

УДК 541.64:542.943

© 1992 г. Н. И. Бахман, И. И. Лобанов, Ш. А. Насыбуллин,  
И. И. Файауллин, Г. П. Шарнин

### ГОРЕНИЕ ТКАНЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДЛОЖКИ

Изучено влияние подложки (текстолит) на устойчивость и скорость горения четырех различных тканей при различных углах  $\varphi$  наклона образца к горизонтали. Определена минимальная величина зазора  $\Delta_{cr}$  между подложкой и тканью, при которой горение затухает, для открытого (без боковых стенок) и закрытого (с боковыми стенками) зазора. Для открытого зазора кривая  $\Delta_{cr}(\varphi)$ , имеет колоколообразную форму: величина  $\Delta_{cr}$  максимальна для горизонтальных образцов ( $\varphi=0$ ) и убывает с ростом  $|\varphi|$ . Для закрытого зазора  $\Delta_{cr}$  монотонно убывает с ростом  $\varphi$ . Рассмотрена возможность использования  $\Delta_{cr}$  в качестве одного из критерии горючести тканей. Изучена роль нижнего (под образцом ткани) и верхнего ( над тканью) пламени в устойчивости горения.

Имеется большое количество работ, в которых исследованы такие характеристики горючести тканей, как скорость распространения пламени  $w$  и кислородный индекс в зависимости от природы ткани [1], поверхностной плотности ткани (т. е. массы единицы площади ткани) [2], ее влажности [3], ориентации образца ткани [4], наличия внешнего радиационного потока тепла [5], скорости потока газа, обдувающего образец [6]. Большое внимание уделяется подбору ингибиторов (антипиренов), снижающих горючесть тканей [1].

Однако в доступной литературе отсутствуют исследования по влиянию подложки на величину  $w$  и критические условия горения тканей, хотя этот вопрос имеет большое практическое значение для всех видов одежды и обивочных материалов.

Проводили опыты с двумя хлопковыми тканями арт. 3217 и 3515, хлопколавсановой тканью арт. 3303, а также с этой тканью, пропитанной резиновым клеем (табл. 1). Изготовили следующую установку. Образец ткани (70×400 мм) наклеивали на тонкую (толщиной 1 мм) текстолитовую рамку (70×500 мм) с вырезом размером 50×300 мм. Рамка могла устанавливаться под любым углом  $\varphi$  к горизонтали.

Таблица 1

Характеристики исследованных тканей ( $\rho$  – поверхностная плотность,  $V$  – воздухопроницаемость)

Артикул ткани	Состав ткани	$\rho$ , г/м <sup>2</sup>	Толщина ткани, мм	$V$ , дм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·с
3217	Хлопок 100%	262	0,52	20,14
3515	Хлопок 100%	255	0,62	32,3
3303	Хлопок 80% Лавсан 20%	277	0,62	56,44
3303+БК	Ткань 3303, пропитанная*	387	0,66	28,24

\* Пропитана резиновым клеем на основе бутилкаучука (БК) (100 мас. ч)+аэросил (35 мас. ч).

(принято  $\phi = -90^\circ$  – горение вертикально вниз,  $\phi = 0$  – горизонтально,  $\phi = 90^\circ$  – вертикально вверх). Специальное устройство позволяло плавно, параллельно рамке с тканью подводить подложку из текстолита ( $70 \times 500$  мм и толщиной 10 мм) – до начала опыта или в процессе горения ткани. В последнем случае можно было проследить за эволюцией нижнего пламени.

Таким образом, в опытах на данной установке воздух мог свободно проникать сквозь в зазор между горящей тканью и подложкой («открытый» зазор).

Кроме того, проводили опыты с тканью арт. 3303 на установке с «закрытым» зазором. В этом случае образец ( $80 \times 700$  мм) прикашивали к рамке из текстолита (толщиной 10 мм) с вырезом ( $50 \times 500$  мм), в который плотно вдвигали и закрепляли в заданном положении текстолитовый вкладыш (толщиной 10 мм). Таким образом, между вкладышем и тканью создавали зазор глубиной  $\Delta = 0-10$  мм. Появления открытого и закрытого зазора отражают различные ситуации, которые могут возникнуть при горении одежды и т. д. в реальных условиях.

Все опыты проводили в покоящемся воздухе при атмосферном давлении и комнатной ( $\sim 20^\circ$ ) температуре. Поджигание ткани проводили с помощью никромовой спирали диаметром 10 и шириной 50 мм (изготовленной из проволоки диаметром 1 мм), на которую подавали напряжение 20–30 В. Скорость пламени  $w = l/t$  рассчитывали по времени  $t$  (измеренному с помощью секундомера) прохождения пламенем участка ткани длиной  $l$ . Перемещение пламени фиксировали по фронту почернения ткани. Точность определения  $w$  при горении вниз ( $\phi > 0$ ) была гораздо выше, чем при горении вверх ( $\phi < 0$ ), так как при  $\phi > 0$  пламя обычно ускорялось по длине обрата, фронт почернения ткани менял форму, отдельные языки пламени могли сильно опережать остальную часть фронта горения.

Для тонких полимерных материалов (ТПМ), в частности для тканей, типичным является двустороннее горение, при котором вдоль ТПМ распространяется верхнее (над ТПМ) и нижнее (под ТПМ) пламя<sup>1</sup> (рис. 1). Верхнее пламя имеет вид обычного диффузионного факела. Нижнее пламя напоминает пламя гомогенных газовых смесей на плоских горелках: оно сравнительно тонкое, плоское, прижатое к нижней поверхности ткани. Для ткани арт. 3303+БК, пропитанной резиновым kleem, как нижнее, так и особенно верхнее пламя значительно больше, чем для исходной ткани арт. 3303. Это естественно уже потому, что количество горючего материала на 1 см<sup>2</sup> ткани арт. 3303+БК на  $\sim 35\%$  больше, чем для исходной ткани.

При горении вниз форма и скорость пламени быстро стабилизируются; при этом как нижнее, так и верхнее пламя имеют относительно небольшие размеры. Напротив, при горении вверх величина  $w$  все время растет, а размеры нижнего и верхнего пламени сильно увеличиваются.

Отдельно рассмотрим роль нижнего и верхнего пламени в устойчивости горения. В работе [7] на примере бумаги утверждается, что нижнее пламя играет определяющую роль для устойчивости горения в целом. Если с помощью потока CO<sub>2</sub> подавить верхнее пламя, горение продолжается за счет нижнего пламени, но если сдувать нижнее пламя, не затрагивая верхнего, то горение затухает.

В данной работе в условиях открытого зазора установлены более сложные закономерности. Нижнее пламя действительно играет определяющую роль при не слишком больших  $\phi$ . Если подвести подложку к горящей ткани на достаточно малое расстояние, нижнее пламя затухает, а затем быстро происходит и затухание горения в целом. Однако при достаточно больших  $\phi$  ( $\geq 45^\circ$ ) можно получить два различных режима горения: при энергичном поджигании возникает обычное двустороннее горение; при «мягком» поджигании с верхней стороны ткани возникает только верхнее пламя. Скорость такого одностороннего горения в 2–3 раза ниже, чем для двустороннего горения. Если в первом из этих случаев подавить нижнее пламя с помощью подложки, ткань продолжает гореть за счет верхнего пламени, но  $w$  падает.

<sup>1</sup> Эти термины лишаются смысла лишь при  $\phi = \pm 90^\circ$ , где можно говорить о левом и правом пламени. Однако при наличии подложки и  $\phi = \pm 90^\circ$  нижним естественно называть пламя в зазоре между ТПМ и подложкой.

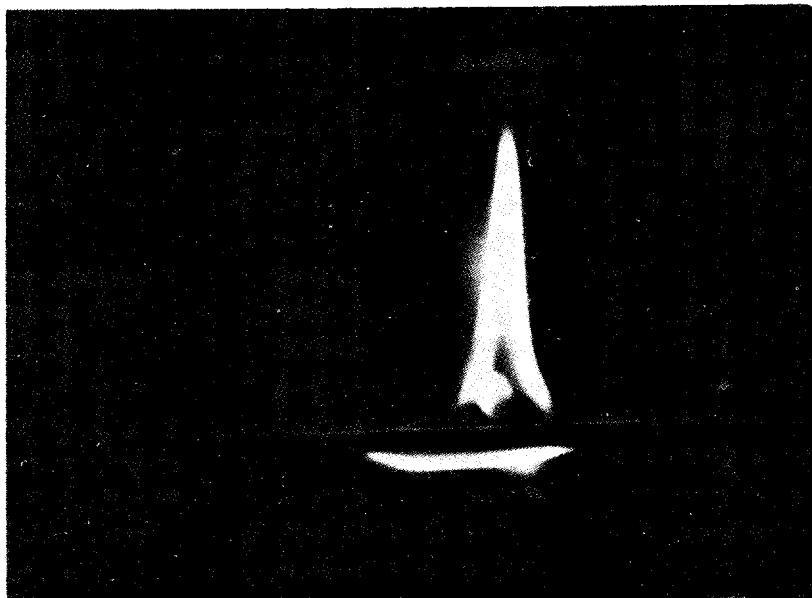


Рис. 1. Горение горизонтального образца ткани (арт. 3303) без подложки

Поскольку скорость пламени  $w$  является одним из критериев горючести, она была определена для всех изученных в данной работе тканей. Из табл. 2 следует, что при увеличении  $\phi$  в интервале  $-90 \dots -30^\circ$  скорость пламени для всех образцов остается постоянной или возрастает крайне незначительно, однако затем начинает повышаться все быстрее и быстрее (табл. 3).

В интервале  $\phi = -90 \dots -20^\circ$  значения  $w$  для тканей арт. 3217, 3515 и 3303 очень близки друг к другу. Для ткани арт. 3303+БК, пропитанной резиновым клеем, значение  $w$  при  $\phi \leq +20^\circ$  существенно ниже, чем

Таблица 2  
Скорость горения тканей без подложки при различной ориентации образцов

Артикул ткани	$w$ (мм/с) при $\phi^\circ$										
	-90	-60	-45	-30	-20	0	+20	+30	+45	+60	+90
3217	0,7	0,7	0,7	0,75	0,85	1,1	3,0	>5	~10	≥10	≥20
3515	0,6	0,6	0,7	0,75	0,85	1,0	4,0	>6	~15	≥15	≥20
3303	0,6	0,65	0,7	0,7	0,75	0,8	5,0	>8	~15	≥15	≥20
3303+БК	0,4	0,45	0,45	0,5	0,55	0,7	4,0	>8	~20	≥20	≥20

Таблица 3

Интенсивность увеличения скорости пламени по мере роста угла наклона образца

Артикул ткани	$\frac{1}{w_i} \frac{w_\phi - w_i}{\psi_\phi - \psi_i}, \%/\text{град}$		
	$\phi = -90^\circ \dots -30^\circ$	$-30^\circ \dots 0^\circ$	$0^\circ \dots +20^\circ$
3217	0,12	1,56	8,6
3515	0,42	1,11	15,0
3303	0,28	0,48	26,2
3303+БК	0,42	1,33	23,6

для исходной ткани арт. 3303. Это можно объяснить тем, что пропитка увеличивает поверхностную плотность  $\rho$  ткани (от 277 до 387 г/м<sup>2</sup>). Известно, что скорость пламени падает с ростом  $\rho$ . Разумеется, на величину  $w$  может влиять также изменение химического состава ткани.

В работе [8] для зависимости  $w(\varphi)$  было предложено выражение

$$w_\varphi/w_{\varphi=0} = 1 + k \sin^n \varphi \quad (1)$$

В работе [4] сделан вывод, что формула (1) удачно аппроксимирует экспериментальные данные для трех различных тканей (в том числе ткани арт. 3303), а также для бумаги и резинотканевого материала.

В данной работе экспериментальные точки, представленные в табл. 2, удовлетворительно группировались около прямых в координатах  $\lg(1 - w_\varphi/w_{\varphi=0})$ ,  $\lg \sin|\varphi|$  только для тканей 3515 и 3303+БК. Значения констант  $k$  и  $n$  для этих тканей представлены ниже (точность аппроксимации не хуже 5%).

Артикул ткани	3515	3303+БК
$k$	-0,43	-0,41
$n$	0,969	0,610

Была оценена также возможность описания экспериментальных данных табл. 2 с помощью упрощенного варианта формулы (1)

$$w_\varphi/w_{\varphi=0} = 1 + k \sin \varphi \quad (2)$$

Удовлетворительная аппроксимация (не хуже 6%) получена для тканей 3515 и 3303. Для этих тканей значения  $K$  соответственно -0,435 и -0,242. Таким образом, в рассмотренных случаях формулы (1) и (2) обеспечивают примерно одинаковую точность аппроксимации экспериментальных данных.

По мере уменьшения зазора  $\Delta$  между тканью и подложкой скорость пламени падает, и при  $\Delta = \Delta_{kp}$  горение затухает<sup>2</sup> в случае как открытого, так и закрытого зазора. Однако абсолютная величина  $\Delta_{kp}$  (при  $\varphi = \text{const}$ ) и вид зависимости  $\Delta_{kp}(\varphi)$  для открытого и закрытого зазоров существенно различны.

Из данных табл. 4 для открытого зазора следует, что зависимость  $\Delta_{kp}(\varphi)$  имеет колоколообразный вид (рис. 2): максимальное значение  $\Delta_{kp}$  наблюдается для горизонтальных образцов, а при увеличении  $|\varphi|$  величина  $\Delta_{kp}$  быстро уменьшается. При  $\varphi \leq 0$  значения  $\Delta_{kp}$  для всех изученных в данной работе тканей близки друг к другу. Однако в интервале  $\varphi = 30^\circ - 60^\circ$  различия между тканями проявляются достаточно четко:  $\Delta_{kp}$  убывает в ряду: арт. 3515 > арт. 3217 > арт. 3303 > арт. 3303+БК. Если рассматривать  $\Delta_{kp}$  в качестве одного из критериев горючести, то

Таблица 4

Значения  $\Delta_{kp}$  для открытого зазора

Артикул ткани	$\Delta_{kp}$ (мм) при $\varphi^*$										
	-90	-60	-45	-30	-20	0	+20	+30	+45	+60	+90
3217	~2,0	2,5	3,5	3,5	4,0	7,5	3,0	2,5	2,0	1	<1
3515	~2,0	3,0	3,5	4,0	5,0	8,0	3,5	3,5	3,0	2	<1
3303	~2,0	3,0	3,5	4,5	5,0	8,5	2,5	2,5	<1	<1	~
3303+БК	~1,5	3,0	3,0	3,5	3,5	7,5	1,5	<1	~0	~0	~

<sup>2</sup> Величина  $\Delta_{kp}$  определялась как  $\Delta_{kp} = (\Delta^+ + \Delta^-)/2$ , где  $\Delta^+$  — минимальный зазор, при котором устойчиво горел весь исследуемый участок ткани, а  $\Delta^-$  — максимальный зазор, при котором горение затухало, не дойдя до конца исследуемого участка.

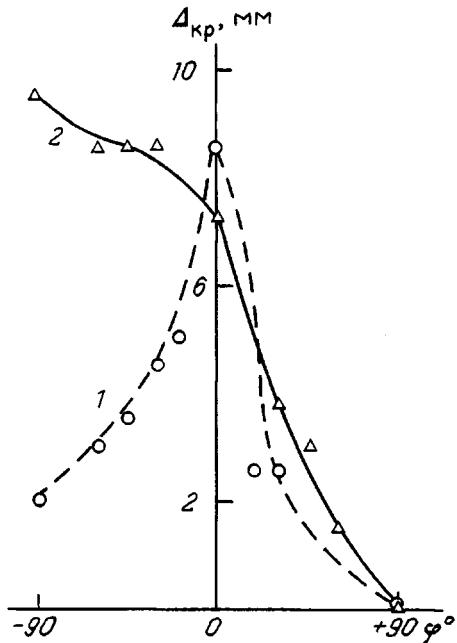


Рис. 2. Зависимость критического зазора  $\Delta_{kp}$  между тканью 3303 и подложкой от угла наклона  $\varphi$  образца для открытого (1) и закрытого зазоров (2)

она возрастает в том же ряду, т. е. минимальной горючестью отличается ткань 3515, а максимальной – 3303+БК. Действительно, ткань представляется тем более горючей, чем труднее ее погасить с помощью подложки.

Колоколообразную форму кривой  $\Delta_{kp}(\varphi)$  для открытого зазора можно объяснить следующим образом. Для горизонтальных образцов значение  $\Delta_{kp}$  максимально, так как архимедова сила прижимает продукты горения, образовавшиеся в нижнем пламени, к горящей ткани. Это затрудняет подвод кислорода к нижнему пламени, ширина зоны реакции растет, и для устойчивости горения нужен достаточно большой зазор между тканью и подложкой.

По мере увеличения  $|\varphi|$  увеличивается (пропорционально  $\sin|\varphi|$ ) скорость оттока вверх продуктов горения. При  $\varphi < 0$  это приводит к росту скорости потока холодного воздуха навстречу фронту горения. С одной стороны, это снижает величину  $w$  (табл. 2); объяснение этого эффекта дано в работе [6]. С другой стороны, по мере увеличения  $|\varphi|$  нижнее пламя вытягивается, прижимается к горящей ткани, становится более тонким и может устойчиво существовать в более узком зазоре.

При  $\varphi > 0$  направление оттока продуктов горения совпадает с направлением горения. Прогревание свежей ткани горячими продуктами горения увеличивает  $w$  и одновременно способствует снижению  $\Delta_{kp}$  (наряду с уменьшением толщины пламени по мере роста  $\varphi$ ). Кроме того, как уже отмечено выше, при достаточно больших  $\varphi$  горение может продолжаться за счет одного верхнего пламени (даже при  $\Delta \rightarrow 0$ ).

На установке с закрытым зазором была исследована только ткань 3303. Результаты опытов представлены в табл. 5. На основе данных табл. 5 была рассчитана величина  $\Delta_{kp}(\varphi)$ :

φ°	-90	-60	-45	-30	0	+30	+45	+60	+90
Δ <sub>kp</sub> , мм	9.5	8.5	8.5	8.5	7.2	3.8	3.0	1.5	0

Таблица 5

Скорость горения ткани арт. 3303 в условиях закрытого зазора

$\varphi^{\circ}$	$w$ (мм/с) при $\Delta$ мм									
	0-1	2,5	3,5	4	6,5	8	9	10	$\infty$	
+90	0,4-2,0	>4	>6	>7	>8	>9	>10	>10	>15	
+60	н/г *	1,5	2	4	5	7	7	9	10	
+45	*	н/г	1,0	1,5	3	5	6	6	7	
+30	*	*	н/г	0,6	0,8	1,6	1,6	4	5	
0	*	*	*	н/г	н/г	0,4	0,5-0,7	1,0	1,0	
-30	*	*	*	*	*	н/г	0,8	0,7	0,7	
-45	*	*	*	*	*	*	0,6	0,6	0,7	
-60	*	*	*	*	*	*	0,5	0,6	0,6	
-90	*	*	*	*	*	*	н/г	0,5	0,6	

\* Горение затухает на длине исследуемого участка ткани.

Отсюда следует, что в условиях закрытого зазора величина  $\Delta_{kp}$  монотонно уменьшается с ростом  $\varphi$  (слабо — в интервале  $\varphi = -90 \dots 0^\circ$  и сильно — при  $\varphi = 0 \dots 90^\circ$ ).

Таким образом, вид кривой  $\Delta_{kp}(\varphi)$  существенно различен для открытого и закрытого зазоров (рис. 2). Возможно, это связано с неодинаковыми условиями подвода воздуха к нижнему пламени в указанных случаях. Данное различие сильно выражено при  $\varphi < 0$ . Здесь в условиях закрытого зазора нижнее пламя может подпитываться только за счет того воздуха, который первоначально находился в зазоре (и в который к тому же частично подсасываются газообразные продукты горения ткани). Напротив, при  $\varphi > 0$  различия в величине  $\Delta_{kp}$  для открытого и закрытого зазоров малы, так как в обоих случаях воздух может подсасываться снизу, через окно, образованное после горения нижнего участка ткани.

Если рассматривать величину  $\Delta_{kp}$  в качестве одного из критериев горючести ткани, то приведенные выше результаты, согласно которым  $(\Delta_{kp})_{откр} < (\Delta_{kp})_{закр}$ , показывают, что открытый зазор более опасен с точки зрения горючести ткани.

Отметим теперь еще один результат для закрытого зазора, который следует из табл. 5. При каждом фиксированном значении  $\Delta = \text{const} \leq 9$  мм существует минимальный угол наклона образца  $\varphi_{kp} = (\varphi^+ + \varphi^-)/2$ , при котором горение затухает:

$\Delta$ , мм	9	8	6,5	4,0	3,5	2,5
$\varphi_{kp}^\circ$	-75	-15	+15	+15	+38	+52

Величина  $\varphi_{kp}$  также может быть использована в качестве одного из критериев горючести для различных материалов — как при наличии, так и при отсутствии подложки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюганова М. А., Махов М. Ю., Кольев М. А. // ЖВХО им. Д. И. Менделеева. 1976. Т. 21. № 1. С. 90.
2. Moussa N. A., Toong T. Y., Backer S. // Combust. Sci. Technol. 1973. V. 8. № 4. P. 165.
3. Hendrix J. E., Beninate I. V., Drake G. L., Reeves W. A. // Textile Res. J. 1971. V. 41. № 10. P. 854.
4. Насыбуллин Ш. А., Зарипов М. А., Файзуллин И. Н. // Высокомолек. соед. А. 1989. Т. 31. № 5. С. 332.
5. Kashiwagi A., Newman D. L. // Combust. Flame. 1976. V. 26. № 2. P. 163.

6. Жевлаков А. Ф., Грошев Ю. М. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 3. С. 36.
7. Абдураимов И. М., Андросов А. С., Крылов Е. В. // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15. № 4. С. 60.
8. Бахман Н. Н., Коодолов В. И., Ларионов К. И., Лобанов И. Н. // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24. № 6. С. 63.

Институт химической физики  
им. Н. Н. Семёнова  
Российской Академии наук, Москва

Поступила в редакцию  
01.07.91

N. N. Bakhman, I. N. Lobanov, Sh. A. Nasybullin,  
I. N. Faizullin, G. P. Sharin

### BURNING OF FABRICS WITH CARRIERS

#### Summary

The carrier (textolite) effect on stability and burning rate of four different fabrics for various  $\varphi$  angles of inclination of a sample to a horizontal. The minimal value of the clearance between a fabric and carrier ( $\Delta_{cr}$ ) when burning goes out has been determined for the open (without side walls) and closed (with side walls) clearance. For the open clearance of  $\Delta_{cr}(\varphi)$  curve is of the bell-like shape: the  $\Delta_{cr}$  value is maximal for horizontal samples ( $\varphi=0$ ) and decreases with increase of  $|\varphi|$ . For the closed clearance  $\Delta_{cr}$  decreases monotonously with increase of  $\varphi$ . The possibility to use  $\Delta_{cr}$  as a criterion of combustibility of fabrics is discussed. The role of lower (below the fabric sample) and upper (above the fabric sample) flame in stability of burning has been studied.