

*Н. Н. Бахман, А. А. Беляев, И. Н. Лобанов,
Ш. А. Насыбулин, И. Н. Файзуллин*

ВЛИЯНИЕ ПОДЛОЖКИ НА ГОРЮЧЕСТЬ ТКАНЕЙ

Исследованию горючести тканей посвящено большое число работ, что связано с важным практическим значением этого вопроса. Основное внимание при этом уделялось природе ткани [1, 2] и подбору антипиренов (ингибиторов горения) [1]. Рассматривалось также влияние поверхностной плотности ткани (т. е. массы единицы площади ткани) [3], ее влажности [4], наличия внешнего радиационного потока тепла [5], скорости потока газа, обдувающего образец [6]. В [7] исследована скорость распространения пламени по различным направлениям относительно основы ткани.

Парадоксально, однако, что в доступной литературе отсутствуют результаты экспериментов по влиянию подложки на горючесть тканей, хотя этот вопрос имеет очевидное практическое значение для всех видов одежды и обивочных материалов. Вместе с тем имеется ряд работ [8—10], где рассмотрено влияние подложки на горение плоских или цилиндрических слоев некоторых полимеров.

Теоретический анализ влияния ряда параметров на скорость и структуру пламени, распространяющегося по поверхности образца твердого горючего в газообразном окислителе, проведен, например, в [11, 12], однако в этих работах рассматривался образец без подложки.

При исследовании роли подложки нужно выделить два случая: 1) материал контактирует с подложкой практически без зазора; 2) между материалом и подложкой имеется зазор, в котором могут протекать воздух и продукты сгорания, а при определенных условиях — распространяться пламя.

Представляет интерес вопрос о влиянии подложки на критические условия горения и на скорость распространения пламени вдоль поверхности материала.

Для опытов выбрана хлопколавсановая ткань арт. 3303 с поверхностной плотностью 290 г/м^2 по ГОСТу 12239-76. Образец размером $80 \times 700 \text{ мм}$ приклеивался по краям к рамке из текстолита (толщиной 10 мм) с прямоугольным вырезом размером $50 \times 500 \text{ мм}$. В этот вырез мог плотно вдвигаться и закрепляться в заданном положении текстолитовый вкладыш. С его помощью создавался зазор шириной $\Delta = 0 \div 10 \text{ мм}$ между вкладышем и тканью. Указанная сборка могла устанавливаться под любым углом φ к горизонтали. Опыты проведены при $\varphi = -90^\circ$ (горение вертикально вниз), $-60, -45, -30^\circ$ и 0 (горизонтально); $30, 45, 60$ и 90° (горение вертикально вверх).

Ткань поджигалась нихромовой спиралью (диаметр спирали 10 , ширина 50 мм). Все опыты проводились на атмосферном воздухе при температуре $18-20^\circ \text{C}$ и относительной влажности $60 \div 80 \%$. Скорость пламени $W = l/\tau$ рассчитывалась по времени τ (измеренному секундомером) прохождения пламенем участка ткани длиной l . Перемещение пламени фиксировалось по фронту почернения ткани.

Критический зазор между подложкой и тканью $\Delta^* = (\Delta^+ + \Delta^-)/2$, где Δ^+ — минимальный зазор, при котором устойчиво сгорал весь исследуемый участок, а Δ^- — максимальный зазор, при котором горение затухало, не дойдя до конца ткани. Критическая скорость пламени определялась как $W^* = W/\Delta^+$.

Следует отметить, что точность измерения W при горении вертикально вниз была значительно выше, чем при горении вверх. В последнем случае пламя ускорялось по ходу горения, а фронт почернения менял форму и экранировался языками пламени.

Результаты опытов приведены в таблице. Видно, что в опыте без подложки ($\Delta \rightarrow \infty$) величина W при $+90 \geq \varphi > -30^\circ$ быстро падает по мере уменьшения φ , а в интервале $\varphi = -90 \div -30^\circ$ остается практиче-

φ, град	W, мм/с при Δ, мм								
	0-1	2,5	3,5	4,0	6,5	8	9	10	∞
+90	0,4-2,0	>4	>6	>7	>8	>9	>10	>10	>15
+60	—	1,5	2	4	5	7	7	9	10
+45	—	—	1,0	1,5	3	5	6	6	7
+30	—	—	—	0,6	0,8	1,6	1,6	4	5
0	—	—	—	—	—	0,4	0,5-0,7	1,0	1,0
-30	—	—	—	—	—	—	0,8	0,7	0,7
-45	—	—	—	—	—	—	0,6	0,6	0,7
-60	—	—	—	—	—	—	0,5	0,6	0,6
-90	—	—	—	—	—	—	—	0,5	0,6

Примечание. Прочерк означает, что горение затухает на длине исследуемого участка образца.

ски постоянной. При $\Delta = 10$ мм ткань горит во всем диапазоне φ и скорость пламени не более чем на 10—20 % уступает значению в отсутствие подложки, а в случае $\Delta \leq 9$ мм образец горит уже не при всех значениях φ : чем уже зазор, тем меньше диапазон φ , где горение устойчиво.

Для каждого фиксированного φ значение W быстро падает по мере уменьшения Δ и при некотором Δ^* горение затухает. По мере роста φ величина Δ^* уменьшается (слабо при $\varphi = -90^\circ \div 0$ и сильно при $\varphi = 0 \div +60^\circ$):

φ, град	-90	-60	-45	-30	0	+30	+45	+60
Δ*, мм	9,5	8,5	8,5	8,5	7,2	3,8	3,0	1,5

Лишь при $\varphi = +90^\circ$ ткань не затухала, даже если она вплотную прилегла к подложке.

Равным образом для каждого Δ скорость пламени падала по мере уменьшения φ . При этом в случае $\Delta \leq 9$ мм существует минимальный угол наклона $\varphi^* = (\varphi^+ + \varphi^-)/2$, когда стационарное горение невозможно:

Δ, мм	9	8	6,5	4,0	3,5	2,5
φ*, град	-75	-15	+15	+15	+38	+52

Для плоского образца горючего материала, приклеенного (или плотно прижатого) к негорючей подложке, горение может протекать лишь на свободной стороне образца. Потери тепла в подложку (главным образом теплопроводностью) снижают скорость горения¹ (тем сильнее, чем тоньше исследуемый образец) и наконец приводят к затуханию при некоторой минимальной толщине образца δ^* . При отсутствии подложки образец может гореть с обеих сторон.

Существенно отметить, что зависимости $W(\delta)$ для одно- и двухстороннего горения взаимно противоположны. Если в первом случае при уменьшении δ скорость пламени падает, то во втором она, напротив, растет² [10]. Дело в том, что при двухстороннем горении волны прогрева, распространяющиеся с обеих сторон образца, схлопываются. Чем тоньше образец, тем сильнее он прогревается, что и приводит к росту W .

В данной работе исследовался более сложный случай, когда между образцом и подложкой имеется слой воздуха толщиной Δ . Здесь очевидны два предельных случая.

1. При достаточно больших Δ наблюдается двухстороннее горение. Из таблицы следует, что уже при $\Delta \geq 10$ мм подложка не влияет на величину W .

¹ Исключением является случай очень тонкой подложки с высокой теплопроводностью, которая может увеличивать скорость пламени [8].

² Конечно, это не означает, что при двухстороннем горении может гореть бесконечно тонкий образец. Действительно, по мере уменьшения δ падает тепловыделение при сгорании 1 см² образца, и теплопотери в окружающий воздух в конце концов приведут к затуханию.

2. Случай $\Delta \rightarrow 0$ соответствует одностороннему горению образца на подложке, когда ткань могла гореть лишь вертикально вверх (см. таблицу).

Таким образом, по мере уменьшения Δ двухстороннее горение переходит в одностороннее. Существенным моментом этого перехода должен являться момент исчезновения «внутреннего» пламени (между образцом и подложкой) при некотором значении Δ_* .

Можно предположить, что значения Δ_* и Δ^* определяются теплопотерями от «внутреннего» пламени в подложку, количеством воздуха в зазоре и возможностью подвода воздуха в зазор, а также характером течения продуктов сгорания внутри зазора.

Роль второго и третьего из этих факторов продемонстрирована с помощью следующих качественных опытов. Если длина образца меньше длины выреза в рамке, так что уже в начальный момент с обоих концов образца имеются «окна», благодаря которым в зазоре возникает течение воздуха и продуктов сгорания ткани, то Δ^* уменьшается, а W возрастает. Очевидно, что этот эффект сильно зависит от ориентации образца.

Как отмечалось выше, в теоретических работах [11, 12] решалась задача о распространении пламени по слою твердого горючего без подложки. В данном разделе излагаются соображения, касающиеся влияния теплонепроницаемой подложки на горение слоя полимера, и приближенно оценивается влияние теплопроводящей подложки и зазора между подложкой и горючим материалом. Попытка развитого теоретического исследования роли подложки будет предпринята в дальнейшем.

В случае теплонепроницаемой подложки при отсутствии зазора между образцом и подложкой рассмотрена теоретическая модель, в которой горение газовой смеси у поверхности горючего описывается системой уравнений, выражающих основные законы сохранения, а в качестве граничных условий используются условия в свободном потоке и на границе с твердой фазой. Получено выражение

$$W = \frac{\int_{-\infty}^0 q_{\Sigma} dx}{\delta \rho_1 c_{p1} (T_s - T_0)}. \quad (1)$$

Из (1) видно, что скорость пламени обратно пропорциональна толщине слоя горючего δ , его теплоемкости c_{p1} , плотности ρ_1 и разности между температурой газификации T_s и начальной температурой T_0 . Тепловой поток из газовой фазы к поверхности твердого горючего q_{Σ} находится из решения упомянутой выше системы уравнений. Ось x направлена вдоль поверхности горючего ($x \rightarrow -\infty$ соответствует свежей газовой смеси, а $x = 0$ — началу газификации твердого горючего).

Учет влияния теплоотвода в подложку и наличия зазора может заметно сказаться на скорости пламени и структуре его фронта. Детальное исследование этого вопроса требует внесения серьезных изменений в модель. Приближенное рассмотрение процесса теплоотвода в подложку показывает, что в (1) вместо q_{Σ} будет стоять $q_{\Sigma} - q_{\Pi}$, где q_{Π} — тепловой поток из твердого горючего в подложку, величина которого возрастает с увеличением теплопроводности материала подложки и ее толщины.

Если предположить, что в зазоре между горючим и теплонепроницаемой подложкой протекает химическая реакция в газовой фазе, то приближенное выражение для скорости пламени можно записать в виде

$$W = \frac{\int_{-\infty}^0 (q_{\Sigma} + \Delta\Phi) dx}{[\delta c_{p1} \rho_1 + \Delta c_{p2} \rho_2] (T_s - T_0)}, \quad (2)$$

где Φ — тепловыделение за счет химической реакции в зазоре; c_{p2} и ρ_2 — теплоемкость и плотность газа в зазоре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюганова М. А., Махов М. Ю., Кольев М. А. Придание огнезащитных свойств текстильным материалам // ЖВХО им. Менделеева.— 1976.— 21, № 1.— С. 90.
2. Вилкова С. А., Крупкин В. Г., Марголин А. Д. Критические условия горения материалов из волоконобразующих полимеров // ФГВ.— 1986.— 22, № 3.— С. 67.
3. Moussa N. A., Toong T. Y., Backer S. An experimental investigation of flame-spreading mechanisms over textile materials // Combust. Sci. Techn.— 1973.— 8, N 4.— P. 165.
4. Hendrix J. E., Beninate J. V. et al. Effects of moisture on oxygen index values for textiles // Textile Res. J.— 1971.— 41, N 10.— P. 854.
5. Kashiwagi T., Newman D. L. Flame spread over an inclined thin fuel surface // Combust. Flame.— 1976.— 26, N 2.— P. 163.
6. Жевлаков А. Ф., Грошев Ю. М. Влияние скорости потока окислителя на распространение пламени по тканям и пленкам // ФГВ.— 1987.— 23, № 3.— С. 36.
7. Miller B., Goswami V. C. Effects of constructional factors on the burning rates of textile structures. Part I: Woven thermoplastic fabrics // Textile Res. J.— 1971.— 41, N 12.— P. 949.
8. 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.
9. Bakman N. N., Aldabaev L. I., Kondrikov B. N. et al. Burning of polymeric coatings on copper wires and glass threads: II. Critical condition of burning // Combust. Flame.— 1981.— 41, N 1.— P. 35.
10. Бахман Н. Н. Распространение пламени вдоль поверхности контакта горючего и окислителя // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 41.
11. De Ris J. N. Spread of a laminar diffusion flame // 12th Symp. (Int.) on Combust.— Pittsburgh: The Combust. Inst., 1969.
12. Рыбанин С. С. Структура, скорость и пределы распространения диффузионного пламени по поверхности горючего материала // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем.— Черногоровка, 1977.

2. Москва

Поступила в редакцию 28/VI 1990

УДК 536.46

В. Н. Лихачев, Г. С. Сухов, Л. П. Ярин

К ТЕОРИИ ПУЗЫРЬКОВЫХ РЕАКТОРОВ ГОРЕНИЯ

Предложена математическая модель горения пузырьковых реагирующих сред, в которых теплота реакции затрачивается первоначально на разогрев парогазовой смеси, содержащейся в пузырьках, а затем через межфазную поверхность передается жидкости, обеспечивая ее прогрев и испарение. При некоторых допущениях (малое объемное содержание газовой фазы, интенсивное перемешивание исходных компонентов и конечных продуктов, квазиравновесность процесса парообразования) получены приближенные аналитические выражения для функций тепловыделения и теплоотвода, численно решено уравнение теплового баланса. Исследованы возможные режимы горения и определены области существования стационарных состояний.

Пузырьковые реагирующие среды, представляющие собой гетерогенные газожидкостные системы с развитой межфазной поверхностью, отличаются высокой интенсивностью тепло- и массообмена и большой скоростью превращения исходных компонентов в конечные продукты. Механизм горения таких сред заключается в прогреве и испарении жидкости и образовании в пузырьках, заполненных первоначально газообразным окислителем, реагирующей парогазовой смеси. Воспламенение и горение последней сопровождаются выделением теплоты, передаваемой вначале жидкому реагенту, а затем «холодным» пузырькам, обеспечивая их прогрев и воспламенение [1, 2]. Такой процесс может быть практически реализован в пузырьковых реакторах — технологических аппаратах, заполненных неподвижным или движущимся жидким реагентом, насыщенным пузырьками, содержащими газообразный окислитель.

Режим работы пузырьковых реакторов зависит от физико-химических свойств взаимодействующих компонентов, кинетики химических реакций, теплообмена с окружающей средой, а также от интенсивности межфазного тепло- и массообмена, определяющей динамическую, тепловую и концентрационную неравновесность. Существенное влияние на