проведены с горизонтальными образцами, хотя в цитируемых работах это не оговорено.) Из табл. 5 следует, что ни в одном случае величина  $T_{\max}$  не превышает  $\sim 600$  °C, что в  $\sim 2$ — $2,5$  раза ниже обычных температур диффузионного горения твердых горючих на воздухе. Обращают на себя внимание необычно низкие значения  $T_{\max}$  для ликоподия и порошка какао. Этот результат может быть связан с очень низкой плотностью слоя этих порошков.

Из сравнения данных по травяной муке следует, что величина  $T_{\max}$  сильно падает при уменьшении скорости подвода кислорода за счет удлинения пути его подвода.

Транспорт кислорода к зоне тления может быть ускорен за счет обдува поверхности горючего (или увеличения скорости принудительной фильтрации окислителя через слой горючего), соответственно возрастает и  $T_{\max}$ . Так, в [16] для плоских слоев пыли получено:

	$v$ , м/с	0	4
$T_{\max}$ , °C (мучная пыль)		430 ÷ 530	630 ÷ 730
(древесная пыль)		600	680

Незначительное повышение  $T_{\max}$  с ростом  $v$  отмечено в [10] для листов теплоизоляции из фибры: при  $v = 2 \div 9$  м/с  $T_{\max} = 770 \div 790$  °C.

Для сигарет профиль температуры и величина  $T_{\max}$  пульсируют во времени. Согласно [23], в конце затяжки на периферии сигареты  $T_{\max} = 900$  °C, а между затяжками температура в этой зоне опускается до  $\sim 600$  °C. Напротив, температура в зоне пепла на конце сигареты сла-

бо зависит от времени и составляет  $700 \div 800$  °С [23]. Отметим также, что при низкотемпературном «влажном» горении в нефтяном пласте (см. выше) температура в зоне реакции может достигать 400—600 °С, а при «сверхвлажном» горении (т. е. при достаточно большой подаче воды) — всего около 200 °С [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бахман Н. Н. Закономерности распространения волны тления. I. Критические условия тления // ФГВ.— 1993.— 29, № 1.
2. Bakhman N. N., Librovich V. B. // Combust. Flame.— 1970.— 15, N 2.— P. 143.
3. Широков Б. Ф., Бахман Н. Н. Скорость выгорания пластины горючего, контактирующей со слоем твердого окислителя // ФГВ.— 1972.— 8, № 2.— С. 247.
4. Ohlemiller T. J. // Progr. Energy Combust. Sci.— 1985.— 11, N 4.— P. 277.
5. Rieber M. // Fire and Materials.— 1983.— 7, N 3.— P. 157.
6. Ortiz-Molina M. G., Toong T. Y., Moussa N. A. et al. // 17th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1979.— P. 1191.
7. Ворман Л. П., Дегтярев А. Г. // Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1989.— С. 99.
8. Ворман Л. П., Жолобов В. И., Комов В. Ф. и др. // Горение гетерогенных и газовых систем.— Черноголовка, 1986.— С. 128.
9. Материалы семинара по внутрипластовому горению нефти.— М.: ИПМ АН СССР, 1983.
10. Palmer K. N. // Combust. Flame.— 1957.— 1, N 2.— P. 129.
11. Kinbara T., Endo H., Segal S. // 11th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1967.— P. 525.
12. Бахман Н. Н. Распространение пламени вдоль поверхности контакта горючего и окислителя // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 41.
13. Moussa N. A., Toong T. Y., Garris C. A. // 16th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1976.— P. 1447.
14. Мелихов А. С., Никитенко И. Н., Штепа А. В. // Горение конденсированных систем.— Черноголовка, 1989.— С. 110.
15. Sato K., Segal S. // Combust. Flame.— 1991.— 83, N 1—2.— P. 146.
16. Leisch S. O., Kauffman C. W., Sichel M. // 20th Symp. (Int.) on Combust., The Combust. Inst., 1984.— P. 1601.
17. Бахман Н. Н., Кодолов В. И., Ларионов К. И. и др. Влияние ориентации образца твердого горючего на скорость распространения пламени вдоль его поверхности // ФГВ.— 1988.— 24, № 6.— С. 63.
18. Bakhman N. N., Aldabaev L. I., Kondrikov B. N. et al. // Combust. Flame.— 1981.— 41, N 1.— P. 17.
19. Бахман Н. Н., Лобанов И. И. Скорость распространения фронта горения по поверхности ПММА для обычных и потолочных пламен // ФГВ.— 1991.— 27, № 6.— С. 63.
20. Cohen L., Luft N. W. // Fuel.— 1955.— 34, № 2.— P. 154.
21. Ohlemiller T. J., Rogers F. E. // Combust. Sci. Technol.— 1980.— 24, N 3—4.— P. 139.
22. Ohlemiller T. J., Bellan J., Rogers F. // Combust. Flame.— 1979.— 36, N 2.— P. 197.
23. Egerton A., Gagan K., Weinberg F. J. // Ibid.— 1963.— 7, N 1.— P. 63.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/VII 1992

УДК 536.46 : 662.61

А. М. Липанов, А. В. Алиев

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ В НЕСИММЕТРИЧНОМ ГЛУХОМ ДЕФОРМИРУЕМОМ КАНАЛЕ

Исследован процесс распространения пламени по поверхности твердого топлива, размещенного в несимметричном глухом деформируемом кольцевом канале. Получены уравнения, позволяющие решать пространственную газодинамическую задачу в двумерной постановке. Показано, что несимметричность полости кольцевого канала благоприятно влияет на распространение пламени вдоль по поверхности топлива. Максимальное влияние несимметрии на скорость распространения пламени проявляется для первоначально несимметричного кольцевого канала, боковые поверхности которого не перемещаются.

© А. М. Липанов, А. В. Алиев, 1993.