

А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.В. Рейно, Р.Ш. Цвык, М.В. Шерстобитов

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПО ОПАДУ ХВОЙНЫХ И ЛИСТВЕННЫХ ДЕРЕВЬЕВ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 22.06.99 г.

Принята к печати 24.06.99 г.

Рассмотрены результаты исследований скорости распространения и радиационной температуры горения опада березы, кедра и сосны различной влажности с использованием тепловизионной методики. Предложены экспоненциальные зависимости скорости движения фронта пожара в зависимости от влажности опада. Радиационная температура горения конденсированной фазы в диапазоне $3\div 12$ мкм составляет $800 - 900$ К при условии, что коэффициент излучения ϵ равен 1.

Введение

Общие математические модели лесных пожаров находят широкое применение для прогноза возникновения, развития и распространения низовых лесных пожаров (НЛП) и их экологических последствий. Наиболее общая, на наш взгляд, математическая модель лесных пожаров, в которой используется групповое диффузионное приближение переноса излучения, учитывает все основные физико-химические процессы горения лесных горючих материалов (ЛГМ) и передачи энергии [1, 2]. С использованием этой модели были разработаны методики, которые позволяют определять выбросы загрязняющих веществ в атмосферу [3, 4]. При разработке модели использованы многочисленные результаты полунатурных и лабораторных исследований.

Отметим то обстоятельство, что в данной модели используются статические параметры процесса горения и характеристики ЛГМ. В действительности процессы горения и характеристики среды – это случайные поля со своими статистическими параметрами. Поэтому нам представляется, что необходимость разработки статистической математической модели лесных пожаров является логичным продолжением проводимых исследований.

Разработка такой модели потребует как развития теории, так и выполнения большого объема экспериментальных исследований статистических характеристик полей ЛГМ (пространственное распределение запаса, плотности и влажности ЛГМ) в различных ландшафтных зонах, процессов горения в натуральных и лабораторных условиях при случайных полях распределения параметров ЛГМ, предельных условий зажигания и горения и др.

В данной статье обсуждаются результаты экспериментальных исследований скорости движения фронта горения ЛГМ различной влажности.

Методика измерений

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке по физическому моделированию низовых лесных пожаров с использованием стола-

полигона размером $1,3 \times 0,75$ м, засыпанного слоем почвы $0,1$ м, поверх которой укладывался слой (навеска) исследуемого горючего материала, по тепловизионной методике измерений [6–8]. В качестве ЛГМ использовался опад листьев березы, хвои кедра и сосны различной влажности. В большей части экспериментов первая поджигаемая половина навески имела влажность менее 1%, а вторая – $> 1\%$.

В измерениях применялись два типа тепловизионных систем. Тепловизионная система АГА-780 (диапазон длин волн $3\div 5$ мкм), модернизированная нами и предназначенная для исследования динамики тепловых полей, а также тепловизор Igframetric-760 (диапазон длин волн $3\div 12$ мкм), имеющий более широкий диапазон измеряемых температур и высокую точность, но позволяющий регистрировать только отдельные кадры. Применение динамической системы позволяет программно определять изменение скорости движения фронта пожара, относительную максимальную температуру и ее координаты, высоту пламени и ряд других характеристик. Скорость движения фронта определялась с интервалом $1\div 2$ с по траектории (координатам) движения точки максимальной температуры. Такая методика позволяет повышать точность определения скорости по сравнению с методом термопар и измерять скорость на отдельных участках движения фронта пожара. Вторая система – калиброванная, с ее помощью можно определять абсолютные температуры по закону излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при известном коэффициенте излучения тела.

Пространственное разрешение по горизонтали и вертикали определялось по нагретой пластине известного размера. Расстояние от тепловизора АГА-780 до стола-полигона равнялось 7 м, высота от поверхности пола $1,4$ м, высота расположения стола-полигона $0,7$ м, разрешение по направлению распространения фронта пожара (координата x) $7,7$ мм.

Результаты измерений

На рис. 1, а–д приведены результаты измерений динамики относительной температуры и координаты x точки максимальной температуры во времени при горении ЛГМ.

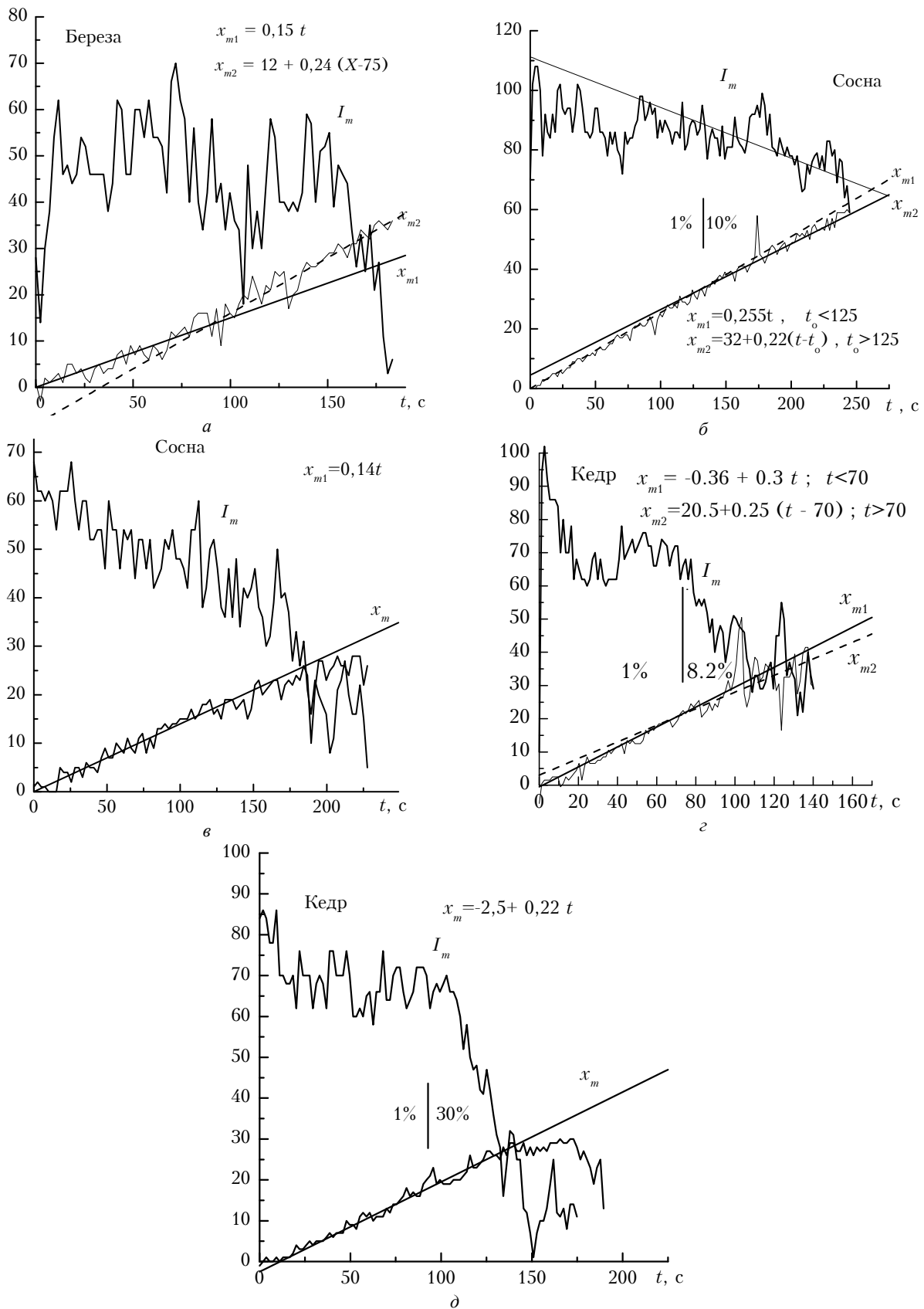


Рис. 1. Горение опада: а – березы влажностью $W=6\%$ ($W_1=6,4\%$); б – сосны (С1) влажностью $W=1+10\%$ ($W_1=1+11\%$); в – сосны (С2) влажностью $W=12\%$ ($W_1=13,6\%$); г – кедр влажностью $W=1+8,2\%$ ($W_1=1+8,9\%$); д – кедр влажностью $W=1+30\%$ ($W_1=1+43\%$)

Один из экспериментов горения листьев березы влажностью $W = 100(m - m_0)/m \approx 6\%$ (влажностью $W_1 = 100W/(1 - W) = (m - m_0)/m_0 \approx 6,4\%$, где m, m_0 – масса влажного и сухого ЛГМ соответственно), массой $m = 53$ г (запас ЛГМ $0,59$ кг/м²), слоем 1 см на площади 30×30 см² представлен на рис. 1,а. Из полученных данных видно, что скорость движения фронта горения растет со временем. Весь путь $x_m(t)$, проходимый фронтом, можно разбить на два участка и для каждого из них подобрать аппроксимационное уравнение первого порядка. Эти уравнения имеют вид $x_{m1}(t) = 0,15t$ при $t < 75$ с, $x_{m2}(t) = 12 + 0,24(t - 75)$ при $t > 75$ с, т.е. скорость движения фронта возрастает с $1,5$ до $2,4$ мм/с. Относительная максимальная температура I_m флуктуирует, однако среднее значение постоянно (~ 45 ед.). При аналогичных условиях, но менее уплотненной навеске, скорость движения фронта более высокая. На начальном участке она составила 2 мм/с, затем возросла до 3 мм/с, а средняя максимальная температура увеличилась до 55 ед. Увеличение скорости движения фронта можно объяснить радиационной и конвективной сушкой ЛГМ, а также возможным уменьшением плотности ЛГМ за счет деформации в процессе сушки. Естественно ожидать, что в данном эксперименте из-за ограниченности фронта горения по длине процесс сушки не достигает максимальной скорости. Отметим, что при влажности $12,5\%$ после перехода на второй участок процесс горения прекращается.

На рис. 1,б–д приведены результаты измерений процесса горения опада сосны двух видов С1, С2 (рис. 1,б,в) и кедр (рис. 1,з,д) различной влажности. Масса навески ЛГМ каждой влажности составляла 27 г. Навеска размещалась на двух равных участках размером 23×23 см слоем 1 см. На первом участке всегда размещался сухой ЛГМ (влажность менее 1%), а на втором – другой влажности. Вертикальной линией на рисунках указано положение границы раздела участков. На рис. 1,в зарегистрировано горение только на втором участке (опад хвои сосны влажностью 12%). Из рис. 1,в видно, что при $t \approx 170$ с фронт горения достигает внешней границы ЛГМ и его движение прекращается. Из приведенных данных следует, что скорость движения фронта горения и относительная максимальная температура I_m на участке с повышенной влажностью уменьшаются. Причем при влажности кедр 30% (см. рис. 1,д) относительная максимальная температура в течение ~ 40 с уменьшилась и горение прекратилось, пройдя путь 10 – 15 см. Это указывает на то, что радиационная и конвективная сушка играет огромную роль в преодолении полос повышенной влажности при неоднородном пространственном распределении влажности ЛГМ. Визуально отмечено, что скорость движения фронта пожара по краю ЛГМ на втором участке меньше, чем в центре. Это обусловлено меньшим радиационным потоком и, соответственно, замедлением процесса сушки ЛГМ. Отметим тот факт, что воспламенить сухой опад хвои ели не удалось. После выгорания хвоинок в области поджигающей спирали горение прекращалось.

На рис. 2 приведены результаты измерения скорости движения фронта горения в зависимости от влажности W для всех видов опада ЛГМ. Кривая 1 на рис. 2 – полуэмпирическая зависимость скорости движения фронта от влагосодержания:

$$V_p = V_0 W_1 / (1 + 14,8 W_1), \quad (1)$$

широко используемая в математических моделях пожаров [1, 5] при значении скорости движения фронта горения сухого ЛГМ $V_0 = 3$ мм/с и $W_1 = W/(1 - W)$. Кривые 2, 3 по-

добраны по экспериментальным данным с использованием экспоненциальной зависимости скорости от влажности вида:

$$V = V_0 \exp[-W^2/W_0^2] \quad (2)$$

и

$$V = V_0 \exp[-W^2/(W - W_0)^2]. \quad (3)$$

Эти функции дают более слабую зависимость при малых влажностях, наблюдаемую в эксперименте, так как влажность ЛГМ быстро уменьшается за счет интенсивной радиационной и конвективной сушки ЛГМ. В то же время первая функция (2) дает быстрое уменьшение скорости при $W \geq W_0$, когда даже с учетом сушки влажность ЛГМ превышает предельные значения поддержания процесса горения. Вторая функция (3) стремится к нулю при $W \rightarrow W_0$ и применима только при $W < W_0$. Естественно ожидать, что, как и V_0 , значение W_0 будет зависеть от типа опада ЛГМ, его плотности, запаса, степени разрушения, скорости радиационной и конвективной сушки фронтом пожара. Предварительные средние по всем измерениям значения W_0 для формулы (2) $W_0 = 14\%$, формулы (3) – $W_0 = 25\%$. Можно отметить то обстоятельство, что во многих случаях экспоненциальная зависимость удобнее в математических моделях, так как позволяет решать более широкий класс уравнений.

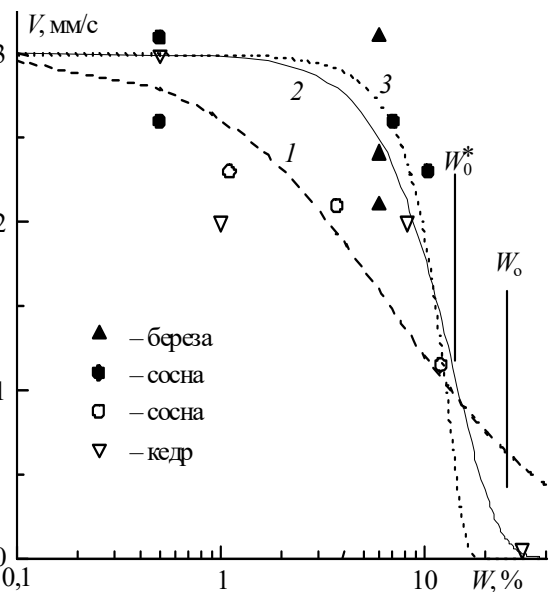


Рис. 2. Зависимость скорости движения фронта горения V от влажности W

На рис. 3,а–в приведены максимальные радиационные температуры, определенные тепловизором Iqframetric-760 в предположении, что зона горения конденсированной фазы излучает по закону Планка с коэффициентом излучения ϵ , равным 1. Из полученных данных следует: область максимальной температуры, восстановленная по излучению в ИК-области, равна 800 – 900 К и расположена в зоне горения ЛГМ (области горения конденсированной фазы); с увеличением влажности максимальная температура уменьшается; при достижении края области навески ЛГМ и при влажности выше критической (кривая влажности $12,5\%$, рис. 3,а и $30,5\%$, рис. 3,в) скорость движения фронта замедляется, максимальная температура быстро уменьшается и горение

прекращается. Более низкая температура горения опада березы 700÷800 К обусловлена тем, что на всей площади использовался опад влажностью 6%.

Можно отметить, что максимальная температура горения конденсированной фазы, измеренная в

различных спектральных интервалах, отличается в пределах 30°. Этот факт указывает на то, что конденсированная фаза действительно излучает по закону Планка, по крайней мере как серое тело.

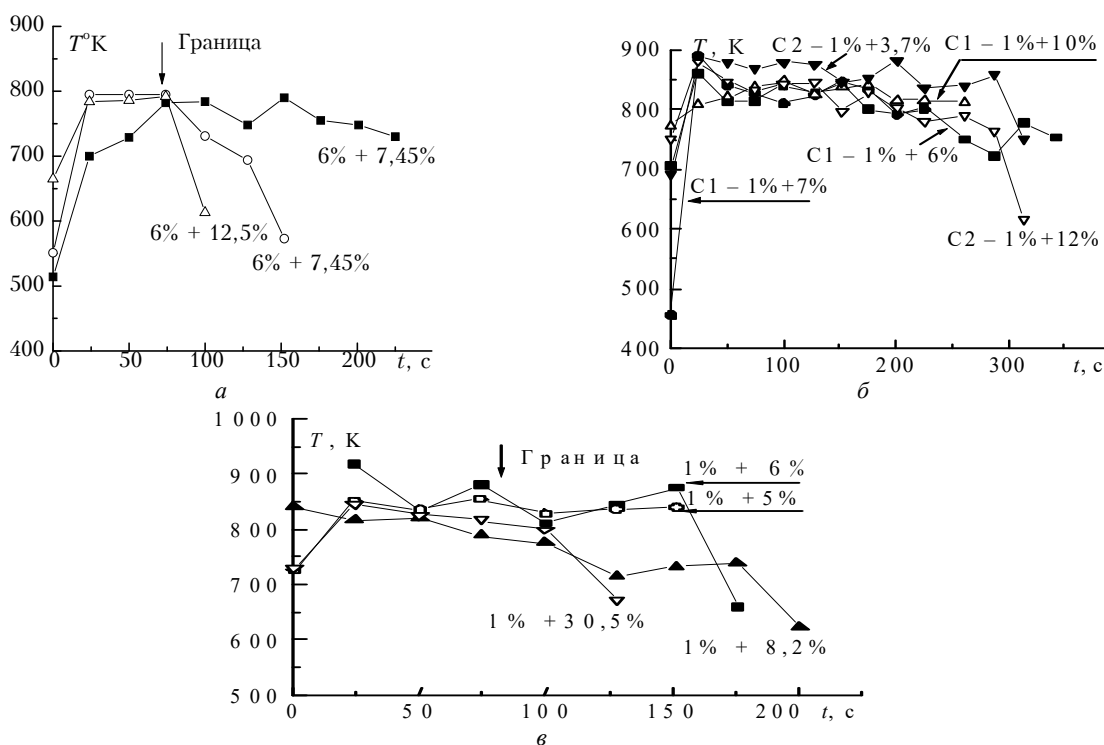


Рис. 3. Максимальная температура при горении опада березы (а), сосны (б), кедра (в)

Выводы

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований горения лесных горючих материалов. Предложены соотношения вида $V = V_0 \exp[-(W/W_0)^2]$ и $V = V_0 \exp[-W^2/(W - W_0)^2]$ для описания зависимости скорости движения фронта горения от влажности W (%), где $V_0 \approx 3$ мм/с – скорость движения фронта горения сухого ЛГМ. Предварительное значение влажности W_0 , при котором скорость распространения V уменьшается в 2,7 раза, равно 14% для первого соотношения и 25% для второго, когда $V = 0$. Значения W_0 пропорциональны предельной влажности, при которой происходит распространение фронта горения.

Максимальная радиационная температура горения конденсированной фазы ЛГМ в области 3÷12 мкм, восстановленная по закону излучения АЧТ с коэффициентом излучения 1, для сухого опада хвои сосны и кедр составляет 800–900 К. С увеличением влажности максимальная радиационная температура уменьшается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 99-01-0363.

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.

A.M. Grishin, A.A. Dolgov, V.V. Reino, R.Sh. Tsyvk, M.V. Sherstobitov. Study of Low Forest Fire Propagation by Fallen Leaves and Needles.

Experimental results on forest combustibles (FC) burning are treated in the paper. Maximum radiation temperature of the FC condensed phase burning within the range of 3 to 12 μm, reconstructed by the blackbody radiation law at the radiation coefficient of 1, is 800–900 K for dry needles of pine and cedar. The higher is the humidity, the lower is the maximum radiation temperature.

2. Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them. Publishing House of the Tomsk State University (Edited by Frank Albini), 1997. 390 p.
3. Гришин А.М., Долгов А.А., Цымбалюк А.Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. М.: Госкомитет РФ по охране окружающей среды, 1997. 37 с.
4. Гришин А.М., Долгов А.А., Цымбалюк А.Ф. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов. М.: Госкомитет РФ по охране окружающей среды, 1997. 37 с.
5. Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984. С. 99–125.
6. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Рейно В.В., Цык П.Ш. Телевизионные исследования развития и распространения низового лесного пожара // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1039–1050.
7. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П., Исаков А.В., Максимов О.Л., Рейно В.В., Цык П.Ш. Комплексная методика исследования и распространения низового пожара // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 6. С. 1–11.
8. Grishin A.M., Dolgov A.A., Zima V.P., Reino V.V., Tsyvk P.Sh. Thermovision method for the investigation of initiation and spread of a surface forest fire // Proc. SPIE's. Infrared Spaceborne Remote Sensing V. 1997. V. 3122. P. 317–326.