

УДК 630.43

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И ВОЗМОЖНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЕГО НА ДРЕВОСТОЙ

Э.Н. Валендик, И.В. Косов

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок, 50; e-mail: kosov-iv@ksc.krasn.ru

Приводятся результаты исследований теплового излучения при лесных пожарах разного вида и влияние его на кроны и стволы хвойных пород. Установлены расстояния, на котором тепловое излучение приводит к гибели почек в кронах хвойных и поражает прикамбиальную зону стволов.

Ключевые слова: лесной пожар, тепловое излучение, интенсивность горения, температура пламени

This paper discusses the results of a study of heat radiated from forest fires of various types and its impact on conifer tree crowns and stems. The investigation permitted to determine the crown-to-ground distances, at which fire heat flux was lethal to buds in conifer crowns and damaged the near-cambium tree stem zone.

Key words: forest fire, thermal radiation, combustion rate, flame temperature

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое излучение лесного пожара – это электромагнитное излучение инфракрасного диапазона, испускаемое пламенем и горящими углями. Падая на поверхность предмета, излучение поглощается его поверхностью и преобразуется в тепловую энергию, вследствие чего температура предмета (вещества и пр.) повышается (Амосов, 1958).

Доля теплового излучения в тепловом балансе лесного пожара, в зависимости от его вида и интенсивности, находится в пределах 10-40% (Валендик и др., 2006; Гришин и др., 1984; Грузин, 1983; Зигель, Хауэлл, 1975; Исаков, 1977). При верховых пожарах на долю теплового излучения приходится до 90% от общего тепла пожара (Сухинин, Конев, 1972; Anderson, Rothermal, 1965).

Поток теплового излучения в ряде случаев значительно влияет на скорость распространения пожара при ветре или движении вверх по склону. В этих случаях пламя наклонено к поверхности земли и лучистый тепловой поток интенсивно подсушивает горючие материалы перед кромкой пожара и тем самым увеличивает скорость его воспламенения. В случаях, когда пламя находилось бы перпендикулярно поверхности земли. Например, при подлесно-кустарниковых пожарах образуется большое вертикальное пламя и поток излучения воспламеняет подрост хвойных, а также нагревает стволы до повреждения камбия, что иногда приводит к гибели дерева.

Теплового излучения оказывает значительное отрицательное воздействие на людей при тушении пожаров ручными средствами, когда пожарные вынуждены работать в нескольких метрах от горящей кромки пожара.

Воздействие теплового излучения от кромки пожара становится болезненным для незащищенной кожи при интенсивности излучения более 2 кВт/м² (Braun, 1980). Уровень излучения в 12 кВт/м² причиняет ожог моментально (Cohen, 2004). Если по-

жарный полностью облачен в спецодежду из ткани плотностью 200 г/м², он может получить ожог второй степени приблизительно через 90 секунд (Fang, 1969). Измерения потока теплового излучения на пожарах очень сложно и большую часть экспериментальных данных составляют расчетные и лабораторные исследования.

Так при слабой интенсивности горения с высотой пламени 0,3 м тепловое излучение на расстоянии 0,6 м от горящей кромки составляет 0,4 кВт/м². С увеличением пламени до 1,2 м интенсивность излучения на расстоянии 1,8 м составляет 4,6 кВт/м² (Green, 1969), а это уже существенное препятствие для пожарных.

По некоторым расчетам, пламя лесного пожара высотой 2 м должно создавать радиационный поток на расстоянии 6 м от кромки 60 кВт/м² (King, 1966).

По данным экспериментальных исследований параметров верхового пожара было установлено, что интенсивность излучения на расстоянии 10 м от пожара может достигать 80 кВт/м², а на расстоянии 40 м интенсивность снижается до 20 кВт/м² (McCarter, 1965).

Ван Вагнер (Anderson, 1965) объясняет высокую интенсивность радиационного потока на верховых пожарах тем, что на их долю приходится до 90% тепла общего теплового потока пожара.

Некоторые авторы считают, что при отсутствии ветра излучение факела пламени не играет существенной роли в теплообмене и доминирует лишь излучение горящих углей (Anderson, Rothermal, 1965; Stoll, Greene, 1959; Tassios, Packham, 1964). Вместе с тем, при распространении пламени по слою сосновой хвои в ветровом тоннеле роль излучения факела пламени возрастает (Thomas, 1964). Это дало возможность предположить (Сухинин, Конев, 1972; Anderson, Rothermal, 1965), что увеличение скорости горения при ветре зависит от повышения теплового излучения пламени.

Поток теплового излучения при верховых пожарах во всех случаях зажигает кроны деревьев и яв-

ляется основным фактором распространения горения по кронам. Процесс этот очень интенсивный и каких-либо мер для его прекращения еще не найдено. Нас интересует тепловое излучение при низовых пожарах в разных зонах его воздействия на структурные элементы насаждения и доступность тушения.

В связи с этим целью наших исследований является выделение зоны воздействия потока теплового излучения на структурные элементы дерева в насаждениях разного класса возраста, а также предельные условия тушения кромки низовых пожаров без специальной защиты пожарных от теплового излучения горящей кромки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с поставленной целью объекты горения подбирали по двум критериям: наличие высокого пламени и горение углей.

В соответствии с этим положением измерения мощности теплового излучения проводили на низовых пожарах средней силы в сосняке лишайниково-зеленомошном, на валежных пожарах на захлавленной вырубке в пихтарнике мелкотравно-зеленомошном и в усохшем после повреждения шелкопрядом древостое пихтарника мелкотравно-зеленомошного (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных участков

Тип леса	Состав древостоя	Возраст, лет	Вид ЛГМ	Запас ЛГМ
Сосняк лишайниково-зеленомошный	10С+Лц	180	Лишайник, подстилка, мох, опад	4,0 кг/м ²
Вырубка в пихтарнике мелкотравно-зеленомошном	—	—	Порубочные остатки	120 т/га
Пихтарник мелкотравно-зеленомошный (усохший на 100%)	сухостой	—	Опад, валеж, сухостой	180 м ³ /га 50 м ³ /га

На вырубке основным горючим материалом являлись порубочные остатки разных размеров и частично оставшиеся проводники горения.

На участке «шелкопрядника» основным горючим материалом были сухостойные деревья, валежник и опад из мелких веток, а также подстилка.

Участки, во всех случаях, были отграничены от лесных массивов минерализованными полосами, и площадь участков была в пределах от 1-6 га.

Перед каждым экспериментом проводились измерения метеорологических условий (температуры и относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра). Учитывали запас и влагосодержание напочвенных горючих материалов, так как их параметры влияют на скорость распространения, высоту пламени и интенсивность горения.

В ходе опытов определяли температуру пламени, скорость движения горящей кромки, тепловое излучение пламени.

Тепловое излучение измеряли в трех точках, на высоте 0,5, 1,0, 1,5 м над уровнем земли, в зависимости от высоты пламени, с помощью калориметров. Калориметр представляет собой плоский медный цилиндр Ø 20 мм и толщиной 4 мм. Внутри калориметра вделывается хромель-алюмелевая термопара диаметром 0,3 мм. Для увеличения поглощающей способности рабочая (торцевая) поверхность калориметра зачерняется сажей. Калориметр помещается в цилиндр из фторопласта и для

удобства пользования крепится на защитном щите.

Щит с калориметрами во время измерения устанавливали в направлении максимального предполагаемого потока теплового излучения, с учетом исключения воздействия конвективных потоков, что достигалось его установкой в тылу или на флангах пожара.

Величину плотности теплового излучения рассчитывали в предположении равномерного нагрева всей поверхности калориметра (Van Wagner, 1967):

$$I = \frac{W}{tS}, \quad (1)$$

где W – энергия потока теплового излучения, Дж;
 S – площадь воспринимающей поверхности, м²;
 t – время измерения, с.

$$W = m \cdot C \cdot (T_2 - T_1), \quad (2)$$

где m – масса калориметра, кг;
 C – теплоемкость меди, Дж/кг;
 $(T_2 - T_1)$ – максимальный разогрев, °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении эксперимента фиксировались параметры горения (табл. 2, 3).

Таблица 2 – Плотность потока теплового излучения в зависимости от вида пожара и параметров горения

Тип леса	Вид пожара	Высота пламени (max), м	Температура пламени, °С	Ширина кромки, м	Скорость распространения, м/мин	Максимальная мощность излучения, кВт/м ²
Сосняк лишайниково-зеленомошный	вапочвенный	1,5	600-700	0,5-1	0,3-1,7	28
Вырубка	валежный	3,5	800-1000	4-5	1,0-1,5	130
Шелкопрядник	валежно-стволовой	6	700-1000	3-6	1,5-1,8	208

Из таблицы 2 видно, что с увеличением скорости горения увеличивается ширина зоны пламенного горения, но уменьшается степень прогорания горючего материала и образование горящих углей, что

сказывается на величине теплового потока.

По данным таблицы 3 можно проследить зависимость величины теплового излучения от параметров горения.

Таблица 3 – Характеристика параметров горения в сосняке лишайниково-зеленомошном

Опыт	№1		№2		№3		№3	
Расстояние от кромки, м	2	2	2	2	2	2	4	4
Тепловое излучение, кВт/м ²	4,3	8,7	5,2	11,9	8,2	15,2	10,4	10,8
Высота пламени, м	0,4	0,3	0,7	0,5			0,3	
Скорость горения, м/мин		1,7		1,3			0,3	
Ширина кромки, м		1		0,7			0,5	

При проведении экспериментов в сосняке лишайниково-зеленомошном максимальные значения потока теплового излучения отмечены на расстоянии от кромки горения 2 м, при высоте пламени – 0,3 м, скорости горения – 0,3 м/мин, ширине кромки

– 0,5 м — 21,7 кВт/м². Температура пламени колебалась от 600 до 1000°C.

В таблице 4 приведены параметры горения на трех летней вырубке в пихтарнике мелкотравно-зеленомошном.

Таблица 4 – Характеристика параметров горения на вырубке

Расстояние от кромки, м	2	2	2	3	4	5	6	7	9
Тепловое излучение, кВт/м ²	26	26	39	124	26	113	52	45,5	26
Высота пламени, м	0,5	1	1,5	3,5	1,5	3,5	3	3,5	3
Ширина кромки, м	5	5	5	5	4	4	5	5	4

Данные позволяют сравнить изменение потока теплового излучения в зависимости от удаленности точки измерения, по опытам с высотой пламени – 3-3,5 м (рис. 1).

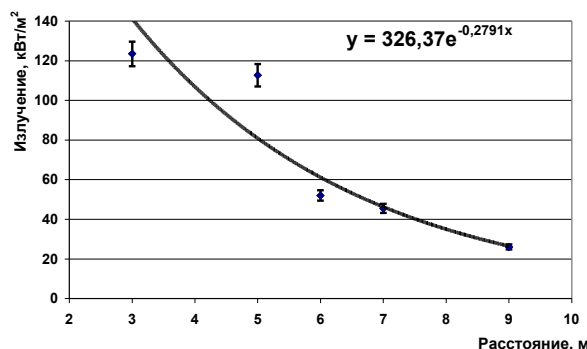


Рисунок 1 – Плотность теплового излучения в зависимости от расстояния до горящей кромки пожара

При проведении экспериментов на вырубке максимальные значения потока теплового излучения отмечены на расстоянии от кромки горения 3 м, при высоте пламени – 3,5 м, ширине кромки – 5 м

— 130 кВт/м². Температура пламени колебалась от 800 до 1000°C. Характеристики параметров горения при валежном пожаре приведены в таблице 5.

Опыты, проведенные в шелкопряднике, позволяют сравнить изменение потока теплового излучения в зависимости от высоты пламени на одинаковом расстоянии от фронта пламени, по опытам с шириной кромки — 4-6 м. Полученная зависимость представлена на рисунке 2.

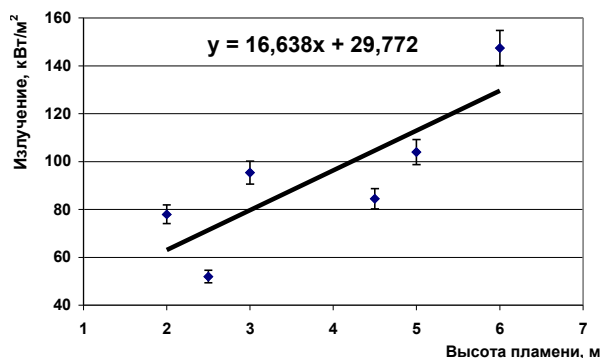


Рисунок 2 – Плотность теплового излучения в зависимости от высоты пламени

Таблица 5 – Характеристика параметров горения в «шелкопряднике»

Расстояние от кромки, м	2	2	2	2	2	2	4	4	4	6	10
Тепловое излучение, кВт/м ²	52	78	95	84	104	147	37	65	27	17	57
Высота пламени, м	2	2,5	3	4,5	5	6	2,5	4	2,5	2,5	5
Ширина кромки, м	5	4	5	5	5	6	5	5	3	3	6

Максимальные значения потока теплового излучения отмечены на расстоянии от кромки горения 2 м, при высоте пламени – 6 м, ширине кромки – 5 м

— 208 кВт/м². Температура пламени колебалась от 700 до 1000°C.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Существенное влияние теплового излучения на древостой в основном происходит при подлесно-кустарниковых пожарах, когда пламя вертикально и до стигает высоты 2-3 метра. В этом случае максимальный тепловой поток направлен по горизонтали к древостойу и поражает кроны хвойного подроста, сжигая хвою, либо перегревая хвою и почки, что также при-

водит к гибели деревьев I и II классов возраста. В тоже время, деревья III и IV классов возраста получают только ожоги, что не приводит к их гибели, но снижает сортность деловой древесины.

В таблице 6 приведены расчеты теплового потока и температуры на поверхности ствола дерева в зависимости от высоты пламени и времени его нагрева.

Таблица 6 – Расчет нагрева поверхности ствола дерева от теплового излучения на расстоянии 4 м, с градацией по высоте пламени

Тепловое излучение, кВт/м ²	Время нагрева, с						Высота пламени, м
	10	20	30	40	50	60	
26	66	86	101	113	124	134	0,5
39	90	119	141	159	176	191	1,5
78	159	217	262	299	332	362	2,5
130	252	349	423	485	540	589	3,5
208	392	546	664	764	851	931	6

Расчет температуры производится по формуле 3

$$T_1 = T_0 + \frac{q \cdot \tau_1}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho}{4} \cdot \tau_1}}, \quad (3)$$

где A - коэффициент поглощения;

q –тепловое излучение, Вт/м²;

ρ - плотность, кг/м³;

λ - теплопроводность, Вт/м;

c - удельная теплоемкость, Дж/кг;

T₀ - начальная температура, °С;

τ - время, за которое происходит нагрев, с.

Из таблицы следует, что уже при высоте пламени 0,5 м у деревьев стоящих на расстоянии 4 м температура на поверхности почек и хвои может достигать 134°С. При такой температуре почки погибают в кроне хвойных деревьев. Тепловой поток от пламени более 3 м создает на поверхности стволов температуру около 600°С и в этом случае деревья диаметром от 16 см и более получают ожог камбиальной зоны с образованием подсушин. Деревья меньшего диаметра, получающие круговой ожог по диаметру ствола при такой температуре гибнут (Van Wagner, 1968).

ВЫВОДЫ

Анализ динамики потока теплового излучения на валежных и валежно-стволовых пожарах показал, что его мощность зависит от вида пожара, высоты пламени и мощности излучения горящих углей.

Выявлена зависимость плотности теплового излучения от расстояния до кромки пожара и установлено, что тепловое излучение на валежных и валежно-стволовых пожарах близко по значению к излучению при верховых пожарах на расстоянии 10 м.

Установлено, что тепловое излучение может нагревать до летальной температуры почки в кроне хвойных деревьев и оставлять подсушины на стволах диаметром от 16см и более, а деревья

меньших диаметров могут гибнуть при круговом ожоге камбия ствола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Амосов, Г.А. Некоторые особенности горения при лесных пожарах / Г.А. Амосов. - Л.,: ЛенНИИЛХ. – 1958.- 29.
- Валендик, Э.Н. Влияние пожаров на устойчивость хвойных пород / Э.Н. Валендик, А.И. Сухинин, И.В.Косов. - Красноярск, 2006. – 96 с.
- Гришин, М.А. Теплофизика лесных пожаров / М.А. Гришин, А.Д. Грузин, В.Г. Зверев. - ИТФ СО АН СССР, Новосибирск, 1984. – С. 38-75.
- Грузин, А.Д. Аэродинамика и сопряженный тепломассоперенос в приземном слое атмосферы при распространении лесных пожаров / А.Д. Грузин: автореф. дисс.... канд. ф-м. наук, Томск, ТГУ, 1983, 23.
- Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Д. Хауэлл - М.: «Мир», 1975, 936.
- Исаков, Р.В. Прогнозирование лесных пожаров / Р.В. Исаков. – Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1977. - С. 100-107
- Сухинин, А.И. Вопросы лесной пирологии /А.И. Сухинин, Э.В. Конев. – Красноярск, 1972. – С. 7-51.
- Anderson, H.E. Tenth symposium (international) on combustion / H.E. Anderson, R.S. Rothmal // The Combustion Institute, Pittsburgh, 1965, 1009–1019
- Braun, E. Measurement of the protective value of apparel fabrics in a fire environment / E. Braun, D. Cobb, V.B. Cobble, J.F. Krasny, R.D.Peacock // Journal of Consumer Product Flammability, 1980. - 7:15725.
- Cohen, J.D. Canadian Journal of Forest Research, / J.D. Cohen 8, 34, 2004, 1616–1626.
- Fang, J.B., Steward F.R., «Combustion and flame», / J.B. Fang, F.R. Steward. - 1969, 13. -№4. P. 392-398.
- Green, L.R., Schinike H.E., Guides for fuelbreaks in the Sierra Nevada mixed-conifer type, Berkeley, / L.R. Green, H.E. Schinike - CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1971,14.
- King, A.R. The efficiency of rural firefighters, Melbourne / A.R. King // Commonwealth Scientific And Industrial Research Organization, Chemical Research Laboratories, Technical Paper No.4, 1966, 12.
- McCarter, R.J. «Pyrodynamics» / R.J. McCarter, A. Broido. – 1965. - v. №1. - P. 65–85.
- Stoll, A.M. Journal of Applied Physiology / A.M. Stoll, L.C. Greene. -1959 – 14. - P. 373-382.
- Tassios, S. National Center for Rural Fire Research, technical paper no. 1. / S. Tassios, D. Packham // Research Institute, Forestry and Timber Bureau: Canberra, ACT, Aus-

- tralia, 1964, 3.
- Thomas, P.H. The contribution of flame radiation to fire spread in forest, Joint fire research org. / P.H. Thomas Fire research note, № 594, Fire res. Station, Boreham Wood, Great Britain, 1965.
- Van Wagner, C.E., Calculation on forest fire spread by flame radiation, Forestry branch departmental publication /
- C.E. Van Wagner // Queen's printer and controller of stationary, Ottawa, 1967. - № 1185. – 17 p.
- Van Wagner C.E., Fire behaviour mechanisms in a Red Pine Plantation: field and laboratory evidence, Forestry branch departmental publication / C.E. Van Wagner // Queen's printer and controller of stationary, 1968. - №1229.- 3p.
-

Поступила в редакцию 7 декабря 2007 г.
Принята к печати 16 мая 2008 г.