

Результаты температурных и калориметрических измерений дают возможность оценить долю излучения в тепловом балансе при распространении пламени как в зоне конвективного нагрева I ( $k_1$ ), так и в области  $-\infty \div 0$  ( $k_0$ ). Доля излучения возрастает при увеличении запаса горючего, рыхлости слоя и уменьшении влагосодержания. Для исследованных условий она варьирует от 13 до 32% в зоне I и от 25 до 57% в зонах 0—I, т. е. теплообмен излучением не определяет процесс распространения пламени. Хвоя перед фронтом нагревается лучистым потоком до температуры, не превышающей 130°C даже в случае высоких пламен, что связано с теплоотдачей в воздух, подтекающий в зону горения. Влияние излучения в проведенных опытах сводится к повышению начальной температуры и частичному подсушиванию материала.

*Поступила в редакцию  
17/X 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. Г. Демидов. Горение и свойства горючих материалов. М., изд-е МКХ РСФСР, 1962.
2. D. L. Simms. Combustion and flame, 1963, 7, 3, 253.
3. А. И. Сухинин, Э. В. Конев. В сб. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, изд-е Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1972, с. 7.

УДК 662.612.63

### НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

*Э. В. Конев  
(Красноярск)*

Многие аспекты вопроса о роли излучения при горении лесных горючих материалов остаются не изученными [1—6]. Не исследована зависимость излучения фронта горения от условий (т. е. от влагосодержания, запаса горючего материала, угла наклона слоя к горизонту, вида горючего материала и т. д.), не изучено экспериментальное распределение лучистого потока на поверхности горючего материала перед фронтом пламени, отсутствуют данные о коэффициенте поглощения радиации пламени лесными горючими материалами.

В данной работе приведены результаты измерений, полученные на слоях и на отдельных характерных частицах. Лучистый поток определялся по темпу нагрева медного цилиндра (калориметра) диаметром 7 и высотой 3 мм. Торцевая поверхность его была покрыта ламповой сажей, а боковая поверхность защищена от излучения. Нагрев калориметра регистрировался на потенциометре ЭПП-09 со шкалой 2 мВ.

В большей части опытов фиксировались излучение на поверхности фронта горения и распределение лучистого потока перед ним. С этой целью калориметр устанавливался неподвижно между элементами лесного горючего материала, лежащими на поверхности слоя, торцевой поверхностью в сторону приближающегося фронта горения. Поверхность пламени отождествлялась с точкой резкого подъема температуры калориметра. Расстояние между фронтом пламени и калориметром рассчитывалось по скорости распространения пламени.

Таблица 1

$M$ , кг/м <sup>2</sup>	$W$ , %	$\alpha$ , град	$u$ , мм/с	$H$ , м	$q$ (кал/(см <sup>2</sup> ·с)), при $x$ (см)						$r$ , см	
					0	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0		10,0
0,3	1,6	~0	2,66	0,18	0,70±0,06	0,52±0,07	0,45±0,05	0,34±0,07	0,26±0,05	0,13±0,03	0,06±0,02	1,0
0,3	7,6	~0	1,53	0,10	0,65±0,15	0,47±0,15	0,33±0,10	0,26±0,10	0,20±0,07	0,09±0,04	0,033±0,005	0,7
0,3	13	~0	0,91	0,04	0,50±0,10	0,23±0,10	0,17±0,05	0,14±0,04	0,09±0,02	0,03±0,02	0,011±0,002	0,4
0,3	1,5	7,7	2,90	0,12	0,80±0,05	0,44±0,02	0,37±0,15	0,29±0,05	0,21±0,05	0,11±0,03	0,06±0,02	0,8
0,3	1,5	21,5	8,5	0,22	0,9±0,3	0,74±0,10	—	0,47±0,07	0,30±0,04	0,18±0,05	0,08±0,02	1,1
0,3	1,5	26,5	13,2	0,24	~1,0	—	—	~0,58	0,48±0,06	0,19±0,10	0,11±0,06	1,3
0,3	1,5	-16,5	2,56	0,14	0,7±0,2	0,32±0,08	0,24±0,05	0,19±0,04	0,13±0,01	0,06±0,01	0,023±0,003	0,4—0,5
0,3	1,5	-26,5	2,66	—	0,83±0,10	0,49±0,15	0,44±0,15	0,38±0,13	0,14±0,02	0,05±0,02	0,022±0,003	0,4—0,5
1,1	1,5	~0	3,50	0,48	0,84±0,10	~0,60	0,52±0,06	0,37±0,04	0,32±0,02	0,20±0,03	0,10±0,04	1,5

Примечание. Проверки в таблице поставлены в тех случаях, когда из-за нульсодержащего пламени лучистый поток зарегистрировать не удалось. В остальных случаях приведены, как правило, средние из пяти и более измерений и их среднеквадратическая погрешность.

Результаты измерений лучистого потока на слоях из опавшей хвои сосны обыкновенной представлены в табл. 1. В ней приведены также значения запаса горючего материала  $M$ , его влагосодержания  $W$ , угла наклона слоя к горизонту  $\alpha$ , высоты пламени  $H$  и скорости распространения фронта горения  $u$ . Видно, что лучистый поток на поверхности факела пламени  $q(0)$  закономерно изменяется в зависимости от условий горения от  $\sim 0,5$  до  $\sim 1,0$  кал/(см<sup>2</sup>·с). По порядку величины он согласуется с оценками, приводимыми в [2]. Из табл. 1 следует также, что по мере удаления от фронта горения лучистый поток быстро убывает, особенно сильно на слоях с большим влагосодержанием. На рисунке некоторые данные табл. 1 представлены в координатах  $q(0)/q(x)$ ,  $x$ . Зависимость лучистого потока на поверхности слоя от расстояния до фронта пламени может быть описана как

$$q(x) = \frac{r \cdot q(0)}{r + x^2}$$

что аналогично зависимости для нагретого цилиндра радиуса  $r$ , расположенного горизонтально вдоль передней кромки фронта горения и это подтверждает высказанные ранее предположения [6].

Значения эффективного радиуса излучения фронта горения  $r$  могут быть определены двумя способами: как расстояние, на котором лучистый поток уменьшается вдвое, и по тангенсу угла наклона прямых на рисунке (по скольку у излучающего цилиндра  $\frac{q(0)}{q(x)} = 1 + \frac{x}{r}$ ). Второй способ представляется более надежным, так как позволяет провести усреднение по всем точкам. Рассчитанные этим способом  $r$  представлены в табл. 1. Видно, что радиус  $r$  варьируется для исследованных условий от 0,4 до 1,5 см. При увеличении влагосодержания величина  $r$  убывает, а с ростом запаса и угла наклона возрастает.

Полученные результаты не подтверждают предположение, что фронт горения у лесных горючих материалов излучает подобно нагретой пластине с бесконечной длиной и шириной  $L$ . В этом случае распределение  $q(x)$  на поверхности слоя имело бы вид (см. [2] с учетом связи  $x = -V \cdot t$ )

$$q(x) = E \cdot F = \frac{E}{2} \left( 1 + \frac{L \cos A - x}{\sqrt{x^2 - 2Lx \cos A + L^2}} \right),$$

где  $E$  — поток, излучаемый единицей поверхности стенки;  $A$  — угол наклона стенки к поверхности слоя;  $F$  — стериический коэффициент.

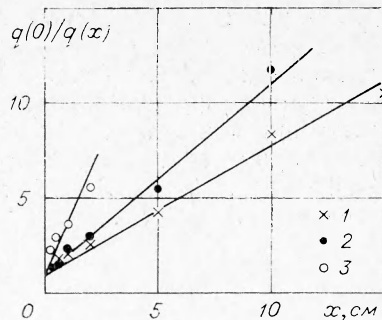
Для вертикального пламени, при  $L = H$ , лучистый поток должен был бы уменьшаться вдвое на расстоянии  $r = 0,58 \cdot H$ , что значительно больше значений  $r$ , полученных экспериментально (см. табл. 1).

В части опытов калориметр перемещался вместе с фронтом пламени на расстоянии 5—7 мм от него или устанавливался в 2—4 мм от кромки обугленных остатков слоя сразу после прохождения фронта горения по нему. Расстояния выбирались из условия, чтобы отсутствовал нагрев калориметра конвекцией. Опыты были проведены на слоях из широко распространенных в природе горючих материалов (опавшая хвоя сосны обыкновенной, отмерший вейник, опавшие листья березы, мох Шребера, лишайник рода *Cladonia*). Результаты измерений представлены в табл. 2. Видно, что излучение фронта горения у всех исследованных лесных горючих материалов примерно одинаково. Для хвои сосны оно находится в согласии с данными табл. 1.

Из табл. 2 следует также, что интенсивность излучения обугленных остатков у исследованных материалов составляет не менее 0,3—0,5 кал/(см<sup>2</sup>·с), что находится в удовлетворительном согласии с измерениями их средней температуры  $\bar{T}$  внутри фронта пламени (500—640°C). Эти оценки произведены с помощью термопар хромель-алюмель диаметром 50 мкм, заделанных внутри характерных частиц. Интенсивность излучения газового факела составляет около 0,3—0,4 кал/(см<sup>2</sup>·с).

Приведенные оценки показывают, что излучение фронта горения должно определяться излучением слоя обугленных остатков внутри фронта пламени. Поэтому оно близко к излучению нагретого цилиндра со сравнительно небольшим радиусом. Другой причиной этого эффекта может быть уменьшение излучательной способности факела пламени по высоте.

Излучение обугленных частиц может достигать больших значений (до 2 кал/(см<sup>2</sup>·с) при  $T_{\max} = 830^\circ\text{C}$ ). В то же время оно должно быстро



Зависимость отношения  $q(0)/q(x)$  от  $x$ .

1 —  $M=1,1$  кг/м<sup>2</sup>,  $W=1,5\%$ ; 2 —  $M=0,3$  кг/м<sup>2</sup>,  $W=1,6\%$ ; 3 —  $M=0,3$  кг/м<sup>2</sup>,  $W=13\%$ .

Таблица 2

Материал	$M$ , кг/м <sup>2</sup>	$W$ , %	$u$ , мм/с	$H$ , м	$q(0,6)$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)	$q_y$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)	$\bar{T}$ , °C	$T_{\max}$ , °C
Хвоя сосны	0,3	1,7	2,8	0,17	0,42±0,03	0,3	640	800
Вейник	0,3	4,0	10,0	0,38	0,41±0,07	—	550	700
Листья березы	0,3	3,4	5,5	0,18	0,38±0,05	—	520	600
Мох Шребера	1,2	6,8	6,7	0,25	0,37±0,12	0,45±0,1	510	620
Лишайник	2,2	4,5	4,9	0,48	0,43±0,13	0,5	500	—

Примечание.  $T_{\max}$  — максимальная температура тлеющих частиц.

падать с расстоянием (мало  $r$ ). Локальные лучистые потоки на передней кромке факела пламени должны существенно зависеть от взаимного расположения частиц горючего материала и их формы. Однако в среднем излучение фронта горения у слоя сосновой хвои оказалось близким к излучению зоны горения у отдельных хвоинок. При измерении последнего калориметр устанавливался сбоку от хвоинки на разных расстояниях от факела пламени  $x$  и перемещался вместе с ним. У сухих хвоинок в интервале  $1,0 \leq x \leq 4,5$  см лучистый поток изменялся как

$$q = \frac{0,11}{(r+x)^{1/8}},$$

где  $r$  — расстояние от оси хвоинки до поверхности факела (0,33 см). При  $x=0$  лучистый поток должен составлять около 0,8 кал/(см<sup>2</sup>·с). По-видимому, излучение фронта пламени при горении лесных горючих материалов обусловлено излучением отдельных локальных пламен, температурное распределение внутри которых близко к таковому у отдельных горящих частиц.

Были проведены оценки теплового потока, поступающего в калориметр после его соприкосновения с факелом пламени, т. е. излучением и конвекцией одновременно. Он оказался равным  $\sim 2,5$  кал/(см<sup>2</sup>·с) (т. е. значительно больше излучаемого фронтом лучистого потока), что указывает на большую роль конвекции в процессах теплообмена внутри факела.

Для анализа процесса лучистого теплопереноса необходимы также сведения о коэффициенте поглощения излучения частицами горючего материала  $\beta$ . Его величину определяли путем измерения стационарных разогревов частиц с помощью тонких (диаметром 30 мкм) термомпар манганин — константан. Расчет производился по формуле

$$\beta = \beta_c \cdot \frac{\Delta T \cdot q_c}{\Delta T_c \cdot q},$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta T_c$  — разогрев образца до и после покрытия сажей;  $q$  и  $q_c$  — соответствующие лучистые потоки;  $\beta_c$  — коэффициент поглощения сажи ( $\sim 0,95$ ). Измерения были проведены для спектра лампы накаливания (чтобы их можно было сравнить с литературными данными) и для спектра пламени свечи (поскольку он близок к спектру излучения пламени при лесных пожарах).

Результаты представлены в табл. 3, где приведены средние из пяти измерений значения. Среднеквадратическая погрешность составила  $\pm 0,06$  для спектра лампы,  $\pm 0,12$  для спектра пламени свечи. Видно, что

Т а б л и ц а 3

Материал	Элемент	Цвет	W, %	$\beta$	
				лампа	свеча
Хвоя сосны	Хвоинка	П	13	0,54	0,80
То же	»	З	12,5	0,47	0,76
Хвоя ели	»	П	4,8	0,49	0,79
То же	»	З	90	0,50	0,66
Хвоя кедра	»	П	8,0	0,51	0,73
Лишайник	Стебель	—	7—8	0,64	0,83
Мох Шребера	Ветвь	З	33	0,32	0,54
Береза	Лист	П	32	0,62	0,76
»	»	З	139	0,47	0,65
Вейник	Стебель	П	13	0,49	0,80
»	Лист	П	12	0,40	0,73
Брусника	»	З	22	0,51	0,75

П р и м е ч а н и е. П — пожелтевший, З — зеленый элемент.

коэффициент поглощения излучения у большинства исследованных материалов примерно одинаков и составляет около 0,7—0,8 для спектра пламени свечи,  $\sim 0,4$ —0,6 для спектра лампы накаливания. Более низкие его значения зафиксированы лишь у мха Шребера, веточки которого состоят из тонких полупрозрачных чешуек.

Приведенные материалы могут быть использованы для расчета радиационного подсушивания

материала перед фронтом пламени и для анализа процессов теплообмена излучением и конвекцией внутри фронта горения.

Поступила в редакцию  
14/X 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. W. Emmons. Tenth Symposium (International) on Combustion, the Combustion Inst., Pittsburgh, 1965.
2. C. E. Van Wagner. Calculations of forest fire spread by flame radiation, Canada, Dep. of Forestry and Rural Devel., Publ. № 1185, 1967.
3. C. E. Van Wagner. Fire behaviour mechanisms in a red pine plantation: field and laboratory evidence, Canada, Dep. of Forestry and Rural Devel., Dep. publ. № 1229, 1968.
4. J. B. Fang, F. R. Steward. Combustion and Flame, 1969, 13, 4.
5. Г. П. Гелицын. Горение и пожары в лесу. Красноярск, Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1973, с. 164.
6. Э. В. Конов. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1970, с. 220.

УДК 536.46 : 533.6

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ЗА ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ТЕЛОМ, ОБТЕКАЕМЫМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ, ПРИ ВДУВЕ ИНЕРТНЫХ И РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ

*В. К. Баев, А. Ф. Гаранин, П. К. Третьяков*  
(Новосибирск)

Проблеме течения за телами с донным срезом посвящено большое количество работ экспериментального и теоретического характера. Методы расчета течений со вдувом инертного или реагирующего газа требуют экспериментальной информации (размер горла следа, параметр присоединения) [1, 2]. Эта информация берется из эксперимента при отсутствии вдува, либо необходимые константы находятся из условия наилучшего совпадения с экспериментом.

Цель данной работы — экспериментальное исследование структуры течения в ближнем следе за осесимметричным телом, обтекаемым сверхзвуковым потоком воздуха, при различных способах вдува инертных и реагирующих газов через отверстия в донном срезе. Исследование проводилось в сверхзвуковой аэродинамической трубе с размерами рабочей части  $200 \times 200$  мм. Скорость потока воздуха в рабочей части трубы менялась с помощью сопловых вставок и соответствовала числам Маха  $M_\infty = 2,05$  и  $3,05$ . Давление торможения (давление в форкамере) варьировалось от 2 до 10 ат, а температура торможения колебалась в пределах  $0 \div 50^\circ\text{C}$ . Число Рейнольдса, отнесенное к линейному размеру 1 м, изменялось в пределах  $1,8 \cdot 10^7 \div 4 \cdot 10^7$ . На боковых стенках рабочей части трубы имелись окна для оптических наблюдений, в которых использовался теневой прибор ИАБ-451 с непрерывным и искровым источником подсветки. Длительность искрового разряда не превышала 5 мкс. Модель представляла собой соединение острого конуса с цилиндрической хвостовой частью (конус — цилиндр). Полуугол при вершине конуса  $\theta = 12^\circ$ , а диаметр цилиндрической части  $d = 35$  мм.