

ного горения к турбулентному описывается той же формулой

$$u_* \rho_1 = \frac{\delta_1 (T_r^*)^4}{c (T_1 - T_0^*) + L} \quad (8)$$

Из (7) и (8) получим следующую связь:

$$u_1 = u_* \left( \frac{T_r}{T_r^*} \right)^4 \cdot \frac{c (T_1 - T_0^*) + L}{c (T_1 - T_0) + L} \quad (9)$$

Разложив  $(T_r/T_r^*)^4$  в ряд Тейлора в точке  $T_r^*$  и считая, что  $dT_r/dT_0=1$ , получим

$$u_1 \simeq u_* \left( 1 - 4 \frac{T_0 - T_0^*}{T_r^*} \right) \frac{c (T_1 - T_0^*) + L}{c (T_1 - T_0) + L}, \quad (10)$$

где  $u_*$  и  $T_r^*$  относятся к температуре ( $T_0^*$ ) перехода от нормального горения к пульсирующему. Приняв  $T_0^* = 90^\circ \text{C}$  и  $u_*$  равной скорости горения при такой температуре, рассчитаем по формуле (10) скорость выгорания вещества при  $T_0 = 110^\circ \text{C}$ . Рассчитанные скорости выгорания (табл. 6) близки к измеренным ( $u_0$ ).

При высоких температурах горение пульсирующее (см. рис. 6, в), что также находится в соответствии с предложенным механизмом.

Таблица 6

р. ат	$u_1$ , см/с	$\bar{u}$ , см/с	$u_0$ , см/с
50	0,49	0,46	0,43
80	0,77	0,73	0,7
120	1,04	0,98	1,0
180	1,43	1,41	1,5

Поступила в редакцию  
10/X 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., «Наука», 1966.
2. Б. Н. Кондриков, В. М. Райкова, Б. С. Самсонов. ФГВ, 1973, 9, 1.
3. К. К. Андреев, Лю Бао-фен. В сб. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1963, с. 349.
4. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л., «Химия», 1973.
5. А. А. Зенин. ПМТФ, 1963, 5.
6. А. Д. Марголин, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1966, 2, 2.
7. К. К. Андреев, М. С. Плясунов. В сб. Теория взрывчатых веществ. М., «Высшая школа», 1967, с. 263.
8. F. N. Pollard, R. M. H. Wyatt. Trans. Far. Soc., 1950, 46, 281.
9. Б. С. Светлов, Б. А. Лурье, Г. Е. Корнилова. В сб. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 780.

УДК 662.612.3.63

#### О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ГОРЕНИИ СЛОЯ ХВОИ

А. И. Сухинин  
(Красноярск)

Горение хвои определяет процесс распространения низового и верхового пожара во многих типах леса. С целью изучения теплообмена и структуры фронта горения при его движении по слою опавшей сосновой

хвои проведены температурные измерения в газовой и конденсированной фазах. Термопары были натянуты в виде параллельных струн, их спаи находились на одной вертикали. Использовались хромель-алюмелевые термопары диаметром 50 мкм; их сигналы подавались на усилитель постоянного тока и регистрировались осциллографом Н-700.

Термопары, записывающие температуру газа, располагались на высоте 2 и 40 мм над хвоинкой, лежащей на поверхности слоя, и на глубине 2 мм под ней. Разогрев твердой фазы фиксировался термопарой, заделанной внутрь хвоинки. Место заделки представляло поперечное отверстие, не превышающее 100 мкм. После введения термопары оно слегка сжималось для обеспечения теплового контакта. Хвоинки-образцы отбирались одинакового эквивалентного диаметра (0,06 см), соответствующего модальному. Образцы высушивались или увлажнялись до требуемого влагосодержания.

Исследование горения слоев проводилось на стенде, имеющем асбокартонную дорожку 25×70 см. С боков слои экранировались бортиками. Шарнирное устройство позволяло задавать угол наклона слоя к горизонту. На дорожку укладывалось определенное количество хвои так, чтобы слой представлял равномерно распределенную массу беспорядочно ориентированных хвоинок. Все опыты проводились в спокойной атмосфере.

Перед каждым опытом на поверхность слоя устанавливалось термопарное устройство с образцовыми хвоинками. Последние ориентировали вдоль направления распространения, фиксировали угол наклона слоя  $\beta$ , отсчитывая его от горизонтальной плоскости (знак минус соответствует распространению пламени снизу вверх), запас горючего на единицу площади  $M$ , толщину слоя для определения компактности  $K$  (доля объема горючего в объеме слоя), а также брали навеску для определения влагосодержания  $W$ . Зажигание производилось с помощью смоченного спиртом асбестового шнура, что давало прямолинейную ведущую кромку фронта горения. Во время опыта кроме термопарных измерений регистрировалась скорость продвижения пламени как по слою в целом, так и по нитям, образованным из связанных или состыкованных хвоинок и уложенным на поверхность слоя вдоль направления распространения. Дополнительно измерялись высота пламени  $H$  и излучение зоны горения в непосредственной близости от пламени (измерения проведены Э. В. Коновым). Калориметр располагался на уровне поверхности слоя, момент начала конвективного нагрева характеризовался изломом на кривой разогрева калориметра.

В ряде экспериментов записывался разогрев частиц, лежащих внутри слоя на той же вертикали, что и поверхностная образцовая хвоинка. В другой серии опытов зондировался факел пламени по фронтальной и тыльной поверхности движущимися термопарами. В этом случае температурная запись синхронизировалась с киносъемкой, что упростило расшифровку осциллограмм.

Типичное температурное распределение показано на рис. 1, результаты измерений сведены в таблицу. Они представляют среднеарифметические значения при пяти повторениях опыта. Доверительный интервал при надежности 0,95 составлял в среднем 18% от указанных значений. В целом температурное поле можно разбить на следующие зоны (рис. 1):

0 — нагрев поверхностных частиц излучением и одновременное их охлаждение воздухом, втекающим во фронт горения. Здесь же происходит частичное подсушивание материала;

I — нагрев материала до температуры газификации  $T_{г} \approx 300^{\circ}\text{C}$  излучением и конвекцией в слое газа, примыкающем к поверхности фронта пламени,  $x=0$  — координата, разделяющая зоны 0 и I;

II — нагрев материала от  $T_{г}$  до максимальной температуры горения углеродистого остатка;

III — догорание материала.

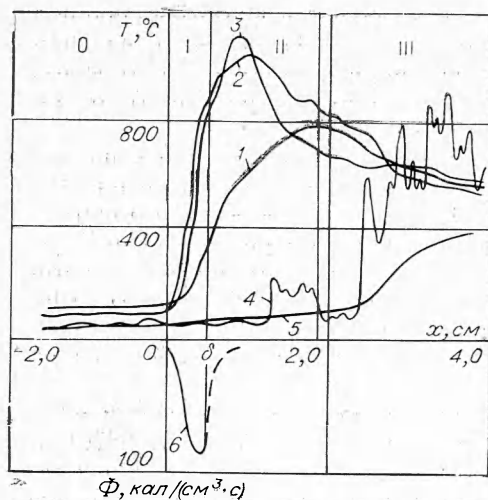


Рис. 1. Температурные профили для горящего слоя ( $\beta=0$ ,  $M=0,9$  кг/м<sup>2</sup>,  $K=0,046$ ,  $W=1,5\%$ ).

1 — разогрев поверхностной хвоинки; 2 — температура газовой фазы над хвоинкой, 2 мм от нее; 3 — температура газовой фазы под хвоинкой, 2 мм от нее; 4 — температура газовой фазы на высоте 40 мм от поверхности слоя; 5 — разогрев частицы внутри слоя на глубине 20 мм от поверхности; 6 — распределение скоростей объемного тепловыделения внутри поверхностной хвоинки.

Кривая 1 описывает разогрев поверхностной частицы, причем в зоне 0 градиент температуры хвои сохраняет практически постоянное значение  $\nabla_1$ . Далее температура частицы резко повышается  $\nabla_2$  до значения  $T_{f1}$ , а затем с меньшим наклоном  $\nabla_3$  достигает максимальной температуры горения углеродистого остатка  $T_{f2}$  и понижается до  $T_{f3}$  в зоне III.

Температура газовой фазы ( $T_g$ ) вблизи той же частицы (кривые 2, 3) повышается также до подхода пламени, но в зоне 0 остается меньшей температуры конденсированной фазы. В зоне I температура газа резко возрастает вследствие теплопроводности от факела пламени от

Параметр	Размерность	Тепловые характеристики горящего слоя сосновой хвои														
		0	0,3	0,9	1,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3				
$\beta$	град	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+21	-23
$M$	кг/м <sup>2</sup>	0,3	0,9	1,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$K \cdot 10^2$		4,6	4,6	4,6	2,2	7,8	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
$W$	%	1,1	1,5	1,5	1,5	1,5	6	8	11	5	5	5	5	5	5	5
$u$	мм/с	2,6	3,2	3,4	4,0	2,4	1,7	1,4	1,2	1,8	5,9					
$H$	см	18	40	56	40	18	8	7	4	—	—					
$q$	кал/(см <sup>2</sup> · с)	0,7	0,8	0,9	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,7	—					
$\nabla_1$	°C/см	12	10	11	9	15	18	19	18	17	9					
$T_{f0}$	°C	85	110	130	127	90	80	83	75	90	110					
$\nabla_2$	°C/см	1300	1030	1100	1010	1120	1930	2140	1940	2010	120					
$u \cdot \nabla_2$	°C/с	340	330	370	400	270	330	3000	230	360	70					
$T_{f1}$	°C	500	490	490	470	410	550	510	500	480	—					
$\nabla_3$	°C/см	500	440	310	260	560	740	770	850	780	—					
$T_{f2}$	°C	790	800	780	900	660	880	810	780	880	660					
$T_{f3}$	°C	600	500	5700	500	510	510	590	730	610	470					
$T_{g0}$	°C	80	85	108	90	60	80	80	73	70	105					
$\nabla_g$	°C/см	2190	1980	2020	2350	1730	3000	2900	3300	2800	—					
$T_{g1}$	°C	970	1050	1060	1030	780	1040	1020	1010	1020	940					
$T_{g3}$	°C	525	580	590	510	610	530	540	560	610	640					
$\delta$	мм	2,6	3,8	3,1	3,6	3,1	1,7	1,7	1,7	1,6	26,5					
$\int_0^{\delta} \Phi(x) dx$	кал/(см <sup>2</sup> · с)	12,6	13,6	12,9	15,3	11,2	8,0	6,4	5,6	8,2	—					
$\int_0^{\infty} \Phi(x) dx$	кал/(см <sup>2</sup> · с)	16,4	20,0	21,3	25,1	15,0	10,2	8,3	7,1	10,9	—					
$\alpha \cdot 10^3$	кал/(см <sup>2</sup> · с · град)	2,3	1,6	2,1	2,2	1,8	3,5	3,4	3,2	2,5	—					
$\alpha_0 \cdot 10^3$	кал/(см <sup>2</sup> · с · град)	2,8	2,2	2,1	1,9	2,1	2,5	2,1	2,4	2,6	—					
$k_1$	%	23	32	30	27	25	14	13	13	19	—					
$k_0$	%	34	50	50	56	46	29	29	25	33	—					

$T_{g0}$  до  $T_{g1}$ , наклон кривых описывается градиентом  $\nabla_g$ . В зоне II обе кривые имеют четко выраженный пик температуры, по ширине соответствующий основанию фронтальной поверхности факела. В зоне догорания  $T_g$  уменьшается до  $T_{g3}$ , сопровождаясь слабыми колебаниями. На высоте 4 см от поверхности слоя появляются пульсации температуры (см. рис. 1, 4), амплитуда которых достигает  $600^\circ$ , причем на низкочастотные колебания ( $\sim 0,5$  Гц) накладываются высокочастотные ( $\sim 20$  Гц). Следовательно, уже на этой высоте развивается турбулентное горение.

При распространении пламени сверху вниз по наклонному слою температурное поле сохраняет описанный выше характер, лишь кривая 4 сдвигается правее из-за большего отклонения пламени назад. В случае горения снизу вверх перед фронтом пламени появляются пульсации температуры в газовой фазе уже на уровне поверхности слоя. Киньсъемка показала, что они вызваны завихрениями пламени на передней кромке и его случайными контактами с горючим материалом. Указанное обстоятельство явилось причиной замедленного темпа разогрева материала и  $\nabla_2$  по сравнению с другими условиями горения, т. е. нарушения пропорциональности между шириной зоны I и скоростью распространения пламени. Аналогичный эффект должен иметь место при воздействии попутного ветра, становясь в некоторых условиях определяющим способом теплопередачи.

Зондирование пламени показало, что средняя температура его фронтальной поверхности при движении термопар вверх начинает убывать примерно с  $0,5 H$ . Максимальная температура верхних языков пламени составляла  $\sim 700^\circ\text{C}$ . За границей светящейся области температура газа  $\sim 300^\circ\text{C}$ . Охлаждение связано с интенсивным перемешиванием продуктов сгорания с окружающим воздухом, кроме того, в верхнюю область факела попадают продукты пиролиза с меньшим тепловым эффектом [1]. Следовательно, с учетом граничной температуры воспламенения растительных материалов  $500^\circ\text{C}$  [2] воспламенение хвои пламенем низового пожара может произойти лишь в светящейся области факела. Поэтому положение верхних языков пламени, т. е. его высота, будет определять, как это и наблюдалось на естественных пожарах, переход огня в кроны деревьев.

Путем обработки осциллограмм и фотографий установлено, что под действием втекающего воздушного потока фронт пламени отклоняется назад от вертикали на  $30-45^\circ$ . Это позволяет оценить скорость подтока вблизи поверхности слоя. Она составляет  $\sim 0,4$  м/с при скорости газовых потоков в факеле  $\sim 1,1$  м/с.

Запись разогрева хвоинок, расположенных внутри слоя, дала возможность оценить наклон поверхности, разделяющей свежее горючее от сгоревшего. Установлено, что с увеличением компактности от  $0,022$  до  $0,078$  угол отклонения от вертикали увеличивается от  $34$  до  $76^\circ$ , что указывает на возрастание теплоотвода из зоны горения поверхностных хвоинок внутрь слоя. Теплоотвод обусловлен затрудненной подачей кислорода, приводящей к уменьшению температуры горения  $T_{g1}$  до  $900^\circ\text{C}$  и  $T_{j2}$  до  $440^\circ\text{C}$  в центре слоя. Имеет место также теплоотдача в инертную подложку: на расстоянии  $\sim 2$  мм от нее  $T_{g1}$  понизилась до  $780^\circ\text{C}$ , даже при горении рыхлого слоя.

Анализ температурных профилей и фотографий позволяет представить схематически структуру фронта горения горизонтального слоя (рис. 2). Свежий материал 1 отделен от разложившегося поверхностью 2, отклоненной в сторону зоны горения на угол  $\varphi_1$ . Над слоем около его поверхности имеется узкое ( $\sim 1$  см) ламинарное пламя 3, также отклоненное внутрь зоны горения. С высотой оно переходит в широкий турбулентный факел 4, к которому с тыльной стороны примыкает область продуктов разложения хвои 5. Далее следует область продуктов сгорания углеродистого остатка 6, выгорающего с поверхности слоя 7.

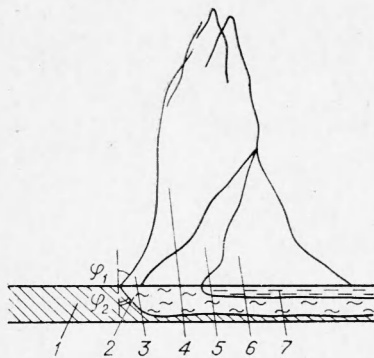


Рис. 2. Структура слоя, горящего в спокойной атмосфере.

При определенных условиях область 6 затрудняет доступ кислорода к продуктам пиролиза со стороны тыльной кромки.

Экспериментально установлено, что по нити, составленной из поверхностных хвоинок и ориентированной вдоль направления распространения, горение продвигается практически с той же скоростью, что и по всему слою. Это устанавливает связь между горением отдельных частиц и их совокупностью в виде слоя. К горению нити можно применить рассуждения, приведенные для случая одиночных хвоинок [3], но с учетом условной, которые создаются при горении слоя в целом.

Температурные поля в газовой и конденсированной фазах формируются в результате совместного действия этих условий и дают возможность измерить результирующие тепловые потоки, идущие на нагрев хвои.

Полагая, что влияние лучистого и конвективного потоков, поступающих через боковую поверхность, эквивалентно объемному тепловыделению внутри хвоинки и произведя графическое дифференцирование кривой  $I$ , получим пространственное распределение скоростей объемного тепловыделения в частице  $\Phi(x)$  (см. рис. 1, б). Максимум тепловыделения расположен на передней кромке фронта горения. Здесь идут процессы теплообмена, определяющие скорость распространения пламени, а также создаются наиболее благоприятные условия для протекания реакций горения, обусловившие максимум температуры (см. рис. 1, 2, 3) и узкое светящееся пламя у поверхности слоя.

Тепло, поступившее извне через боковую поверхность хвоинки в зоне I, полностью расходуется на испарение влаги и нагрев материала от  $T_{j0}$  до  $T_n$ , что выражается соотношением:

$$\frac{4\delta}{d} [a_c \alpha (\bar{T}_g - \bar{T}_f) + a_r \varepsilon q] = \rho u L \frac{w}{1+w} + \int_0^{\delta} \Phi(x) dx, \quad (1)$$

где  $\delta$  — ширина зоны I;  $d=0,06$  см — эквивалентный диаметр хвоинки;  $a_c \approx 1$ ,  $a_r \approx 0,3$  — доля поверхности, участвующая в теплообмене;  $\alpha$  —

коэффициент конвективного нагрева;  $\bar{T}_g = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_g(x) dx$ ;  $\bar{T}_f = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_f(x) dx$ ;

$\varepsilon=0,8$  — коэффициент поглощения излучения материалом;  $q$  — лучистый поток, измеренный вблизи пламени;  $\rho=0,66$  г/см<sup>3</sup> — плотность хвои;  $L=710$  кал/г — суммарная теплота десорбции и испарения влаги;  $u$  — скорость распространения пламени.

Соотношение (1) позволяет вычислить коэффициент  $\alpha$  для исследованных условий горения, если воспользоваться измеренными значениями  $u$ ,  $q$ , данными температурных распределений и оценками, приведенными выше. Как следует из таблицы, он слабо возрастает с увеличением влагосодержания и по величине близок к значению  $\alpha$  для одиночной хвоинки, горящей вне слоя ( $2,5 \cdot 10^{-3}$  кал/(см<sup>2</sup>·с·град)).

В таблице приведены также значения коэффициента конвективного охлаждения горячего в зоне 0 ( $\alpha_0$ ), рассчитанные из условия теплового равновесия:

$$a_r \varepsilon q = \alpha_0 (T_{j0} - T_g).$$

Видно, что  $\alpha \approx \alpha_0$ , т. е. смена охлаждения нагревом не приводит к существенному изменению коэффициента теплообмена.

