

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО СЛОЮ СОСНОВОЙ ХВОИ

*A. И. Сухинин, Э. В. Конев, Н. П. Курбатский  
(Красноярск)*

На процесс горения лесных пожаров сильное влияние через температуру пламени, ширину зоны теплообмена, коэффициенты теплообмена и т. д. оказывают условия горения (ветер, рельеф, влагосодержание и т. д.). Важно выявить, на какие параметры фронта горения и как влияют условия горения.

В данной работе описаны результаты измерений параметров фронта горения слоя из опавшей сосновой хвои в зависимости от 1) запаса и компактности слоя — параметров, характеризующих слой, 2) угла наклона слоя — параметра, моделирующего рельеф местности, 3) влагосодержания — параметра, выражающего внутренние свойства горючего. Результаты опытов составлены с расчетом.

### Методика измерений

Исследования проводились на стенде с покрытой асбокартоном дорожкой длиной 70 и шириной 25 см. С боков дорожка экранировалась бортиками высотой 3—4 см. Шарнирное устройство позволяло задавать угол наклона дорожки к горизонту. Горючим материалом служила отмершая хвоя сосны обыкновенной, широко распространенной на территории СССР. Этот вид горючего достаточно однороден по составу и свойствам и позволяет воспроизводить опыты с достаточной степенью точности.

Перед каждым опытом фиксировалась начальная температура среды  $T_0$ , запас — количество хвои на единице площади —  $M$ , толщина слоя  $h$ , определялось влагосодержание слоя  $W$  путем высушивания пробы при  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , во время опыта линейкой измерялась высота пламени  $H_{пл}$  и ширина кромки  $\delta_{кр}$ . Скорость продвижения фронта пламени и определялась по времени между моментами перегорания двух нитей, натянутых поперек слоя на заданном расстоянии одна от другой. Взвешиванием твердого остатка определялась полнота сгорания. Опыты повторялись 5÷10 раз. Часть опытов проведена с температурными измерениями, регистрацией лучистого потока от фронта горения и фотографии киносъемкой. Температуру измеряли 50-микронными хромель-алюмелевыми термопарами. Спай термопар находились внутри хвоинок, расположенных на поверхности слоя или в газовой фазе на расстоянии  $\sim 2$  мм от хвоинок. Лучистый поток определялся по скорости разогрева медного цилиндра высотой 3 и диаметром 7 мм. Торцевая, обращенная к пламени поверхность его была зачернена, а боковая заэкранирована от излучения. Разогрев цилиндра регистрировался термопарой медь — константан на потенциометре ЭПП-09 со временем пробега шкалы карткой 1 с.

Для достоверного измерения параметров фронта пламени длина кромки была принята  $l=25$  см. Это на порядок больше ширины той зоны внутри фронта пламени  $\delta$ , которая определяет скорость распространения. Как показали термопарные измерения, ширина этой зоны составляет 0,3—0,5 см, что дает отношение  $l/\delta \approx 60$ . Одновременно длина

кромки была много больше расстояния между точками соприкосновения хвоинок между собой. Последнее в наших опытах составляло 3—4 мм. Контрольные опыты показали, что увеличение длины горящей кромки до 90 см приводит к возрастанию скорости распространения на 5÷6%.

Необходимые для анализа горения температура  $T_\delta$  в точке δ (см. температурные профили в работе [63]) и средняя величина лучистого потока  $\bar{q}$  в зоне 0—δ наряду с другими данными приведены ниже в зависимости от условий горения. Среднеквадратическая погрешность их составляла 10÷15 К при измерении  $T_\delta$  и около 0,05 кал/(см<sup>2</sup>·с) при измерении  $\bar{q}$ .

### Влияние влагосодержания

Полученные данные представлены в табл. 1. Скорость распространения убывает  $\sim 3$  мм/с у сухого горючего до  $\approx 1$  мм/с при влагосодержании  $\sim 13\%$ , которое соответствует пределу горения слоя. В интервале от 13 до 15% фронт горения затухает, не доходя до края слоя. При этом разогрев ( $T_\delta - T_0$ ) и средний в зоне 0—δ лучистый поток также убывают.

Высота пламени убывает от 20 см у сухого горючего материала до 3—5 см на пределе горения по влагосодержанию. Полнота сгорания  $\eta = 1 - (P_h/P_n)$ , где  $P_n$  — начальный вес сухого горючего,  $P_h$  — вес твердого остатка, слабо зависит от влагосодержания слоя и составляет около 80% от первоначальной массы горючего. В интервале  $0 < W < 0,1$  зависимость  $\frac{1+W}{u}(W)$  линейна. Соответственно функция  $u(W)$  в этой области может быть описана соотношением

$$u = u_0 \frac{1+W}{1+AW}, \quad (1)$$

где  $u_0$  — скорость распространения пламени по слою при  $W=0 \sim 3,0$  мм/с,  $A=15,8$ . Это соотношение хорошо выражает зависимость также и при горении отдельных хвоинок [1], и слоя из опавшей хвои сосны красной [2]. В этих случаях  $u_0=4,25$  мм/с,  $A=8,8$  и  $u_0=5,7$  мм/с,  $A=10,0$  соответственно.

Таблица 1  
Влияние влагосодержания на параметры горения ( $T_0=296$  К;  $M=0,3$  кг/м<sup>2</sup>,  $h=1$  см)

Количество опытов	$100 \cdot W$ , %	$u$ , мм/с	$u^{-1}$ , с/мм	$\frac{1+W}{u}$ , с/мм	$H_{пл}$ , см	$\eta$ , %	$(T_\delta - T_0)$ , К	$\bar{q}$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)
8	$0,26 \pm 0,12$	$2,89 \pm 0,12$	0,347	0,350	20	80	62	—
12	$1,10 \pm 0,19$	$2,57 \pm 0,12$	0,3890	0,393	18	75	61	0,70
10	$2,30 \pm 0,30$	$2,46 \pm 0,26$	0,406	0,415	17	81	59	—
6	$4,40 \pm 0,43$	$1,83 \pm 0,24$	0,546	0,572	12	82	57	—
8	$6,90 \pm 0,34$	$1,61 \pm 0,10$	0,622	0,663	11	77	54	0,65
10	$8,40 \pm 0,26$	$1,37 \pm 0,10$	0,730	0,786	8	78	53	—
8	$9,50 \pm 0,12$	$1,30 \pm 0,10$	0,790	0,840	7	83	52	—
7	$11,5 \pm 0,26$	$1,14 \pm 0,14$	0,877	0,973	5	77	50	—
12	$13,0 \pm 0,14$	$1,00 \pm 0,11$	1,00	1,13	4	83	47	0,5

Примечание. Значения  $T_\delta - T_0$  получены методом интерполяции. В графах 2 и 3 приведены значения доверительного интервала при надежности 0,95.

На пределе горения фронт пламени сначала сильно искривляется, а затем разбивается на отдельные очаги. Последние распространяются по слою уже независимо друг от друга по извилистому пути. Видимо, по этой причине скорость распространения пламени вблизи предела уменьшается сильнее.

### Влияние запаса

Данные о влиянии запаса на процесс горения представлены в табл. 2. Зависимость скорости распространения от запаса выражается кривой с постепенно уменьшающимся наклоном и может быть описана соотношением

$$u = u_0(1 - e^{-BM}),$$

где  $u_0 \sim 3,6 \text{ мм/с}$  — скорость распространения при бесконечном запасе ( $W=1 \div 2\%$ ). Параметр  $B$ , по-видимому, зависит от влагосодержания, но в первом приближении может быть принят равным  $4 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При запасе  $\sim 0,1 \text{ кг}/\text{м}^2$  и менее горение становится невозможным. В области малых запасов зависимость близка к линейной, как это было получено М. А. Софоновым [3] на травянистом опаде. В области больших запасов связь практически отсутствует, что также соответствует литературным данным [4].

Из табл. 2 следует далее, что разогрев хвои перед фронтом пламени ( $T_\delta - T_0$ ) обычно изменяется довольно сильно от  $\sim 30 \text{ К}$  вблизи предела горения до  $110 \text{ К}$ . На участке плато  $\bar{q}$  возрастает от  $0,7 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при  $M=0,3 \text{ кг}/\text{м}^2$  до  $0,84 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  при  $M=1,2 \text{ кг}/\text{м}^2$ , в то же время полнота сгорания уменьшается, а высота пламени возрастает с увеличением запаса. Интересно отметить, что слой при этом сгорал в большинстве случаев не полностью. При  $M=0,9 \text{ кг}/\text{м}^2$ , например, остаток составлял  $37\%$  и был способен после разрыхления гореть со скоростью  $2,8 \text{ мм/с}$ , мало отличающейся от первоначальной ( $\sim 3,1 \text{ мм/с}$ ). Однако при очень больших запасах, а также при наличии воздушных потоков слой хвои становится способным к тлению, причем он почти полностью сгорает.

Для выяснения роли подсушивания горючего материала в ряде опытов на поверхности слоя укладывали хвоинки с заранее измеренным влагосодержанием, составлявшим  $\sim 10\%$ . Затем их извлекали из слоя непосредственно перед фронтом пламени, продвигающимся по слою,

Таблица 2  
Влияние запаса на параметры горения ( $T_0 = 295 \text{ К}, 100 \cdot W = 1 \div 2\%$ )

Количество опытов	$M, \text{ кг}/\text{м}^2$	$h, \text{ см}$	$u, \text{ мм/с}$	$H_{\text{пл}}, \text{ см}$	$\eta, \%$	$(T_\delta - T_0), \text{ К}$	$\bar{q}, \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
6	0,09	—	$1,31 \pm 0,13$	3	60	30	( $\sim 0,35$ )
6	0,15	0,5	$2,16 \pm 0,18$	4	78	—	—
4	0,20	—	$2,31 \pm 0,20$	8	69	—	—
8	0,30	1,0	$2,59 \pm 0,08$	18	79	63	0,70
6	0,60	2,0	$2,94 \pm 0,05$	33	73	80	—
10	0,90	3,0	$3,12 \pm 0,21$	43	63	90	—
10	1,20	4,0	$3,41 \pm 0,24$	46	65	98	0,84
10	1,50	5,0	$3,40 \pm 0,27$	57	60	102	—

Примечание. Полнота сгорания определена сразу после прохождения пламени. Значение  $\bar{q}$  в скобках взято пропорционально величине  $T_\delta - T_0$ .

и определяли влагосодержание повторно. Оказалось, что даже при весьма больших запасах ( $M=1,5+3,0$  кг/м<sup>2</sup>,  $W=1-2\%$ ) подсушивание невелико и не превышает 2,5 абс. %.

### Влияние угла наклона

Зависимость скорости распространения пламени (см. рисунок) и других параметров фронта горения (табл. 3) от угла наклона исследовалась при влагосодержаниях 1—2 и ~12%. На рисунке представлены также оценочные данные при влагосодержании ~5%. Качественно характер зависимостей аналогичен описанным в литературе для других горючих материалов [2, 3, 5]. Из зависимости обратной скорости распространения от угла наклона (кривая 1) следует, что зависимость  $u(\varphi)$  может быть разбита на три области, в каждой из которых

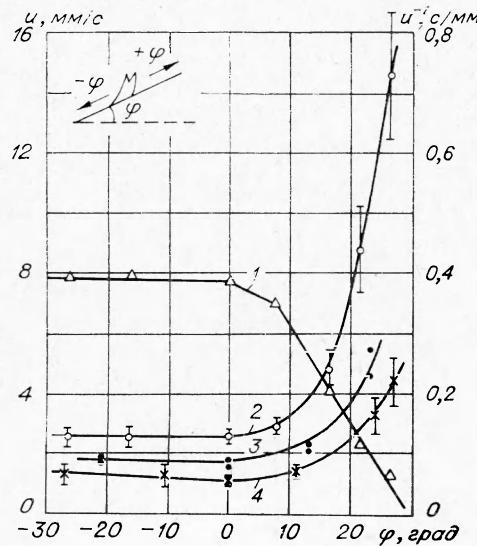
$$u = \frac{u_0}{1 - C\varphi},$$

где при  $\varphi < 0^\circ$   $u_0 = u(0)$  — скорость распространения по горизонтальному слою,  $C \approx 0$ ; при  $0 < \varphi < 8^\circ$   $u_0 = u(0)$ ,  $C = 0,012$ ; при  $\varphi > 8^\circ$ ,  $u_0 = -0,8u(0)$ ,  $C = 0,032$ . Следует отметить, что параметр  $C$  при  $\varphi < 16^\circ$  не зависит от влагосодержания, а при  $\varphi > 16^\circ$  несколько уменьшается с увеличением влагосодержания.

Визуально и с помощью фотофотосъемки было установлено, что при  $\varphi < 8^\circ$  передняя кромка факела пламени отклонена в сторону сгорающего материала (если  $\varphi = 0^\circ$ , на  $\sim 45^\circ$ ), при  $\varphi = 8^\circ$  она располагается примерно вертикально, а если  $\varphi > 8^\circ$ , отклонена в сторону несгоревшего материала.

Методом киносъемки был подтвержден известный [2, 5] факт, что, начиная с некоторого угла наклона, появляется дополнительный наклон факела пламени к поверхности слоя. При  $\varphi = 27^\circ$ , например, угол между поверхностью слоя и передней границей факела пламени составляет не  $63^\circ$ , а  $30 \pm 15^\circ$ . Отдельные языки факела пламени на задней границе фронта горения иногда располагаются вертикально, хотя в целом пламя сильно наклонено к поверхности слоя. Это обстоятельство говорит в пользу предположения, что дополнительный наклон пламени к поверхности слоя обусловлен газодинамическим взаимодействием фронта факела пламени с поверхностью слоя. В то же время было замечено, что перед фронтом горения отдельные вихри касаются поверхности слоя, вызывая воспламенение хвои на расстоянии до 10—15 см от передней кромки горения.

Как следует из представленных выше материалов, зависимость  $u(\varphi)$  при отрицательных углах наклона практически отсутствует. В то же время на отдельных хвоинках [1] и на ряде других горючих материалов [3] такая зависимость наблюдается. Одной из причин ослабления или



Зависимость скорости распространения от угла наклона слоя.  
1 —  $100 \cdot W = 12\%$ ; 2 —  $100 \cdot W = 5\%$ ; 3 —  $100 \cdot W = 1-2\%$ ; 4 —  $u^{-1}$  при  $100 = 1-2\%$ .

Таблица 3

Влияние угла наклона на параметры горения ( $M=0,3$  кг/м<sup>2</sup>;  $T_0=295$  К;  $h=1$  см)

Количество опытов	$\varphi$ , град	$u$ , мм/с	$\Delta u_{0,95}$ , мм/с	$u^{-1}$ , с/мм	$H_{пл}$ , см	$\eta$ , %	$q$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)	$\delta_{kp}$ , см	$\delta_{kp}/u$ , с	$(T_\delta - T_0)$ , К
-------------------	------------------	------------	--------------------------	-----------------	---------------	------------	--------------------------------	--------------------	---------------------	------------------------

$$100 \cdot W = 1 \div 2\%$$

8	0	2,59	0,08	0,286	18	76	0,7	5	19,3	63
8	+7,8	2,86	0,08	0,350	—	72	—	5—6	19,2	68
8	+16,5	4,82	0,71	0,207	—	69	—	9	18,7	73
10	+21,5	8,76	1,38	0,114	—	69	0,9	14	16,0	76
14	+27	14,6	2,1	0,068	21	71	1,0	20	16,4	81
6	-16,5	2,53	0,16	0,396	—	80	0,7	11	43	—
17	-26,5	2,55	0,11	0,392	16	81	0,83	12	47	—

$$100 \cdot W = 12\%$$

12	0	1,06	0,12	0,945	6	78	~0,5	~5	~47	40÷50
10	+11	1,34	0,22	0,745	—	85	—	—	—	—
10	+24	3,37	0,57	0,306	—	81	—	—	—	—
8	+27	4,38	1,04	0,228	—	79	—	—	—	—
12	-11	1,29	0,31	0,775	7	81	—	—	—	—
8	-27	1,30	0,34	0,708	11	83	—	—	—	—

Приложение. Здесь  $H_{пл}$  — расстояние от передней точки основания факела пламени до его вершины.

даже отсутствия зависимости может быть, по-видимому, скатывание сгорающих частиц вниз по склону. Это было проверено двумя способами: по движению медной проволоки диаметром 100 мкм, лежащей на поверхности слоя, и путем киносъемки. Оба способа подтвердили, что скатывание частиц существует и что оно начинается еще до подхода фронта пламени. При  $\varphi=27^\circ$ , например, частица за 12 с переместилась к моменту подхода фронта горения в среднем из 5 опытов на  $\sim 1,1$  см. Таким образом, собственная скорость их перемещения в направлении распространения пламени составляла  $\sim 0,9$  мм/с.

Как следует из наблюдений, полнота сгорания при отрицательных наклонах несколько больше, чем при положительных, по-видимому, вследствие дополнительного наклона пламени к поверхности разлагающегося горючего материала. Отношение  $\delta_{kp}/u$  примерно постоянно, точнее, несколько убывает при  $\varphi > 0^\circ$  и возрастает при  $\varphi < 0^\circ$  (по-видимому, из-за увеличения  $\delta_{kp}$ ).

### Влияние плотности (компактности) слоя

Скорость распространения пламени по слою сосновой хвои при одном и том же запасе зависит от высоты слоя, т. е. от его плотности  $\rho_{сл}$  (массы горючего в единице объема) или компактности

$$K = 1 - \frac{V_{сл}}{V_{хв}} = \frac{\rho_{сл}}{\rho_{хв}},$$

где  $V_{сл}$  и  $V_{хв}$  — объем слоя и объем хвои соответственно,  $\rho_{хв}$  — плотность хвои (0,65 г/см<sup>3</sup>).

В табл. 4 представлена зависимость скорости распространения от компактности. Видно, что с уменьшением  $K$  скорость распространения,

Таблица 4  
Влияние плотности слоя на параметры горения  
( $M = 0,6 \text{ кг}/\text{м}^2$ ,  $\varphi = 0, 100 \cdot W \approx 1\%$ )

Количество опытов	$\rho_{\text{сл}} \text{ г}/\text{см}^3$	$K$	$u, \text{мм}/\text{с}$	$\Delta u_{0,95}, \text{мм}/\text{с}$	$u - 1, \text{с}/\text{мм}$	$H_{\text{пл}}, \text{см}$	$\eta, \%$
4	0,060	0,092	2,15	0,18	0,465	14	53
5	0,049	0,075	2,42	0,22	0,413	18	55
8	0,030	0,046	2,94	0,12	0,345	33	72
6	0,015	0,024	3,74	0,24	0,267	40	82

высота пламени, полнота сгорания растут. При этом обратная скорость убывает примерно по линейному закону. Соответственно влияние компактности на  $u$  может быть описано как:

$$u = \frac{u_0}{1 + 15K} = \frac{u_0}{1 + 23\rho_{\text{сл}}}.$$

### Обсуждение результатов

Из уравнения теплового баланса с учетом того, что горючий материал дисперсный и что теплообмен при его горении осуществляется излучением и конвекцией одновременно, вытекает следующее соотношение для скорости распространения пламени по слою [6]:

$$u = \frac{4R(1 + W_\delta)}{\rho_{\text{хв}} d} \cdot \frac{\delta \left[ \beta \left( \frac{S_\pi}{S} \bar{q} - q_u \right) + \alpha (\bar{T}_{\text{пл}} - \bar{T}_{\text{хв}}) \right]}{C_{\text{хв}} (T_n - T_\delta) + [C_v (T_k - T_\delta) + L] \cdot W_\delta} \quad (1)$$

и формула для доли излучения в тепловом балансе

$$u_\lambda = \frac{T_\delta - T_0}{T_n - T_\delta} + \frac{\beta \left( \frac{S_\pi}{S} \bar{q} - q_u \right)}{\beta \left( \frac{S_\pi}{S} \bar{q} - q_u \right) + \alpha (\bar{T}_{\text{пл}} - \bar{T}_{\text{хв}})} \cdot \frac{T_n - T_\delta}{T_n - T_0}. \quad (2)$$

Здесь  $R$  — отношение времени распространения пламени по частице к суммарному времени распространения и перехода на следующую частицу,  $\rho_{\text{хв}}$  — плотность хвои,  $d$  — средний эквивалентный диаметр хвоинок  $\sim 0,06 \text{ см}$ ,  $\beta \approx 0,8$  — коэффициент поглощения излучения в зоне  $0-\delta$ ,  $S_\pi/S \approx 0,3$  — эффективная относительная поверхность облучения,  $q_u \approx 0,1 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  — излучаемый из этой зоны поток,  $T_n \approx 570 \text{ К}$  — температура почернения (газификации) материала,  $C_{\text{хв}} \approx 0,35 \text{ кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$  и  $C_v = 1,0 \text{ кал}/(\text{г} \cdot \text{град})$  — теплоемкость хвои и адсорбированной влаги соответственно,  $L$  — теплота испарения адсорбированной влаги ( $\sim 710 \text{ кал}/\text{г}$ ),  $T_k \approx 375 \text{ К}$  — температура испарения,  $T_\delta$  и  $W_\delta$  — температура и влагосодержание хвои в точке  $\delta$ ,  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена в зоне  $0-\delta$ ,  $\bar{T}_{\text{пл}} \approx 720 \text{ К}$  и  $\bar{T}_{\text{хв}} \approx 450 \text{ К}$  — средняя температура газовой и конденсированной фаз в зоне  $0-\delta$ ,  $T_0 \approx 295 \text{ К}$  — начальная температура слоя.

Соотношения (1) и (2) дают скорость распространения пламени и долю излучения как функции параметров фронта горения. Условия горения явно в них не входят. Их влияние на процесс горения осуществляется, таким образом, не прямо, а косвенно, через изменение одного или нескольких параметров фронта. Влагосодержание, например, может влиять на скорость распространения через изменение таких параметров, как  $W_\delta$ ,  $T_\delta$ ,  $\bar{q}$ ,  $R$ ,  $\rho_{\text{хв}}$ , причем подсушивание при горении основной хвои невелико и  $W_\delta \approx W$ . Чтобы выявить основные из них, приведем (6) к виду, удобному для сравнения с экспериментом

$$u = \frac{(1 + W) R}{1 + \frac{C_v (T_k - T_\delta) + L}{C_{\text{хв}} (T_n - T_\delta)} \cdot W} \cdot \frac{\frac{4}{d} \left[ \beta \left( \frac{S_\pi}{S} \bar{q} - q_u \right) + \alpha (\bar{T}_{\text{пл}} - \bar{T}_{\text{хв}}) \right]}{\rho_{\text{хв}} C_{\text{хв}} (T_n - T_\delta)} = \\ = \frac{u_0 (1 + W)}{1 + AW}.$$

Здесь  $u_0$  — скорость распространения пламени  $W=0$ ,  $A=\frac{C_v(T_k-T_\delta)+L}{C_{xv}(T_n-T_\delta)}$ .

При  $T_\delta=310$  К и приведенных выше значениях других параметров  $A=8,4$ , что хорошо согласуется с данными для одиночных хвоинок [1]. Однако у горящего слоя  $A=15,8$ , т. е. значительно превышает это значение. Несоответствие практически полностью устраняется, если учесть изменение лучистого потока  $\bar{q}$  при горении слоя и связанной с ним величины  $T_\delta$ , т. е. изменяется не только величина  $A$ , но и величина  $u_0$ . Отсюда вытекает, что и влияние  $R$ ,  $\rho_{xv}$  должно быть невелико. Не противоречат этому объяснению и данные для сосны красной, поскольку она является более тонкой, следовательно, разогрев  $T_\delta-T_0$  у нее должен быть значительно меньше.

Таким образом, основными параметрами фронта горения, на которые влияет влагосодержание, являются  $W$ ,  $\bar{q}$  и  $T_\delta-T_0$ . Роль параметров  $R$  и  $\delta$ , по-видимому, невелика. Доля излучения, как показывают оценки с помощью соотношения (2), изменяется при горении хвои сосны обыкновенной от  $\sim 20\%$  на пределе горения до  $\sim 30\%$  при  $W=0$ .

Изменение излучения фронта горения является, по-видимому, в основном причиной изменения скорости распространения пламени при различном запасе горючего. Другие параметры, входящие в соотношение (1), практически не зависят от запаса. Действительно, плотность лучистого потока возрастает при горении сосновой хвои от  $\sim 0,35$  кал/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) на пределе горения при  $M \approx 0,1$  кг/ $\text{м}^2$  до  $\approx 0,84$  кал/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) при  $M=1,2$  кг/ $\text{см}^2$ , одновременно ( $T_\delta-T_0$ ) возрастает от  $\sim 30$  до 98 К. По-видимому, это возрастание происходит вследствие увеличения толщины слоя излучающих углей внутри фронта пламени и увеличения размеров факела. Вблизи предела на влияние излучения накладывается дополнительно влияние теплоотвода в подлежку, в результате чего зависимость становится более сильной. Доля излучения изменяется при росте запаса от 10% вблизи предела до  $\sim 50\%$  при запасе 1,5 кг/ $\text{м}^2$ .

Из соотношения (1) следует далее, что скорость распространения пламени должна изменяться пропорционально

$$u \sim \left[ \beta \left( \frac{S_d}{S} \bar{q} - q_i \right) + \alpha (\bar{T}_{pl} - \bar{T}_{xv}) \right] \delta.$$

Выражение в скобках должно слабо зависеть от угла наклона, так как некоторое возрастание  $\bar{q}$  с увеличением  $\varphi$ , по-видимому, компенсируется уменьшением коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$ . В основном угол наклона влияет на скорость распространения пламени через изменение ширины зоны теплообмена факела пламени с горючим материалом  $\delta$ . В то же время доля излучения возрастает с углом наклона от  $\sim 30\%$  при  $\varphi=0^\circ$ ,  $M=0,3$  кг/ $\text{м}^2$  до  $\sim 50\%$  при  $\varphi=27^\circ$ .

При увеличении плотности слоя расстояние между частицами в слое уменьшается, соответственно возрастает теплоотвод от поверхностных частиц, определяющих скорость распространения пламени, внутрь слоя. Это приводит к уменьшению  $\bar{T}_{pl}$ , а следовательно, к уменьшению скорости распространения пламени [7]. Некоторую роль может играть также изменение угла наклона частиц в слое. Их отклонение от горизонтального положения в более рыхлых слоях должно приводить к дополнительному увеличению распространения пламени.

Как следует из оценок доли излучения, теплообмен излучением не является доминирующим при горении слоя сосновой хвои. Тем не менее доля его в процессе теплообмена является довольно значительной. Она варьирует для исследованных условий от  $\sim 10$  до  $\sim 50\%$  при  $M=0,3$  кг/ $\text{м}^2$ ,  $\varphi=0$ ,  $\rho_{cl}=0,03$  г/ $\text{см}^3$ ,  $W=7-8\%$ , что составляет около 20–30%. Соответственно излучение играет существенную роль в процессе горения, в частности, является основной причиной изменения ско-

рости распространения пламени в зависимости от запаса и оказывает заметное влияние на зависимость скорости распространения от других условий горения.

В заключение следует отметить, что в первом приближении влияние исследованных факторов проявляется в изменении разных параметров фронта пламени. Их взаимодействие между собой может происходить лишь через излучение фронта пламени. Но поскольку теплообмен излучением не доминирует в исследованных условиях, можно принять при ориентировочных оценках, что они влияют на процесс горения независимо друг от друга. Зависимость скорости распространения пламени от условий горения может быть описана тогда следующей обобщенной формулой:

$$u = u_0 \frac{(1 + W)(1 - e^{-BM})}{(1 + AW)(1 - CW)(1 + DP_{ca})}.$$

Значения  $u_0$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  для слоя сосновой хвои приведены выше.

Авторы благодарны Е. К. Кисиляхову за помощь при проведении фото и киносъемки.

Поступила в редакцию  
21/XI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Сухинин, Э. В. Конев. В сб. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛиД СО АН СССР, 1972, с. 7—51.
2. С. Е. Van Wagener. Forestry branch departmental publication, N 1229. Ottawa, 1968, p. 30.
3. М. А. Софронов. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М., «Наука», 1967.
4. T. B. Fang, F. R. Stewart. Combustion and Flame, 1963, 13, 4, p. 392.
5. М. А. Шешуков. Канд. дис. Красноярск, ИЛиД СО АН СССР, 1970.
6. Э. В. Конев, А. И. Сухинин. ФГВ, 1975, 11, 4.
7. Э. В. Конев, А. И. Сухинин, Е. К. Кисиляхов. В сб. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛиД СО АН СССР, 1972, с. 41—49.

УДК 621.43.056

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕР ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ТИПА «РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА»

И. М. Севастьянов, К. С. Танин

(Астрахань)

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований пульсирующего горения, взаимосвязь между основными параметрами рабочего процесса недостаточно изучена. Цель настоящей работы — установление соотношений между такими характеристиками пульсирующего горения, как амплитуда давления газа, частота, тепловыделение и геометрия камеры пульсирующего горения (КПГ). В качестве объекта исследования выбрана КПГ, имеющая конфигурацию известного в акустике резонатора Гельмгольца, состоящего из камеры с присоединенной к ней резонансной трубой.